



**Funded by
the European Union**

GUIDE DE BONNES PRATIQUES POUR LE REEMPLOI DE PRODUITS EN ACIER

— Volume 1: Réemploi de produits et de bâtiments en acier existants —

Comité Technique 14

**Durabilité et éco-efficacité de la construction métallique,
dans le cadre du projet FRCA européen ADVANCE**

ADV1-FR | 2025



ECCS TC14

Durabilité et éco-efficacité de la construction métallique

Guide de bonnes pratiques pour le réemploi des produits en acier

Volume 1 : Réemploi des produits et bâtiments en acier

2^{nde} édition, 2025



Guide de bonnes pratiques pour le réemploi des produits en acier

Volume 1 : Réemploi des produits et bâtiments en acier

Nº 146, ADV1-FR, 2^{nde} édition, 2025

Publié par :

ECCS – Convention européenne pour la construction métallique
publications@steelconstruct.com
www.eccspublications.eu

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans un système d'archivage ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, photocopie, enregistrement ou autre, sans l'autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur.

ECCS n'assume aucune responsabilité quant à l'utilisation, pour quelque raison que ce soit, des informations contenues dans le présent document.

Copyright © 2025 ECCS – European Convention for Constructional Steelwork

ISBN : 978-92-9147-206-2

Bien que toutes les précautions aient été prises pour assurer l'intégrité et la qualité de cette publication et des informations qu'elle contient, les partenaires du projet et l'éditeur n'assument aucune responsabilité en cas de dommages aux biens ou aux personnes résultant de l'utilisation de cette publication et des informations qu'elle contient.

La reproduction à des fins non commerciales est autorisée à condition que la source soit citée et que le coordinateur du projet en soit informé. La diffusion de cette publication par le biais d'autres sources que les sites web mentionnés ci-dessous nécessite l'autorisation préalable des partenaires du projet.



Ce travail a été financé par l'Union européenne dans le cadre de la subvention n° 101112269. Les points de vue et les opinions exprimés sont toutefois ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de la Convention Européenne de la Construction Métallique. Ni l'Union européenne ni la Convention Européenne de la Construction Métallique ne peuvent en être tenues pour responsables.



**Funded by
the European Union**



<https://www.steelconstruct.com/eu-projects/advance/>

AVANT-PROPOS

L'utilisation d'éléments en acier provenant de la déconstruction est une stratégie efficace pour réduire l'impact environnemental d'un bâtiment, en évitant la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dues au recyclage. Le projet de recherche *PROGRESS* (*Provisions for a greater reuse of steel structures*) s'est concentré sur les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée et a identifié différents scénarios de réemploi. Il a également montré comment des mesures de conception bien pensées peuvent faciliter le réemploi d'une structure ou de ses principaux composants. Dans le cadre du projet de recherche *ADVANCE* (*Accompanying measure for dissemination, valorisation and collaborative exploitation of circularity of constructional steel products*), le domaine d'application a été étendu aux bâtiments multi-étages.

Le guide aborde les aspects clés que les concepteurs doivent prendre en compte pour faciliter le réemploi futur d'éléments en acier et présente des exemples de projets. Le guide décrit les exigences en matière de réemploi, mais ne couvre pas les aspects économiques et environnementaux en détail.

Le guide ne vise que le réemploi :

- d'éléments en acier qui n'ont pas été endommagés, y compris par des déformations plastiques et des sections réduites dues par exemple à une corrosion excessive ;
- d'éléments en acier provenant de bâtiments construits après 1970, c'est-à-dire approximativement l'époque où la conception aux états limites est devenue une pratique courante ;
- d'éléments non soudés ;
- d'éléments récupérés, autant que possible, dans leur forme d'origine, bien que certains travaux de reconditionnement et de préparation supplémentaire puissent être nécessaires.

Le guide est composé de trois volumes :

- Volume 1 : Réemploi des produits et bâtiments en acier
- Volume 2 : Bonnes pratiques pour la conception des bâtiments afin de faciliter la déconstruction et le réemploi futurs
- Volume 3 : Aspects environnementaux et mise en œuvre pratique

Alerte :

Le présent guide ne se substitue pas aux recommandations professionnelles – Réemploi d'éléments structuraux en acier de juin 2024.

Le volume 1 traite des questions techniques générales liées à l'utilisation structurale de l'acier récupéré dans les structures existantes en acier et les structures mixtes acier-béton. Il présente une brève description de l'anatomie des bâtiments à un ou plusieurs étages, la classification des différents scénarios de réemploi, une bibliographie des guides de bonnes pratiques européens et des normes produit, des critères de sélection et d'acceptation des produits, et leur classification pour les « nouvelles » conceptions conformément aux Eurocodes. Il aborde également les aspects de la conception selon les principes des états limites. Le protocole d'évaluation qualitative des éléments, d'échantillonnage et d'essai de l'acier récupéré figure dans l'annexe A. L'estimation du coefficient partiel modifié pour la résistance au flambement des éléments en acier réemployés est présentée à l'annexe B.

Le volume 2 couvre la conception de nouveaux bâtiments avec des objectifs de fonctionnalité, de facilité de fabrication, de démontabilité, de réemploi futur, ainsi que d'esthétique. Il donne les principes généraux de conception dans l'objectif de faciliter le démontage et le réemploi d'une charpente métallique. Il définit, également, les charges et les combinaisons d'actions à utiliser dans le dimensionnement et propose des améliorations générales dans les détails de construction qui facilitent le réemploi futur.

Le volume 3 (disponible uniquement en version anglaise) présente l'évaluation des avantages environnementaux du réemploi des éléments en acier issus de la déconstruction et fournit des informations sur les aspects pratiques de fabrication et de montage des structures en acier de réemploi. Plusieurs études de cas sont présentées dans la dernière section de ce volume, illustrant le réemploi d'éléments structuraux en acier dans différents pays de l'UE et certains des problèmes techniques qui ont été résolus.

Les membres des consortiums des projets PROGRESS et ADVANCE qui ont contribué à ce document sont :

Petr Hradil	Finlande	Véronique Dehan	Belgique
Ludovic Fülöp	Finlande	Francis Grogna	Belgique
Sirje Vares	Finlande	Carlos del Castillo	Belgique
Margareta Wahlström	Finlande	Helena Gervásio	Portugal
Tiina Vainio-Kaila	Finlande	Luis da Silva	Portugal
Michael Sansom	Royaume-Uni	Ari Ilomäki	Finlande
Ana M. Girão Coelho	Royaume-Uni	Teemu Tiainen	Finlande
Ricardo Pimentel	Royaume-Uni	Timo Koivisto	Finlande
Mark Lawson	Royaume-Uni	Jyrki Kesti	Finlande
Viorel Ungureanu	Roumanie	Břetislav Židlický	République tchèque
Raluca Buzatu	Roumanie	František Wald	République tchèque
Ioan Both	Roumanie	André Beyer	France
Dan Dubina	Roumanie	Amor Ben Larbi	France
Markus Kuhnenne	Allemagne	Peetu Hirvonen	Finlande
Dominik Pyschny	Allemagne	Maria Carrubba	Allemagne
Kevin Janczyk	Allemagne	Jie Yang	Luxembourg
Paul Kamrath	Allemagne	José Humberto Matias de Paula Filho	Luxembourg

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	12
1.1	Domaine d'application du présent document	13
1.2	Normes de calcul et normes produit	15
1.3	Termes et définitions	17
2	Composants des bâtiments à un ou plusieurs étages	20
2.1	Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée (SSB)	20
2.1.1	Ossature métallique principale – Portiques et système de contreventement	21
2.1.2	Systèmes de toiture	22
2.1.3	Systèmes de contreventement	23
2.1.4	Ossature métallique secondaire	23
2.1.5	Systèmes de bardage	24
2.1.6	Guides de conception pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée – Documents complémentaires	25
2.2	Bâtiments en acier multi-étages (MSB)	26
2.2.1	Systèmes structuraux	27
2.2.2	Systèmes de contreventement	28
2.2.3	Systèmes de plancher	29
2.2.4	Systèmes de bardage	30
2.2.5	Guides de conception pour les bâtiments multi-étages – Documents complémentaires	31
3	Classification du réemploi de l'acier	33
3.1	Étapes du cycle de vie des éléments de construction en acier	33
3.2	Scénarios de réemploi	33
4	Examen d'anciennes normes de calcul et de produits	36
4.1	Aciers de construction laminés à chaud	36
4.1.1	Normes de produits	36
4.1.2	Normes de conception et de calcul	38
4.2	Aciers de construction formés à froid	38
5	Évaluation de la réemployabilité des structures en acier	40
5.1	Paramètres influençant le réemploi	40
5.2	Approche générale	41
5.3	Procédure de conception	44
5.4	Acier de construction pour le réemploi	45
5.4.1	Classification de la structure métallique récupérée	46
5.4.2	Exigences en matière de performance des matériaux	47
5.4.3	Exigences en matière d'assurance qualité	48

5.4.4 Propriétés de l'acier à déclarer pour les éléments récupérés en acier laminé à chaud	48
5.4.5 Évaluation des propriétés des matériaux	52
5.4.6 Exécution et certification de la structure métallique récupérée	55
5.5 Produits constitutifs	55
5.5.1 Propriétés pertinentes	55
5.5.2 Fiabilité	59
5.6 Éléments de structure ou ensemble de l'ossature principale	62
5.6.1 Cadre général	62
5.6.1 Classe d'exécution	67
5.7 Éléments de structure en acier formés à froid	70
5.7.1 Classification de l'acier formé à froid en vue de son réemploi	71
5.7.2 Critères de sélection et d'acceptation	72
5.7.3 Exigences en matière de performance des matériaux	73
5.7.4 Évaluation de l'adéquation et de la fiabilité	74
5.7.5 Propriétés du produit à déclarer pour les éléments récupérés formés à froid	74
5.7.6 Durabilité	76
5.8 Planchers mixtes	76
5.9 Enveloppes	76
5.9.1 Critères de sélection et d'acceptation	77
5.9.2 Résistance à la traction et masse volumique	78
5.9.3 Résistance au cisaillement	78
5.9.4 Résistance à la compression	78
5.9.5 Moment de flexion/résistance au plissement	78
5.9.6 Facteurs de sécurité des matériaux	79
5.9.7 Propriétés de durabilité	79
5.9.8 Tolérances	79
5.9.9 Comportement thermique	79
5.9.10 Sécurité incendie	79
5.9.11 Requalification pour le réemploi	79
6 Conception des structures avec des Éléments en acier de réemploi	82
6.1 Atteindre la fiabilité	82
6.1.1 Coefficients partiels pour les actions	84
6.1.2 Scénarios possibles pour l'adoption d'une durée de vie plus courte	86
6.1.3 Coefficients partiels de résistance	86
6.2 Analyse structurale (statique)	88
6.3 États limites ultimes	88
6.3.1 Dimensionnement des éléments : résistance des sections transversales	88
6.3.2 Dimensionnement des éléments : stabilité	89

6.3.3 Dimensionnement des assemblages	89
6.3.4 Dimensionnement de la structure principale	89
6.3.5 Dimensionnement des éléments de l'ossature secondaire	90
6.4 Considérations relatives au calcul sismique	91
6.5 États limites de service – Flèches et déplacements	91
Références	93
Annexe A	102
A.1 Général	102
A.2 Évaluation qualitative et mesures	102
A.3 Définition d'un groupe d'éléments à tester – groupe d'essai	105
A.4 Méthodes d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques et chimiques	106
A.5 Protocoles de requalification	108
A.6 Mise en œuvre de tests complets pour la limite d'élasticité et la résistance à la traction	109
A.7 Résistance aux chocs – énergie de rupture	114
A.8 Composition chimique	114
A.9 Tolérances géométriques	115
A.10 Remarques complémentaires pour les produits en acier formés à froid	115
A.11 Évaluation de l'acier de réemploi selon le protocole D	116
Annexe B	117
B.1 Contexte pour les coefficients partiels de matériaux selon l'EN 1990	117
B.2 Dérivation de $\gamma_{M1,mod}$ pour la conception utilisant de l'acier de réemploi	118

NOTATION

Minuscules

f_u	Résistance à la traction
f_y	Limite d'élasticité
$f_y(t)$	Limite d'élasticité en fonction de l'épaisseur de la plaque
k_n	Valeur tirée du tableau D1 de la norme EN 1990
m	Valeur moyenne du groupe
n	Exposant
w	Déviation

Majuscules

E	Module d'élasticité
F	Action
G	Module de cisaillement, action permanente
$G_{k,j,\text{sup}}$	Valeur caractéristique supérieure de l'action permanente j
$G_{k,j,\text{inf}}$	Valeur caractéristique inférieure de l'action permanente j
H_v	Valeur de dureté Vickers
$K_{\gamma_{M1}}$	Facteur de correction
P_f	Probabilité de défaillance
Q	Action variable
$Q_{k,1}$	Action de la variable directrice
$Q_{k,j}$	Action de la variable d'accompagnement i
R_{eH}	Limite d'élasticité résultant d'essais ou d'une norme de produit pertinente
R_m	Résistance ultime issue d'essais ou d'une norme de produit pertinente
$R_{p0,2}$	0,2 % Résistance à la déformation
S_x	Écart-type
V_x	Coefficient de variation
X	Propriété du matériau ou du produit
\bar{X}	Valeur moyenne d'une propriété d'un matériau ou d'un produit
X_d	Valeur d'intérêt de la conception
X_k	Valeur caractéristique d'intérêt

Lettres et symboles grecs

α	Coefficient de dilatation thermique linéaire
α_R	Facteur d'importance d'une propriété matérielle
β	Indice de fiabilité
γ_G	Coefficient partiel pour les actions (générique)
γ_m	Coefficient partiel pour une propriété matérielle
γ_M	Coefficient partiel de résistance (générique)
γ_{M0}	Coefficient partiel de résistance des sections transversales
γ_{M1}	Coefficient partiel de résistance des membres à l'instabilité
$\gamma_{M,1,mod}$	Coefficient partiel modifié pour la résistance des membres à l'instabilité
γ_{M2}	Coefficient partiel de résistance à la rupture des sections transversales en traction
γ_{Rd}	Coefficient partiel couvrant l'incertitude du modèle de résistance
δ	Allongement après rupture
ν	Coefficient de Poisson
ρ	Densité de l'air
ξ	Facteur de réduction pour les actions permanentes défavorables
ψ	Facteur de combinaison
ψ_0	Facteur de combinaison pour l'action variable
$\psi_{(0,)}(i)$	Facteur de combinaison pour la variable action <i>i</i>
Φ	Distribution normale

Indices

d	Valeur de calcul
inf	Inférieur
k	Valeur caractéristique
mod	Modifié
nom	Nominal
sup	Supérieure

Abréviations

CEN	Comité européen de normalisation
CEV	Valeur du carbone équivalent
CFC	Chlorofluorocarbone
CHS	Sections creuses circulaires
CoV	Coefficient de variation
RPC	Règlement produits de construction
D _{0-A}	Scénario de réemploi in situ
Di _B	Scénario de réemploi : même configuration et même site
Di _C	Scénario de réemploi : configuration différente et même site
Di _D	Scénario de réemploi : même configuration et site différent
Di _E	Scénario de réemploi : configuration et site différents
DCL	Systèmes à faible ductilité pour la conception sismique selon la norme EN 1998-1
DdP	Déclaration des performances
DT	Essais destructifs/essais
EN	Norme européenne
ETA	Évaluation technique européenne
L'UE	Union européenne
EXC	Classe(s) d'exécution
FEM	Méthode des éléments finis
H-CFC	Hydro-chlorofluorocarbone
hEN	Norme européenne harmonisée
ACV	Analyse du cycle de vie
LCC	Évaluation du coût du cycle de vie
LSD	Méthode de conception des états limites
MSB	Bâtiment en acier à plusieurs étages
AN	Annexe nationale
DAN	Document d'application national
END	Essais non destructifs/essais
P- Δ	Effets globaux de second ordre
P- δ	Effets locaux de second ordre
PU	Polyuréthane

RHS	Sections creuses rectangulaires
SHS	Sections creuses carrées
ELS	État(s) limite(s) d'aptitude au service
SSB	Bâtiment en acier à un étage
STR	Valeurs de calcul des actions pour la résistance
ULS	État(s) limite(s) ultime(s)
Z	Zingage par immersion de la bande préparée dans un bain de zinc en fusion
ZF	Revêtement zinc-fer par immersion de la bande préparée dans un bain de zinc en fusion et recuit ultérieur
ZA	Revêtement de zinc-aluminium par immersion de la bande préparée dans un bain de zinc-aluminium en fusion
ZM	Revêtement de zinc-magnésium par immersion de la bande préparée dans un bain de zinc-aluminium-magnésium en fusion
AZ	Revêtement aluminium-zinc par immersion de la bande préparée dans un bain fondu d'aluminium-zinc-silicium
AS	Revêtement aluminium-silicium par immersion de la bande préparée dans un bain d'aluminium-silicium en fusion

Axes

- x* Axe longitudinal le long de l'élément
- y* Axe fort (parallèle à la semelle)
- z* Axe faible (parallèle à l'âme)

1 INTRODUCTION

Le secteur de la construction doit développer des pratiques durables qui permettent de réduire l'empreinte carbone et de contribuer à l'économie circulaire. Les stratégies de circularité 9R (Refuser, Repenser, Réduire, Réemployer, Réparer, Rénover, Remanufacturer, Réutiliser, Recycler et Récupérer) peuvent être appliquées à l'ingénierie pour aider à développer de nouvelles approches de conception et des systèmes qui réduisent les impacts environnementaux et améliorent l'efficacité structurale globale de la construction. Dans la conception, la mise en œuvre et l'entretien des structures en acier, le cadre des 9R peut être compris comme suit :

- *Refuser* de construire de la charpente métallique inutile. S'il existe un moyen d'atteindre les mêmes objectifs avec l'infrastructure existante, il faut le privilégier.
- *Repenser* les options de fin de vie de votre bâtiment en acier. La démolition n'est pas la seule solution.
- *Réduire* les émissions de CO₂ et les besoins en énergie liés à la production et/ou au recyclage de l'acier, *réduire* les déchets et l'utilisation de matériaux en développant des systèmes structuraux plus efficaces.
- *Réemployer* les produits en acier récupérés, si possible, pour remplacer l'acier neuf.
- *Réparer* les composants endommagés. Concevoir la nouvelle charpente métallique de manière à pouvoir accéder aux composants, les inspecter et les réparer.
- *Remanufacturer* les composants récupérés pour les rendre conformes aux spécifications actuelles au lieu de les recycler.
- *Réutiliser* la charpente métallique si elle n'est plus nécessaire. Elle peut s'avérer utile dans un environnement moins exigeant ou dans une application industrielle différente.
- *Recycler* les composants en acier qui ne peuvent pas être réparés, remis à neuf, refabriqués ou réutilisés afin d'atténuer l'épuisement des ressources naturelles et l'impact sur l'environnement.
- *Récupérer* ce qui reste et trouver la meilleure solution circulaire. L'acier n'est pas le seul matériau du bâtiment.

Le présent document se concentre sur le réemploi des constructions métalliques, mais les concepts de remise à neuf, de remanufacturation, de réparation et de réaffectation sont également abordés, car ils se chevauchent souvent. Les stratégies de « *refus* » et de « *repenser* » ne sont pas abordées dans le présent document, car elles sont liées au réemploi adaptatif et au partage des espaces architecturaux plutôt qu'à des solutions techniques pour le démantèlement et/ou les modifications physiques des structures en acier existantes.

La réduction des émissions de carbone associées à la production de matériaux et la réduction des déchets sont des facteurs importants dans la construction. Dans le cadre de la philosophie de la circularité dans la construction, Kibert [1] a présenté quelques étapes de base nécessaires pour obtenir l'utilisation et la récupération de matériaux en boucle fermée et pour réduire les déchets à la fin de la vie d'un bâtiment. Cela signifie que le bâtiment doit être conçu pour une utilisation flexible et qu'à la fin de sa vie, ses matériaux doivent être réemployables ou recyclables.

Dans le cas classique de la construction d'une structure neuve ou de la rénovation, les sections neuves d'acier sont fournies avec un certificat qui garantit leurs propriétés. Les

sections d'acier réemployées ont besoin d'une garantie équivalente de leurs performances et, en l'absence d'autres informations, des essais de matériaux sont nécessaires.

Des verrous techniques doivent être levés, notamment en ce qui concerne l'évaluation de l'adéquation et de la fiabilité de l'acier récupéré afin de garantir que :

- les éléments en acier issus de la déconstruction répondent aux exigences de performance pour les propriétés mécaniques, physiques, dimensionnelles et autres propriétés pertinentes afin de garantir leur adéquation dans la conception conformément à la norme EN 1993 ;
- les éléments récupérés répondent aux exigences de qualité des spécifications nominales afin de garantir la fiabilité de leur utilisation. Pour l'acier de construction, la norme pertinente pour le dimensionnement est la EN 1993 et ses différentes parties ;
- les structures fabriquées à partir d'acier de réemploi doivent présenter une intégrité et une durabilité à long terme lors de leur utilisation ultérieure.

Il s'agit là d'aspects essentiels à prendre en compte pour montrer que l'acier récupéré peut constituer une alternative économiquement et structurellement viable à l'utilisation d'acier neuf dans les bâtiments. Le réemploi peut être envisagé à toutes les échelles du bâtiment, c'est-à-dire au niveau des éléments individuels, des composants structuraux tels qu'un système de fermes, un portique ou un panneau sandwich, et de l'ensemble de la structure.

L'objectif principal du présent document est de résumer les bonnes pratiques et les informations pertinentes sur la fabrication et la conception des bâtiments construits avec de l'acier de réemploi et sur la conception des bâtiments en vue d'un démontage et d'un réemploi futurs (conception pour le réemploi).

Les autres objectifs de ce document sont les suivants :

- donner des critères d'acceptabilité en matière de géométrie, d'état des éléments et de propriétés des matériaux pour permettre le réemploi potentiel des produits en acier, conformément aux recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et au fascicule technique CEN / TS 1090-201 [3] ;
- aborder les obstacles identifiés au réemploi des structures métalliques [4], en particulier l'approvisionnement et la fourniture d'acier de réemploi, les implications financières du réemploi des structures métalliques et la requalification des éléments en acier en vue de leur réemploi.

1.1 Domaine d'application du présent document

Le présent document propose des bonnes pratiques de conception pour l'amélioration des procédures existantes visant les structures utilisant des produits en acier de réemploi, et donne des informations sur la conception en vue d'une adaptabilité, d'un démontage et d'un réemploi futurs. Les bonnes pratiques proposées dans le présent document sont présentées comme des lignes directrices pour le réemploi de l'acier dans le contexte de la conception selon l'Eurocode. Pour un lieu spécifique, les annexes nationales pertinentes peuvent exiger l'utilisation de paramètres de calcul spécifiques au pays qui peuvent également affecter le réemploi de la charpente métallique.

Ce guide s'adresse principalement aux ingénieurs de structure et aux architectes qui souhaitent réemployer l'acier de construction récupéré aujourd'hui et concevoir de nouveaux bâtiments en acier qui pourront être déconstruits et réemployés plus facilement

à l'avenir. Le réemploi généralisé de l'acier de construction nécessitera des actions de la part de toutes les parties de la chaîne d'approvisionnement de la construction en acier et ce guide peut donc également être utile à un public plus large. Il contient des bonnes pratiques pour les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée, tels que les halls industriels, ainsi que pour les structures multi-étages en acier et mixtes.

Les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée se prêtent particulièrement bien à la récupération et au réemploi :

- ils ont un système structural répétitif qui se conforme à des formes structurales bien définies ;
- ils sont faciles à monter et à démonter ;
- les éléments structuraux sont généralement visibles et accessibles à une hauteur de travail relativement sûre ;
- il s'agit généralement de bâtiments à faible taux d'occupation ;
- généralement, ces structures ne sont pas protégées contre les incendies ;
- ils présentent un bon potentiel de standardisation dans leur géométrie et dans l'utilisation des composants de structure ;
- chaque élément est facile à documenter.

La récupération et le réemploi de la structure métallique des bâtiments en acier multi-étages, dont la plupart ont des structures mixtes acier-béton, représentent un défi difficile à relever, car les poutres en acier sont reliées au plancher mixte en béton par des connecteurs de cisaillement dont l'accessibilité est très limitée. Chen et al. [5] présentent et discutent cinq méthodes de récupération potentielles pour surmonter la difficulté d'accès et de découpe des connecteurs de cisaillement soudés pour récupérer la section en acier de la poutre mixte, c'est-à-dire :

- la coupe à la scie à ruban ;
- la coupe à la scie à fil ;
- la coupe à la scie murale ;
- le perçage au laser ;
- le perçage au diamant.

Toutefois, ces méthodes de récupération ont été testées dans des essais en laboratoire uniquement pour récupérer des sections d'acier sur des spécimens mixtes de petite taille. Dans la pratique, les produits issus des bâtiments en acier à plusieurs étages existants sont généralement réemployés *in situ* (par exemple, par le biais d'une rénovation majeure) en raison de leur construction complexe, de leurs systèmes mixtes et des contraintes d'ingénierie spécifiques au contexte. Leur réemploi sur de nouveaux sites nécessite généralement une refonte en profondeur, ce qui limite la faisabilité pratique. À l'inverse, les systèmes de planchers secs, lorsqu'ils sont intégrés dans des bâtiments à plusieurs étages, offrent un meilleur potentiel de désassemblage des composants individuels. Il est important de noter que ces concepts ont déjà été mis en œuvre dans des projets concrets – par exemple des portiques en béton préfabriqué démontables et réemployables ont été utilisés avec succès dans plusieurs cas de construction en Finlande, [6] et [7].

Plusieurs innovations pour la conception de nouveaux systèmes multi-étages réemployables sont présentées dans le deuxième volume de ce guide.

1.2 Normes de calcul et normes produit

Le présent document est rédigé pour faciliter les travaux d'ingénierie structurale et se réfère aux règles et principes énoncés dans les normes suivantes :

- EN 1090-1: 2009+A1: 2012 [8] – Execution of steel structures and aluminium structures, Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components (incorporating CEN amendment A1:2012)
- EN 1090-2:2018+A1: 2024 [9] – Execution of steel structures and aluminium structures, Part 2: Technical requirements for steel structures (incorporating CEN amendment A1: 2024)
- EN 1990: 2023 [10] – Basis of structural and geotechnical design
- EN 1991-1-1: 2002 [11] – Actions on structures, Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings (incorporating CEN corrigenda Dec. 2004 and Mar. 2009)
- EN 1991-1-3: 2002+A1: 2015 [12] – Actions on structures, Part 1-3: General actions – snow loads (incorporating CEN corrigenda Dec. 2004 and Jun. 2009, and CEN amendment A1: 2015)
- EN 1991-1-4: 2002+A1: 2010 [13] – Actions on structures, Part 1-4: General actions – wind actions (incorporating CEN amendment A1: 2010)
- EN 1991-1-5: 2003 [14] – Actions on structures, Part 1-5: General actions – Thermal actions
- EN 1991-1-6: 2005 [15] – Actions on structures, Part 1-6: General actions – Actions during execution,
- EN 1993-1-1: 2022 [16] – Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings
- EN 1993-1-3: 2024 [17] – Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for cold-formed members and sheeting
- EN 1993-1-8:2024 [18] – Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints
- EN 1993-1-10: 2005 [19] – Design of steel structures, Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties (incorporating CEN corrigenda Dec. 2005, Sep. 2006 and Mar. 2009)
- EN 1994-1-1: 2004 [20] Design of composite steel and concrete structures – General rules and rules for buildings

Les normes de produits suivantes, qui spécifient les exigences géométriques et mécaniques, ont été utilisées dans la préparation de ce document et doivent être utilisées avec celui-ci :

- EN 10025-1: 2004 [21] – Hot rolled products of structural steels, Part 1: General technical delivery conditions
- EN 10025-2: 2019 [22] – Hot rolled products of structural steels, Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels
- EN 10025-4: 2019 [23] – Hot rolled products of structural steels, Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels (incorporating CEN amendment A1: 2022)
- EN 10025-5:2 004 [24] – Hot rolled products of structural steels, Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance

- EN 10029: 2010 [25] – Hot rolled steel plates 3 mm thick or above, Tolerances on dimensions and shape
- EN 10034: 1993 [26] – Structural steel I and H sections – Tolerances on shape and dimensions
- EN 10051: 2024 [27] – Continuously hot rolled strip and plate/sheet cut from wide strip of non-alloy and alloy steels – Tolerances on shape and dimensions
- EN 10055: 1998 [28] – Hot rolled steel equal flange tees with radiused root and toes – Dimensions and tolerances on shape and dimensions
- EN 10056-1: 2017 [29] – Structural steel equal and unequal leg angles, Part 1: Dimensions
- EN 10056-2: 1993 [30] – Structural steel equal and unequal leg angles, Part 2: Tolerances on shape and dimensions
- EN 10204: 2004 [31] – Metallic products – Types of inspection documents
- EN 10210-1: 2006 [32] – Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 1: Technical delivery requirements,
- EN 10210-2: 2019 [33] – Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties
- EN 10219-1: 2006 [34] – Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 1: Technical delivery requirements
- EN 10219-2: 2019 [35] – Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties,
- EN 10279: 2000 [36] – Hot rolled steel channels – Tolerances on shape, dimension and mass
- EN 10346: 2015 [37] – Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions
- EN 10169: 2022 [38] – Continuously organic coated (coil coated) steel flat products – Technical delivery conditions
- EN 10365: 2017 [39] – Hot rolled steel channels, I and H sections – Dimension and masses
- EN 14399 series [40] – High-strength structural bolting assemblies for preloading (all parts)
- EN 14509: 2013 [41] – Self-supporting double skin metal faced insulating panels, Factory made products, Specifications

1.3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants ont été utilisés.

Parement	Éléments de façade et de toiture qui forment l'enveloppe du bâtiment et assurent l'isolation thermique et acoustique, l'étanchéité à l'eau et à l'air, la protection contre l'incendie et l'aspect esthétique.
Composant	Partie d'un bâtiment en acier, par exemple une poutre, un panneau sandwich. Il peut s'agir d'un assemblage de plusieurs éléments plus petits.
Classes de conséquences	Classification des bâtiments basée sur l'Eurocode, en fonction des conséquences d'une défaillance ou d'un dysfonctionnement sur les personnes, l'économie ou l'environnement ; différents indices de fiabilité sont associés à chaque classe de conséquences.
Produit constitutif	Matériaux ou produits utilisés dans la fabrication des bâtiments, dont les propriétés sont utilisées dans les calculs de la résistance mécanique et de la stabilité des ouvrages et de leurs parties, et/ou de leur résistance au feu, y compris les aspects de durabilité et d'aptitude à l'emploi.
Acier de construction	Terme générique désignant la charpente métallique utilisée dans la construction (principale et secondaire) et les bardages à base d'acier.
Déconstruction (ou désassemblage, ou démontage)	Processus consistant à démonter un bâtiment et ses éléments de manière qu'ils puissent être facilement réemployés ; il atténue les aspects destructifs du processus de démolition, en préservant les éléments et les matériaux.
Démolition	Processus au cours duquel un bâtiment est démantelé avec peu ou pas de tentative de récupération de ses composants en vue du réemploi ; les matériaux résultant de la démolition peuvent toutefois être recyclés.
Durée de vie de calcul	Période présumée pendant laquelle le composant doit être utilisé pour l'usage auquel il est destiné, avec une maintenance anticipée, mais sans réparation majeure.
Distributeur	Toute personne physique ou morale de la chaîne d'approvisionnement, autre que le fabricant ou l'importateur, qui met un produit de construction à disposition sur le marché.
Enveloppe du bâtiment (ou Enveloppe)	Composants ou parties du bâtiment qui séparent l'espace clos de l'environnement extérieur et assurent une série de

	<p>fonctions de physique du bâtiment et éventuellement des fonctions structurales.</p>
Classe d'exécution	<p>Ensemble classé d'exigences, basé sur l'Eurocode, spécifié pour l'exécution de l'ouvrage dans son ensemble, d'un élément individuel ou d'un détail d'un élément.</p>
Façade	<p>Voir parement.</p>
Plancher	<p>Partie de la structure ayant pour fonction de fournir l'espace utile dans le bâtiment. Sur le plan structural, il transmet les charges aux poteaux et aux murs et assure la stabilité dans le plan horizontal des étages, contribuant ainsi à la stabilité globale de la structure.</p>
Importateur	<p>Toute personne physique ou morale établie dans l'UE qui met sur le marché de l'UE un produit de construction provenant d'un pays tiers.</p>
Réemploi in situ	<p>Réemploi du composant ou de la structure, sans déplacement, sur le même site.</p>
Fabricant	<p>Toute personne physique ou morale qui fabrique ou fait concevoir ou fabriquer un produit de construction et le commercialise sous son nom ou sa marque.</p>
Organisme notifié	<p>Organisme tiers indépendant (non gouvernemental), reconnu par l'UE/EEE et autorisé à effectuer des évaluations de la conformité des produits qui répondent aux exigences d'une norme harmonisée (hEN) ou d'une évaluation technique européenne (ETA).</p>
Diagnostic avant démolition	<p>Évaluation qualitative et quantitative des flux de déchets de construction et de démolition avant la déconstruction, la démolition ou la rénovation de bâtiments et d'infrastructures.</p>
Ossature principale ou structure métallique	<p>Structure en acier comprenant tous les principaux éléments porteurs, par exemple les poteaux, les poutres et les contreventements.</p>
Acheteur	<p>Entreprise qui achète les produits sidérurgiques ; généralement, une entreprise de construction métallique qui fabrique la charpente.</p>
Reconditionnement	<p>Processus consistant à remettre un produit en bon état de fonctionnement en remplaçant les composants défectueux et en améliorant l'apparence d'un produit, par exemple : greaillage, peinture, etc., ou en le rénovant.</p>
Recyclage	<p>Processus de valorisation de matériaux mis au rebut en nouveaux matériaux et produits ; le recyclage de l'acier</p>

	implique la refonte de la ferraille pour former de nouveaux produits semi-finis.
Remise à neuf	Processus de rénovation d'un bâtiment existant en vue d'une nouvelle utilisation, qui peut impliquer une série de processus allant du remplacement d'équipements et d'aménagements à des modifications structurales majeures.
Réemploi ex situ	Réemploi, lorsque le processus nécessite le transport de la structure ou du composant pour le réemploi sur un autre site. Opposé au réemploi in situ.
Remise en état	Retour d'un produit ou d'un composant à la spécification de performance du fabricant d'origine.
Réparation	Réparation d'un défaut. Dans le contexte des structures en acier, cela peut signifier le renforcement d'un composant.
Réutilisation	Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.
Réemploi	Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.
Ossature secondaire	L'ossature métallique secondaire, composée de lisses et de pannes, est utilisée pour soutenir le bardage/la couverture. Dans certains cas, elle peut assurer la stabilité de la structure principale.
Composant structural	Composant d'une structure conçu pour assurer la résistance mécanique et la stabilité et/ou la résistance au feu, y compris les aspects de durabilité et d'aptitude au service.
Kit structural	Ensemble de composants structuraux standardisés qui sont assemblés et installés sur place.
Fournisseur	Société de stockage et de fourniture de produits sidérurgiques sur le marché.
Déchets	Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défaît ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

2 COMPOSANTS DES BATIMENTS A UN OU PLUSIEURS ETAGES

2.1 Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée (SSB)

Les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée sont très polyvalents et couramment utilisés dans diverses applications telles que les entrepôts, les espaces de vente au détail, les installations industrielles et agricoles. Leurs propriétés inhérentes, telles que la résistance et la flexibilité, les rendent idéaux pour un large éventail d'exigences de conception.

Les SSB sont classés en fonction de leurs systèmes structuraux qui sont conçus pour répondre à des exigences fonctionnelles et à des conditions d'exposition spécifiques. Les principaux systèmes structuraux utilisés dans les SSB sont les portiques et les fermes. Chaque système présente des caractéristiques différentes qui influencent la conception, la construction et les performances globales du bâtiment. Les bâtiments de service public se caractérisent généralement par de grandes portées et peuvent offrir des espaces de bureaux dans une structure connectée ou sur un étage en mezzanine.

L'utilisation généralisée de ces éléments démontre l'adaptabilité de l'acier en tant que matériau de construction, offrant une variété de configurations conçues pour répondre à des exigences structurales, esthétiques et opérationnelles, tout en garantissant l'efficacité et la sécurité. Les structures en acier peuvent être facilement adaptées à différentes fonctionnalités, tout en offrant un délai de construction rapide et un bon rapport coût-efficacité. Cette méthode de construction moderne, caractérisée par ses matériaux légers, résistants au feu et durables, continue d'évoluer, offrant des conceptions et des technologies améliorées pour de meilleures performances et une plus grande durabilité dans les applications de construction.

L'agencement d'un bâtiment typique à simple rez-de-chaussée utilisant un système de portique est illustré à la figure Fig. 2.1. Il comporte trois niveaux :

- une ossature principale, constituée de portiques et du système de contreventement de la toiture et du bardage ;
- une ossature secondaire, composée de lisses pour les façades et de pannes pour la toiture, et qui est souvent constituée d'éléments formés à froid ;
- un bardage et une couverture, généralement des systèmes double peau ou des panneaux sandwich pour les façades, et des toitures étanchées ou des panneaux sandwich pour les couvertures.

Le chargement comprend :

- le poids propre de la structure et de ses composants, y compris les équipements, qui sont supportés par la structure ;
- les charges variables agissant sur la structure en raison de l'occupation et de l'utilisation du bâtiment ;
- les charges climatiques, par exemple la neige, le vent, les charges thermiques et les actions sismiques.

Les options de conception pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée sont les suivantes :

- les poteaux/poutres simples, souvent appelés structures contreventées ;

- les portiques et leurs variantes pour une gamme d'applications de moyenne portée ;
- les structures en treillis (fermes) pour des portées plus grandes ou des charges en toiture importantes.

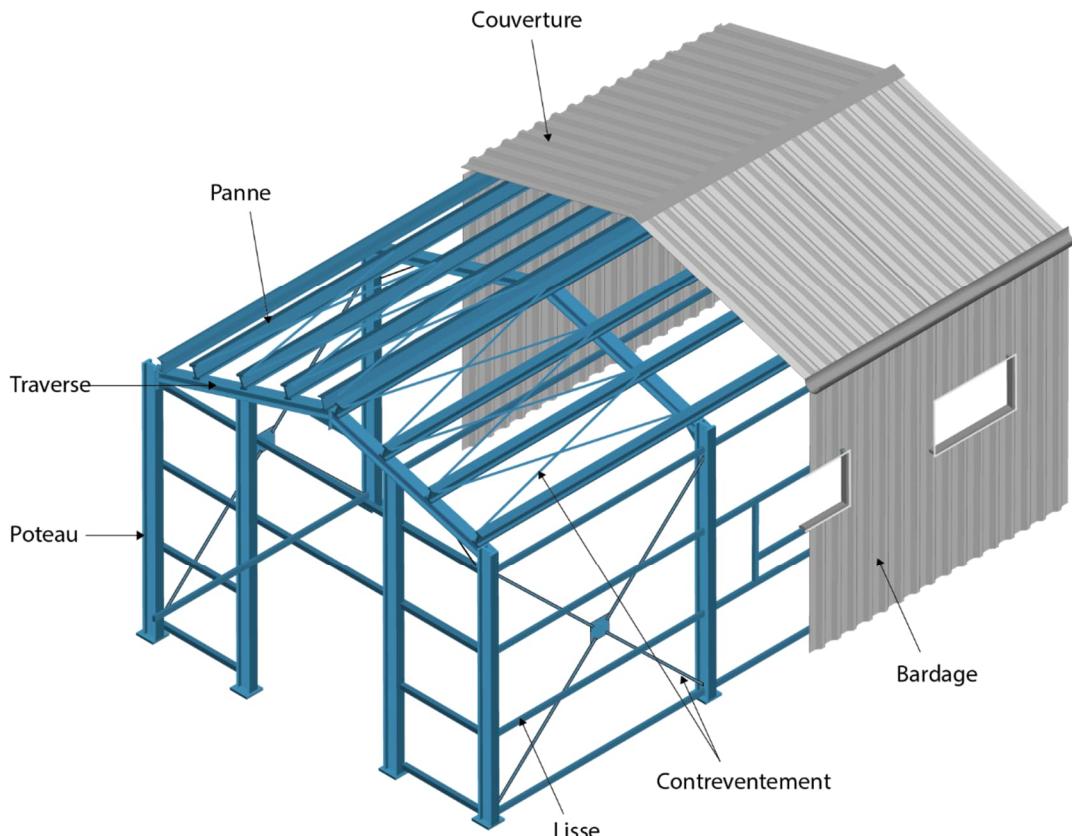


Fig. 2.1 Constituants d'un bâtiment typique à simple rez-de-chaussée avec des portiques plans

2.1.1 Ossature métallique principale – Portiques et système de contreventement

Les structures en portiques sont l'un des systèmes les plus courants. Ces systèmes se composent d'une série de portiques reliés de manière rigide qui comprennent généralement des poteaux et des traverses qui peuvent être inclinées ou horizontales, un système de contreventement sur le toit et les façades, ainsi que des pannes, des lisses et des systèmes de couverture. Les poteaux servent de supports verticaux, transférant les charges du toit aux fondations. Les traverses couvrent la distance entre les poteaux et fournissent le support nécessaire à la couverture. Les éléments sont souvent fabriqués à partir de sections d'acier laminées à chaud, de sections soudées ou de sections creuses en acier. La rigidité des connexions permet aux charpentes de résister aux charges latérales, ce qui les rend particulièrement adaptées aux zones exposées au vent ou aux forces sismiques. La conception du portique permet de créer des espaces largement ouverts et des aménagements intérieurs flexibles, souvent sans poteaux internes, ce qui est avantageux pour les entrepôts ou les espaces de vente.

Les portiques peuvent être conçus selon les principes de la structure articulée, de la structure rigide ou de la structure semi-rigide. Dans une structure articulée, les assemblages entre les éléments sont articulés, c'est-à-dire qu'ils ont une faible rigidité en rotation et ne

transmettent pas de moments de flexion significatifs. Les charges horizontales sont reprises par un système de contreventement. Dans une structure rigide, les assemblages sont conçus pour offrir une rigidité suffisante pour être considérés comme rigides et transmettent donc des moments de flexion entre les éléments. Une structure semi-rigide est conçue pour résister à certains moments, mais pas autant que dans un portique entièrement rigide (continu). Cela permet une plus grande flexibilité dans la conception et peut améliorer les performances structurales et l'économie.

Les systèmes de fermes sont une autre option pour les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée, afin de créer une structure légère mais solide. Les fermes soutiennent efficacement le toit tout en réduisant l'utilisation de matériaux. En fonction de la conception, les fermes peuvent être inclinées ou plates, ce qui permet de répondre à différentes conceptions architecturales et à différents besoins fonctionnels. Les fermes distribuent les charges à travers le réseau de connexions, ce qui leur permet de couvrir de grandes distances sans support interne, ce qui peut être avantageux pour les installations sportives, par exemple.

Les éléments secondaires servent de support aux éléments d'enveloppe (bardage et couverture). Le terme « secondaire » ne fait pas référence à l'importance de l'élément, mais plutôt à son ordre dans le processus de construction. Ces éléments sont constitués de lisses latérales et de pannes ou parfois de platelages profonds et de cassettes qui transfèrent les charges à l'ossature principale. L'enveloppe fournit essentiellement un environnement intérieur contrôlé au bâtiment et comprend des éléments tels que des lanterneaux et des sorties de ventilation. Les éléments d'enveloppe et la charpente métallique secondaire peuvent tous deux empêcher le flambement des éléments de l'ossature principale.

2.1.2 Systèmes de toiture

Les toitures peuvent être plates ou inclinées. Les systèmes de toiture sont conçus pour transmettre les charges et former l'enveloppe du bâtiment afin de maintenir l'environnement et la fonction internes requis. D'un point de vue structural, les systèmes de toiture sont conçus pour supporter leur poids propre, les charges permanentes des équipements éventuels, les charges d'exploitation, les charges climatiques (neige et vent), y compris le soulèvement. La toiture fournit également une isolation acoustique et thermique, et une étanchéité à l'eau et à l'air.

Les structures les plus courantes pour les toitures dans les bâtiments à simple rez-de-chaussée sont illustrées à la Fig. 2.2 :

- les portiques pour les toitures en pente (utilisant des poutres/traverses inclinées reliées par des assemblages rigides aux poteaux) pour des portées allant jusqu'à environ 50 m. Ils peuvent avoir des configurations à une ou plusieurs travées et la pente est généralement d'environ 6° par rapport à l'horizontale ;
- les fermes avec une membrure supérieure inclinée pour des portées allant jusqu'à environ 100 m, ou pour des charges lourdes agissant sur la toiture.

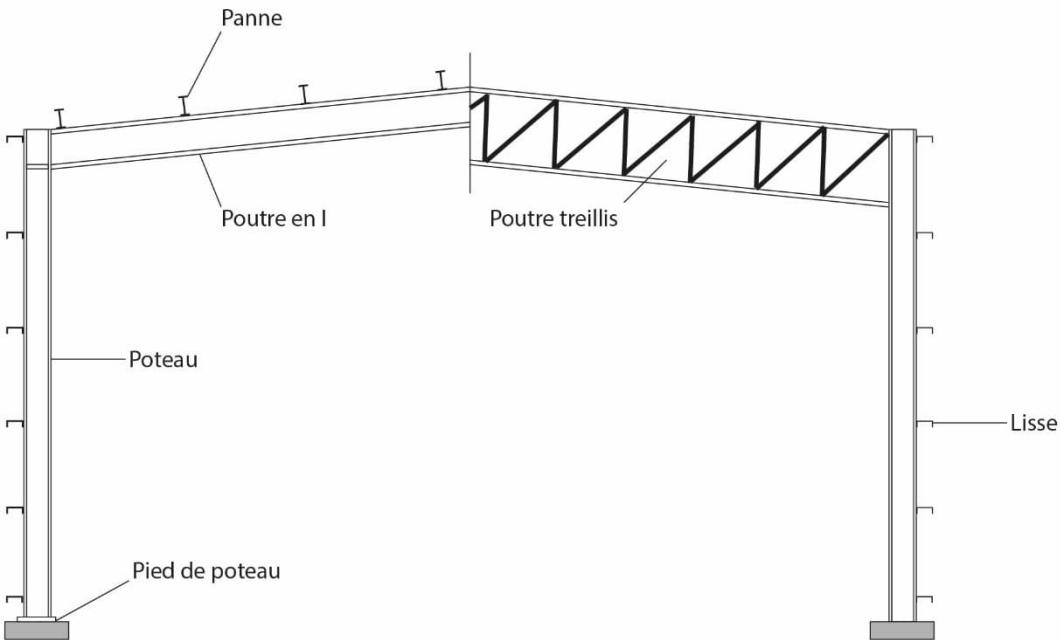


Fig. 2.2 Éléments structuraux d'un bâtiment en acier typique à simple rez-de-chaussée

2.1.3 Systèmes de contreventement

Les systèmes de contreventement utilisés dans les bâtiments à simple rez-de-chaussée peuvent relever de trois catégories :

- le contreventement permanent ;
- le contreventement temporaire ;
- la stabilisation des éléments comprimés et des joints de continuité des poteaux.

Les contreventements permanents sont conçus pour assurer la stabilité globale de la structure. Il s'agit souvent de fermes (c'est-à-dire d'éléments droits triangulés interconnectés) ou de diaphragmes fournis par la couverture ou la toiture. Lorsque des entretoises sont utilisées, elles peuvent agir comme des éléments uniquement tendus, ce qui permet à l'élément comprimé de l'entretoise de se déformer. La couverture ou la toiture peut agir comme un diaphragme et rigidifier considérablement le bâtiment.

Un contreventement temporaire peut être nécessaire en fonction de la séquence de construction.

L'option la plus courante consiste à recourir à une ossature métallique secondaire et à des contreventements pour limiter le flambement global des éléments de l'ossature principale, ainsi que l'instabilité latérale de la semelle comprimée des éléments principaux. Cependant, pour les bâtiments de taille considérable et/ou pour certains types de construction, un système de contreventement supplémentaire peut être nécessaire.

2.1.4 Ossature métallique secondaire

L'ossature métallique secondaire de la toiture comprend généralement un système de pannes en acier qui s'étendent entre les poutres de l'ossature principale. Traditionnellement, des profilés laminés à chaud étaient utilisés comme pannes, mais plus récemment, les pannes formées à froid sont devenues très populaires. Selon le type de

bardage, l'espacement des pannes est généralement compris entre 1,2 et 2,5 m (1,8 m étant une valeur typique). L'ossature métallique secondaire peut ne pas être nécessaire dans le cas d'éléments de couverture de longue portée qui s'étendent directement entre les ossatures principales. Pour les applications typiques des portiques, les pannes sont souvent conçues comme continues sur plusieurs travées.

Les pannes sont généralement des poutres en I en acier laminé à chaud, des éléments formés à froid en C ou en Z, avec des sections sigma ou oméga comme options alternatives. Elles sont conçues pour :

- transférer les charges de la toiture à l'ossature principale, y compris les charges climatiques et d'exploitation dues à la neige et à l'accès pour l'entretien ;
- transférer les charges horizontales au système de contreventement ;
- assurer la stabilisation des poutres de l'ossature principale.

Les pannes et les lisses sont généralement fournies dans le cadre du système de support du bardage, avec les raccords, les fixations et les autres composants associés.

Le bardage est souvent soutenu par des lisses horizontales qui s'étendent entre les poteaux de l'ossature principale. De nos jours, les profilés en C formés à froid sont une option très populaire pour les lisses, mais les profilés en Z formés à froid peuvent être utilisés si la lisse est conçue pour être continue sur plusieurs poteaux. Les lisses sont conçues pour :

- transférer la charge, y compris la charge de vent, du bardage aux poteaux ;
- transférer les charges horizontales au système de contreventement ;
- assurer la stabilisation latérale des poteaux.

Le bardage rigidifie également la façade et transfère une part importante de la charge verticale directement sur les poteaux, tout en empêchant les lisses de se déformer.

2.1.5 Systèmes de bardage

La fonction principale du système de bardage est de fournir un environnement interne contrôlé en fonction de l'utilisation prévue du bâtiment. Les exigences générales du système de bardage sont les suivantes :

- fournir le niveau d'isolation thermique requis ;
- résister à la pression et à l'arrachement dus à l'action du vent ;
- empêcher la propagation du feu ;
- participer à l'étanchéité à l'air et à l'eau du bâtiment ;
- inclure des systèmes de ventilation d'un bâtiment, par exemple au moyen d'équipements mécaniques ;
- assurer une isolation acoustique compatible avec l'utilisation prévue du bâtiment ;
- Eventuellement, stabiliser l'ossature secondaire en acier, et parfois l'ossature principale, à l'aide de dispositifs appropriés.

Dans les bâtiments à simple rez-de-chaussée, les bardages de courte portée (jusqu'à 2 ou 3 m) sont généralement fixés à l'ossature secondaire. Il est également possible d'utiliser des bardages de grande portée, allant jusqu'à 10 m. Les bardages de grande portée peuvent prendre la forme de plaques nervurées ou ondulées ou de panneaux sandwich posés horizontalement sur les poteaux. Cette solution permet de réduire le nombre de fixations.

Les systèmes de bardage typiques sont les suivants :

- bardage simple peau ;
- bardage double peau ;
- bardage à joint debout ;
- panneaux sandwich.

2.1.6 Guides de conception pour les bâtiments à simple rez-de-chaussée – Documents complémentaires

Des guides de conception pour les bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée (SSB) ont été élaborés sous la direction d'Arcelor Mittal, Peiner Träger et Corus. Le contenu technique a été préparé par le CTICM et le SCI, qui collaborent dans le cadre de l'Alliance pour l'acier. Les guides sont disponibles à l'adresse suivante :

https://constructalia.arcelormittal.com/en/news_center/articles/design_guides_steel_buildings_in_europe [42] :

- Single-storey steel buildings – Part 1: Architect's guide
- Single-storey steel buildings – Part 2: Concept design
- Single-storey steel buildings – Part 3: Actions
- Single-storey steel buildings – Part 4: Detailed design of portal frames
- Single-storey steel buildings – Part 5: Detailed design of trusses
- Single-storey steel buildings – Part 6: Detailed design of built-up columns
- Single-storey steel buildings – Part 7: Fire engineering
- Single-storey steel buildings – Part 8: Building envelopes
- Single-storey steel buildings – Part 9: Introduction to computer software
- Single-storey steel buildings – Part 10: Model construction specifications
- Single-storey steel buildings – Part 11: Moment connections

Des guides de conception sur les SSB sont également disponibles à l'adresse suivante : <https://steelconstruction.info/> [44] :

- SCI P313: Single storey steel framed buildings in fire boundary conditions. The Steel Construction Institute, 2002
- SCI P252: Design of single span steel portal frames to BS 5950:2000. The Steel Construction Institute, 2004
- SCI P346: Best practice for the specification and installation of metal cladding and secondary steelwork. The Steel Construction Institute, 2006
- SCI P347: Single storey buildings – Best practice guidance for developers, owners, designers & constructors. The Steel Construction Institute, 2006
- EP37: Best practice in steel construction – Industrial buildings. Guidance for architects, designers & constructors. The Steel Construction Institute, 2008
- SCI P397: Elastic design of single-span steel portal frame buildings to Eurocode 3. The Steel Construction Institute, 2012
- SCI P399: Design of steel portal frame buildings to Eurocode 3, The Steel Construction Institute, 2015
- Target Zero: Guidance on the design and construction of sustainable, low carbon warehouse buildings. Tata Steel and BCSA, 2011

- Scheme development: Selection of the external wall envelope system for single storey buildings, SS019a-EN-EU. Access Steel
- Scheme development: Details for portal frames using rolled sections, SS051a-EN-EU. Access Steel
- Scheme Development: Design of portal frames using fabricated welded sections, SS052a-EN-EU. Access Steel
- Scheme development: Selection of the external roof envelope system for single storey buildings, SS018a-EN-EU. Access Steel
- Scheme development: Overview of structural systems for single-storey buildings, SS048a-EN-EU. Access Steel

Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres documents spécifiques à certains pays ou produits peuvent également être applicables.

2.2 Bâtiments en acier multi-étages (MSB)

Les bâtiments multi-étages en acier sont des structures complexes qui font appel à divers systèmes structuraux conçus pour supporter les charges appliquées pendant leur durée de vie. La conception de ces bâtiments repose sur l'utilisation de l'acier pour sa résistance, sa polyvalence et sa capacité à être fabriqué dans une large gamme de formes. Les bâtiments multi-étages en acier sont souvent classés en fonction de leur structure, qui fournit le soutien et la stabilité nécessaires à l'ensemble du système.

Une classification est basée sur le type de système structural utilisé, qui peut inclure des portiques résistants aux moments, des structures contreventées et des systèmes de murs de cisaillement/diaphragmes. Le choix du système de structure est principalement influencé par la hauteur du bâtiment, avec les options typiques suivantes :

- portiques résistants aux moments – conviennent aux bâtiments jusqu'à environ 4 étages, où les charges horizontales sont un facteur clé ;
- structures contreventées – généralement utilisées pour les bâtiments jusqu'à environ 12 étages ;
- noyaux en acier ou en béton (systèmes de murs de cisaillement/diaphragme) – appropriés pour les bâtiments jusqu'à environ 40 étages.

Les structures des bâtiments de très grande hauteur sont influencées par leurs systèmes de stabilisation et ne sont pas couvertes par le présent guide.

Les portiques résistants aux moments sont caractérisés par leur capacité à résister aux forces latérales grâce à des connexions rigides entre les poutres et les poteaux. Le système structural permet aux portiques de se déformer sous l'effet des charges latérales. Les portiques présentent généralement des dispositions qui favorisent la flexibilité tout en maintenant la résistance. La rigidité des connexions permet à la structure de conserver sa forme tout en répartissant uniformément les forces sur l'ensemble de la structure. Les portiques permettent de créer des plans d'étage ouverts.

Les structures contreventées, quant à elles, intègrent des contreventements entre les poteaux et les poutres afin de créer une structure triangulée qui renforce la stabilité. Ces diagonales de contreventement s'opposent efficacement aux forces latérales, ce qui rend ce système particulièrement adapté aux bâtiments plus hauts. La conception réduit la

quantité d'acier nécessaire par rapport aux portiques, tout en maintenant l'intégrité structurale. Les structures contreventées peuvent être configurées selon différents styles, notamment en X, en V et en K, en fonction du choix architectural et des exigences de conception.

Les systèmes de diaphragme comprennent des parois verticales en béton armé ou en acier, placées judicieusement dans le bâtiment pour résister aux charges latérales. Les murs agissent comme des porte-à-faux verticaux, transmettant efficacement les forces à la fondation, ce qui les rend idéaux pour les bâtiments conçus pour résister à des pressions de vent élevées ou à l'activité sismique, apportant une rigidité et une stabilité accrues à la structure. L'intégration de diaphragmes peut améliorer considérablement la rigidité de la structure tout en permettant des plans d'étage ouverts.

Conditions de chargement :

- poids propre de la structure et de ses composants, y compris les équipements ;
- charges variables dues à l'occupation et à l'utilisation du bâtiment, y compris les cloisons mobiles ;
- charges dues aux effets de l'environnement, par exemple la neige, le vent ou les actions thermiques et sismiques ;
- charges dues à des actions accidentelles, par exemple chocs de véhicules, explosions.

2.2.1 Systèmes structuraux

Dans les bâtiments à plusieurs étages, la reprise du poids du bâtiment et la répartition des charges sur les fondations sont assurées par une ossature principale composée de poteaux et de poutres. Le nombre de points porteurs dépend de l'usage prévu, des charges qu'il devra supporter et du type de fondation choisi (qui est lui-même influencé par les conditions du sol sur le site de construction).

Les bâtiments à plusieurs étages soumettent les poteaux à une compression importante, ce qui nécessite des considérations de conception pour la résistance au flambement. En fonction de la taille et de la disposition de la grille de poteaux, des coûts d'installation, du coût des profilés en acier, de la facilité de connexion aux éléments secondaires (plafonds, murs, façades), des exigences de résistance au feu ou à la corrosion ou des préférences architecturales, les principaux types de poteaux généralement utilisés dans les structures à plusieurs étages sont les profilés en H (acier ou mixte) et les profilés creux circulaires (acier ou mixte).

Les poutres jouent un rôle dans le transfert des charges verticales. Principalement soumis à des moments de flexion, ces éléments horizontaux nécessitent une rigidité et une résistance suffisantes pour garantir l'intégrité de la structure. Il existe une grande variété de sections de poutres, telles que les sections laminées à chaud adaptées aux petites et moyennes portées, les profilés reconstitués soudés PRS (généralement utilisées pour les poutres plus longues), les profils cellulaires fabriqués à partir de sections laminées à chaud avec des ouvertures circulaires ou hexagonales découpées dans l'âme (ce qui permet d'augmenter la résistance et de faciliter le passages des gaines) et les sections mixtes constituées d'un profilé en acier travaillant conjointement avec la dalle de béton par l'intermédiaire de goujons en acier ou d'un platelage en acier.

Les poutres mixtes conviennent aux planchers de grande portée (jusqu'à environ 20 m) car elles tirent parti de la grande surface de compression de la dalle en béton et de la résistance élevée à la traction de la poutre en acier, ce qui leur confère des performances mécaniques exceptionnelles en termes de capacité de charge et de rigidité. Plusieurs types de poutres mixtes sont disponibles : les dalles simples qui nécessitent un coffrage temporaire, les dalles en béton préfabriqué avec un tablier métallique et les poutres enrobées, où le profilé en acier est partiellement enrobé de béton pour une meilleure résistance au feu. Dans les bâtiments à plusieurs étages, les planchers minces sont généralement utilisés pour augmenter l'espace utilisable. Cette solution intègre la poutre en acier directement dans la hauteur de la dalle de béton, réduisant ainsi la profondeur totale du plancher. La figure 2.3 montre les portées pour différentes options structurales de plancher.

	Portée (m)					
	6	8	10	13	16	20
Plancher en béton armé	■	■				
Dalle avec poutre intégrée et dalles avec plancher mixte	■	■				
Poutre intégrée avec dalle préfabriquée	■	■	■			
Dalle avec poutre en béton armé		■	■	■		
Dalle en béton précontraint			■	■		
Dalle mixte avec poutres mixtes	■	■	■	■		
Poutre à ouverture d'âme			■	■	■	
Poutre mixte à ouverture d'âme				■	■	
Treillis mixte					■	■

Fig. 2.3 Portées des systèmes structuraux de plancher [42], [44]

2.2.2 Systèmes de contreventement

La stabilité globale des bâtiments à plusieurs étages peut être assurée par des systèmes de contreventement, en plus de l'effet portique. L'utilisation de contreventements pour la stabilité conjointement avec des portiques rigides est une solution rentable, car l'utilisation exclusive de portiques rigides pour maintenir la stabilité nécessite des poteaux plus lourds et parfois des poutres, ce qui entraîne des coûts plus élevés au fur et à mesure que le nombre d'étages du bâtiment augmente. Par conséquent, dans une solution économique optimale, les portiques peuvent fournir un support principal dans une direction, tandis que les systèmes de contreventement sont placés dans la direction perpendiculaire pour améliorer la stabilité.

Les ossatures métalliques contreventées intègrent diverses configurations de contreventement dans les murs, généralement dissimulées dans les cavités de la façade ou autour des cages d'escalier et des zones de service. Dans les zones sismiques, plusieurs systèmes d'ossature en acier peuvent être utilisés pour améliorer la résistance aux charges sismiques. Ces systèmes sont les suivants :

- les portiques résistants aux moments (Moment Resisting Frames – MRF) : ces portiques reposent sur la rigidité des poutres et des poteaux pour résister aux forces sismiques latérales ;

- les portiques à contreventement concentrique (Concentrically Braced Frames – CBF) : les portiques à contreventement concentrique utilisent des diagonales à l'intérieur du portique pour résister aux forces de cisaillement. Dans les CBF, l'axe longitudinal des entretoises est concentrique au point médian de la poutre ;
- les portiques à contreventement excentrique (Eccentrically Braced Frames – EBF) : comme les CBF, les EBF intègrent des contreventements, mais ceux-ci sont conçus pour se plier et dissiper l'énergie lors d'un tremblement de terre. Dans les EBF, l'axe longitudinal des contreventements est excentré par rapport au milieu de la poutre ;
- Les portiques contreventés avec stabilisation au flambement (Buckling Restrained Braced Frames – BRBF) : les BRBF répondent à une limitation des contreventements traditionnels en incorporant des stabilisations au flambement qui empêchent le flambement des contreventements sous l'effet des charges sismiques ;
- les diaphragmes (Special Plate Shear Walls – SPSW) : ces murs, construits en plaques d'acier, agissent comme des éléments rigides pour résister aux forces de cisaillement induites par les charges sismiques.

Le système EBF, qui est un système structural combinant le système MRF et le système CBF, offrant une grande ductilité (comme le système MRF) et une grande rigidité élastique (comme le système CBF), comprend plusieurs types de configuration de contreventement, comme le montre la figure 2.4.

Les systèmes de contreventement sont également utilisés dans les bâtiments à plusieurs étages pour assurer la stabilité verticale, étant donné que ces bâtiments sont généralement conçus avec des éléments articulés. Les systèmes de contreventement peuvent être placés à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment.

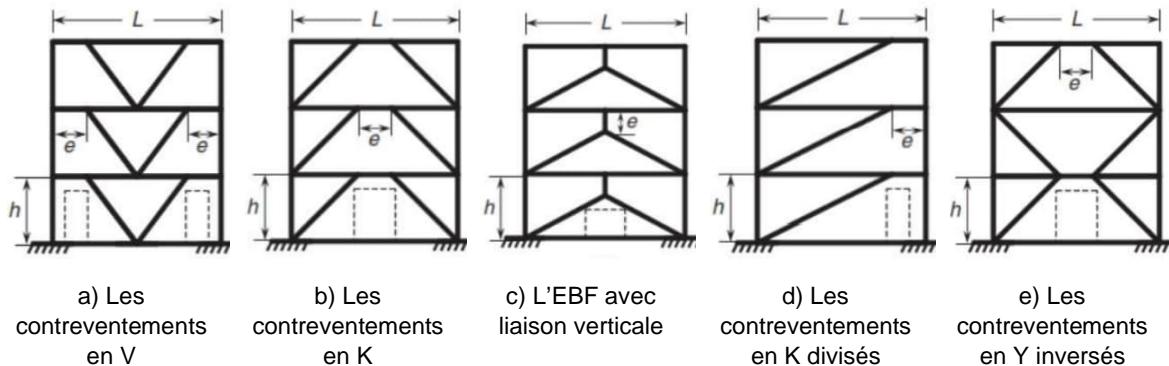


Fig. 2.4 Types de configurations de contreventement dans le système EBF

2.2.3 Systèmes de plancher

Dans une structure de bâtiment à plusieurs étages, les planchers ont pour fonction de transférer les charges aux éléments verticaux et, en même temps, ils assurent la stabilité dans le plan horizontal grâce à l'effet diaphragme qu'ils apportent, contribuant ainsi à la stabilité globale de la structure. Dans ces bâtiments, les vibrations des planchers peuvent être un facteur critique dans la conception. Les équipements techniques du bâtiment peuvent être intégrés dans le plancher. Ils peuvent également être suspendus sous le plancher. Dans les bâtiments commerciaux, les planchers surélevés permettent une

distribution aisée des services dans l'espace situé sous la surface du sol. Cela facilite l'entretien et la modification de ces services sans perturber le fonctionnement du bâtiment.

Le choix d'un système de plancher repose sur plusieurs facteurs, et les options les plus courantes sont les suivantes :

- dalle de béton avec bacs en acier : des bacs en acier sont installés comme coffrage permanent pour une dalle de béton et contribuent à la résistance à la flexion du plancher, en tant qu'éléments de tension. La bonne liaison entre le béton et les bacs en acier est assurée par des bossages sur les nervures des bacs ;
- dalle mixte et poutres mixtes avec tablier métallique : un tablier métallique est installé comme coffrage perdu pour une dalle mixte, contribuant à la résistance à la flexion des poutres. La bonne connexion entre le béton et la poutre en acier est assurée par des connecteurs en acier soudés à l'aile supérieure de la poutre en acier ;
- dalle mixte préfabriquée : éléments de dalle préfabriqués d'une longueur maximale de 7 m et d'une largeur maximale de 1,20 m ;
- dalle creuse : les éléments préfabriqués de dalle creuse sont généralement intégrés aux poutres en acier. Les dalles alvéolées peuvent être placées sur l'aile inférieure de la poutre ou sur des profils en acier en forme de L soudés à l'âme de la poutre en acier. Pour assurer l'effet diaphragme du plancher, une couche de béton armé est posée sur le dessus ;
- dalle préfabriquée avec béton complémentaire coulé sur place : dalle ordinaire qui utilise une combinaison de dalles préfabriquées en béton et de béton coulé sur place. Pendant le coulage sur place du béton, des supports temporaires peuvent être nécessaires pour supporter le poids combiné de la dalle préfabriquée, du béton frais et des ouvriers de la construction. En incorporant des connexions appropriées, telles que des goujons soudés, entre la dalle et les poutres de soutien, la dalle peut améliorer la résistance à la flexion et la rigidité des poutres ;
- plancher sec : plancher constitué d'éléments individuels assemblés tels que des plaques de plâtre, des panneaux de bois, des plaques nervurées en acier et de la laine minérale. La plaque nervurée en acier offre une solution pour l'intégration des équipements techniques du bâtiment.

2.2.4 Systèmes de bardage

Les systèmes de bardage typiques pour les bâtiments à plusieurs étages sont les suivants :

- bardage en briques : pour les bâtiments jusqu'à trois étages, le bardage en briques peut être directement soutenu par le sol. Les structures plus hautes nécessitent un support supplémentaire, généralement réalisé à l'aide de cornières en acier inoxydable, d'équerres individuelles ou d'équerres reliées à l'ossature structurale ;
- systèmes de bardage vitré : ces systèmes de vitrage, utilisés pour les bâtiments plus hauts, comportent généralement des façades à triple vitrage ou à double couche. Ils sont soutenus par des poteaux en aluminium ou des ailettes en verre, ce qui offre une grande variété d'options de conception. Les fixations d'angle sont courantes et les panneaux comportent souvent des joints d'étanchéité. Il existe également des différences entre les tolérances des portiques en acier et celles des panneaux de verre, de sorte que les connexions doivent permettre des ajustements lors de l'installation. La dilatation et la contraction thermiques peuvent également se

produire, ce qui exige que le système de support s'adapte efficacement aux mouvements ;

- systèmes de murs-rideaux : ces systèmes de bardage comprennent des panneaux d'aluminium ou d'autres panneaux légers qui sont fixés à la charpente métallique périphérique, au revêtement en pierre ou aux panneaux en béton préfabriqué. Le système de bardage peut être capable de supporter son propre poids et les charges appliquées (le panneau est suspendu à son sommet ou soutenu à la base, à partir du sol), ou il peut nécessiter un soutien supplémentaire (soutien qui se présente généralement sous la forme de meneaux, des éléments verticaux qui peuvent couvrir plusieurs étages ; dans certains cas, des éléments horizontaux appelés traverses peuvent être utilisés pour relier les meneaux à des niveaux intermédiaires, ce qui renforce encore la stabilité). Chaque système de panneaux de bardage utilise une méthode de fixation unique conçue pour permettre des mouvements et des ajustements dans trois directions. Comme ces détails de fixation relient le bardage à la structure du bâtiment, la conception de la dalle de plancher peut nécessiter des ajustements pour gérer les forces localisées exercées par le bardage. Une solution courante consiste à incorporer des profils en C directement dans le bord de la dalle lors du coulage, ce qui fournit un emplacement sûr et compatible pour les fixations du revêtement ;
- systèmes de bardage en tuiles isolées ou enduit : ces systèmes de bardage reposent sur des murs de remplissage légers (l'isolation et l'enduit, ou les tuiles, sont soutenus par une ossature secondaire en acier). Les tuiles peuvent être des panneaux individuels ou préformés. Ce système de bardage permet également d'utiliser la maçonnerie comme peau extérieure.

2.2.5 Guides de conception pour les bâtiments multi-étages – Documents complémentaires

Un ensemble de guides de conception sur les bâtiments multi-étages en acier (MSB) a été élaboré sous la direction d'Arcelor Mittal, Peiner Träger et Corus. Le contenu technique a été préparé par le CTICM et le SCI, qui collaborent dans le cadre de la Steel Alliance. Il est disponible à l'adresse suivante :

https://constructalia.arcelormittal.com/en/news_center/articles/design_guides_steel_buildings_in_europe [45].

Il comprend :

- Multi-storey steel buildings – Part 1: Architect's guide
- Multi-storey steel buildings – Part 2: Concept design
- Multi-storey steel buildings – Part 3: Actions
- Multi-storey steel buildings – Part 4: Detailed design
- Multi-storey steel buildings – Part 5: Joint design
- Multi-storey steel buildings – Part 6: Fire engineering
- Multi-storey steel buildings – Part 7: Model construction specifications
- Multi-storey steel buildings – Part 8: Description of member resistance calculator
- Multi-storey steel buildings – Part 9: Description of simple connection resistance calculator
- Multi-storey steel buildings – Part 10: Guidance to developers of software for the design of composite beams

D'autres guides de conception pertinents sur les bâtiments en acier à plusieurs étages sont disponibles à l'adresse suivante : <https://steelconstruction.info/> [45].

Il s'agit de :

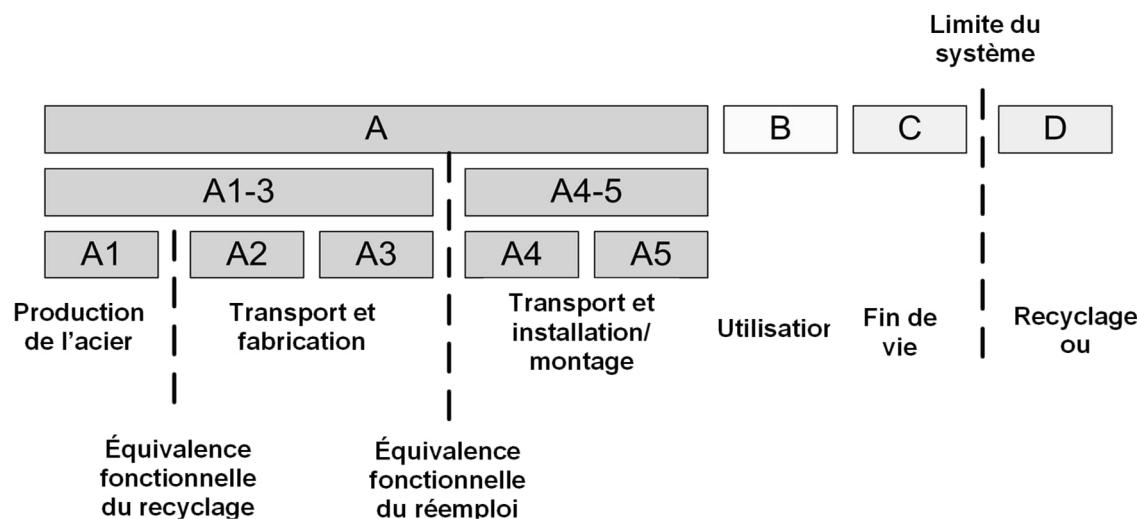
- SCI P332: Steel in Multi-storey residential buildings. The Steel Construction Institute, 2004
- SCI P362: Concise Eurocode for design of steel buildings. The Steel Construction Institute, 2009
- SCI P365: Steel building design: Medium rise braced frames. The Steel Construction Institute, 2009
- BSCA 35/03: Steel buildings. The British Construction Steel Association, 2003
- SCI P300: Composite slabs and beams using steel decking: Good practice for design and construction, (3rd Edition), The Steel Construction Institute and The Metal Cladding & Roofing Association, 2023
- SCI P355: Design of composite beams with large web openings. The Steel Construction Institute, 2011
- SCI P354: Design of floors for vibrations – A new approach. The Steel Construction Institute, 2009
- SCI P166: Design of steel framed buildings for service integration. The Steel Construction Institute, 1992
- SCI P416: The design of cast-in plates. The Steel Construction Institute, 2017
- SCI P101: Interfaces - Steel supported glazing systems. The Steel Construction Institute, 1997
- Best Practice in Steel Construction: Commercial Buildings. The Steel Construction Institute, 2008
- Target Zero – Guidance on the design and construction of sustainable, low carbon office buildings. Tata Steel and BCSA, 2012
- Scheme Development: Coordination of structural and architectural design for multi-storey buildings with steel frames, SS001a-EN-EU. Access Steel
- Scheme Development: Composite slabs for multi-storey buildings for commercial and residential use, SS010a-EN-EU. Access Steel
- Scheme Development: Integrated beams for multi-storey buildings for commercial and residential use, SS013a-EN-EU. Access Steel

Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres documents spécifiques à certains pays ou produits peuvent également être applicables.

3 CLASSIFICATION DU REEMPLOI DE L'ACIER

3.1 Étapes du cycle de vie des éléments de construction en acier

Le cycle de vie d'un bâtiment ou d'un produit peut être divisé en plusieurs étapes (appelées modules) conformément aux normes préparées par le comité CEN/TC 350 pour l'analyse du cycle de vie (ACV) et l'évaluation du coût du cycle de vie (CCV) – [46] à [48] (voir Fig. 3.1).



A : Stade du produit et de la construction

- A₀: Phase de pré-construction
- A₁: Approvisionnement en matières premières
- A₂: Transport
- A₃: Fabrication
- A₄: Transport
- A₅: Processus de construction et d'installation/de montage

B : Stade d'utilisation

- B₁: Utilisation
- B₂: Maintenance
- B₃: Réparation
- B₄: Remplacement
- B₅: Réhabilitation

C : Phase de fin de vie

- C₁: Déconstruction, démolition
- C₂: Transport
- C₃: Traitement des déchets
- C₄: Décharge

D : Potentiel de réemploi, de récupération et de recyclage

Fig. 3.1 Étapes du cycle de vie de l'acier et des composants à base d'acier

3.2 Scénarios de réemploi

Comme illustré dans la Fig. 3.2, plusieurs cas de base de réemploi des composants peuvent être identifiés en fonction du niveau de désassemblage :

D₀: Réemploi de l'ensemble de la charpente métallique ou d'une partie de celle-ci (par exemple, plusieurs poutres) sur place sans démontage (rénovation)

D_I: Réemploi de la charpente métallique démontée (peut inclure l'enveloppe)

D_{II}: Réemploi des composants fabriqués (par exemple, panneaux sandwich, poteaux)

D_{III}: Réemploi des produits constitutifs (par exemple, sections, plaques)

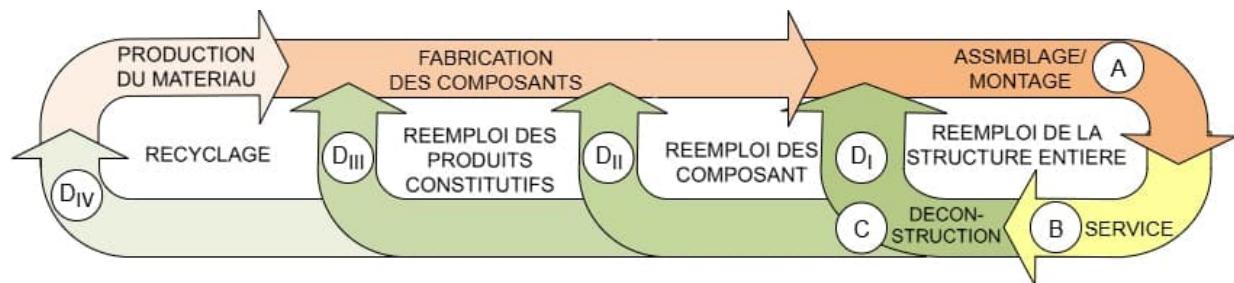


Fig. 3.2 Scénarios de réemploi dans la chaîne de valeur

Du point de vue de la déconstruction et du transport, plusieurs scénarios peuvent exister :

D_A: Réemploi in situ sans démontage (rénovation)

D_B: Réemploi in situ dans la même configuration

D_C: Réemploi in situ dans une configuration différente

D_D: Réemploi ex situ dans la même configuration

D_E: Réemploi ex situ dans une configuration différente

Ce processus est expliqué dans le Tableau 3.1 en fonction de cette classification.

Tableau 3.1 Classification des cas de réemploi

Cas	Rénovation	Réemploi			
		In situ		Ex situ	
		Configuration identique	Configuration différente	Configuration identique	Configuration différente
Toute la charpente métallique	D _{0-A}	- ^a	-	D _{0-D} ^b	-
Charpente métallique démontée	-	D _{I-B}	D _{I-C}	D _{I-D}	D _{I-E}
Composants fabriqués	-	D _{II-B}	D _{II-C}	D _{II-D}	D _{II-E}
Produits constitutifs	-	D _{III-B}	D _{III-C}	D _{III-D}	D _{III-E}

^aCe scénario est peu probable car si la structure était déconstruite, il est peu probable qu'elle soit reconstruite dans la même configuration sur le même site ;

^bUniquement dans le cas des bâtiments en acier à un étage.

Dans le cas du réemploi in situ sans démontage (D_A), les composants ne sont pas démontés et restent reliés à la charpente métallique. Cette approche, communément appelée rénovation, implique la préservation de la structure existante, qui peut être réparée,

renforcée ou revêtue afin d'éviter le démontage et le remplacement et, éventuellement, de s'adapter à des conditions de charge différentes. La résistance structurale et l'aptitude au service doivent être vérifiées conformément aux normes en vigueur. Ce cas spécifique n'est pas couvert par le présent document.

Le réemploi avec démontage des éléments (D_B à D_E) signifie que les composants sont déconnectés et reconditionnés sur le chantier ou dans l'atelier. Dans de nombreux cas, le chantier est réaménagé et il peut être intéressant d'envisager l'intégration des éléments en acier du bâtiment précédent dans le nouveau projet (D_B et D_C).

Le réemploi sur un autre site (D_D et D_E) peut être organisé avec les matériaux (dans le cas de grandes quantités de petits composants tels que des sections structurales) ou peut être négocié directement entre les participants aux processus de déconstruction et de la nouvelle construction. Dans certaines structures de petite taille, par exemple celles de forme modulaire, il est possible de déplacer le bâtiment ou ses principaux composants sans démontage ($D_{(0)}$) sur une courte distance à l'aide de grues ou de véhicules à chenilles.

Les différentes options concernant les besoins en transport sont présentées dans le Tableau 3.1, où l'indice « A » signifie que le réemploi a lieu sur le même site de construction et l'indice « B » signifie que les composants nécessitent un transport (par exemple, entre les sites, vers le revendeur, le stockage ou l'atelier).

Le bardage est un élément plus complexe qui peut être réemployé. S'il s'agit d'un système de bardage double peau, il convient de prêter attention à toutes les couches. Les panneaux sandwich peuvent être réemployés si les trous de vis sont cachés ou réutilisés lors de la deuxième utilisation. La préservation de la protection par peinture est plus difficile, surtout si elle est combinée à une détérioration à long terme, à la pollution et aux attaques des UV. Pour des agencements différents, les panneaux sandwich peuvent être réutilisés, mais en combinaison avec une nouvelle couche externe.

4 EXAMEN D'ANCIENNES NORMES DE CALCUL ET DE PRODUITS

Il est important de connaître l'histoire de l'acier de construction si l'on veut que le réemploi des éléments en acier et d'autres composants en acier soit largement adopté. Au cours des années 1970, considérées comme le point de départ du réemploi de l'acier dans le cadre du présent document, des descriptions détaillées de la composition chimique et des caractéristiques physiques et mécaniques des éléments en acier étaient nécessaires pour répondre aux normes spécifiques à chaque pays. Ceci est présenté dans la figure 4.1 pour les éléments de construction en acier laminés à chaud.

En 1961, le Comité européen de normalisation (CEN) a été fondé par les organismes nationaux de normalisation en Europe pour produire et mettre en œuvre des normes européennes communes. Les normes adoptées sont mises en œuvre en tant que normes nationales par chaque pays membre du CEN et toutes les normes nationales conflictuelles sont retirées.

Dans le présent document, on considère que la structure en acier dont les éléments doivent être récupérés a été conçue à l'origine sur la base des normes indiquées dans la Fig. 4.1 ou la norme EN 1993. La conception était basée sur les principes de l'état limite, de sorte que la probabilité que chaque état limite soit atteint est relativement constante pour tous les éléments d'une structure et se situe également à un niveau bas acceptable.

4.1 Aciers de construction laminés à chaud

4.1.1 Normes de produits

La désignation des produits en acier dans la norme EN 1993 est conforme à l'EN 10025-2: 2019 [22]. La Fig. 4.1 présente une liste des anciennes désignations nationales correspondantes et des anciennes désignations de l'EN 10025: 1990 et de l'EN 10025: 1990+A1: 1993, qui ont été remplacées par l'édition 2004 et plus tard par l'édition 2019. Les propriétés des aciers de construction sont définies dans la clause 5.2.5 de l'EN 1993-1-1, et ces propriétés ne se dégradent pas avec le temps, c'est-à-dire que le module d'élasticité de toutes les nuances d'acier est $E= 210000 \text{ N/mm}^2$, le coefficient de Poisson $\nu= 0,3$ et le coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha= 12 \times 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$, à des températures ambiantes.

L'acier de construction est spécifié par sa limite d'élasticité (en N/mm^2 ou MPa) et il doit avoir une marge suffisante entre la résistance ultime et la limite d'élasticité de l'acier pour permettre la plasticité et la redistribution des efforts internes au sein d'une structure. Les qualités d'acier courantes sont S235 (la valeur minimale par défaut pour la conception et le développement des formules de conception dans les Eurocodes), S275 et S355.

Les aciers de construction modernes contiennent de faibles quantités de carbone, généralement 0,17 % pour le S235 et 0,24 % pour le S355 (dans les qualités JR). Des résistances supérieures sont obtenues grâce à des alliages, par exemple de manganèse, de nickel et de niobium, qui peuvent affecter d'autres propriétés mécaniques, telles que la ductilité, la ténacité et la soudabilité. La ductilité peut être améliorée en réduisant les niveaux de soufre, et la ténacité peut être améliorée par l'ajout de nickel.

Les propriétés chimiques et mécaniques sont consignées dans des certificats matière dans le cadre des procédures normales de contrôle de la qualité du fabricant d'acier et sont présentées dans les spécifications de fabrication des produits en acier.

Il convient de reconnaître que les spécifications des produits sont un ensemble d'exigences à respecter et ne constituent pas un label pour un type d'acier particulier.

EN 10025-2:2004		Normes de produit : Désignations antérieures équivalentes correspondant à la norme EN 10025-2										Normes pour le calcul des structures en acier : Désignations antérieures équivalentes correspondant à la norme EN 1993		
		Autriche	Belgique	Finlande	France	Allemagne	Italie	Pays-Bas	Norvège	Portugal	Roumanie	Espagne	Suède	Royaume-Uni
EN 10025-1990 +A1:1993	EN 10025:1990	M 3116	NEIN A 21-101	SFS 200	NF A 35-501	DIN 17100	UNI 7070	Euro norme 25-72	DIN 17100	NP 1729	STAS 500/2-76	UNE 36-080	SS 14 suiv/ du numéro de la nuance d'acier	BS 4360
S235,IR	Fe 360 B	AE 235-B	E 24-2	St 37-2	Fe 360 B	Fe 3100	St 37-2	Fe 360-B	OL37-1/1a/1b	13 11-00				
S235,IRG1	Fe 360 BFU	USI 360 B	Fe 37 B	USI 37-2	Fe 360 A	Fe 360 BFU	USI 37-2	Fe 360-B	AE 235-B-FU	13 12-00	40 B			
S235,IRG2	Fe 360 BFN	RUE 360 B	AE 235-C	E 24-3	St 37-3 U	Fe 360 C	Fe 360 BFN	St 37-3 U	AE 235-B-FN	40 °C				
S235,JO	Fe 360 C	RUE 360 C	St 360 de notre ère	AE 235-D	E24-4	St 37-3 N	Fe 360 D	Fe 360 CFN	AE 235-C	40 D				
S235,PG3	Fe 360 D1	RUE 360 D		—				Fe 360 DFN	AE 235 D					
S235,JO2	Fe 360 D2	RUE 360 D2							OL37-4kf					
S275,IR	Fe 430 B	AE 255-B	Fe 44 B	E 28-2	SAINT 44-2	Fe 430 B	St 44-2	Fe 430-B	AE 235-B					
S275,JO	Fe 430 C	AE 255-C	Fe 44 C	E 28-3	SI 44-3 U	Fe 430 C	Fe 430 BFN	SI 44-3 U	AE 235-C					
S275,PG3	Fe 430 D1	AE 255-D	Fe 44 D	E 28-4	SI 44-3 N	Fe 430 D	Fe 430 CFN	SI 44-3 N	AE 235-C					
S275,JO2	Fe 430 D2	RUE 430 D		—				Fe 430 DFN	AE 235 D					
S355,IR	Fe 510 B	AE 355-B	Fe 52 C	E 36-2	St 52-3 U	Fe 510 B	Fe 510 BFN	—	OL44-4kf					
Réf. Réf.	Fe 510 C	AE 355-C	Fe 52 D	E 36-3	St 52-3 N	Fe 510 C	Fe 510 CFN	St 52-3 U	OL44-4kf					
S355,JO	Fe 510 D1	RUE 510 D	AE 355-D	—		Fe 510 D	Fe 510 DFN	St 52-3 N	OL52-22k					
S355,PG3	Fe 510 D2	RUE 510 D2	AE 355-DD	E 36-4	—			Fe 510 DDFN	AE 355 B					
S355,JO2	Fe 510 D2	RUE 510 D2	Fe 510 DD2	—				Fe 510 DD	AE 355 C					
S355,JO2	Fe 510 D2	RUE 510 D2	Fe 510 DD2	—				Fe 510 DD	AE 355 D					
EN 1993-1:1992	EN 1993-1-1:1992	ÖNORM B 4300	NBN 21/1970 et NBN 1/27-071:1987	Collection du Code de bâtiment B7	Regles CM96	DIN 1880	NEN 6770-1984 partie 2 (1997-2012)	NS 3472 : 1984 partie 1 (1990-1997)	STAS 10/10890-78	NEN 6770, NEN 3451 (1972-1990) N 1055 (1955-1972)	NEN 10/10890-10X et 11X (avant 1996) NEN EA-95 (après 1996)	NEN 10/10890-10X et 11X (avant 1996) NEN EA-95 (après 1996)	BSK 99 Manuels SIBK-NX, X 1, 2, 3, 4, 5	BS 449 (avant 1985) BS 5960 (après 1985)

Fig. 4.1 Produits nationaux et normes de conception structurale avant 2004

Les nuances d'acier largement utilisées, S235, S275 et S355, sont conformes à des normes communes depuis les années 1970 et possèdent des propriétés comparables à celles des aciers de construction couramment utilisés aujourd'hui. Si un produit laminé à chaud est étiqueté comme étant conforme à une autre spécification, la différence peut se limiter au type et à la quantité d'essais requis par cette autre spécification. Par conséquent, un examen plus approfondi permettra de déterminer si les composants structuraux répondent aux exigences de l'utilisateur.

4.1.2 Normes de conception et de calcul

La première norme européenne pour la conception des structures en acier a été publiée en 1992, sous la forme d'une prénorme ENV 1993-1-1 [49]. Elle était destinée à servir de cadre à l'élaboration de spécifications techniques pour les produits de construction dans les différents pays européens. Ces normes de conception étaient utilisées avec un document d'application national (DAN) valable dans le pays où le bâtiment était situé. Plus tard, cet ENV a été converti en norme européenne (EN), EN 1993 ou Eurocode 3, et les DAN sont devenus des annexes nationales (AN). Depuis 2005, les Eurocodes ont été de plus en plus appliqués dans tous les pays européens et ont généralement remplacé toutes les normes nationales de calcul des structures (voir Fig. 4.1). Les Eurocodes permettent également de garantir la sécurité publique dans l'ensemble de l'UE.

Il est également important de noter que l'Eurocode 3 est référencé dans les normes produit, en particulier l'EN 1090-1, pour permettre au marquage CE de soutenir le règlement sur les produits de construction (CPR) [50].

4.2 Aciers de construction formés à froid

En Europe, le comité ECCS TC7 a initialement produit les recommandations européennes pour le calcul des éléments minces en acier en 1987 [52], suivies par l'ENV 1993-1-3: 1996 [53]. Cette recommandation a été développée et publiée en 2006 sous la forme de la norme européenne Eurocode 3 : Conception des structures en acier. Partie 1-3 : Règles générales. Règles complémentaires pour les éléments et tôles minces formés à froid [17]. L'EN 1993-1-3: 2006 représente la norme européenne unifiée pour la conception des structures en acier formé à froid et contient des dispositions spécifiques pour les applications structurales utilisant des produits en acier formé à froid fabriqués à partir de tôles et bandes minces revêtues ou non revêtues, laminées à chaud ou à froid. Elle est destinée à être utilisée pour la conception de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil en plus des normes EN 1993-1-1 et EN 1993-1-5. L'EN 1993-1-3 n'autorise que la conception selon la méthode des états limites (LSD).

La norme EN 1993-1-3 inclut au chapitre 10 des critères de conception pour les applications suivantes :

- poutres tenues par des bacs ;
- conception du diaphragme ;
- tôle perforée.

La technologie du formage à froid permet de produire des formes de section fabriquées sur mesure. Cependant, l'analyse et la conception structurale d'éléments inhabituels peuvent être complexes. Les systèmes structuraux constitués de différentes sections formées à froid reliées entre elles (par exemple, les pannes et les tôles) peuvent également donner lieu à

des situations de conception complexes, qui ne sont pas entièrement couvertes par les normes de conception. L'analyse numérique par éléments finis est toujours une alternative pour la conception, mais dans de nombreuses situations pratiques, la modélisation peut s'avérer compliquée. Pour ces problèmes de conception complexes, les normes de conception modernes autorisent l'utilisation de procédures d'essai pour évaluer les performances structurales. Les essais peuvent remplacer la conception basée sur les calculs ou être utilisés en combinaison avec les calculs. Seuls les laboratoires accrédités peuvent effectuer ces essais et produire la justification nécessaire.

5 ÉVALUATION DE LA RÉEMPLOYABILITÉ DES STRUCTURES EN ACIER

La faisabilité de réemploi de la plupart des composants structuraux, des assemblages ou des produits constitutifs peut être estimée dès le diagnostic de pré-déconstruction. Cela influencera grandement la planification de la déconstruction, y compris les outils et les techniques à utiliser sur le site. Les règles générales du diagnostic sont présentées dans le nouveau protocole de gestion des déchets de construction et de démolition de l'UE, y compris les lignes directrices pour les diagnostics de pré-démolition et de pré-rénovation [51] et des conseils plus spécifiques pour la charpente métallique sont fournis par le projet PROGRESS dans le protocole de diagnostic de pré-déconstruction (chapitre 3) [43].

5.1 Paramètres influençant le réemploi

Un aspect important de l'évaluation de l'acier de construction en vue de son réemploi est l'absence d'endommagement non acceptable au moment de la récupération. Par conséquent, les éléments de structure ne doivent pas présenter d'imperfections significatives ou de déformations permanentes, ni de dommages locaux, ni de déformations plastiques, ni de sections transversales réduites de manière excessive (par exemple, par des trous, des ouvertures, des fissures ou une corrosion excessive) et ne doivent pas avoir été soumis à des événements extrêmes tels que des chocs ou de la fatigue, ni avoir été endommagés par le feu.

La détérioration est la réduction des caractéristiques et/ou de la taille du matériau en raison de ses conditions d'exposition. Par exemple, un élément en acier peut souffrir de corrosion dans des conditions d'exposition défavorables, ce qui réduit ses propriétés géométriques. Un défaut est une réduction de la capacité structurale dans les cas où les charges ont dépassé la capacité structurale, ou en raison d'un impact local, d'un perçage ou d'un soudage. Les dommages sont le résultat de charges extrêmes qui n'ont pas pu être raisonnablement prévues ou prises en compte, par exemple une charge sismique extrême, un impact (par exemple d'un véhicule), un souffle ou une explosion.

L'acier ne subit pas de modifications majeures dues au vieillissement, à l'exception de la rouille superficielle et de l'effet éventuel des déformations plastiques. La corrosion peut être évitée par une protection appropriée qui comprend la préparation et l'application de systèmes de peinture de surface ou de revêtements métalliques par pulvérisation thermique ou galvanisation.

Le vieillissement du matériau est la détérioration progressive (en raison du temps ou de l'utilisation) principalement des propriétés mécaniques et physiques. Il existe deux types fondamentaux de vieillissement : la fragilisation par vieillissement thermique et le vieillissement par déformation. La fragilisation par vieillissement thermique représente un processus de changement des propriétés des matériaux dû à la désintégration d'une solution de ferrite solide sursaturée sur une longue période sans charge mécanique externe. Ce phénomène peut se produire en particulier dans les aciers à faible teneur en carbone, c'est-à-dire jusqu'à 0,2 % de carbone, et entraîne progressivement une diminution de la ductilité et de la ténacité à la rupture du matériau, une augmentation de la température de transition et une augmentation des limites inférieure et supérieure de la ténacité. Le vieillissement par déformation fait référence à un processus consistant en des changements

dans les propriétés des matériaux après et/ou pendant la déformation plastique. Il existe deux types de vieillissement par déformation : le vieillissement par déformation statique, par exemple lors du tassement des fondations, où les propriétés des matériaux changent après que les éléments ont subi des déformations plastiques, et le vieillissement par déformation dynamique, par exemple après des événements sismiques de grande ampleur, où les propriétés des matériaux changent rapidement au cours d'une déformation importante. Le vieillissement par déformation affecte les caractéristiques mécaniques dans le sens où la limite d'élasticité mesurée après le vieillissement est souvent plus élevée, mais la ductilité au moment de la rupture diminue. Les deux phénomènes sont souvent considérés comme combinés et le terme de vieillissement est donc souvent utilisé de manière interchangeable.

La fatigue est définie comme un processus d'accumulation de dommages cycle par cycle dans un matériau qui subit des contraintes et des déformations fluctuantes. Une caractéristique importante de la fatigue est que la charge n'est pas suffisamment élevée pour provoquer une défaillance immédiate. En revanche, la défaillance se produit après un certain nombre de fluctuations de la charge, c'est-à-dire lorsque les dommages accumulés ont atteint un niveau critique. Par exemple, les poutres de roulement pour appareils de levage sont des éléments sujets à la fatigue.

Dans certaines circonstances, l'acier peut fluer en raison de déformations plastiques lentes à haute température, généralement au cours d'un incendie. La résistance au fluage dans la plage de températures où le fluage s'applique est toujours inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

5.2 Approche générale

Le processus global allant de la récupération au réemploi des composants en acier est résumé dans l'organigramme de la Fig. 5.1.

Le champ d'application est limité aux bâtiments construits avec des produits fabriqués après 1970, de sorte que les matériaux sont généralement conformes aux spécifications des produits modernes et aux méthodes de conception à l'état limite prises en compte dans les normes actuelles.

Si un bâtiment devient disponible pour la récupération de l'ossature principale en acier, et éventuellement de ses composants secondaires et de son bardage, un diagnostic de pré-déconstruction doit être effectué avant le démontage du bâtiment. Cela permettra d'identifier les éléments du bâtiment qui peuvent être réemployés. Les diagnostics (ou audits) de pré-déconstruction sont décrits au chapitre 3 du présent document.

Cette inspection initiale du bâtiment permet d'émettre des recommandations sur la possibilité de réemployer les éléments en acier ou de privilégier la démolition. Si les produits en acier peuvent être récupérés, il est important de définir le scénario de réemploi prévu. Dans le cas d'un réemploi délocalisé (ex situ), une décision peut être prise sur le réemploi potentiel de la structure entière ou de ses éléments individuels. Des conseils sur l'évaluation du réemploi des éléments récupérés sont donnés au chapitre 5.1. Les matériaux doivent ensuite être échantillonnés et, si nécessaire, testés conformément au protocole de l'annexe

A. Le réemploi structural des éléments existants est ensuite évalué en fonction des résultats des tests.

Si le réemploi est une option viable sur la base des dimensions, de la qualité et de la quantité des éléments récupérés, la structure du bâtiment peut alors être démontée et tous les éléments doivent être identifiés (par exemple par étiquettes) et mis en lots. Les éléments doivent souvent être nettoyés pour enlever les revêtements et la saleté accumulée, ou soumis à d'autres processus de reconditionnement. Enfin, la conception structurale et la vérification des éléments en acier récupérés et des autres composants sont effectuées pour le scénario de réemploi choisi (voir chapitre 6).

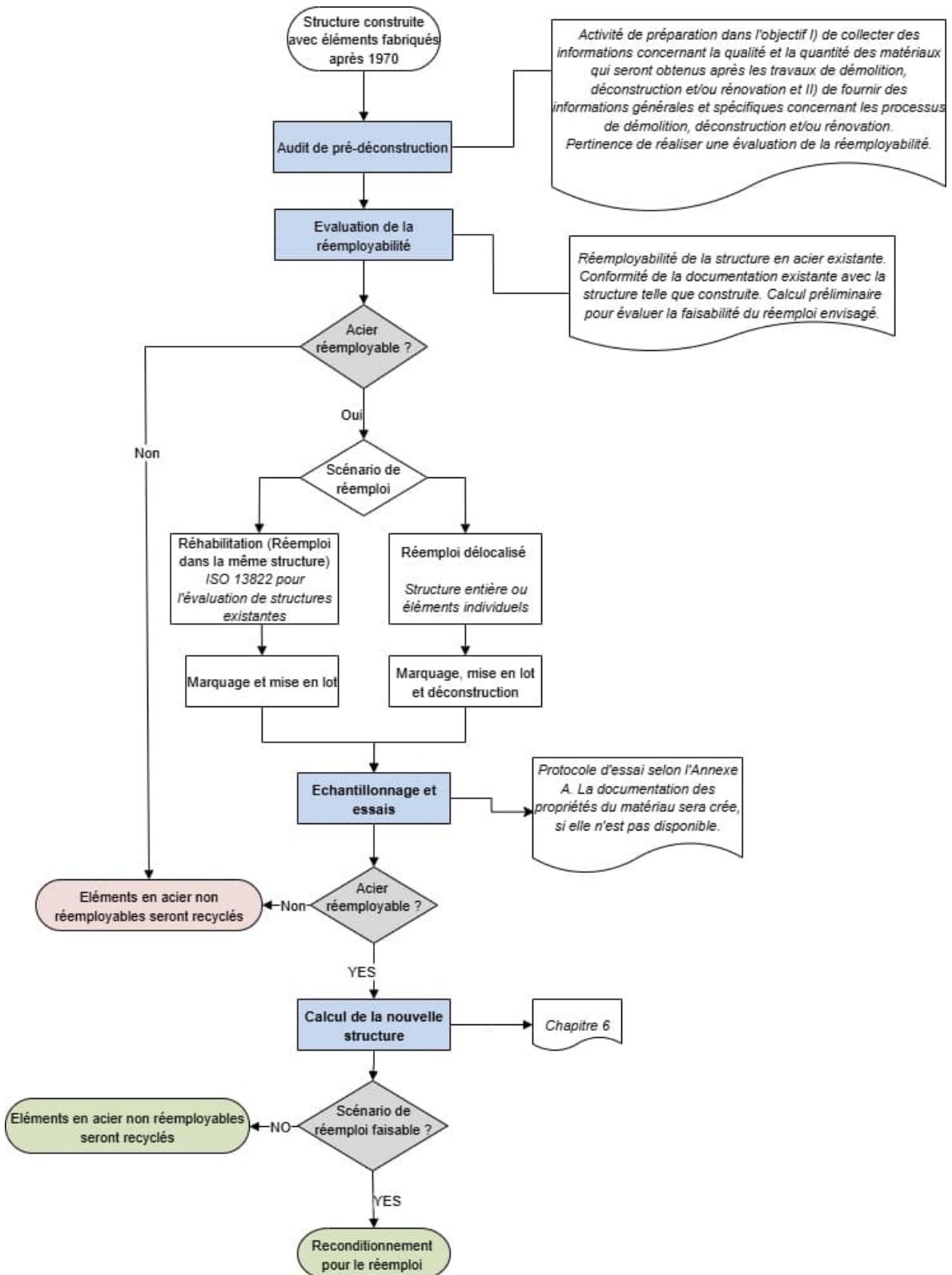


Fig. 5.1 Processus global : de la récupération au réemploi et au calcul des éléments en acier de réemploi

5.3 Procédure de conception

Le calcul des structures fabriquées à partir d'éléments en acier de récupération suit les principes de calcul aux états limites et de vérification à l'aide de la méthode des coefficients partiels qui sont également applicables aux structures fabriquées à partir « d'éléments neufs ». Il existe cependant quelques règles et dispositions supplémentaires, qui sont présentées dans cette partie du document. Les dispositions spécifiques pour vérifier l'intégrité structurale sont dérivées des principes de fiabilité structurale [10].

La Fig. 5.2 donne un aperçu de la philosophie de conception basée sur l'Eurocode.

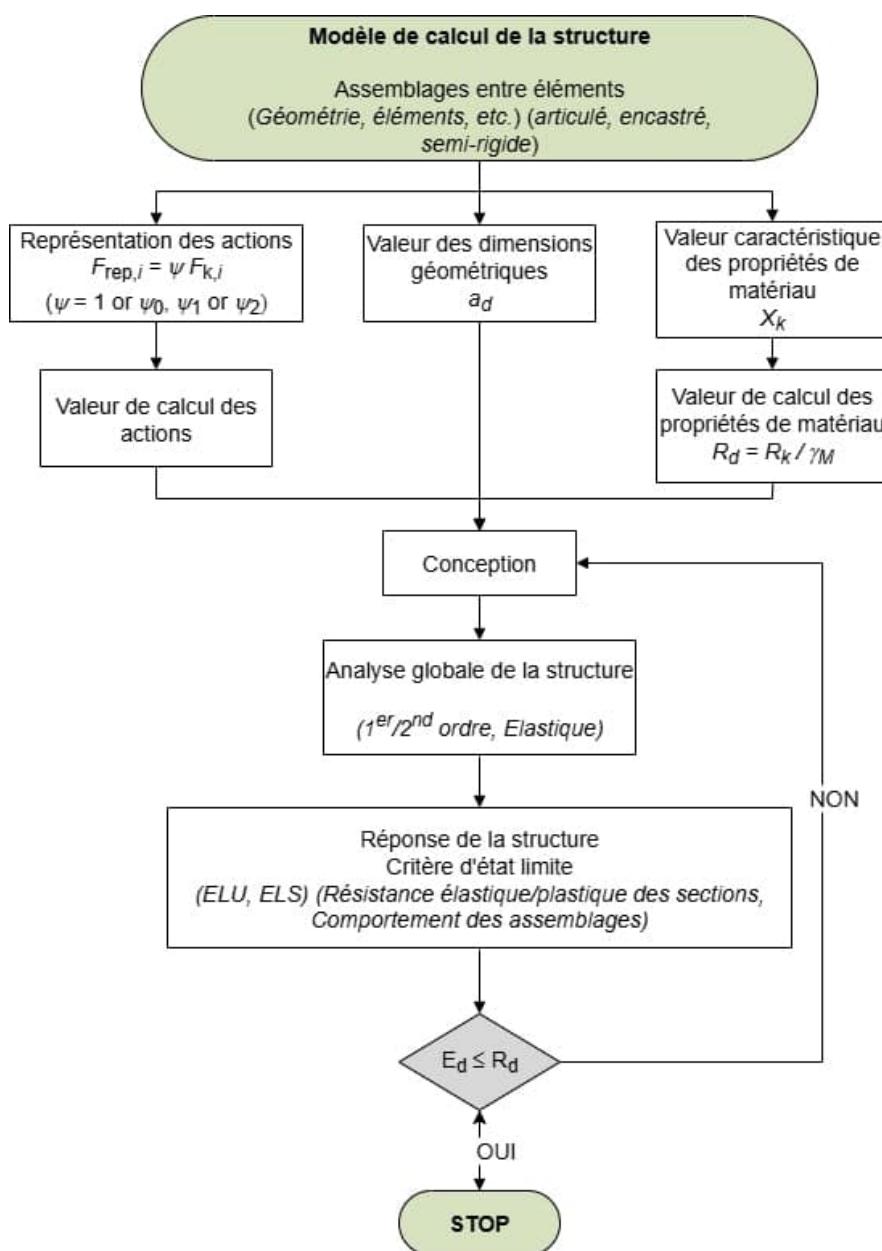


Fig. 5.2 Vue d'ensemble de la procédure de conception de la structure selon l'Eurocode

L'approche de la conception comprend les étapes suivantes en fonction du type de structure et du rôle contractuel du concepteur (pour le compte du client ou du maître d'œuvre) :

- le concepteur choisit un schéma structural viable en fonction des exigences spatiales du bâtiment ;
- les valeurs de calcul des effets des actions, basées sur les normes pertinentes et la géométrie du bâtiment, sont obtenues ;
- les valeurs de calcul des résistances des matériaux sont déterminées pour les éléments de structure en acier, voir section 5.4.1 ;
- l'étude conceptuelle de la structure est réalisée sur la base de ces informations et plusieurs options sont présentées au client ;
- à ce stade, il apparaîtra clairement si l'utilisation éventuelle d'éléments de réemploi en acier est à la fois pratique et viable ;
- la conception finale de la structure est ensuite réalisée en tenant compte des commentaires du client sur le projet conceptuel proposé ;
- le concepteur décide du type d'analyse structurale à adopter. La recommandation pour la conception d'une charpente métallique récupérée est d'adopter une analyse globale élastique ;
- les vérifications des états limites sont effectuées pour déterminer la réponse de la structure. Ces vérifications consistent à contrôler les états limites d'aptitude au service (ELS), c'est-à-dire les flèches du portique et des éléments dans des conditions de charge de service, et les états limites ultimes (ELU), c'est-à-dire la résistance des éléments, ainsi que la stabilité des éléments et du portique.

Si la structure ne répond pas aux nouvelles exigences de conception, le système structural devra être modifié ou renforcé en conséquence.

5.4 Acier de construction pour le réemploi

L'acier de construction récupéré peut être utilisé dans la conception structurale conformément aux dispositions de la norme EN 1993. Pour être conforme à cette norme de conception, le matériau doit répondre à des exigences spécifiques de performance et de qualité, qui sont décrites ci-dessous.

Dans ce contexte, le terme « acier de construction » comprend l'acier des éléments fabriqués à partir de profilés laminés à chaud et leurs assemblages d'extrémité, y compris les fermes fabriquées à partir d'éléments laminés. Les sections fabriquées (soudées), telles que les PRS, peuvent être incluses dans cette définition, mais elles sont souvent conçues pour des conditions de charge spécifiques en matière de taille des soudures, de raidisseurs d'âme, etc. et nécessitent donc des vérifications pour le scénario de réemploi spécifique. Les éléments secondaires fabriqués à partir de sections d'acier formées à froid peuvent également être réemployés, sans modifications ou à des longueurs réduites.

La spécification technique CEN/TS 1090-201 : 2024 [3] fournit des dispositions complémentaires à l'EN 1090-2 pour l'évaluation et les essais des éléments de structure récupérés pour l'exécution de structures en acier jusqu'à EXC3 (voir EN 1090-2). Les dispositions du CEN/TS 1090-201 : 2024 s'appliquent aux produits utilisés dans les structures devant être conçues (voir EN 1993-1-1) pour une charge quasi statique et non soumises à une charge de fatigue. Le document fournit des exigences pour l'évaluation de

la réemployabilité des composants structuraux et des produits constitutifs récupérés. Il comprend également une évaluation générale du réemploi et une évaluation de la qualité des tôles, des profilés laminés à chaud et des sections creuses en acier de construction finies à chaud ou formées à froid, utilisés comme produits constitutifs.

L'évaluation de la qualité comprend la détermination et la déclaration des propriétés mécaniques et géométriques, ainsi que de la soudabilité. Ces propriétés sont celles qui doivent être spécifiées pour les produits non standards conformément à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2. Les dimensions et les tolérances de tous les produits récupérés doivent être mesurées et documentées. Le composant peut être déclaré en référence à un profil standard, si toutes les exigences géométriques sont satisfaites. Les propriétés mécaniques peuvent être déterminées par des essais de dureté non destructifs et, enfin, les propriétés pertinentes sont obtenues par un ou quelques essais destructifs et les résultats sont attribués à tous les éléments du lot d'essai. Enfin, l'acier peut être déclaré selon les qualités définies dans les normes de produit.

Le document CEN/TS 1090-201: 2024 [3] ne s'applique pas aux profilés et tôles en acier formés à froid tels que décrits dans la norme EN 1090-4, ni aux fixations mécaniques.

En plus du document précédent, le document de la référence [54] a été développé pour décrire les questions les plus importantes concernant la conception de nouvelles structures avec de l'acier de construction récupéré conformément à l'EN 1993, y compris le champ d'application, la proposition et les plans d'action. Le champ d'application comprend la conception de composants en acier de construction récupérés en vue de leur réemploi (éléments structuraux uniquement). Il propose également 8 étapes du processus de réemploi. Des descriptions détaillées de ces étapes respectives de la chaîne de processus (étapes PC) sont également données.

5.4.1 Classification de la structure métallique récupérée

Dans le cadre du projet RFCS PROGRESS [55], l'acier récupéré a été classé en fonction de la vérification des exigences de performance des matériaux (évaluation de l'adéquation) et des exigences d'assurance qualité (évaluation de la fiabilité) dans les catégories suivantes :

- **classe A** : matériaux en acier qui répondent aux exigences de performance et dont la qualité a été approuvée par les certificats matière originaux ;
- **classe B** : matériaux en acier qui satisfont à toutes les exigences de performance grâce à des essais exhaustifs sur les matériaux (voir annexe A) et à une assurance qualité approuvée, c'est-à-dire des certificats de conformité aux normes européennes de produits pertinentes, par le biais d'une nouvelle certification ;
- **classe C** : matériaux en acier classés dans la catégorie la plus conservatrice en fonction de l'âge et de la localisation de la structure (acier non identifié).

L'évaluation de l'adéquation vise à justifier les caractéristiques nécessaires/exigées des matériaux conformément à la norme relative aux matériaux/produits ou à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2, tandis que l'évaluation de la fiabilité vise à justifier que l'exigence de fiabilité pour les procédures de conception conformément aux Eurocodes est satisfaite.

Plus tard, le CEN/TS 1090-201: 2024 [3] a proposé quatre protocoles de requalification, de A à D. Les essais destructifs requis sont ajustés en fonction des informations recueillies au

cours du diagnostic. Les recommandations pour le choix d'un protocole spécifique sont données ci-dessous et sont illustrées dans la Fig. 5.3. La provenance de l'acier doit être considérée comme connue lorsque l'on connaît au moins la localisation géographique, l'année de construction et l'ancienne fonction des composants. Deux types d'acier de construction sont pris en compte, à savoir le type 1 et le type 2.

On peut s'attendre à ce que l'acier de construction de type 1 ait des propriétés mécaniques et une soudabilité similaires à celles des nuances d'acier conformes aux normes européennes énumérées dans la clause 5.3 de la norme EN 1090-2: 2018+A1: 2024. On peut supposer que la variabilité de leurs propriétés mécaniques est conforme à l'annexe E de la norme EN 1993-1-1. Les produits récupérés sur des structures construites en 1970 ou après sont considérés comme étant constitués d'acier « moderne », appelé acier de type 1.

Pour l'acier de construction de type 2, la variabilité des propriétés ne peut pas être prise en compte de manière fiable, et il convient d'effectuer davantage d'essais ainsi qu'une analyse statistique des résultats, conformément au protocole C du paragraphe 5.3.4.5 des spécifications techniques CEN/TS 1090-201: 2024.

Les composants structuraux de provenance inconnue ne doivent pas être regroupés en unités d'essai (lots de contrôle) et des essais complets sont requis, conformément au protocole D de la section 5.3.4.6 du CEN/TS 1090-201: 2024.

5.4.2 Exigences en matière de performance des matériaux

La norme EN 1090-2 pour l'exécution des structures en acier (c'est-à-dire la fabrication et le montage) permet de spécifier l'acier et les sections qui ne sont pas couverts par les normes européennes pour les produits constitutifs. Les propriétés mécaniques suivantes doivent être déterminées conformément à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2 [9] :

- la résistance, c'est-à-dire la limite d'élasticité, f_y , et la résistance à la traction, f_u ;
- l'allongement après rupture, δ , qui donne des informations sur l'ampleur de la déformation du matériau ;
- condition de livraison concernant le traitement thermique.

La nuance d'acier doit être comprise entre S235 et S700. Les exigences de ductilité pour la conception selon l'EN 1993-1-1 sont présentées dans le Tableau 5.1 (valeurs recommandées pouvant être modifiées par les autorités nationales).

Tableau 5.1. Exigences de ductilité (valeurs recommandées par le CEN)

	Rapport f_u/f_y	Allongement à la rupture
Pour l'analyse globale plastique	≥ 1.10	$\geq 15 \%$
Pour l'analyse globale élastique	≥ 1.05	$\geq 12 \%$

La norme EN 1090-2 indique également que la caractérisation des propriétés suivantes peut être exigée, mais n'est pas obligatoire :

- exigences vis-à-vis de la striction ;
- résistance aux chocs ou ténacité ;

- exigences dans le sens de l'épaisseur (qualité Z) ;
- limites des discontinuités internes ou des fissures dans les zones à souder.

Lorsque le soudage de la structure en acier récupéré est prévu, la composition chimique doit être déterminée afin de préparer la spécification de la procédure de soudage. Il existe des techniques de contrôle non destructif très simples pour déterminer la composition de l'acier, telles que la technique de spectrométrie des métaux (voir annexe A). La caractérisation complète de la composition chimique est également nécessaire, et le matériau récupéré doit être caractérisé en raison de l'absence de certificats originaux. La soudabilité de l'acier doit être déclarée comme suit [9] :

- classification selon le système de classification des matériaux défini dans la norme CEN ISO/TR 15608 [56] ;
- ou une limite maximale pour le carbone équivalent ;
- ou une déclaration de sa composition chimique suffisamment détaillée pour permettre le calcul de son carbone équivalent.

5.4.3 Exigences en matière d'assurance qualité

L'acier récupéré doit répondre à certaines exigences de qualité et de sécurité afin d'être caractérisé pour garantir sa capacité à être utilisé dans la conception structurale sur la base de la norme EN 1993. La principale question à laquelle il faut répondre est la suivante : « Selon quelle norme de produit spécifique le matériau a-t-il été fabriqué ? », afin de vérifier la conformité, la qualité et la traçabilité du produit.

La traçabilité des matériaux est la capacité de remonter à la source d'un matériau d'acier spécifique jusqu'à son identité d'origine tel qu'il a été livré par l'usine, grâce à un système d'identification et d'assurance qualité approprié. Les fournisseurs et les fabricants qui ont l'intention de récupérer des matériaux de construction en acier doivent mettre en place un système interne d'assurance qualité pour garantir la traçabilité de ces matériaux. Chaque élément en acier doit être marqué d'un numéro d'identification unique pour lequel des contrôles de qualité sont effectués et enregistrés. Cette identification unique facilitera les références ultérieures au certificat de contrôle de la production en usine, au certificat d'essai du fabricant, au dossier d'inspection et/ou au rapport d'essai, sans qu'il y ait de confusion.

Si les certificats matière sont disponibles, il est possible de remonter jusqu'aux composants en acier récupérés pour vérifier qu'ils répondent aux spécifications techniques et normes produit.

Les nouveaux matériaux en acier sont fournis avec une déclaration de performance (DOP) valide et un certificat matière du fabricant basé sur la spécification de livraison. En revanche, ceci n'est pas le cas pour un acier récupéré. Par conséquent, le réemploi du matériau est autorisé moyennant une vérification satisfaisante de sa capacité de réemploi.

5.4.4 Propriétés de l'acier à déclarer pour les éléments récupérés en acier laminé à chaud

Cette section résume les propriétés de l'acier qui doivent être évaluées pour les éléments en acier laminé à chaud récupérés conformément à la clause 5.1 de la norme EN1090-2 (y

compris les sections creuses – Tableau 5.2). D'autres commentaires sur ces propriétés sont également fournis.

La résistance

La limite d'élasticité et la résistance ultime à la traction doivent être déterminées et évaluées conformément à l'annexe A. Ces valeurs déclarées pour l'acier de construction récupéré à utiliser pour la conception doivent être définies en fonction d'une nuance d'acier spécifiée par la norme de référence du produit (par exemple S275) qui garantit les exigences de fiabilité (voir l'annexe A).

Déformation à la rupture

L'utilisation de la charpente métallique récupérée est limitée aux applications où une ductilité significative n'est pas requise (c'est-à-dire analyse globale élastique, pas d'utilisation dans un système sismique primaire, conception DCL). Cependant, l'allongement doit être évalué conformément à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2, c'est-à-dire à l'aide d'un essai de traction destructif. Sur la base des données historiques, il n'y a pas lieu de craindre que l'acier de construction récupéré sur des bâtiments construits après 1970 ne réponde pas aux exigences de conception de l'Eurocode 3 (voir Tableau 5.1) – [57] à [59]. L'exigence d'allongement minimum pour l'acier récupéré est tirée du Tableau 5.1 et non de la norme de référence du produit.

Tableau 5.2. Propriétés des matériaux à déclarer conformément à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2

Propriété	À déclarer	Procédure
Résistance	Oui	Déterminée par des essais destructifs et non destructifs
Déformation à la rupture	Oui	Déterminée par des essais destructifs
Exigences vis-à-vis de la striction	Si nécessaire	En général, il n'est pas nécessaire de les déclarer
Tolérances sur les dimensions et la forme	Oui	Sur la base de mesures dimensionnelles
Résistance aux chocs ou ténacité	Si nécessaire	Si nécessaire, déterminée par des essais destructifs. Hypothèse conservatrice par défaut
Traitement thermique – Condition de livraison	Oui	Hypothèse conservatrice par défaut
Exigences dans le sens de l'épaisseur (Qualité Z)	Si nécessaire	En général, il n'est pas nécessaire de les déclarer
Limites des discontinuités internes ou des fissures dans les zones à souder	Si nécessaire	En général, il n'est pas nécessaire de les déclarer

En outre, si l'acier doit être soudé, sa soudabilité doit être déclarée comme suit :

Propriété	À déclarer	Procédure
Classification selon le système de classification des matériaux défini dans la norme CEN ISO/TR 15608	-	Non applicable à la charpente métallique récupérée
Option 1 : Une limite maximale pour le carbone équivalent de l'acier	Oui	Maximum à déclarer sur la base des certificats d'essai du fabricant
Option 2 : Une déclaration de la composition chimique suffisamment détaillée pour permettre le calcul de son carbone équivalent.	Oui	Déterminée par des essais non destructifs et destructifs

Tolérances sur les dimensions et la forme

Les éléments récupérés peuvent être vérifiés par rapport aux tolérances géométriques conformément à la norme de produit pertinente (voir

Tableau 5.4). Les éléments qui se situent dans les tolérances admissibles sont acceptables et satisfont aux hypothèses formulées dans la norme de conception. Cependant, il n'y a pas de limitation à l'utilisation de charpentes métalliques de récupération avec des dimensions sur mesure, c'est-à-dire des éléments pour lesquels les tolérances du

Tableau 5.4 ne sont pas respectées, tant que la conception prend en compte les propriétés mesurées de la section plutôt que les dimensions standards de la section figurant dans le tableau. Les imperfections de rectitude de l'élément et de la section transversale (comme les défauts d'équerrage ou de planéité) doivent toujours être conformes aux exigences de la norme EN 1090-2.

Exigences dans le sens de l'épaisseur (qualité Z)

Les propriétés dans le sens de l'épaisseur (qualité Z) ne sont généralement pas requises pour les sections récupérées, telles que les poutres ou les poteaux. Certains détails/composants de joints peuvent exiger que la tôle d'acier ait des qualités Z spécifiques [63]. Si des qualités Z sont requises, la tôle récupérée doit être testée comme spécifié dans la norme EN 1993-1-10 [19].

Résistance aux chocs ou ténacité

La résistance à l'impact ou la ténacité (communément appelée valeur Charpy) peut être exigée pour un projet spécifique, par exemple pour des éléments épais et fortement sollicités, en particulier lorsqu'ils sont exposés à de basses températures. Pour les charpentes métalliques internes qui ne sont pas soumises à la fatigue, on peut adopter une hypothèse conservatrice concernant la ténacité du matériau, ce qui signifie qu'une valeur minimale d'impact Charpy en V de 27J à 20 °C peut être supposée si aucun essai n'est effectué (qualité JR) – [57] à [59]. Si la ténacité du matériau doit être déterminée, des essais destructifs sont requis conformément à la norme pertinente (voir l'annexe A).

Traitements thermiques – Condition de livraison

Les conditions de livraison de traitement thermique ont un impact, par exemple, sur la taille des grains, les contraintes résiduelles, etc. Dans le cadre du présent document, cette condition aura des implications pour les sections creuses récupérées. Les sections creuses destinées aux applications structurales sont formées à froid conformément à la norme EN 10219 ou finies à chaud conformément à la norme EN 10210. Les conditions de livraison de traitement thermique influencent le niveau des contraintes résiduelles dans la section creuse, et cela a des conséquences sur la résistance au flambement de l'élément. Comme la mesure de ces propriétés n'est pas économiquement réalisable, il est recommandé de considérer que toutes les sections creuses récupérées sont formées à froid conformément à la norme EN 10219.

Déclaration de composition chimique

La composition chimique est nécessaire pour établir la durabilité et la soudabilité de l'acier de construction récupéré. Une déclaration de composition chimique basée sur des essais est

nécessaire (voir annexe A). Il est nécessaire que la composition chimique détaille certains éléments chimiques conformément à la norme produit pertinente (EN 10025-2/3-4, clause 7.2 ou EN 10219-1, clause 6.6), à partir de laquelle la valeur équivalente en carbone (CEV) peut être calculée.

5.4.5 Évaluation des propriétés des matériaux

En général, l'acier récupéré est évalué en fonction de son adéquation et de sa fiabilité, qui sont étroitement liées. L'acier doit généralement être évalué, c'est-à-dire que les propriétés réelles du matériau doivent être examinées par rapport aux exigences de performance du matériau. En l'absence de telles informations, des essais de matériaux doivent être réalisés à l'aide de méthodes d'échantillonnage et d'essai appropriées, afin de démontrer l'adéquation du matériau. L'évaluation de la fiabilité vise à garantir que les produits structuraux sont fabriqués dans le cadre d'un système d'assurance qualité rigoureux et qu'ils satisfont aux exigences en matière d'assurance qualité.

Les matériaux peuvent être classés à l'issue de ces évaluations, qui sont évidemment interdépendantes, selon le système proposé ci-dessus et conformément à l'organigramme présenté dans la Fig. 5.3. La classification est nécessaire pour déterminer si le matériau en acier recyclé peut être autorisé pour une utilisation structurale conformément à l'EN 1993, avec ou sans restriction.

Les quatre protocoles [3], A à D, sont définis pour l'évaluation des propriétés des matériaux :

- **protocole A** : documentation disponible (acier de construction de type 1 avec documents d'inspection originaux) ;
- **protocole B** : échantillon unique DT (acier de construction de type 1 dont la provenance est connue) ;
- **protocole C** : DT statistiquement représentatif (acier de construction de type 2 dont la provenance est connue) ;
- **protocole D** : DT complet (acier de construction de provenance inconnue).

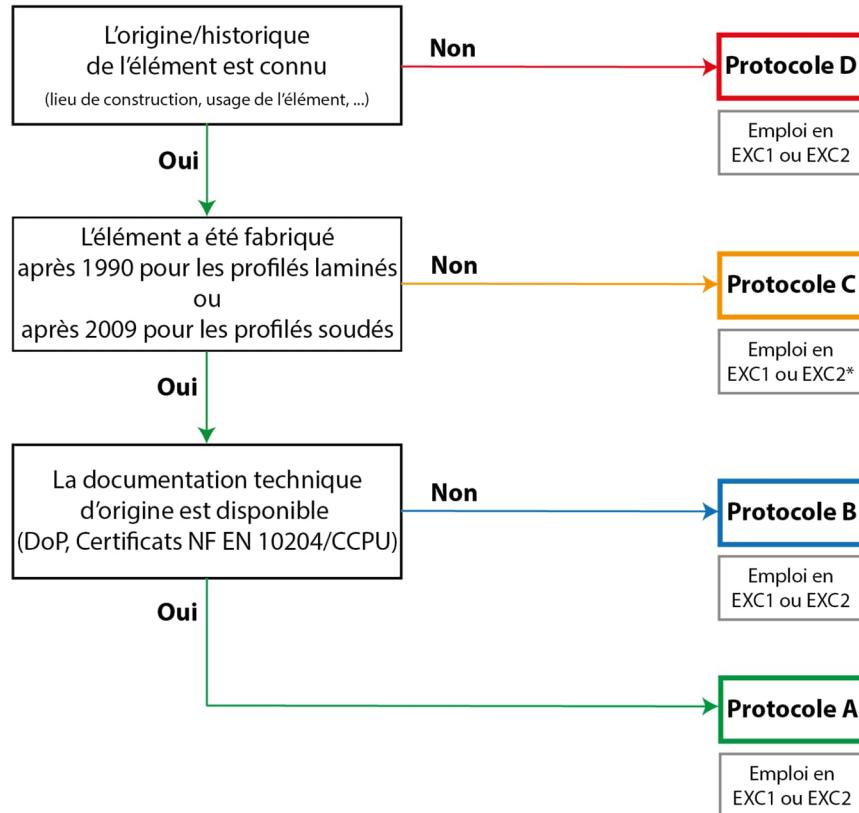


Fig. 5.3 Organigramme pour le choix du protocole de requalification [2]

Le **protocole A** : documentation disponible (acier de construction de type 1 avec documents de contrôle/certificats matière originaux) couvre le cas des produits qui sont traçables et pour lesquels la documentation originale est disponible. Selon le protocole A, les matériaux en acier peuvent être conçus conformément à la norme EN 1993, car l'évaluation appropriée de l'adéquation et de la fiabilité est justifiée par la documentation existante. Les exemples de charpentes métalliques de classe A comprennent les charpentes métalliques récupérées de différentes sources, pour lesquelles la documentation est disponible. Une procédure d'essai facultative pour l'acier de classe A peut être utilisée pour confirmer la qualité de l'acier récupéré.

Protocole B : échantillon d'essai destructif unique DT (acier de construction de type 1 dont la provenance est connue). Une distinction importante est faite en ce qui concerne l'âge du matériau évalué. Les composants fabriqués plus récemment sont en effet susceptibles d'avoir des propriétés, y compris leur variabilité, correspondant à celles supposées lors de la conception avec les nuances d'acier actuelles. Ces propriétés peuvent être évaluées sur la base d'un seul essai (protocole B). Lorsque le protocole B est appliqué, les propriétés attribuées à tous les éléments d'une unité d'essai peuvent être déclarées comme référence à une nuance d'acier. Les exigences relatives à la limite d'élasticité et à la résistance ultime ci-dessus représentent les fractiles à 95 % sur la base des moyennes et des variances indiquées dans l'annexe E de l'EN 1993-1-1.

La limite d'élasticité et la résistance ultime à la traction peuvent également être déclarées en se référant à une nuance d'acier équivalente pour laquelle la limite d'élasticité et la résistance à la rupture mesurées satisfont aux critères du Tableau 5.3.

Tableau 5.3. Limites minimales d'élasticité et de résistance ultime en traction déterminées sur un seul échantillon pour des nuances d'acier équivalentes

Nuance d'acier équivalente	$R_{eh} \geq$ (MPa)	$R_m \geq$ (MPa)
S235	267	397
S275	313	452
S355	391	505
S420	463	559
S460	490	560

Les limites minimales d'élasticité et de résistance ultime en traction du Tableau 5.3 correspondent aux fractiles de 5 %, en supposant que les propriétés des matériaux sont conformes à la norme EN 1993-1-1: 2022, annexe E.

Protocole C : essais destructifs statistiquement représentatifs (acier de construction de type 2 dont la provenance est connue). Lorsque le protocole C est appliqué, les propriétés caractéristiques attribuées à tous les éléments d'une unité d'essai valide peuvent être basées sur une analyse statistique conformément à l'EN 1990.

Pour les protocoles B et C, la conformité du matériau aux exigences de performance est démontrée par des essais exhaustifs (voir l'annexe A). La procédure d'essai comprend une combinaison d'essais non destructifs et destructifs, par exemple selon la norme EN ISO 6892-1, ainsi qu'une inspection des tolérances géométriques.

Protocole D : essais destructifs individuels (acier de construction de provenance inconnue). Si l'origine des produits récupérés est inconnue, il n'est pas possible de rassembler plusieurs composants dans une unité d'essai et de leur attribuer des propriétés communes. Dans ce cas, le protocole D exige que les composants soient testés individuellement à l'aide de méthodes destructives. Les résultats des essais peuvent alors être utilisés directement, en tant que valeurs caractéristiques, ou comparés aux valeurs nominales d'une norme de produit pertinente. Lorsque la provenance des produits récupérés est connue, les composants peuvent être triés dans des unités d'essai et des essais de dureté non destructifs sont effectués sur tous les éléments d'une unité d'essai afin de sélectionner en toute sécurité les éléments qui feront l'objet d'essais destructifs.

Par ailleurs, si l'acier récupéré reste un acier non identifié, exempt de défauts dommageables, il peut être utilisé pour des structures non critiques du point de vue de la sécurité, par exemple des bâtiments agricoles. Dans ce cas, il faut supposer que l'acier possède les propriétés correspondant à la qualité la plus faible utilisée au moment de sa première utilisation. Les normes de produits et les codes de conception pertinents basés sur la date de construction de la structure peuvent être utilisés.

Après l'évaluation de l'adéquation de la charpente métallique récupérée, une évaluation de la fiabilité est nécessaire pour s'assurer que le produit récupéré peut être utilisé dans la conception

structurale conformément à l'EN 1993-1-1. L'exigence de base de cette évaluation est essentiellement liée au fait que l'EN 1993 s'appuie sur la distribution statistique connue de la limite d'élasticité et de la résistance ultime en traction pour spécifier les coefficients partiels pour les sections transversales et les résistances des éléments qui satisfont aux exigences de fiabilité selon l'EN 1990. Pour entreprendre une telle évaluation, les résultats des essais doivent satisfaire à certaines valeurs minimales pour la limite d'élasticité et la résistance à la traction.

L'annexe A présente un protocole d'évaluation et d'essai qui comprend la définition des groupes d'éléments à tester (unités d'essai), la fréquence des essais, les types de procédures d'essai à utiliser pour entreprendre l'évaluation de l'adéquation et une procédure pour atteindre les exigences de fiabilité adéquates (évaluation de la fiabilité).

5.4.6 Exécution et certification de la structure métallique récupérée

Il n'y aura aucune différence dans les processus de fabrication, les procédures, les normes ou les tolérances, que ce soit pour l'acier neuf ou pour l'acier récupéré. Il est donc approprié que les structures métalliques refabriquées et récupérées puissent être marquées CE conformément à la norme EN 1090-1.

Outre un contrôle minutieux du processus de fabrication, les propriétés des matériaux doivent être déclarées conformément à la clause 5.1 de la norme EN 1090-2 si aucun certificat/documentation n'est disponible. Lors de l'utilisation des éléments en acier récupérés, la déclaration des propriétés conformément à l'article 5.1 de la norme EN 1090-2 peut relever de la responsabilité des stockistes (par exemple plateforme physique d'éléments de réemploi ou matériauthèque). Les plateformes qui souhaitent commercialiser les éléments récupérés dans le secteur de la construction sont tenues de fournir la documentation sur les matériaux équivalente à celle donnée par les fabricants d'acier « neuf ».

Le paragraphe précédent concerne les éléments récupérés simples, sans procédures de soudage. Si les éléments en acier récupéré comportent des parties soudées, les soudures doivent être inspectées et testées pour s'assurer qu'elles répondent aux exigences de fabrication de la norme EN 1090-2.

5.5 Produits constitutifs

5.5.1 Propriétés pertinentes

Dans le contexte du réemploi, un produit constitutif représente un élément individuel extrait d'une structure existante sélectionnée pour être démonté, puis réemployé en tant que nouveau produit pour la fabrication et la construction d'une autre structure. Il peut s'agir de profilés en acier laminés à chaud ou formés à froid.

Les sections, tôles et barres d'acier utilisées comme éléments doivent avoir des dimensions et des tolérances conformes aux normes du Tableau 5.4 et les sections creuses en acier de construction à celles listées dans le Tableau 5.5.

Tableau 5.4. Profilés, tôles ou barres en acier laminé : normes de matériaux et de dimensions

Désignation	Dimensions	Tolérances	Qualité des matériaux			
			Aciers non alliés	Aciers résistant aux intempéries		
Sections I et H	EN 10365	EN 10034	EN 10025-2 ^a EN 10025-3 EN 10025-4	EN 10025-5 ^b		
Profilés en I à ailes inclinées laminés à chaud	EN 10365	EN 10024				
Sections U	EN 10365	EN 10279				
Sections asymétriques laminées	<i>Voir les informations du fabricant.</i>					
Cornières	EN 10056-1	EN 10056-2				
Fers T en acier laminés à chaud	EN 10055	EN 10055				
Sections fabriquées (imperfections comme défaut de rectitude)	—	EN 1090-2				
Tôles en acier laminées à chaud ^c	—	EN 10029				
Tôles issues de larges bandes (découpées dans la bobine) ^c	—	EN 10051				

^a Nuances d'acier S235, S275, S355 et S450. Les nuances d'acier S235 et S275 peuvent être fournies dans les qualités JR, J0 et J2. La nuance d'acier S355 peut être fournie dans les qualités JR, J0, J2 et K2. La nuance d'acier S450 est fournie dans la qualité J0.

^b Nuances d'acier S235 et S355. La nuance d'acier S235 peut être fournie dans les qualités J0W et J2W. La nuance d'acier S355 peut être fournie dans les qualités J0W, J0WP, J2W, J2WP et K2W.

^c Le champ d'application de la norme EN 10029 couvre les tôles de 3 mm à 250 mm laminées à chaud, tandis que la norme EN 10051 couvre les tôles jusqu'à 25 mm déroulées en continu de produits plats non revêtus laminés à chaud.

Tableau 5.5. Sections creuses en acier de construction : normes relatives aux matériaux et aux dimensions

Désignation ^(a)	Dimensions et tolérances	Qualité des matériaux
Profils creux (finis à chaud)	EN 10210-2	EN 10210-1
Sections creuses (formées à froid)	EN 10219-2	EN 10219-1

^(a) Les profilés creux destinés à la construction métallique (finis à chaud et formés à froid) sont fournis en qualité d'acier S235 (qualité JRH), en qualité d'acier S275 (qualités J0H et J2H) et en qualité d'acier S355 (qualités J0H, J2H et K2H).

Note : La sélection de la norme EN 10210 ou EN 10219 spécifie si les sections creuses en acier de construction doivent être finies à chaud ou formées à froid. Les sections creuses finies à chaud selon la norme EN 10210 ne peuvent pas être directement remplacées par des sections creuses formées à froid selon la norme EN 10219, car les propriétés ne correspondent pas directement.

Outre les propriétés géométriques, les caractéristiques des matériaux sont d'une grande importance pour la performance des éléments. La qualité de l'acier peut être obtenue en utilisant les protocoles d'essai indiqués au paragraphe 5.4.5. Ces protocoles peuvent également être utilisés pour définir la ténacité à la rupture de l'acier nécessaire pour satisfaire aux exigences de la norme EN 1993-1-10 [19].

La norme EN 1993-1-10 donne des règles générales de conception pour la sélection des qualités d'acier afin d'éviter les ruptures fragiles en spécifiant les propriétés de ténacité et d'éviter les arrachements lamellaires en spécifiant les propriétés d'épaisseur.

Alternativement, le Tableau 5.6 fournit des épaisseurs maximales de tôle pour la pratique britannique (UK) en supposant que la charpente métallique est soudée avec des détails

« modérés » et « très sévères » conformément aux références [61] et [62] pour un niveau de contrainte égal ou supérieur à $0,5 \times f_y(t)$.

Tableau 5.6. Épaisseur maximale (mm) pour chaque nuance d'acier et chaque désignation (UK)

Détail soudé	Charpente métallique	S235			S275			S355		
		JR	J0	J2	JR	J0	J2	JR	J0	J2
Modéré	Interne	45	82.5	115	40	70	102.5	22.5	45	67.5
	Externe	27.5	67.5	97.5	22.5	60	85	12.5	37.5	55
Très grave	Interne	27.5	45	67.5	22.5	40	60	12.5	22.5	37.5
	Externe	12.5	37.5	55	10	32.5	50	5	17.5	30

Étant donné que le champ d'application du présent document est limité au réemploi de l'acier récupéré, les valeurs d'épaisseur limite proposées par le SCI P419 [62] peuvent être utilisées pour les structures dont la fatigue n'est pas une contrainte de conception. Le document de référence de l'EN 1993-1-10 [19] confirme que les épaisseurs limites peuvent être extrêmement sûres si elles sont utilisées pour des structures non soumises à la fatigue.

SCI P419 [62] adopte les mêmes procédures que l'Eurocode, basées sur l'approche de la mécanique de la rupture, mais réduit la croissance calculée des fissures pour les applications où la fatigue n'est pas une contrainte de conception. Le Tableau 5.8 suit le même format que le tableau 2.1 de l'EN 1993-1-10. Les valeurs du Tableau 5.7 peuvent être utilisées dans d'autres pays que le Royaume-Uni, lorsque la fatigue n'est pas une contrainte de conception, sous réserve des exigences de l'annexe nationale spécifique du pays de construction.

Tableau 5.7. Valeurs limites d'épaisseur lorsque la fatigue n'est pas une contrainte de conception [62]

Steel grade	Sub Grade	Charpy energy CVN at T (°C)	J _{min}	Reference temperature, T _{Ed} (°C)																							
				σ _{Ed} = 0.75 f _y (t)								σ _{Ed} = 0.5 f _y (t)								σ _{Ed} = 0.25 f _y (t)							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S235	JR	20	27	200	200	200	195	125	87	63	200	200	200	200	200	200	161	200	200	200	200	200	200				
	J0	0	27	200	200	200	200	195	125	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	J2	-20	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
S275	JR	20	27	200	200	200	133	91	64	47	200	200	200	200	200	200	170	121	200	200	200	200	200				
	J0	0	27	200	200	200	200	133	91	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	J2	-20	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	M,N	-20	40	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	ML,NL	-50	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
S355	JR	20	27	200	177	114	77	54	40	30	200	200	200	200	147	104	76	200	200	200	200	200	200				
	J0	0	27	200	200	200	177	114	77	54	200	200	200	200	200	200	147	200	200	200	200	200	200				
	J2	-20	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	K2,M,N	-20	40	200	200	200	200	200	200	177	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	ML,NL	-50	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
S460	Q	-20	30	200	200	200	200	147	96	65	200	200	200	200	200	200	187	200	200	200	200	200	200				
	M,N	-20	40	200	200	200	200	147	96	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	QL	-40	30	200	200	200	200	200	200	147	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	ML,NL	-50	27	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				
	QL1	-60	30	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200				

Les documents de contrôle (ou les certificats d'essai) constituent une preuve suffisante que l'élément en acier est conforme à la qualité requise. Dans l'usine de fabrication de l'acier,

le système de contrôle de la qualité appose des marques sous forme de numéros ou de lettres estampillés sur chaque longueur ou lot de produits de manière à pouvoir remonter jusqu'à la coulée et à la ligne de fabrication particulière, jusqu'au point d'assemblage des éléments [64]. Le document de contrôle de chaque lot d'acier est le document le plus important pour le fabricant d'acier, le constructeur, le monteur et l'acheteur ultérieur du composant ou de la structure finie. Outre la composition chimique et les propriétés mécaniques, le document de contrôle doit également mentionner le procédé de fabrication de l'acier et tout traitement thermique appliqué au matériau par le fabricant d'acier.

L'acier dont la qualité n'est pas facilement identifiable doit être testé pour déterminer sa conformité aux normes. Un protocole d'échantillonnage doit être établi afin d'obtenir la connaissance adéquate des matériaux nécessaire à une évaluation fiable (voir l'annexe A). L'acier récupéré non identifié peut être utilisé dans des structures non critiques pour la sécurité, par exemple dans des bâtiments agricoles.

La procédure suivante est proposée pour la vérification du réemploi structural des éléments en acier en tant que produits constitutifs :

- des documents indiquant l'emplacement et la structure du bâtiment où les éléments ont été récupérés, y compris la date de construction du bâtiment d'origine, doivent être fournis pour tous les éléments ;
- tous les produits à réemployer doivent provenir d'une structure construite avec des éléments produits en 1970 ou après, qui n'a pas été exposée à des charges dynamiques importantes ou à d'autres conditions sévères, par exemple un incendie ;
- toutes les surfaces doivent faire l'objet d'une inspection visuelle afin de s'assurer que les surfaces en acier sont exemptes de rouille et qu'il n'y a pas de corrosion excessive (les surfaces nues des éléments doivent être visibles et, par conséquent, toute protection contre le feu doit être enlevée). Dans le cas des sections formées à froid, le cordon de soudure doit être inspecté pour détecter d'éventuels défauts ;
- les revêtements contenant des substances toxiques, telles que le plomb, le cadmium et l'amiante, ainsi que l'écaillage de la surface doivent être éliminés en préparant les surfaces conformément à la norme EN ISO 8501-1 [65] ;
- les éléments en acier récupéré ne doivent pas comporter de goussets soudés (sauf si les soudures sont testées) et ne doivent pas comporter de trous à des endroits où de nouveaux trous doivent être percés dans l'élément (un minimum de 3 fois le diamètre du trou ou de 100 mm est une règle raisonnable pour la distance entre les nouveaux trous et les goussets) ;
- les dimensions des sections (si elles ne sont pas connues) doivent être mesurées et les sections classées, comme indiqué dans les Tableaux 5.4 et 5.5.
- au moins trois endroits le long des éléments doivent être sélectionnés pour la comparaison avec les valeurs nominales ;
- pour les sections transversales ouvertes (profilés à larges ailes en H et en I), la norme EN 10034 spécifie des tolérances sur les dimensions et la forme de ces éléments. Les tolérances suivantes doivent être adoptées : hauteur de la section transversale, largeur de l'aile, épaisseur de l'âme, épaisseur de l'aile, défaut d'équerrage et décentrage de l'âme ;

- pour les sections fermées qui sont des sections creuses circulaires (CHS), carrées (SHS) et rectangulaires (RHS), la norme EN 10219-2 spécifie les tolérances sur les dimensions et la forme des sections creuses en acier de construction formées à froid, tandis que la norme EN 10210-2 spécifie les tolérances sur les dimensions de forme des sections creuses finies à chaud. Les tolérances suivantes doivent être adoptées : dimensions extérieures (CHS et RHS), épaisseur (CHS et RHS), ovalisation (pour CHS), concavité/convexité (pour RHS) et équerrage des parties planes (pour RHS) ;
- les tolérances sur la rectitude de l'élément doivent être conformes à la norme EN 1090-2 et, pour le CHS et le RHS, à la norme EN 10219-2 et à la norme EN 10210-2. Les tolérances sur les sections plus anciennes peuvent être différentes et, par conséquent, un redressement peut être nécessaire, par exemple, voir Tableau 5.8 pour les données historiques du Royaume-Uni et de la Roumanie ;
- les éléments doivent avoir une surface lisse. Toutefois, les bosses, les cavités ou les rainures longitudinales peu profondes résultant du processus de fabrication sont admissibles, à condition que l'épaisseur restante soit dans les limites de la tolérance. Les défauts de surface peuvent être éliminés par meulage, à condition que l'épaisseur de la section transversale après réparation ne soit pas inférieure à l'épaisseur minimale autorisée. Si la dimension réelle après le sablage ou le meulage ne correspond pas aux dimensions nominales moins la tolérance nominale, la section doit être reléguée à la section plus légère suivante ;
- les zones de striction (réduction de la section) ne sont pas autorisées, par exemple dans les connexions et les éléments en traction ;
- les sections récupérées dont la réparation ou le reconditionnement ne sont pas rentables doivent être mises au rebut ;
- l'acier de construction récupéré doit être classé à des fins de conception conformément à la section 5.4.1.

Tableau 5.8. Tolérances géométriques pour les éléments individuels

Produits	Tolérances				
	BS4 UK (1962) [66]	Dorman Long UK (1964) [67]	NSSS UK (1994) [68]	EN 1090-2 Europe (2018) [9]	STAS 767 RO (1988) [69]
Poutre	L/960	L/960	L/1000 ou 3 mm	L/1000	
Poteau jusqu'à (mais pas plus) 9,14 m	L/714	L/960	L/1000 ou 3 mm	L/1000	
Poteau jusqu'à 13,72 m	L/960	L/960	L/1000 ou 3 mm	L/1000	L/1000, mais max. de 15 mm
Poteaux supérieurs ≥ 13,72 m	L/960 - 4,75 mm	L/960 + 9,5 mm	L/1000 ou 3 mm	L/1000	

5.5.2 Fiabilité

La fiabilité des méthodes de conception de l'Eurocode 3 est garantie par l'utilisation de coefficients partiels. Les valeurs recommandées de ces coefficients sont définies dans la

partie correspondante de l'Eurocode 3 et dans les annexes nationales respectives. Aucune information spécifique n'est actuellement fournie pour les sections de réemploi en état.

Si les protocoles d'essai et les exigences définis dans le CEN/TS 1090-201: 2024 [3] sont respectés, il semble raisonnable d'appliquer les mêmes coefficients partiels tant qu'il n'existe pas d'autres dispositions au niveau national.

Il est également important de noter que la norme EN 1993-1-1: 2022, annexe E [16] fournit les propriétés statistiques des caractéristiques géométriques et de matériau qui ont été supposées lors de la détermination des valeurs actuelles des coefficients partiels.

Les bandes de dispersion supposées (valeurs moyennes, coefficients de variation) pour les propriétés dimensionnelles sont indiquées dans le tableau E.2. Pour les propriétés dimensionnelles qui ne sont pas spécifiquement mentionnées dans le tableau E.2, on suppose que les valeurs moyennes sont égales aux valeurs nominales et que les écarts types sont égaux à la moitié de l'intervalle entre la valeur nominale et la limite inférieure de l'intervalle de tolérance applicable dans la norme EN 1090-2 ou dans d'autres normes de produit pertinentes. Les valeurs figurant dans le Tableau 5.9 (tableau E.2 de [16]) représentent les produits actuellement disponibles sur le marché européen qui satisfont aux normes produit européennes pertinentes.

Tableau 5.9. Variabilité supposée des propriétés dimensionnelles [16]

Type de dimension	Paramètres	Valeur moyenne	Coefficient de variation	Valeur de référence supérieure	Valeur de référence inférieure
		X_m		$X_5 \%$	$X_{0.12} \%$
Dimensions extérieures de la section transversale	Hauteur h	1,0 h_{nom}^a	0.9 %	0,98 h_{nom}^a	0,97 h_{nom}^a
	Largeur b	1,0 b_{nom}^a	0.9 %	0,98 b_{nom}^a	0,97 b_{nom}^a
	Diamètre extérieur d'une section creuse circulaire	1,0 d_{nom}^a	0.5 %	0,99 d_{nom}^a	0,98 d_{nom}^a
Épaisseur	Profilés laminés et soudés en I et en H : épaisseur de la semelle t_f	0,98 $t_{f,\text{nom}}^a$	2.5 %	0,95 $t_{f,\text{nom}}^a$	0,91 $t_{f,\text{nom}}^a$
	Profilés laminés et soudés en I et en H : épaisseur de l'âme t_w	1,0 $t_{w,\text{nom}}^a$	2.5 %	0,96 $t_{w,\text{nom}}^a$	0,93 $t_{w,\text{nom}}^a$
	Profilés creux selon EN 10210 (toutes les parties) : épaisseur de paroi t	0,99 t_{nom}^a	2.5 %	0,95 t_{nom}^a	0,92 t_{nom}^a
	Profilés creux selon EN 10219 (toutes les parties) : épaisseur de paroi t	0,99 t_{nom}^a	2.5 %	0,95 t_{nom}^a	0,92 t_{nom}^a
	Toutes les autres sections soudées fabriquées à partir de tôles fortes : épaisseur t	0,99 t_{nom}^a	2.5 %	0,95 t_{nom}^a	0,92 t_{nom}^a

^a Dimensions nominales conformes à la norme ou à la spécification applicable au produit.

Le Tableau 5.10 indique les propriétés statistiques supposées pour les propriétés des matériaux, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture.

Tableau 5.10. Variabilité supposée des propriétés des matériaux [16]

Paramètres	Nuance d'acier	Valeur moyenne	Coefficient de variation	Valeur de référence supérieure	Valeur de référence inférieure
		X_m		$X_5 \%$	$X_{0.12} \%$
Limite d'élasticité, f_y	S235, S275	1,25 $R_{eH,min}^a$	5,5 %	1,14 $R_{eH,min}^a$	1,06 $R_{eH,min}$
	S355, S420	1,20 $R_{eH,min}^a$	5,0 %	1,1 $R_{eH,min}^a$	1,03 $R_{eH,min}$
	S460	1,15 $R_{eH,min}^a$	4,5 %	1,07 $R_{eH,min}^a$	1,00 $R_{eH,min}$
	Au-dessus de S460	1,10 $R_{eH,min}^a$	3,5 %	1,04 $R_{eH,min}^a$	1,00 $R_{eH,min}$
Résistance ultime en traction, f_u	S235, S275	1,20 $R_{m,min}^a$	5,0 %	1,11 $R_{m,min}^a$	1,03 $R_{m,min}$
	S355, S420	1,15 $R_{m,min}^a$	4,0 %	1,08 $R_{m,min}^a$	1,03 $R_{m,min}$
	S460 et plus	1,10 $R_{m,min}^a$	3,5 %	1,04 $R_{m,min}^a$	1,00 $R_{m,min}$
Module d'élasticité, E	Toutes les nuances d'acier	210 000 MPa	3,0 %	200 000 MPa	192 000 MPa

^a $R_{eH,min}$ et $R_{m,min}$ sont la limite d'élasticité minimale R_{eH} et la limite inférieure de la résistance ultime à la traction R_m , conformément à la norme de produit applicable, par exemple EN 10025 (toutes les parties).

Si l'évaluation des propriétés des éléments donne des propriétés statistiques similaires pour les éléments récupérés, il semble de nouveau raisonnable d'appliquer les valeurs des coefficients partiels généralement utilisés pour les éléments neufs, à condition que les tolérances géométriques, telles que les défauts de rectitude ou de planéité, respectent également les normes du produit.

5.6 Éléments de structure ou ensemble de l'ossature principale

5.6.1 Cadre général

Les structures et les produits de construction en acier sont, en général, facilement démontables. Pour autant que l'on prête attention à la déconstruction au stade de la conception, il n'y a aucune raison technique pour que la quasi-totalité du parc de bâtiments en acier ne soit pas considérée comme des composants susceptibles d'être réemployés à l'avenir dans de nouvelles applications. Dans certains secteurs, par exemple l'industrie et l'agriculture, le réemploi des structures métalliques de bâtiments à simple rez-de-chaussée et des éléments de bardage est déjà relativement courant.

Selon la norme EN 1090-2, un composant représente une partie d'une structure en acier, qui peut elle-même être un assemblage de plusieurs composants plus petits. Une structure en acier représente une combinaison organisée de composants reliés entre eux, conçue pour supporter des charges et fournir une rigidité adéquate.

Les critères de sélection et d'acceptation suivants sont proposés pour le réemploi d'un élément en acier, c'est-à-dire d'une partie d'une structure ou d'une structure complète, dans le cadre du présent document :

- les éléments structuraux, ou l'ensemble de l'ossature principale, doivent appartenir à un bâtiment en acier construit après 1970, utilisant des éléments fabriqués au cours de cette année ou après, et ne doivent pas avoir été soumis à une charge dynamique importante ou à d'autres conditions extrêmes ;
- tout l'acier récupéré doit être conforme aux propriétés de la section et classé selon le système proposé au paragraphe 5.4.1 du présent document ;

- tout d'abord, les éléments structuraux individuels sont évalués conformément au paragraphe 5.5. Le terme « évaluation », dans ce contexte, est défini dans l'EN 1090-1, c'est-à-dire qu'il s'agit de démontrer la conformité aux exigences, telles que les propriétés des matériaux, la géométrie et les caractéristiques structurales ;
- outre le paragraphe 5.5, toutes les soudures doivent faire l'objet d'un contrôle visuel à 100 % sur toute leur longueur pour détecter les imperfections de surface conformément à la norme EN ISO 17637 [70]. L'inspection visuelle doit être effectuée avant toute autre inspection END. Si des imperfections de surface sont détectées, des contrôles supplémentaires par ressusage ou magnétoscopie doivent être effectués sur la soudure inspectée. En règle générale, le contrôle par ultrasons ou le contrôle radiographique s'applique aux soudures bout à bout et le contrôle par ressusage ou le contrôle magnétoscopique s'applique aux soudures d'angle ;
- les boulons existants ne doivent pas être réemployés ;
- dans le cas d'une refabrication, le composant / détail / composant structural ou le module / ossature principale en acier réemployé peut respecter les exigences de la norme EN 1090-1 pour être marqué CE [8].

La Fig. 5.4 présente le cadre du processus de réemploi d'une structure complète ou d'un composant structural en acier.

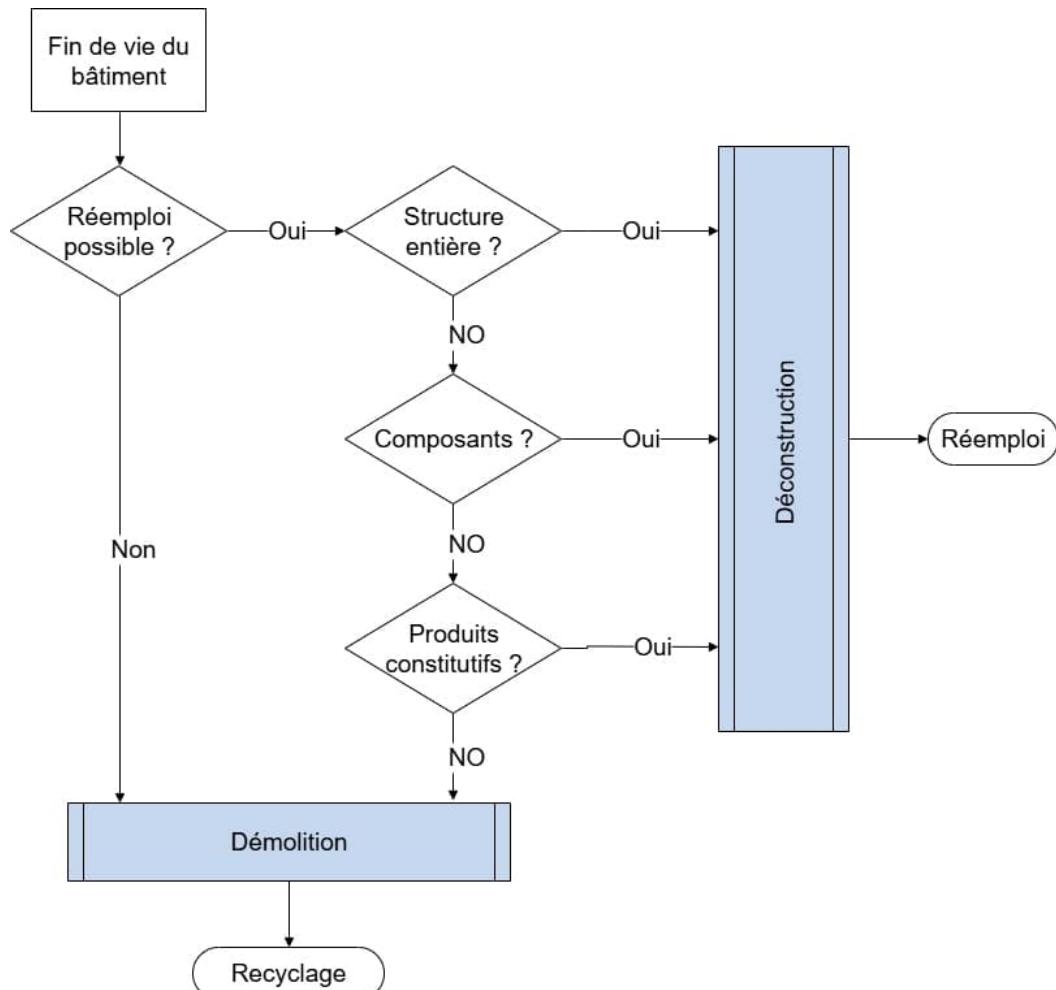


Fig. 5.4 Cadre général du processus de réemploi d'une structure ou de composants en acier

Cependant, un certain degré d'incertitude est inévitablement associé à l'utilisation de la structure métallique récupérée. Le cadre général pour la vérification du réemploi des composants ou d'une structure complète est présenté sur la Fig. 5.5.

L'organigramme de la Fig. 5.5 identifie trois classes possibles, après vérification de l'éligibilité et du respect des tolérances de la norme EN 1090-2 :

- **classe RSC1** : le composant structural n'a pas été marqué CE dans sa première vie et doit être requalifié comme un nouveau composant structural. Des études détaillées sont nécessaires pour cette classe – les matériaux en acier répondent aux exigences de performance grâce à des essais approfondis ;
- **classe RSC2** : le composant structural a été marqué CE lors de sa première vie conformément à la norme EN 1090-1 et la documentation d'origine est disponible. Chaque composant doit être réévalué pour s'assurer de sa conformité à la norme EN 1090-2 et aux normes harmonisées. Les matériaux en acier satisfont aux exigences de performance grâce à des essais limités et à une assurance qualité approuvée sur la base des certificats originaux. La soudure doit être soumis à des inspections visuelles et à d'autres contrôles non destructifs. Le composant structural

récupéré peut être réemployé et dimensionné conformément à l'EN 1993-1-1 avec quelques restrictions : (i) l'analyse globale plastique n'est pas autorisée lorsque l'acier récupéré est réemployé ; (ii) une valeur conservatrice du facteur partiel γ_{M1} est recommandée pour tenir compte des incertitudes possibles, car les processus d'évaluation sont susceptibles d'être moins fiables que ceux entrepris pour les nouveaux composants structuraux en acier ;

- **classe RSC3** : le composant structural n'a pas été marqué CE ou ce marquage n'est pas disponible. Les composants structuraux doivent être conformes à la norme EN 1090-2. Les matériaux en acier et les soudures peuvent être évalués par des essais de matériaux limités et être requalifiés. Le composant structural récupéré peut être réemployé et dimensionné conformément à la norme EN 1993-1-1 avec les mêmes restrictions que pour la classe RSC2.

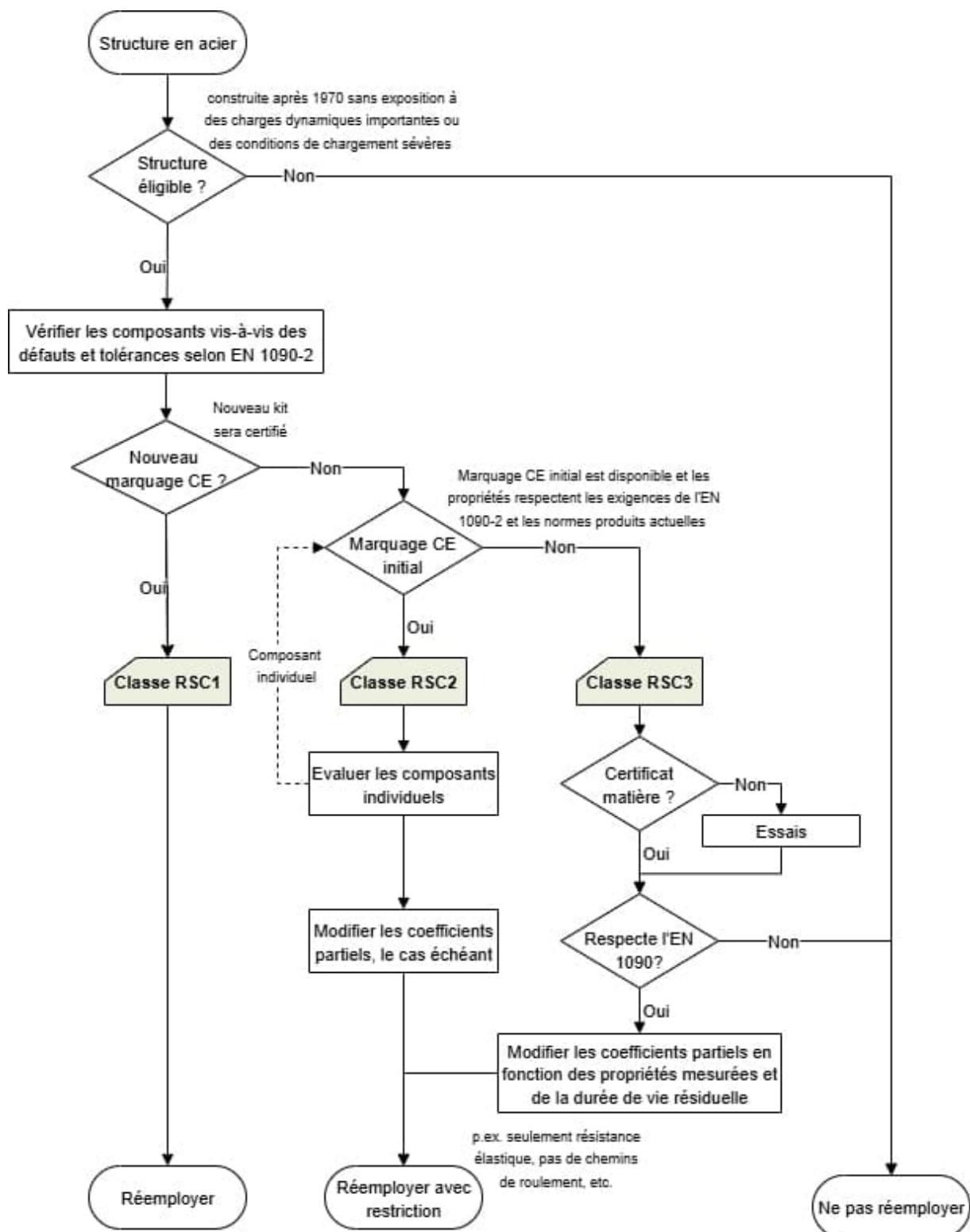


Fig. 5.5 Cadre général pour la vérification du réemploi des composants ou d'une structure complète

5.6.1 Classe d'exécution

La classe d'exécution requise pour la structure en acier est un paramètre de différenciation de la fiabilité qui permet de choisir les exigences en matière de qualité, d'essais et de requalification. La base du marquage CE est que le fabricant déclare que ses produits répondent aux caractéristiques de performance spécifiées qui sont définies comme essentielles à l'application des produits dans la construction.

Pour tout projet, la qualité de fabrication requise ou la classe d'exécution (EXC) doit être spécifiée. La norme EN 1090-2 [9] exige que la classe d'exécution soit spécifiée pour l'ensemble de l'ouvrage, un composant individuel ou un détail d'un composant. Dans certains cas, la classe d'exécution pour la structure, les composants et les détails sera la même, tandis que dans d'autres cas, la classe d'exécution pour le composant et les détails peut être différente de celle de la structure dans son ensemble.

La norme EN 1090-2 spécifie des exigences qui sont pour la plupart indépendantes du type et de la forme de la structure en acier (par exemple, bâtiments, ponts ou treillis), y compris les structures soumises à la fatigue ou à des actions sismiques. Certaines exigences sont différencierées en matière de classes d'exécution.

Selon la norme EN 1090-2, il existe quatre classes, allant de EXC1, pour laquelle les exigences sont les moins strictes, à EXC4, pour laquelle les exigences sont les plus strictes. Il convient toutefois de noter que les exigences de la classe EXC4 doivent être définies individuellement, en tenant compte au moins de celles qui s'appliquent à la classe EXC3. Il appartient au concepteur de choisir la classe d'exécution (EXC) requise pour la structure, un composant individuel ou un détail particulier d'un composant.

Le choix de la classe d'exécution doit être basé sur les trois facteurs suivants (voir Tableau 5.11) :

- la fiabilité requise ;
- le type de charge pour lequel la structure, le composant ou le détail est conçu ;
- le type de structure, de composant ou de détail.

En matière de gestion de la fiabilité, le choix de la classe d'exécution doit être basé sur la classe de conséquences (CC) requise. Les classes de conséquences sont définies dans la norme EN 1990 : 2023 [10]. Les dispositions des Eurocodes couvrent les règles de conception pour les structures classées de CC1 à CC3.

En ce qui concerne le type de chargement appliqué à une structure, un composant ou un détail en acier, le choix de la classe d'exécution doit être basé sur le fait que la structure, le composant ou le détail est conçu pour des actions statiques, quasi statiques, de fatigue ou sismiques.

Tableau 5.11. Choix de la classe d'exécution (EXC) en fonction du type de chargement

Classe de conséquences (CC)	Type de chargement				
	Statique, quasi statique	Sismique			Fatigue ^b
		DC1 ^a	DC2 ^a	DC3 ^a	
CC3	EXC3 ^c	EXC3 ^c	EXC3 ^c	EXC3 ^c	EXC3 ^c
CC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3 ^d	EXC3
CC1	EXC1	EXC2 ^e	EXC2	EXC2	EXC2

^a Les classes de ductilité sismique (DC) sont définies dans la norme prEN 1998-1-1.
^b Voir EN 1993-1-9.
^c EXC4 peut être envisagé pour des cas particuliers, y compris ceux typiquement couverts par CC4 de l'EN 1990.
^d Seul le système principal de résistance aux séismes relève de la catégorie EXC3 ; le système de résistance aux charges gravitaire peut relever de la catégorie EXC2.
^e Si l'indice d'action sismique n'est pas supérieur à 2,5m/s² (classe d'action sismique faible, voir prEN 1998-1-1), la classe d'exécution des structures en DC1 peut être EXC1.

Si la classe d'exécution requise pour certains composants et/ou détails est différente de celle applicable à la structure en général, ces composants et/ou détails doivent être clairement identifiés.

Les annexes nationales peuvent préciser le choix de la classe d'exécution en matière de types de composants ou de détails. Les éléments suivants sont recommandés [16] :

- « Si la classe EXC1 est sélectionnée pour une structure, l'EXC2 doit s'appliquer aux types de composants suivants :
- les composants soudés fabriqués à partir de produits en acier de qualité S355 et supérieure ;
 - les composants soudés essentiels à l'intégrité structurale qui sont assemblés par soudage sur le chantier de construction ;
 - les éléments soudés des poutres en treillis CHS nécessitant des coupes dans le profilé d'extrémité ;
 - les composants ayant subi un formage à chaud au cours de la fabrication ou un traitement thermique au cours de la fabrication. »

Le présent document se concentre sur le réemploi des bâtiments en acier à un ou plusieurs étages et de leurs composants. Les composants réemployés peuvent appartenir à la classe de conséquences CC1 ou CC2 conformément à l'annexe A de la norme EN 1993-1-1, pour des charges statiques, quasi statiques ou sismiques de type DC1. Par conséquent, la classe d'exécution 2 (EXC2) est la plus appropriée pour la majorité des bâtiments à un ou plusieurs étages, c'est-à-dire les bâtiments ou parties de bâtiments non couverts par les classes CC1 ou CC3. La liste des exigences relatives aux classes d'exécution figure à l'annexe A.3 de la norme EN 1090-2.

Les composants en acier de construction récupérés doivent clairement être traités différemment, car ils peuvent avoir été fabriqués selon une norme annulée et il est très peu probable qu'ils disposent de résultats d'essais documentés au moment de la fabrication. La norme EN 1090-2 sanctionne l'utilisation d'autres matériaux en stipulant que « si des produits constitutifs non couverts par les normes listées doivent être utilisés, leurs propriétés doivent être spécifiées ». Il n'y aura aucune différence dans les processus de fabrication, les procédures, les normes ou les tolérances, que ce soit pour l'acier neuf ou pour l'acier de réemploi. Il est donc approprié que les composants et structures fabriqués à partir d'un produit en acier de construction récupérés puissent être marqués CE conformément à la

norme EN 1090-1. Outre le contrôle minutieux des composants structuraux, les propriétés des matériaux doivent être déclarées conformément à la norme EN 1090-2.

La spécification de l'EXC n'est pas toujours suffisante pour différencier les critères d'acceptation et l'étendue de l'inspection des soudures/détails d'importance ou de criticité différente. Il peut en résulter ce qui suit :

- a) les critères d'acceptation peuvent devenir trop onéreux pour des soudures qui ne sont pas importantes ;
- b) l'étendue du contrôle spécifié peut devenir trop importante pour des soudures qui ne le sont pas ;
- c) l'inspection spécifiée peut manquer les endroits critiques.

L'utilisation de classes de contrôle des soudures (WIC) (voir l'annexe L de la norme EN 1090-2) peut être utile pour orienter le champ d'application et le pourcentage de contrôle supplémentaire en fonction de la criticité de la soudure. Cela peut être bénéfique à la fois du point de vue de la sécurité et du point de vue économique, car cela permet d'éviter des inspections et des réparations inutiles. Le choix initial des classes d'inspection des soudures (WIC) doit tenir compte de la probabilité d'apparition de défauts pour des configurations de soudure particulières (par exemple, les soudures à exécuter dans des conditions difficiles, telles que les soudures réalisées dans des positions difficiles, les soudures de chantier, les soudures pour les fixations temporaires). En prenant en compte ces paramètres, il est également possible de baisser les classes de contrôle des soudures (WIC) sur la base de l'expérience acquise en production.

Les classes de contrôle des soudures doivent être utilisées sur la base des critères de sélection suivants :

- a) l'utilisation pour la fatigue ;
- b) les conséquences de la rupture de la soudure pour la structure ;
- c) la direction, le type et le niveau des contraintes.

L'annexe A.3 de l'EN 1090-2 énumère les exigences spécifiques à chacune des classes d'exécution référencées dans cette norme européenne. La mention « SE » dans cette annexe signifie « Pas d'exigence spécifique dans le texte ».

Dans le cas d'éléments récupérés ou d'un ensemble de structure de réemploi, une nouvelle classe d'exécution doit être spécifiée comme dans le cas d'une construction à partir d'éléments neufs. Cette classe d'exécution peut être spécifiée pour la structure complète (l'ouvrage dans son ensemble) ou, si cela est approprié, pour les éléments individuels ou les détails constructifs particuliers. Lorsqu'elle est différente, la classe d'exécution d'un composant ou d'un détail ne doit pas être inférieure à celle spécifiée pour l'ensemble de l'ouvrage. La classe d'exécution d'un composant ou d'un détail doit être clairement identifiée dans la nouvelle spécification si elle est différente de la classe d'exécution de l'ouvrage.

L'organisation qui détient les éléments structuraux récupérés ou l'ensemble de la structure a des responsabilités particulières en ce qui concerne l'examen et l'essai de cette structure, la traçabilité et les déclarations sur les propriétés des matériaux lorsque les éléments structuraux récupérés ou l'ensemble de la structure sont distribués dans la chaîne d'approvisionnement.

Lorsque des composants structuraux récupérés ou des structures entières sont distribués dans la chaîne d'approvisionnement, ils doivent être accompagnés d'une déclaration

formelle, conformément aux exigences de la norme EN 1090-2. La déclaration doit indiquer clairement quelles propriétés ont été déclarées par défaut et lesquelles ont été déclarées sur la base d'essais. Dans le cadre des recommandations professionnelles françaises de juin 2024 [2], un système d'attestation des performances a été instauré.

Les propriétés suivantes doivent être déclarées :

- les données géométriques (tolérances pour les dimensions et la forme) ;
- la soudabilité – si nécessaire, sinon la mention « Aucune performance déterminée (NPD) » peut être déclarée ;
- la ténacité à la rupture des produits en acier de construction (si nécessaire) ;
- la réaction au feu – il convient de déclarer que les matériaux sont classés dans la classe A1 ou, s'il s'agit d'un revêtement dont la teneur en matières organiques est supérieure à 1 %, d'indiquer la classe pertinente de la teneur en matières organiques,
- le rejet de cadmium et de ses composés – « NPD » à déclarer ;
- l'émission de radioactivité – « NPD » à déclarer ;
- la durabilité – à déclarer selon les spécifications du composant ;
- la classe d'exécution (EXC) ;
- la référence aux plans et aux rapports de contrôle et d'essai.

5.7 Éléments de structure en acier formés à froid

Les pannes et les lisses sont généralement des sections galvanisées à paroi mince laminées à froid. Actuellement, les sections Z, C et Σ sont utilisées comme pannes. Pour ces éléments les fabricants peuvent proposer des données de conception sous la forme de tableaux de charge/portée ou de logiciels. Les pannes et les lisses agissant comme des poutres secondaires soutenues par des poutres principales (par exemple les traverses) ou des poteaux sont souvent maintenues partiellement par l'enveloppe du bâtiment (par exemple des tôles trapézoïdales, des cassettes, des panneaux sandwich, etc.).

La forme du diagramme du moment de flexion dépend non seulement du type de charge, gravitaire ou soulèvement, mais aussi des conditions de support de la panne, qui peut être simplement supportée ou continue sur deux travées ou plus. Lorsqu'elle est continue, la panne peut avoir une section transversale uniforme dans la travée et sur l'appui, ou des sections transversales en escalier, par chevauchement des profils sur les appuis. Dans ce dernier cas, les sections en Z peuvent être sélectionnées pour adapter la capacité de la panne à la variation du moment le long de l'élément, ainsi qu'à l'importance de la charge transversale au niveau des appuis.

Chaque fabricant produit ses propres formes spécifiques, avec des hauteurs allant de 100 à 350 mm et des épaisseurs de 0,8 mm à 3,2 mm. Ces pannes sont généralement adaptées à des espacements des portiques de 4 à 9 m et à des espacements entre pannes de 1,2 à 2,5 m.

Tous les aciers utilisés pour les éléments formés à froid et les bacs trapézoïdaux doivent être aptes au formage à froid et, le cas échéant, au soudage. Les aciers utilisés pour les éléments et les tôles, qui doivent être galvanisés, doivent également être aptes à la galvanisation.

La norme EN 1993-1-3 [17] précise que les matériaux de son tableau 5.1a sont conformes aux normes de produits harmonisées, tandis que les matériaux de son tableau 5.1b sont conformes aux normes de produits EN ou ISO. Pour les autres aciers, l'aptitude au formage à froid doit être démontrée par un essai de pliage conformément à la norme EN ISO 7438 [71] ou par un essai équivalent.

Pour une conception efficace, lorsque les portées sont comprises entre 6,0 m et 7,0 m, les pannes continues sont généralement réalisées avec des sections chevauchées et boulonnées sur des supports intermédiaires. Il est également possible d'utiliser des sections doublées pour renforcer la panne au niveau des appuis intermédiaires.

Le bac lui-même peut être utilisé comme système de maintien continu pour empêcher les déformations latérales et la torsion des pannes. Pour être efficaces, ces systèmes de maintien doivent présenter une rigidité suffisante en translation et en rotation. Lorsque le maintien par le bac n'est pas suffisant, des dispositifs de contreventement latéraux ponctuels, espacés le long des pannes, peuvent être utilisés.

Le taux de réussite de la récupération d'une ossature secondaire en acier de faible épaisseur est probablement beaucoup plus faible que celui d'une ossature métallique principale laminée à chaud. En effet, le bardage est généralement fixé à l'aide d'un nombre considérable de vis, ce qui peut entraver le processus de démontage et endommager les éléments structuraux au cours de l'opération.

Les sections précédentes ont donné un aperçu du processus de réemploi des éléments de structure en acier laminés à chaud conformément à la norme EN 1090-2. Pour les éléments de structure formés à froid, des principes similaires s'appliquent, en tenant compte de la recommandation de la norme EN 1090-4 [72]. D'autres spécifications du matériau d'origine similaires à celles de la section 5.2.5 sont également possibles. Les sections suivantes clarifient les aspects clés pour permettre le réemploi de l'acier de construction des éléments formés à froid.

Il est peu probable que le soudage soit rencontré ou requis pour les éléments en acier formés à froid faisant partie du domaine d'application du présent guide pour une application future. Par conséquent, l'évaluation des processus d'exécution ne peut porter que sur les tolérances géométriques des éléments en acier formés à froid, conformément aux recommandations des normes EN 1090-4 et EN1993-1-3.

5.7.1 Classification de l'acier formé à froid en vue de son réemploi

Les éléments de structure et les tôles en acier formés à froid, utilisés dans des applications structurales, doivent faire l'objet d'une classification en ce qui concerne les exigences de résistance et les dimensions. En ce sens, la surveillance du système de protection contre la corrosion fait également partie de la classification globale.

Conformément au paragraphe 5.4.1, l'acier de récupération doit être classé en fonction de la vérification (i) des exigences de performance des matériaux (évaluation de l'adéquation) et (ii) des exigences d'assurance qualité (évaluation de la fiabilité), en encadrant l'acier dans l'une des classes suivantes : la classe A, la classe B ou la classe C [55]. Pour les ouvrages en acier de récupération de classe C, étant donné qu'une large gamme de nuances d'acier est susceptible d'être disponible, il n'est pas recommandé de supposer une limite d'élasticité et une résistance à la traction supérieures à 120 MPa et à 260 MPa, respectivement.

Les éléments en acier formés à froid sont généralement protégés contre la corrosion au moyen de revêtements métalliques tels que spécifiés dans la norme EN 10346 [37] (désignation de la masse du revêtement Z, ZM, ZA ou AZ) et, si nécessaire, au moyen d'un revêtement organique supplémentaire tel que spécifié dans la norme EN 10169 [38]. Les dispositions de la norme EN 10346 [37] s'appliquent à la détermination de la masse de revêtement. Le type et la portée des essais à réaliser sont indiqués dans le tableau E.8 de la norme EN 1090-4.

5.7.2 Critères de sélection et d'acceptation

Les critères de sélection et d'acceptation suivants sont proposés pour évaluer le réemploi des ossatures secondaires en acier, c'est-à-dire les pannes et les lisses, dans le cadre du présent document :

1. Les éléments composant l'ossature secondaire doivent faire partie d'un bâtiment et ne doivent pas avoir été exposés à des conditions extrêmes.
2. Chaque élément doit être démonté tant que la stabilité est assurée. Les éléments assurant la stabilité latérale ne doivent pas être démontés avant l'enlèvement des éléments principaux ou avant l'installation d'un contreventement temporaire.
3. Les éléments de construction en acier doivent être regroupés, manipulés et transportés en toute sécurité, de manière à éviter toute déformation permanente et à réduire au minimum les dommages superficiels. Les produits qui ont été manipulés ou stockés d'une manière ou pendant une durée susceptible d'entraîner une détérioration significative doivent être vérifiés avant utilisation, afin de s'assurer qu'ils sont toujours conformes à la norme applicable au produit.
4. Tout d'abord, les éléments structuraux individuels sont évalués conformément à la série des normes EN 1090.
5. Tout élément récupéré doit être requalifié, conforme aux propriétés de la section et classé selon le système proposé au paragraphe 5.4.1 du présent document.
6. Si les plans initiaux sont manquants, toutes les dimensions des composants/structures doivent être mesurées pour vérifier qu'elles respectent les tolérances, au niveau de la section transversale, de l'élément ou du système structural conformément à la norme EN 1090-4. Toutes les mesures destinées à vérifier la forme et les dimensions de la section transversale doivent être effectuées à une distance d'au moins 250 mm de l'extrémité des sections afin d'exclure toute influence de l'évasement de l'extrémité sur les résultats des mesures. L'épaisseur de la section doit être mesurée sur les côtés plats de la section. La rectitude et la torsion d'une section sont vérifiées sur toute la longueur d'un élément reposant sur une base plane. La longueur est mesurée le long de l'axe de la plus grande surface :
 - a. Les tolérances de fabrication essentielles et fonctionnelles pour les éléments pressés ou pliés sont indiquées dans l'annexe D de la norme EN 1090-4.
 - b. Pour les éléments formés par laminage, la norme EN 10162 [73] s'applique. La tolérance négative sur la hauteur de la lèvre des raidisseurs de bord doit être conforme à ce qui suit :
 - (1) la tolérance négative sur la hauteur de la lèvre de chaque raidisseur de bord individuel ne doit pas être supérieure à 10 % de la hauteur nominale de la lèvre, avec un maximum de 2 mm ;
 - (2) la tolérance moyenne sur la hauteur de la lèvre de tous les raidisseurs de bord dans chaque section transversale sur la longueur

de l'élément ne doit pas être supérieure à la moitié de la tolérance négative autorisée pour les dimensions extérieures limitées par un rayon et un bord libre. La tolérance positive est une tolérance fonctionnelle.

- c. L'épaisseur peut être mesurée en tout point situé à plus de 40 mm des bords. Les tolérances sur l'épaisseur sont celles indiquées dans les tableaux 1 à 4 de la norme EN 10143 [74] et s'appliquent sur toute la longueur.
7. La surface du produit doit être inspectée visuellement pour vérifier la conformité aux exigences des sections 7.4 à 7.6 de la norme EN 10346 [37]. La surface du revêtement peut varier et prendre un aspect sombre par oxydation. Les masses de revêtement disponibles doivent être conformes au tableau 11 de la norme EN 10346. Des essais non destructifs doivent être effectués pour vérifier l'épaisseur du revêtement. Si nécessaire, les méthodes décrites dans l'annexe A (Z, ZF, ZA et AZ) ou l'annexe B (AS) de la norme EN 10346 doivent être utilisées.
8. Il est possible de suivre la procédure prévue dans la norme EN 1090-1 pour le marquage CE des éléments ou des composants fabriqués à partir des éléments récupérés.

5.7.3 Exigences en matière de performance des matériaux

L'évaluation d'éléments formés à froid non couverts par des normes référencées est autorisée par la clause 5.1 de la norme EN1090-4. Elle stipule que « si des produits constitutifs non couverts par les normes listées dans la clause 5.3 doivent être utilisés, leurs propriétés doivent être spécifiées ».

Les propriétés suivantes ont été identifiées comme devant faire l'objet d'une évaluation appropriée :

- limite d'élasticité ou limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% (R_{eH} ou $R_{p0.2}$) en MPa ;
- résistance à la traction ($R_{(m)}$) en MPa ;
- allongement après rupture A_{80mm} en % ;
- rapport entre le rayon de courbure et l'épaisseur, le cas échéant ;
- adhésion du revêtement métallique ;
- tolérances sur les dimensions et la forme, y compris l'épaisseur minimale.

Si l'acier doit être soudé, sa soudabilité doit être déclarée comme suit :

- une limite maximale pour le carbone équivalent de l'acier ;
- ou une déclaration de sa composition chimique suffisamment détaillée pour permettre le calcul de son carbone équivalent.

Outre les propriétés susmentionnées, il convient d'évaluer la masse et l'épaisseur du revêtement.

Pour autant que l'acier de réemploi réponde à toutes les exigences en matière de matériaux et que les processus de fabrication soient conformes aux normes EN 1090, il n'y aura pas de différence dans les procédures de fabrication, les normes ou les tolérances entre l'acier neuf et l'acier de réemploi. Par conséquent, il est possible de suivre les exigences de la norme EN 1090-1 pour le marquage CE.

Le protocole d'essai pour l'acier formé à froid est destiné à permettre de déclarer les propriétés des matériaux nécessaires conformément à la clause 5.3 de la norme EN 1090-4,

sur la base d'un relevé dimensionnel, d'essais non destructifs, d'essais destructifs, ou en faisant des hypothèses prudentes.

Dans le cadre du présent document, la limite d'élasticité nominale des éléments formés à froid doit être comprise entre 220 N/mm^2 et 550 N/mm^2 . La résistance nominale minimale à la traction doit être comprise entre 300 N/mm^2 et 560 N/mm^2 . Les exigences de ductilité pour une conception selon la norme EN 1993-1-1 sont présentées dans le Tableau 5.1 (valeurs recommandées pouvant être modifiées par les annexes nationales).

5.7.4 Évaluation de l'adéquation et de la fiabilité

Comme pour les éléments laminés à chaud, des évaluations de l'adéquation et de la fiabilité sont nécessaires pour l'acier formé à froid afin de garantir que le produit récupéré peut être utilisé dans la conception structurale conformément à l'EN 1993-1-3. Une procédure d'essai pour entreprendre l'évaluation de l'adéquation et de la fiabilité des éléments formés à froid est proposée à l'annexe A.

5.7.5 Propriétés du produit à déclarer pour les éléments récupérés formés à froid

Cette section résume les propriétés de l'acier qui doivent être évaluées pour les éléments en acier formés à froid récupérés conformément à la clause 5.3 de la norme EN1090-4 (voir Tableau 5.12.). D'autres commentaires sur ces propriétés sont également fournis.

Tableau 5.12. Propriétés des matériaux à déclarer conformément à la norme EN 1090-4, clause 5.3

Propriété	À déclarer	Procédure
Limite d'élasticité ou limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % ($R_{eH}/R_{p0,2}$)	Oui	Déterminée par des essais non destructifs et destructifs
Résistance à la traction (R_m)	Oui	Déterminée par des essais non destructifs et destructifs
Allongement après rupture A_{80} mm en %	Oui	Déterminé par des essais destructifs
Tolérances sur les dimensions et la forme, y compris l'épaisseur minimale	Oui	Sur la base d'une étude dimensionnelle
Rapport entre le rayon de courbure et l'épaisseur, le cas échéant	Si nécessaire	Si nécessaire, déterminé par des essais destructifs
Composition du revêtement métallique, désignation, masse et épaisseur de la couche	Oui	Si nécessaire, déterminée par des essais non destructifs ou destructifs et une inspection visuelle
Adhésion du revêtement métallique	Oui	Sur la base d'une inspection visuelle
En outre, si l'acier doit être soudé, sa soudabilité doit être déclarée comme suit :		
Propriété	À déclarer	Procédure
Une limite maximale pour le carbone équivalent de l'acier,		Maximum à déclarer sur la base des certificats d'essai du fabricant
Ou une déclaration de sa composition chimique suffisamment détaillée pour permettre le calcul de son carbone équivalent	Si nécessaire (en général, ce n'est pas nécessaire car les procédures de soudage ne sont souvent pas utilisées)	Déterminée par des essais non destructifs et destructifs

Limite d'élasticité, résistance à la traction et allongement

Conformément à la norme EN 10346 [37], les essais de traction doivent être effectués sans revêtement, dans la direction d'essai indiquée dans les tableaux 7 à 11 et à la section 7.2.5.2 de la même norme.

Tolérances et limitations géométriques

Les tolérances géométriques sur la forme dimensionnelle doivent être conformes à la norme EN 10143 [74]. La norme EN 1993-1-3 spécifie les épaisseurs minimales pour les éléments en acier formés à froid. Les recommandations de la norme EN 1090-4 doivent également être suivies.

Rapport entre le rayon de courbure, l'épaisseur et l'adhérence du revêtement métallique

Comme les éléments métalliques de structure récupérés sont déjà pliés, une inspection visuelle visant à évaluer les éventuelles fissures et l'adhérence du revêtement métallique à proximité de la zone de pliage doit être effectuée pour chaque élément récupéré. L'évaluation de l'adhérence a pour objectif de détecter toute adhérence qui n'est pas « parfaite » (voir l'annexe A pour plus de détails).

Composition de revêtement métallique, désignation et masse des couches

La composition du revêtement métallique doit être spécifiée conformément à la norme EN 10346. La section 3 de la norme EN 10346 spécifie les composants chimiques clés pour chaque type de revêtement. Pour l'évaluation du poids de la couche de revêtement, la section 7.3 de la norme EN 10346 doit être prise en compte (voir également l'annexe A).

Composition chimique

Pour les produits formés à froid, la norme EN 10346 peut être utilisée. Le tableau 2 de la norme présente la composition chimique des aciers de construction. L'objectif de cette déclaration est de permettre le calcul de la valeur du carbone équivalent (CEV), qui est une mesure clé de la soudabilité. Si l'acier formé à froid récupéré n'est pas destiné à être soudé, il n'est pas nécessaire d'évaluer la composition chimique (voir l'annexe A pour plus de détails).

5.7.6 Durabilité

Le processus de démontage peut endommager la structure métallique, et en particulier le revêtement. La structure métallique perd de la masse de revêtement au fil du temps (à un rythme qui dépend de l'environnement du bâtiment/de la structure métallique). Cela signifie que la masse du revêtement pour les cycles de vie suivants est réduite, ce qui diminue la durabilité de la structure métallique. Il est donc nécessaire que le protocole d'essai évalue la masse de revêtement restante/disponible pour la structure métallique formée à froid récupérée.

5.8 Planchers mixtes

Les planchers mixtes acier/béton sont largement utilisés comme solution structurale combinant les meilleures propriétés de l'acier et du béton. Son principal avantage réside dans sa capacité à créer un système léger, solide et durable qui accélère la construction tout en offrant des performances élevées en matière de portance et de résistance au feu. En raison de la liaison permanente de l'acier et du béton dans les solutions actuelles, les planchers mixtes ne peuvent pas être réemployés dans leur forme originale. Cependant, l'acier et le béton peuvent être recyclés, ce qui permet une méthode d'élimination respectueuse de l'environnement, même si le réemploi direct n'est pas possible.

5.9 Enveloppes

Les panneaux sandwich sont couverts par la norme NF EN 14509 – Panneaux sandwich autoportants, isolants, double peau à parements métalliques – Produits manufacturés – Spécifications [75]. Pour les panneaux fabriqués après 2004, les informations clés sont disponibles sur une étiquette apposée sur le panneau, sur laquelle sont inscrits le nom du fabricant, la date de fabrication et les caractéristiques du panneau, y compris le type d'âme. Depuis 2000, le pentane est utilisé comme agent gonflant pour l'âme et ne contient pas de CFC (chlorofluorocarbone) ou de H-CFC (hydro-chlorofluorocarbone).

Les tôles de couverture et de bardage sont couvertes par la norme NF EN 14782 – Plaques métalliques autoportantes pour couverture, bardages extérieur et intérieur et cloisons – Spécification de produit et exigences [76].

Des recommandations sont proposées pour évaluer le potentiel de réemploi des panneaux sandwich. Pour l'évaluation des aspects de sécurité en vue du réemploi, les règles de la

norme EN 1990 (facteurs de sécurité) et les règles de la norme de produit harmonisée EN 14509 sont utilisées pour le type d'essai des propriétés essentielles. Une exigence fondamentale pour un nombre limité d'essais est que le nom du fabricant soit connu et qu'une copie des valeurs déclarées originales (valeurs données par le fabricant) soit également connue. Cela peut limiter l'utilisation d'un programme d'essais réduit pour les panneaux de plus de 25 ans, en raison de l'absence de règles connues de tous, à moins qu'ils n'aient été produits dans le cadre d'homologations nationales avec des essais initiaux et un contrôle par une tierce partie. Dans les autres cas, il est recommandé d'appliquer un programme d'essai complet conforme aux règles de la norme EN 14509.

L'évaluation du potentiel de réemploi des panneaux sandwich est la suivante :

- sur la base de l'architecture ou de l'esthétique ;
- sur la base de la performance – évaluation des propriétés essentielles comme prévu dans la norme EN 14509.

Pour ce faire, on observe visuellement les changements de couleur de la surface ou les dommages qu'elle présente.

5.9.1 Critères de sélection et d'acceptation

Les propriétés mécaniques des panneaux à déclarer et à déterminer sont conformes à la norme EN 14509 :

- la résistance au plissement ;
- la résistance au cisaillement et le module de cisaillement ;
- le coefficient de fluage (pour les charges permanentes uniquement) ;
- la résistance à la compression et le module de compression ;
- la résistance à la traction et le module de traction ;
- les propriétés de durabilité ;
- les tolérances.

Le niveau de référence des propriétés mécaniques correspond aux valeurs déclarées par le fabricant au moment de la livraison des panneaux. Ce niveau de référence est également appelé niveau zéro.

L'évaluation de la dégradation éventuelle des propriétés mécaniques du panneau se fait d'abord en comparant le niveau de la résistance à la traction du panneau transversal au niveau zéro. Si une dégradation considérable (valeur caractéristique inférieure de plus de 10 % à la valeur déclarée) est constatée, la résistance au cisaillement et à la compression du panneau est testée. La valeur caractéristique de la résistance au cisaillement des panneaux, déterminée sur des échantillons de panneaux démontés, est la valeur utilisée pour la conception lors du réemploi des panneaux.

La valeur moyenne du module de cisaillement est mesurée à partir des panneaux à réemployer. Pour la résistance au plissement, la résistance à la compression et le module d'élasticité, les valeurs déclarées à l'origine sont réduites en fonction du rapport entre la résistance au cisaillement caractéristique et la résistance au cisaillement déclarée à l'origine. Cette procédure est prudente, car l'expérience montre que le vieillissement affecte principalement la résistance à la traction transversale et la résistance au cisaillement. Les résultats des essais effectués sur des panneaux démontés à la fin des années 1990 indiquent que le taux de vieillissement de la résistance au plissement est

approximativement égal à la moitié du vieillissement de la résistance au cisaillement. Il est suggéré que les facteurs de sécurité des matériaux soient les mêmes que ceux basés sur les essais de type initiaux.

Il est suggéré de tester des échantillons prélevés sur les panneaux démontés pour la résistance à la traction des panneaux transversaux, comme spécifié dans la section A1 de la norme EN 14509. Le nombre d'échantillons doit être d'au moins 3, et jusqu'à 10, ce qui permettra d'obtenir des résultats plus précis. La masse volumique des échantillons est mesurée à partir d'échantillons prélevés à proximité des échantillons pour la résistance à la traction.

5.9.2 Résistance à la traction et masse volumique

La valeur caractéristique de la résistance à la traction est comparée à la valeur déclarée à l'origine. Si la dégradation est inférieure à 10 %, les panneaux peuvent être réemployés en utilisant les propriétés déclarées à l'origine pour toutes les propriétés de résistance mécanique. Si la dégradation est supérieure à 10 %, il convient de prélever un ensemble d'échantillons pour tester la résistance au cisaillement et le module de cisaillement, ainsi que la résistance à la compression et le module de compression. Il faut prélever au moins 3 échantillons, de préférence 5 pour les essais de cisaillement et 10 pour les essais de compression.

5.9.3 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement et le module de cisaillement sont testés pour les échantillons prélevés sur les panneaux démontés. Si la dégradation de la résistance à la traction n'est pas supérieure à 10 %, un essai de cisaillement est effectué. Le résultat de l'essai doit être au moins égal à la valeur déclarée. L'ensemble des essais est effectué si la résistance à la traction du panneau transversal s'est dégradée de plus de 10 % par rapport à la résistance à la traction initiale déclarée. La valeur caractéristique est calculée pour la résistance au cisaillement. Cette valeur est utilisée pour le dimensionnement des panneaux à réemployer.

5.9.4 Résistance à la compression

La résistance à la compression est testée pour les échantillons prélevés sur les panneaux démontés. Les essais sont effectués si la résistance à la traction du panneau transversal s'est dégradée de plus de 10 % par rapport à la résistance à la traction déclarée à l'origine. La valeur caractéristique est calculée pour la résistance à la compression. Cette valeur est utilisée pour la conception des panneaux à réutiliser.

5.9.5 Moment de flexion/résistance au plissement

Pour le moment de flexion ou la résistance au plissement, la valeur déclarée à l'origine peut être utilisée si la dégradation de la résistance à la traction est inférieure à 10 %. Si la dégradation est plus importante, soit la résistance au plissement est réduite dans le même rapport que la résistance au cisaillement par rapport à la résistance au cisaillement déclarée à l'origine, soit la résistance au plissement est testée pour des panneaux prélevés sur les panneaux démontés. La valeur caractéristique des résultats des tests est alors utilisée dans la conception lors du réemploi des panneaux.

5.9.6 Facteurs de sécurité des matériaux

Les valeurs de sécurité des matériaux déterminées par les essais de type initiaux sont utilisées. Alternativement, les valeurs de sécurité déterminées par les essais sur les panneaux démontés peuvent être utilisées, calculées comme indiqué dans la section A.16 de la norme EN 14509.

5.9.7 Propriétés de durabilité

Il n'est nécessaire de répéter les essais de durabilité que si la dégradation de la résistance à la traction est supérieure à 10 %. Dans ce cas, seul l'essai de durabilité à court terme est requis (14 jours pour tous les autres types d'âme que la laine minérale, voir EN 14509 Annexe B, clause B.2.4, et 7 jours pour l'âme en laine minérale, voir EN 14509 Annexe B, clause B.3.4). Pour les panneaux avec une âme en laine minérale, la dégradation des propriétés doit être inférieure à 15 %, et pour tous les autres types, inférieure à 17 %.

5.9.8 Tolérances

Les tolérances doivent faire l'objet d'un contrôle visuel et, si un écart est constaté, les panneaux sont vérifiés pour s'assurer qu'ils sont aptes à être réemployés.

5.9.9 Comportement thermique

Pour les panneaux sandwich avec une âme en polyuréthane (PU), si le ratio de cellules fermées (voir ISO 4590) diminue de plus de 10 %, la conductivité thermique doit faire l'objet d'un nouvel essai et une nouvelle valeur de dimensionnement doit être déterminée (EN 14509, clause A.10).

5.9.10 Sécurité incendie

Les panneaux dont l'âme est constituée de matériaux utilisant des agents ignifuges doivent faire l'objet d'un nouvel essai de comportement en présence de petites flammes afin de vérifier que l'effet des agents ignifuges est toujours actif. Dans le cas contraire, une reclassification pourrait s'avérer nécessaire.

5.9.11 Requalification pour le réemploi

Un résumé des procédures d'évaluation et de requalification pour le réemploi des panneaux sandwich est présenté dans le Tableau 5.13. .

Tableau 5.13. Résumé de la procédure d'évaluation pour le réemploi des panneaux sandwich

Critère d'évaluation	Propriété
Résistance mécanique	
Essai de résistance à la traction des panneaux transversaux, 3 échantillons au minimum (EN 14509, A1) : calculer le résultat caractéristique de la résistance à la traction. Essai de résistance au cisaillement sur un échantillon (EN 14509, A.3 ou A.4)	
1. Résistance à la traction Valeur réelle $\geq 0.9 \times$ Valeur déclarée, et 2. Résistance au cisaillement Valeur réelle $\geq 0.9 \times$ Valeur déclarée	<p>Si la réponse est OUI, aucun autre essai n'est nécessaire. Toutes les valeurs déclarées pour la résistance mécanique peuvent être utilisées.</p> <p>Si NON, de nouvelles valeurs déclarées doivent être déterminées avec un programme d'essai conforme à la norme EN 14509 pour (i) la résistance à la traction, (ii) la résistance à la compression et (iii) la résistance au cisaillement. La résistance au plissement est réduite dans les mêmes proportions que la résistance au cisaillement.</p>
Durabilité	
Résistance à la traction Valeur réelle $\geq 0.9 \times$ Valeur déclarée	<p>Si OUI, aucun autre test n'est nécessaire. Les panneaux sont aptes à l'emploi.</p> <p>Si NON :</p> <p>Pour les panneaux avec laine minérale : l'essai à 7 jours (voir EN 14509 clause B.3.4) doit être effectué. La réduction de la résistance à la traction après vieillissement ne doit pas dépasser 15 % de la valeur moyenne de la résistance à la traction à température ambiante.</p> <p>Pour tous les autres types de panneaux : la procédure de l'EN 14509 Annexe B.2 est suivie de telle sorte que les panneaux sont testés 14 jours à la température décrite en B.2.4. La réduction de la résistance à la traction après vieillissement ne doit pas dépasser 17 % de la valeur moyenne de la résistance à la traction à température ambiante.</p>
Tolérances	
Les dégradations sont évaluées par des inspections visuelles	<p>Si aucune dégradation ou défaut important n'est constaté, le panneau peut être réemployé.</p> <p>Si des dégradations importantes sont constatées, entraînant des faiblesses au niveau de la résistance, du comportement de l'isolation ou de l'étanchéité des joints, ces panneaux sont rejettés.</p>
Teneur en eau	
Humidité du matériau de base	Si aucune humidité notable du matériau central n'est constatée, les panneaux peuvent être réemployés.
Comportement thermique	
Pour les panneaux en PU : 1. Taux de cellules fermées Valeur réelle $\geq 0,9 \times$ Valeur obtenue par essai de type et par test de résistance 2. Modification de la masse volumique $< 10 \%$	<p>Si OUI, aucun autre test n'est nécessaire ; la valeur de conductivité thermique d'origine peut être utilisée.</p> <p>Si NON, un nouvel essai de détermination de la conductivité thermique doit être effectué conformément aux règles de la section A.10 de la norme EN 14509.</p>

Sécurité incendie	
Essais de petites flammes, voir clause C.1.2 de la norme EN 14509	Tests à effectuer avec le matériau de base, y compris les produits ignifugés. La classification est vérifiée et, si nécessaire, reclassée. Les panneaux sont aptes à l'emploi et répondent aux exigences du projet de réemploi.

6 CONCEPTION DES STRUCTURES AVEC DES ÉLÉMENTS EN ACIER DE RÉEMPLOI

Cette section aborde plusieurs considérations qui peuvent affecter la conception des structures utilisant des éléments en acier de réemploi. Les principes de conception aux états limites doivent être suivis et les règles de résistance et d'aptitude au service données dans les parties 1-1 et 1-8 de l'EN 1993 peuvent être appliquées, en utilisant les coefficients partiels de résistance γ_M et les mêmes méthodes d'analyse et de dimensionnement.

Les structures fabriquées à partir d'éléments en acier de réemploi (ou comprenant de tels éléments) doivent satisfaire aux mêmes principes de base que ceux énoncés dans la norme EN 1990. Pour le reste de la durée de vie prévue, la structure doit être conçue et fabriquée conformément aux conditions suivantes :

- résister à toutes les actions susceptibles de se produire ;
- rester aptes à l'emploi en matière d'aptitude au service et de durabilité ;
- satisfaire aux réglementations en vigueur en matière d'intégrité structurale.

Dans la pratique européenne, les bâtiments autres que les bâtiments agricoles, temporaires et monumentaux, sont conçus pour une durée de vie prévue de 50 ans, ce qui se reflète dans les valeurs caractéristiques des actions figurant dans l'EN 1991 et dans les coefficients partiels appliqués à ces actions. La durée de vie utile peut affecter les valeurs de calcul des actions, mais pas les vérifications de la résistance et de l'aptitude au service présentées ci-dessous.

La ductilité et la ténacité doivent être suffisantes pour que la structure fonctionne comme prévu. Les hypothèses de conception typiques et les procédures de l'Eurocode supposent un niveau minimum de ductilité pour permettre aux éléments de flexion compacts d'atteindre la capacité plastique de la section et pour permettre une déformation localisée sans rupture au niveau des concentrations de contraintes (voir tableau 5.1). En effet, le concepteur s'appuie implicitement sur la ductilité pour un certain nombre d'aspects de la conception, y compris la redistribution des contraintes à l'état limite ultime (ELU), dans la conception des groupes de boulons et dans le processus de fabrication pour le soudage, le cintrage et le redressage. Dans la conception des structures utilisant de l'acier de réemploi, les réductions potentielles de la ductilité et de la ténacité peuvent généralement être négligées. En effet, dans les conditions normales d'utilisation des bâtiments, les déformations maximales sont généralement inférieures à 1,5 %, et ces faibles niveaux de déformation n'affectent pas de manière significative les performances de la structure.

Dans la plupart des cas, on peut s'attendre à ce que les éléments en acier de réemploi se comportent comme de l'acier neuf, sans tenir compte des changements de propriétés des matériaux. Cependant, les imperfections géométriques peuvent affecter la résistance au flambement de l'élément et il peut donc être nécessaire d'augmenter le coefficient partiel correspondant.

6.1 Atteindre la fiabilité

L'application de la méthode des coefficients partiels nécessite la définition des valeurs de calcul des actions, des propriétés des matériaux et des produits, des données géométriques et des incertitudes du modèle. Les valeurs de calcul des actions, Q_d , sont obtenues à partir

des valeurs caractéristiques, Q_k , sur la base d'une durée de vie de référence de 50 ans et de la fiabilité cible correspondante. La valeur cible de l'indice de fiabilité β est liée à la probabilité de défaillance, P_f , correspondant à une période de référence spécifiée, comme suit :

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6.1)$$

Où $\Phi()$ est la fonction de distribution cumulée de la distribution Normale standard.

Les actions sur les structures sont définies dans la norme EN 1991. Les poids propres et les charges d'exploitation ne sont pas sensibles à la période de référence et, par conséquent, la période de référence normale de 50 ans peut toujours être utilisée. Pour les charges de neige et les actions du vent, l'EN 1991 donne des valeurs ajustées pour des périodes de référence autres que la période de 50 ans dans l'annexe D de l'EN 1991-1-3 [12] pour les charges de neige et dans la note 4 de la clause 4.2 de l'EN 1991-1-4 [13] pour les charges de vent.

La norme EN 1990 [10] définit cinq classes de conséquences (CC), en fonction des conséquences d'une défaillance ou d'un dysfonctionnement de la structure, et fournit des règles de conception pour trois d'entre elles, comme suit :

- CC0 : Conséquences très faibles en termes de pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales insignifiantes ;
- CC1 : Conséquences faibles en termes de pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales *faibles ou réduites*, $\beta_{50 \text{ ans}} = 3.3$;
- CC2 : Conséquences moyennes en termes de pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales considérables, $\beta_{50 \text{ ans}} = 3.8$;
- CC3 : Conséquences élevées en termes de pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales très importantes, $\beta_{50 \text{ ans}} = 4.3$;
- CC4 : Conséquences extrêmes en termes de pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales énormes.

Il est également noté que les conceptions avec les coefficients partiels donnés dans les Eurocodes conduisent généralement à une structure avec une valeur β supérieure à 3,8 pour une période de référence de 50 ans.

La durée de vie théorique de la structure n'est pas explicitement liée à la classe de conséquences dans l'EN 1990 et peut être comprise comme une période pendant laquelle une structure doit être utilisée pour l'usage auquel elle est destinée, avec une maintenance anticipée, mais sans réparations majeures. L'annexe A.1.4 de l'EN 1990 donne les catégories suivantes ainsi que la durée de vie prévue pour les structures permanentes :

- structures agricoles et similaires / éléments structuraux remplaçables ayant une durée de vie nominale de 25 ans (catégorie 2) ;
- structures de bâtiment non couvertes par une autre catégorie, avec une durée de vie nominale de 50 ans (catégorie 3) ;
- structures de bâtiments monumentaux ayant une durée de vie nominale de 100 ans (catégorie 4).

Les structures ou parties de structures qui peuvent être démontées pour être réemployées ne doivent pas être classées comme structures temporaires.

Les structures conçues conformément aux Eurocodes sont censées fonctionner et rester en bon état pendant la durée de vie prévue. Pour les bâtiments typiques, la durée de vie est généralement de 50 ans, c'est-à-dire de catégorie 3, ce qui correspond à un indice de fiabilité $\beta_{50 \text{ ans}} = 3,8$, ou $\beta_{1 \text{ an}} = 4,7$, ce qui correspond à une probabilité de défaillance d'environ 10^{-4} /an. Si une structure est destinée à une durée de vie plus courte, un indice de fiabilité cible plus faible peut être justifié. Cela correspondrait à $\beta_{50 \text{ ans}} < 3,8$ pour une période de 50 ans. Toutefois, selon la norme ISO 13822 [77], une valeur minimale de $\beta_{50} \geq 2,3$ doit être maintenue pour garantir la sécurité des personnes. Au contraire, si la durée de vie est prolongée, par exemple à 100 ans, une valeur $\beta_{50 \text{ ans}} > 3,8$ serait appropriée, reflétant une plus grande exigence de fiabilité sur une période de référence de 50 ans. Il convient de noter que ces valeurs β sont des valeurs cibles théoriques utilisées dans le calcul pour garantir un niveau de fiabilité cohérent. Elles représentent des repères théoriques et ne reflètent pas nécessairement les taux de défaillance réels.

Gulvanessian et al. [78] expliquent clairement que les indices β sont utilisés comme valeurs opérationnelles à des fins d'étalonnage des codes et de comparaison des niveaux de fiabilité des structures qui dépendent naturellement de la durée de vie prévue et sont utilisés dans l'ensemble des *actions du système – résistances – coefficients partiels*.

Les différentes mesures visant à réduire le risque de défaillance peuvent être interchangées dans une certaine mesure, à condition que le niveau de fiabilité requis soit maintenu. Lors de la conception avec de l'acier de réemploi, il peut être nécessaire de compenser un coefficient partiel légèrement inférieur par un niveau élevé de gestion, de contrôle et d'inspection de la qualité de la structure. Il s'agit là d'un exemple de différenciation de la fiabilité par les exigences des niveaux de qualité.

La différenciation de la fiabilité peut également être appliquée au moyen (i) des coefficients partiels pour les actions γ_F , ou (ii) des coefficients partiels pour la résistance, γ_M , ce qui est expliqué plus en détail ci-dessous. La première option est généralement préférée.

6.1.1 Coefficients partiels pour les actions

Les coefficients partiels pour les actions permettent de prendre en compte la variabilité des charges dans la conception. Dans la plupart des cas, les probabilités de défaillance augmentent lorsque les charges sont plus importantes que prévu, mais une charge permanente moins importante que celle prévue pour contrer les moments de renversement peut également avoir le même effet d'augmentation de la probabilité de défaillance.

Les mesures envisagées pour les situations de projet durables et transitoires (fondamentales) devraient inclure :

- la valeur de calcul de l'action de la variable principale ;
- les valeurs de calcul des actions variables d'accompagnement.

Lors de l'application de facteurs aux actions, les combinaisons d'actions ΣF_d pour les situations de projet durables et transitoires (fondamentales) doivent être calculées conformément à la norme EN1990: 2023, par l'une des méthodes suivantes :

- la formule (8.12) de la norme EN1990: 2023 ou (6.2) ci-dessous ;

- ou la plus défavorable des deux expressions de la formule (8.13) de la norme EN1990: 2023 ou (6.3) ci-dessous ;
- ou la plus défavorable des deux expressions de la formule (8.14) de la norme EN1990: 2023 ou (6.4) ci-dessous.

$$\Sigma F_d = \sum_i \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j>1} \gamma_{Q,j} \psi_{0,j} Q_{k,j} \quad (6.2)$$

ou

$$\Sigma F_d = \begin{cases} \sum_i \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{j>1} \gamma_{Q,j} \psi_{0,j} Q_{k,j} \\ \sum_i \xi_i \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j>1} \gamma_{Q,j} \psi_{0,j} Q_{k,j} \end{cases} \quad (6.3)$$

ou

$$\Sigma F_d = \begin{cases} \sum_i \gamma_{G,i} G_{k,i} \\ \sum_i \xi_i \gamma_{G,i} G_{k,i} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j>1} \gamma_{Q,j} \psi_{0,j} Q_{k,j} \end{cases} \quad (6.4)$$

où

- F_d représente la valeur de calcul d'une action ;
 Σ désigne l'effet combiné de ;
 $\gamma_{G,i}$ est le coefficient partiel pour l'action permanente i ;
 $G_{k,i}$ est la valeur caractéristique de l'action permanente i ;
 $\gamma_{Q,1}$ est le coefficient partiel pour l'action de la variable dominante ;
 $\psi_{0,1}$ est le coefficient de combinaison pour l'action variable dominante (si elle est appliquée) ;
 $Q_{k,1}$ est la valeur caractéristique de l'action variable dominante ;
 $Q_{k,j}$ est la valeur caractéristique d'une action variable d'accompagnement j ;
 $\psi_{0,j}$ est le coefficient de combinaison pour l'action variable d'accompagnement j ;
 $\gamma_{Q,j}$ est le coefficient partiel pour l'action variable j ;
 ξ est le coefficient de réduction appliqué aux actions permanentes défavorables ; la valeur est de 0,85, sauf si les annexes nationales donnent une valeur différente.

Pour autant que son coefficient de variation soit faible, une action permanente, G , devrait être représentée par une seule valeur caractéristique G_k . Si une seule valeur caractéristique de G_k est utilisée, sa valeur peut être considérée comme la valeur moyenne de G . Si l'incertitude sur G n'est pas faible, ou si la structure est sensible aux variations de sa valeur ou de sa distribution spatiale, l'action permanente G doit être représentée par les valeurs caractéristiques supérieure et inférieure $G_{k,sup}$ et $G_{k,inf}$ respectivement. La valeur caractéristique supérieure $G_{k,sup}$ doit être choisie comme le fractile à 95 % et la valeur caractéristique inférieure $G_{k,inf}$ comme le fractile à 5 % de la distribution statistique de G .

La combinaison des actions pour les états limites ultimes avec des coefficients partiels sur les actions doit être choisie en fonction de la situation de projet, selon la norme EN1990: 2023:

- le tableau A.1.3, en utilisant la formule (8.12) ;
- ou le tableau A.1.4, en utilisant la formule (8.13) ;
- ou le tableau A.1.5, en utilisant la formule (8.14).

Si les valeurs de calcul des actions pour les situations de projet durables et transitoires (fondamentales) sont choisies conformément au tableau A.1.4 ou au tableau A.1.5 de la norme EN 1990: 2023, la plus défavorable des deux expressions de la formule pour la combinaison des actions doit être vérifiée.

Il est courant d'abaisser le niveau de sécurité requis lors de l'évaluation et de l'amélioration des structures existantes, tant que les limites de la sécurité humaine ne sont pas dépassées, voir les références [79] et [80]. Cela se justifie par le fait que, pour les structures existantes, une durée de vie plus courte est souvent supposée et acceptée. De même, pour les conceptions faisant appel à de l'acier de réemploi, il peut être possible, dans certaines situations, d'envisager l'option d'une durée de vie plus courte, par exemple de 15 à 30 ans (catégorie 2 ci-dessus).

6.1.2 Scénarios possibles pour l'adoption d'une durée de vie plus courte

Dans la section précédente, il a été suggéré que les coefficients de combinaison des actions pourraient être légèrement réduits lors de la conception avec de l'acier de récupération en supposant une durée de vie prévue plus courte. Il est recommandé que cette option exige un niveau plus élevé de contrôle de la gestion de la qualité et d'inspection de la structure.

Pour un nouveau bâtiment, les exigences de fiabilité de la norme EN 1990 doivent être respectées (même si des éléments individuels récupérés sont utilisés). Les exemples où les coefficients partiels inférieurs pour une durée de vie théorique de 15 à 30 ans peuvent être utilisés sont : (i) la rénovation de bâtiments existants, ou (ii) les cas où l'ensemble du bâtiment est déplacé vers un autre endroit.

Lors de la conception d'une nouvelle structure tout en favorisant le réemploi de l'acier, il est possible d'ajuster la disposition structurale, comme l'espacement des poutres de plancher ou des portiques, afin de s'assurer que les effets de la charge sur les éléments récupérés restent dans des limites acceptables. Ce faisant, la structure peut répondre aux exigences de fiabilité standard pour une durée de vie théorique de 50 ans, conformément à la norme EN 1990. Cette approche permet de se conformer au processus de conception de l'Eurocode tout en tenant compte de la variabilité inhérente aux éléments en acier réemployés.

6.1.3 Coefficients partiels de résistance

Les coefficients partiels de résistance définis dans l'EN 1993-1-1 sont résumés dans le Tableau 6.1. . Les valeurs caractéristiques de résistance sont divisées par les coefficients partiels appropriés pour obtenir leurs résistances de calcul. Ces valeurs sont des paramètres déterminés au niveau national et peuvent être modifiées dans l'annexe nationale utilisée pour l'application de l'EN 1993-1-1 dans chaque pays, voir Tableau 6.2. . Les valeurs de ces tableaux sont données pour des éléments neufs en acier et ont été obtenues à partir de données d'essai collectées entre 1969 et 1980, voir [81] et [82], et plus tard, en 2002 [83].

L'utilisation d'acier de réemploi a été limitée aux bâtiments fabriqués et construits après 1970. Il est donc peu probable que les propriétés de l'acier soient différentes de celles des aciers utilisés pour calibrer les coefficients partiels de vérification des sections transversales, γ_{M0} et γ_{M2} . Les deux facteurs tiennent compte de la variabilité de la résistance

des matériaux, de sorte que la résistance de l'acier dans la structure réelle peut différer de la résistance utilisée dans les calculs. Ainsi, le concepteur de la charpente métallique peut en toute sécurité adopter les mêmes valeurs du Tableau 6.1. pour γ_{M0} et γ_{M2} dans les conceptions utilisant de l'acier de récupération.

Tableau 6.1. Coefficients partiels γ_M pour la résistance dans EN 1993

Coefficient partiel		Valeur recommandée (CEN)
γ_{M0}	Résistance des sections transversales	1.00
γ_{M1}	Résistance des éléments aux instabilités	1.00
γ_{M2}	Résistance à la rupture des sections transversales en traction	1.25

Tableau 6.2. Coefficients partiels γ_M pour la résistance dans les annexes nationales*

Coefficients partiels	Autriche	Belgique	Danemark	Finlande	France	Allemagne ⁽ⁱ⁾	Italie	Irlande	Pays-Bas	Norvège	Portugal	Roumanie	Espagne	Suède	Royaume-Uni
γ_{M0}	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00
γ_{M1}	1.00	1.00	1.20	1.00	1.00	1.10	1.05	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00
γ_{M2}	1.25	1.25	1.35	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	a	1.10
$a = \min \left(1.10, \frac{0.9 f_u}{f_y} \right)$ ⁽ⁱ⁾ Pour l'analyse non linéaire, supposer $\gamma_{M0} = 1,10$															

*Les coefficients partiels de résistance correspondent à l'édition 2006 de la norme EN 1993-1-1.

Le coefficient partiel γ_{M1} est utilisé lors de la vérification de la résistance des éléments (poutres et poteaux) vis-à-vis de la stabilité. Le problème de la stabilité nécessite la prise en compte des propriétés des matériaux ainsi que d'un certain nombre de facteurs importants généralement regroupés sous le terme d'imperfections, qui comprennent le manque de rectitude initial, les excentricités accidentelles de chargement et les contraintes résiduelles. La conception est généralement basée sur le concept des courbes de flambement, qui relie la résistance au flambement à l'élancement réduit de l'élément. Bien que les éléments récupérés doivent satisfaire à toutes les tolérances géométriques, il peut être raisonnable, dans certaines circonstances, de considérer une valeur γ_{M1} plus élevée pour la vérification de la stabilité lors de l'utilisation d'acier récupéré. Cela permet de disposer d'une marge de sécurité supplémentaire pour tenir compte des incertitudes liées à l'histoire du matériau, aux imperfections potentielles et à la variabilité qui ne sont pas entièrement prises en compte dans les hypothèses de conception standard. Une approche possible est présentée à l'annexe B.

Si une structure est conservée à son emplacement d'origine (réhabilitation/rénovation), il n'y a aucune raison d'augmenter les niveaux de sécurité requis. Cela signifie que les valeurs de $K_{\gamma_{M1}}$ pour les éléments existants en acier au carbone construits après 1970 peuvent être

considérées comme égales à 1 pour un tel scénario de réemploi. La valeur de $K_{\gamma M_1}$ est également liée à l'incertitude des multiples processus de transport, de démontage et de montage, ainsi qu'aux procédures d'essai pour évaluer les imperfections géométriques. Comme la plupart des incertitudes ne sont pas prises en compte si le bâtiment reste à son emplacement d'origine, la valeur de $K_{\gamma M_1} = 1,0$ peut être utilisée.

6.2 Analyse structurale (statique)

L'analyse structurale globale pour l'ELU doit être effectuée conformément aux principes de la norme EN 1993-1-1, en tenant compte des imperfections globales (effets P- Δ , pour la structure) et locales (effets P- δ , pour l'élément) et des effets du second ordre.

L'analyse globale peut également être du premier ou du second ordre, en fonction de la souplesse horizontale de la structure, qui détermine si négliger les effets du second ordre peut conduire à une sous-estimation des efforts internes et des moments de flexion. Pour les structures sensibles aux effets du second ordre global, il est recommandé que les effets globaux P- Δ soient pris en compte par une analyse géométrique non linéaire (généralement effectuée à l'aide d'un logiciel) ou en utilisant le facteur d'amplification conformément au paragraphe 7.2.2 (12)-(13) de l'EN 1993-1-1 :2022.

L'analyse élastique globale est recommandée lors de la conception de charpentes métalliques récupérées pour obtenir des efforts internes et les déplacements dans une structure. Une analyse géométriquement linéaire présente l'avantage de pouvoir utiliser la superposition des forces internes de différents cas de charge. En fonction de la classe de section, la conception des éléments peut être effectuée sur la base de la résistance plastique ou élastique de la section, conformément à l'EN 1993-1-1.

Les résistances des éléments aux états limites ultimes (ELU) contrôlent la sécurité de la structure et doivent être satisfaites. La vérification de la conformité d'une structure ou d'un élément à cet état limite est une vérification technique basée sur les dispositions de la norme de conception EN 1993-1-1 (voir section 6.3).

L'état limite de service (ELS) décrit la performance fonctionnelle de la structure et est généralement basé sur les attentes du propriétaire du bâtiment, qui doit spécifier les critères de performance à respecter. Les ELS ne sont pas critiques en matière de sécurité, mais ils peuvent nuire à l'utilisation et à la durabilité du bâtiment, par exemple en provoquant des fissures et des fuites à cause d'une déformation excessive du bardage (voir section 6.5).

6.3 États limites ultimes

6.3.1 Dimensionnement des éléments : résistance des sections transversales

Les règles énoncées dans la clause 8.2 de l'EN 1993-1-1 :2022 peuvent être appliquées sans restriction dans les vérifications de conception pour la résistance des sections transversales en prenant en considération les classes de sections transversales de la clause 7.5. Les modèles de résistance doivent être basés sur les propriétés nettes des sections transversales. Le concepteur de la charpente métallique peut adopter en toute sécurité les valeurs pour γ_{M_0} et γ_{M_2} conformément à l'annexe nationale appropriée de l'EN 1993-1-1: 2022 (voir section 6.2.3).

6.3.2 Dimensionnement des éléments : stabilité

Pour les vérifications de stabilité des éléments, il convient de tenir compte des imperfections locales, conformément à l'article 7.3.3 de l'EN 1993-1-1 :2022. En général, ce point est traité implicitement dans les procédures de vérification des éléments individuels de l'article 8.3. Dans le cas d'éléments utilisant de l'acier de réemploi, il peut être nécessaire de remplacer γ_{M1} par $\gamma_{M1,mod}$ (voir section 6.1.3). Cette modification est notamment recommandée si des procédures de requalification comparables à celle définies dans le CEN/TS 1090-201 [3] ne sont pas utilisées.

En général, la section transversale brute des éléments structuraux est utilisée pour déterminer la résistance au flambement. Toutefois, si des trous de boulons sont situés dans la section critique (à l'endroit des efforts internes maximaux) et réduisent la section transversale de plus de 15 % dans le segment critique de l'élément, les propriétés de la section transversale nette doivent être utilisées dans la conception [59]. L'élancement réduit doit cependant toujours être déterminé avec la section brute.

6.3.3 Dimensionnement des assemblages

La conception des assemblages doit être basée sur la partie 1-8 de l'EN 1993 en utilisant les coefficients partiels spécifiés γ_M . Pour les vérifications de la résistance au voilement, par exemple, l'âme d'un poteau en compression transversale pour les assemblages rigides (résistants au moment), il n'est pas nécessaire de modifier le coefficient partiel γ_{M1} .

Si les éléments en acier qui seront réemployés sont assemblés par soudage, on peut supposer que le matériau de la soudure a la même résistance que le matériau de la structure métallique de base [59]. Il est toutefois recommandé d'inspecter soigneusement les soudures existantes.

La qualité de l'acier des platines d'about peut être considérée comme la même que celle du matériau de base des éléments structuraux qu'elles relient.

Des bonnes pratiques en matière de conception des assemblages conformément à la norme EN1993-1-8 sont, entre autres, présentées dans les références [84] et [85].

6.3.4 Dimensionnement de la structure principale

Les sous-sections précédentes ont abordé le comportement des éléments individuels en supposant que les conditions de charge et de support sont connues. La conception des éléments d'une structure dépend naturellement de la manière dont ils sont assemblés et conduit aux types suivants : (i) structure articulée, (ii) structure avec assemblages encastrés et (iii) structure avec assemblage semi-rigide.

Dans une structure articulée, les assemblages entre les éléments sont nominalement rotulés, de sorte qu'ils ont une faible rigidité en rotation et ne transmettent pas de moments. Cela permet de concevoir tous les éléments comme s'ils étaient sur appuis simples.

Dans une structure encastrée, les assemblages sont rigides en rotation et transmettent des moments importants entre les éléments. Dans ce cas, les éléments peuvent encore être conçus séparément, à condition que les efforts internes soient calculés en tenant compte des moments transférés entre les éléments. Ce calcul peut être effectué à partir d'une analyse globale élastique.

La clause 7.2.2 de l'EN 1993-1-1 : 2022 autorise toutes les formes d'imperfections géométriques et matérielles dans une analyse globale de second ordre des portiques. Cette approche nécessite un logiciel spécialisé et est rarement utilisée dans la pratique. L'option b) de la clause 7.2.2(2) est le choix le plus probable ; elle permet un traitement séparé de toutes les imperfections et considère les imperfections globales, c'est-à-dire les imperfections du portique, dans l'analyse globale, et les imperfections locales, dans les vérifications des éléments. Les détails sur la manière dont les imperfections globales des portiques doivent être prises en compte sont donnés dans la clause 7.3.2.

Les systèmes de contreventement permanents sont conçus pour résister :

- aux charges horizontales appliquées à l'ossature contreventée ;
- à toute charge appliquée directement au système de contreventement ;
- à l'effet des imperfections des portiques qu'il maintient.

Pour les besoins du calcul, et conformément à l'article 7.3 de la norme EN 1993-1-1 :2022, ces imperfections sont remplacées par des forces horizontales équivalentes.

Pour le contreventement dans le plan vertical, les trois effets doivent être combinés. Des forces horizontales équivalentes doivent être prises en compte pour toutes les combinaisons de charges ELU, car leur but est de représenter la géométrie initiale imparfaite qui conduit à des déflexions sous la charge appliquée. Ces forces équivalentes doivent être déterminées séparément pour chaque combinaison de charges, car elles dépendent de l'ampleur des charges verticales de calcul.

Les systèmes de stabilisation des semelles comprimées sont conçus conformément à l'article 7.3.5 de la norme EN 1993 : 2022. Les imperfections sont prises en compte selon l'une des méthodes suivantes : soit en incluant une imperfection initiale de l'arc dans les éléments à maintenir et en calculant les moments supplémentaires, soit en utilisant une force stabilisatrice équivalente. Lorsque les poutres ou les éléments de compression sont éclissés, il faut en outre que le contreventement puisse résister à une force locale supplémentaire à l'endroit de l'éclisse (voir clause 7.3.5.2(2)).

L'EN 1993 ne contient aucune règle spécifique sur le calcul des contreventements temporaires ou de montage. Ces systèmes garantissent que la structure peut être construite en toute sécurité. Ils dépendent de la séquence de construction et doivent être placés de manière à réduire les erreurs de tolérance cumulées.

6.3.5 Dimensionnement des éléments de l'ossature secondaire

L'ossature métallique secondaire prend généralement la forme de pannes formées à froid qui s'étendent entre les poutres de la toiture (traverses) et de lisses qui s'étendent entre les poteaux. Ces éléments supportent l'enveloppe et sont conçus pour résister aux charges de vent, et, en plus dans le cas des toitures, pour résister à la charge de neige. Les pannes et les lisses sont également souvent utilisées pour maintenir les poutres et les poteaux et pour transférer les charges horizontales au système de contreventement.

Le paragraphe 11 de la norme EN 1993-1-3 fournit des règles pour le calcul des pannes et des lisses. Ces éléments étant généralement développés avec des formes spécifiques, les fabricants ont développé et testé des sections appropriées, fournissant des données de calcul sous forme de tableaux ou de logiciels.

6.4 Considérations relatives au calcul sismique

Les concepteurs doivent noter que le calcul sismique des bâtiments à simple rez-de-chaussée ne nécessite généralement pas d'attention particulière conformément au paragraphe 6 de la norme prEN 1998-1-2 [86]. Les bâtiments à un étage sont généralement traités comme des bâtiments de classe de faible ductilité (DC1), ce qui signifie que les exigences de résistance de l'EN1993-1-1 sont suffisantes. La contrepartie de cette pratique est qu'un facteur de comportement plus faible doit être pris en compte lors de l'évaluation de l'action sismique de calcul. Cependant, comme les bâtiments à un étage ont une faible masse, l'action sismique n'est généralement pas déterminante pour le dimensionnement. Si la classe DC1 est retenue dans le calcul, il n'y a pas de problème à utiliser les éléments en acier récupéré pour les structures soumises à l'action sismique, mais un facteur de comportement $q=1$ est recommandé pour le dimensionnement de la charpente en acier récupéré.

Les recommandations fournies dans le présent document peuvent être adaptées à d'autres structures, telles que les bâtiments à plusieurs étages, pour lesquelles l'action sismique a une autre importance (présence de masses plus importantes, hauteur du bâtiment, zones dissipatives). Les structures conçues en prenant en compte un comportement structural dissipatif doivent appartenir aux classes de ductilité structurale DC2 ou DC3. Ces classes correspondent à une capacité accrue de la structure à dissiper l'énergie par des mécanismes plastiques. En fonction de la classe de ductilité, des exigences spécifiques concernant la classe des sections transversales et la capacité de rotation des assemblages doivent être respectées. Dans de tels cas, il n'est recommandé d'autoriser les éléments en acier de réemploi que si ces éléments sont utilisés au moins dans l'une des conditions suivantes : (i) en tant que poteau ou élément des systèmes de résistance aux charges secondaires (ne faisant pas partie du système de résistance aux charges latérales, telles que les poutres de plancher articulées), ou (ii) en tant qu'éléments faisant partie d'une structure de type DC1.

Les procédures d'évaluation et d'essai proposées dans l'annexe A sont en accord avec les exigences proposées dans la norme EN1998-3 [87] pour les bâtiments existants. Dans les cas où l'évaluation d'une structure existante est entreprise et qu'un comportement dissipatif (classe de ductilité moyenne ou élevée) est requis, les procédures d'essai recommandées doivent suivre les recommandations pour une structure CC3 conformément à l'annexe A. Des conseils supplémentaires peuvent être trouvés dans les références [88] à [90].

6.5 États limites de service – Flèches et déplacements

Les conditions d'état limite de service (flèches, déplacements, vibrations) sont présentées dans les clauses 5.4, 8.4 et l'annexe A de la norme EN 1990: 2023 [10]. Les critères et limites d'aptitude au service sont indiqués dans l'annexe A de la norme EN 1990: 2023 et peuvent être utilisés pour concevoir des structures utilisant des éléments en acier de réemploi. Les exigences d'aptitude au service doivent être spécifiées individuellement pour chaque projet. Des dispositions supplémentaires relatives aux critères d'aptitude au service sont données dans les autres Eurocodes. Les autres valeurs maximales doivent être spécifiées par l'autorité compétente ou, lorsqu'elles ne sont pas spécifiées, elles peuvent

être définies pour un projet spécifique par les parties concernées. L'analyse élastique est utilisée pour déterminer les déplacements des éléments dans l'état limite de service.

Dans ce qui suit, d'autres conditions susceptibles d'influer sur les critères d'aptitude au service sont présentées.

Bardage

Le déplacement différentiel entre les portiques voisins doit être limité pour éviter que les fixations des éléments de bardage ne soient trop sollicitées, ce qui entraînerait des déchirures et d'éventuelles fuites. Par exemple, les tôles ou plateaux de bardage dans les bâtiments à un étage se déforment nettement moins que les déplacements calculés pour l'ossature nue. Cela est dû au fait que les tôles ou les plateaux agissent comme un diaphragme et fournit une augmentation considérable de la rigidité de la structure. La déformation réelle dépend des proportions du bâtiment et du type de bardage, mais des réductions des déplacements horizontaux de plus de 50 % (par rapport à ceux calculés pour la charpente nue) sont généralement mesurées sur les structures telles qu'elles ont été construites.

Pignons

Un portique de pignon avec bardage et/ou contreventé est très rigide dans son propre plan. Les déplacements différentiels calculés entre le portique d'extrémité et le portique adjacent peuvent être très élevés. Cette flèche différentielle sera toujours modifiée par la présence du plancher du bâtiment, de la toiture et du contreventement du toit.

Maçonnerie

Lorsque les murs latéraux en briques ou en parpaings sont construits de telle sorte qu'ils reçoivent le maintien de l'ossature en acier, ils doivent être conçus de manière à pouvoir fléchir avec l'ossature en utilisant un joint compressible à la base du mur. Un dispositif de maintien approprié doit être prévu au sommet du panneau de maçonnerie et aux points intermédiaires, si nécessaire. Si la maçonnerie se poursuit autour des poteaux d'acier, formant des piliers rigides, il n'est pas raisonnable de supposer que les panneaux fléchissent avec l'ossature. Dans ce cas, des limites de déformation plus sévères doivent être appliquées à l'ossature.

Accumulations d'eau de pluie

Sur les toits en pente à faible inclinaison et les toits plats, la possibilité d'une accumulation d'eau sur le toit doit également être prise en compte. La pente de toit minimale recommandée est de 3° après prise en compte du déplacement vertical. La pente standard recommandée est de 6° par rapport à l'horizontale, ce qui permet de ne pas tenir compte de l'effet d'accumulation d'eau de pluie. Les traverses en treillis ont généralement une pente de 3° par rapport à l'horizontale, mais comme ils sont beaucoup plus rigides que les solutions avec des profils laminés à chaud ou des PRS, les effets d'accumulation ne sont pas critiques.

REFERENCES

- [1] Kibert CJ (2013). Sustainable construction: green building design and delivery: green building design and Delivery. John Wiley & Sons.
- [2] Recommandations professionnelles – Réemploi d’éléments structuraux en acier, juin 2024.
- [3] CEN – European Committee for Standardisation (2024). CEN/TS 1090-201: Execution of steel structures and aluminium structures – Reuse of structural steel, Brussels, Belgium.
- [4] Densley Tingley D, Allwood J (2014). Reuse of structural steel: the opportunities and challenges. In: European Steel Environment & Energy Congress 2014, 15-17 September, Teeside University, UK.
- [5] Chen H-M, Wang Y, Zhou K, Lam D, Guo W, Li L, Ajayebi A, Hopkinson P (2022). Reclaiming structural steels from the end of service life composite structures for reuse – An assessment of the viability of different methods. Developments in the Built Environment 10, 100077.
- [6] Yrjölä J. (2022). New white paper: Dismount and reuse of precast concrete structures, Peikko Group. Retrieved from: <https://www.peikko.com/blog/new-white-paper-dismount-and-reuse-of-precast-concrete-structures/>.
- [7] ReCreate Project. (2023). Reusing concrete building components – A practical example. [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=EzppFH_Fg4w.
- [8] CEN – European Committee for Standardisation (2009). EN 1090-1: Execution of steel structures and aluminium structures, Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components (incorporating CEN amendment A1:2012), Brussels, Belgium.
- [9] CEN – European Committee for Standardisation (2018). EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures, Part 2: Technical requirements for steel structures (incorporating CEN amendment A1:2024), Brussels, Belgium.
- [10] CEN – European Committee for Standardisation (2023). EN 1990: Eurocode: Basis of structural and geotechnical design, Brussels, Belgium.
- [11] CEN – European Committee for Standardisation (2002). EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings (incorporating CEN corrigenda Dec. 2004 and Mar. 2009), Brussels, Belgium.
- [12] CEN – European Committee for Standardisation (2002). EN 1991-1-3: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-3: General actions – snow loads (incorporating CEN corrigenda Dec. 2004 and Jun. 2009, and CEN amendment A1:2015), Brussels, Belgium.
- [13] CEN – European Committee for Standardisation (2002). EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-4: General actions – wind actions (incorporating CEN amendment A1:2010), Brussels, Belgium.
- [14] CEN – European Committee for Standardisation (2003). EN 1991-1-5: Eurocode 1. Actions on structures, Part 1-5: General actions – Thermal actions, Brussels, Belgium.

- [15] CEN – European Committee for Standardisation (2005). EN 1991-1-6: Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-6: General actions – Actions during execution, Brussels, Belgium.
- [16] CEN – European Committee for Standardisation (2022). EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [17] CEN – European Committee for Standardisation (2024). EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Brussels, Belgium.
- [18] CEN – European Committee for Standardisation (2024). EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints, Brussels, Belgium.
- [19] CEN – European Committee for Standardisation (2005). EN 1993-1-10: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties (incorporating CEN corrigenda Dec. 2005, Sep. 2006 and Mar. 2009), Brussels, Belgium.
- [20] CEN – European Committee for Standardisation (2004). EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [21] CEN – European Committee for Standardisation (2004). EN 10025-1: Hot rolled products of structural steels, Part 1: General technical delivery conditions, Brussels, Belgium.
- [22] CEN – European Committee for Standardisation (2019). EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels, Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, Brussels, Belgium.
- [23] CEN – European Committee for Standardisation (2019). EN 10025-4: Hot rolled products of structural steels, Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels (incorporating CEN amendment A1:2022), Brussels, Belgium.
- [24] CEN – European Committee for Standardisation (2004). EN 10025-5: Hot rolled products of structural steels, Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance, Brussels, Belgium.
- [25] CEN – European Committee for Standardisation (2010). EN 10029: Hot rolled steel plates 3 mm thick or above, Tolerances on dimensions and shape, Brussels, Belgium.
- [26] CEN – European Committee for Standardisation (1993). EN 10034: Structural steel I and H sections – Tolerances on shape and dimensions, Brussels, Belgium.
- [27] CEN – European Committee for Standardisation (2024). EN 10051: Continuously hot-rolled strip and plate/sheet cut from wide strip of non-alloy and alloy steels – Tolerances on shape and dimensions, Brussels, Belgium.
- [28] CEN – European Committee for Standardisation (1998). EN 10055: Hot rolled steel equal flange tees with radiused root and toes – Dimensions and tolerances on shape and dimensions, Brussels, Belgium.
- [29] CEN – European Committee for Standardisation (2017). EN 10056-1: Structural steel equal and unequal leg angles, Part 1: Dimensions, Brussels, Belgium.

- [30] CEN – European Committee for Standardisation (1993). EN 10056-2: Structural steel equal and unequal leg angles, Part 2: Tolerances on shape and dimensions, Brussels, Belgium.
- [31] CEN – European Committee for Standardisation (2004). EN 10204: Metallic products – Types of inspection documents, Brussels, Belgium.
- [32] CEN – European Committee for Standardisation (2006). EN 10210-1: Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 1: Technical delivery requirements, Brussels, Belgium.
- [33] CEN – European Committee for Standardisation (2019). EN 10210-2: Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties, Brussels, Belgium.
- [34] CEN – European Committee for Standardisation (2006). EN 10219-1: Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 1: Technical delivery requirements, Brussels, Belgium.
- [35] CEN – European Committee for Standardisation (2019). EN 10219-2: Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels, Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties, Brussels, Belgium.
- [36] CEN – European Committee for Standardisation (2000). EN 10279: Hot rolled steel channels – Tolerances on shape, dimension and mass, Brussels, Belgium.
- [37] CEN – European Committee for Standardisation (2015). EN 10346: Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions, Brussels, Belgium.
- [38] CEN – European Committee for Standardisation (2022). EN 10169: Continuously organic coated (coil coated) steel flat products – Technical delivery conditions, Brussels, Belgium.
- [39] CEN – European Committee for Standardisation (2017). EN 10365 Hot rolled steel channels, I and H sections – Dimension and masses, Brussels, Belgium.
- [40] CEN – European Committee for Standardisation. EN 14399: High-strength structural bolting assemblies for preloading (all parts), Brussels, Belgium.
- [41] CEN – European Committee for Standardisation (2013). EN 14509: Self-supporting double skin metal faced insulating panels, Factory made products, Specifications, Brussels, Belgium.
- [42] Steel buildings in Europe: Design guides for single-storey and multi-storey steel buildings. https://constructalia.arcelormittal.com/en/news_center/articles/design_guides_steel_buildings_in_europe.
- [43] Kamrath, P., Sansom, M., Ungureanu, V., & Hradil, P. (2020). Deliverable D2.1a: Safe and efficient deconstruction; Deliverable D2.1a: Deconstruction protocol for single-storey steel framed buildings. European Convention for Constructional Steelwork. <https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/PROGRESS-D2.1-Auditing-and-deconstruction-process.pdf>.
- [44] Single storey industrial buildings. https://steelconstruction.info/Single_storey_industrial_buildings.
- [45] Multi-storey office buildings. https://steelconstruction.info/Multi-storey_office_buildings.

- [46] CEN – European Committee for Standardisation (2019). EN 15804: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products (incorporating CEN amendment A2:2019), Brussels, Belgium.
- [47] CEN – European Committee for Standardisation (2011). EN 15978: Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method, Brussels, Belgium.
- [48] CEN – European Committee for Standardisation (2015). EN 16627: Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method, Brussels, Belgium.
- [49] CEN – European Committee for Standardisation (1992). ENV 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [50] European Union (2011). Regulation (EC) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC/WFD 2008/98/EC. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/oi>.
- [51] European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Oberender, A., Fruergaard Astrup, T., Frydkjær Witte, S., Camboni, M., Chiabrando, F., Hayleck, M., & Akelyté, R. (2024). EU construction & demolition waste management protocol including guidelines for pre-demolition and pre-renovation audits of construction works: updated edition 2024, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/77980>.
- [52] ECCS P49 (1987). European recommendations for design of light gauge steel members, Publication P049, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, Belgium.
- [53] CEN – European Committee for Standardisation (1996). ENV1993-1-3: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1.3. General Rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting. (including the Corrigenda to ENV1993-1-3 of 1997-02-25). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [54] Feldmann M et al. (2024). Guidance on Establishing European Rules for the Design of reclaimed Steel Components for Reuse (4th draft), CEN-TC 250-SC 3-AHG Reuse.
- [55] Girao Coelho AM, Pimentel R, Ungureanu V, Hradil P, Kesti J (2020). European Recommendations for Reuse of Steel Products in Single-Storey Buildings, 1st Edition, <https://www.steelconstruct.com/>.
- [56] CEN – European Committee for Standardisation (2017). CEN ISO/TR 15608: Welding – Guidelines for a metallic materials grouping system, Brussels, Belgium.
- [57] BSI – British Standards Institution. BS 15:1948. Structural steel, UK.
- [58] BSI – British Standards Institution. BS 4360-2:1969. Specification for weldable structural steels metric units, UK.
- [59] SIA 269/3:2011. Existing structures – Steel structures, SIA Zurich.
- [60] Brown D. G. and Iles, D. C. Selection of steel sub-grade in accordance with the Eurocodes. SCI Document ED007. SCI, 2012.

- [61] PD 6695-1-10:2009. Recommendations for the design of structures to BS EN 1993-1-10. BSI, 2009.
- [62] P419 – Brittle fracture: selection of steel sub-grade to BS EN 1993-1-10; ISBN 1-85942-135-0, 2017. The Steel Construction Institute.
- [63] Sedlacek, G. et al. Commentary and worked examples to BS EN 1993-1-10 “Material toughness and through thickness properties” and other toughness-oriented rules in BS EN 1993. European Commission Joint Research Centre, 2008.
- [64] Davison B, Owens GW (eds.) (2012). Steel designers’ manual. The Steel Construction Institute, 7th edition, Wiley-Blackwell, UK.
- [65] CEN – European Committee for Standardisation (2007). EN ISO 8501-1: Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness, Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, Brussels, Belgium.
- [66] BS 4 Part 1:1962. Specification for structural steel section; Part 1: Hot Rolled sections.
- [67] Dorman Long & CO Ltd (1964). Handbook for constructional engineers, Fanfare Press Ltd, London, UK.
- [68] The British Constructional Steelwork Association (1994). National structural steelwork specification for building construction, 3th Edition, 203, London, UK.
- [69] STAS 767/0-88 (1988). Steel Structures. General technical requirements for quality of non-industrial, industrial and agricultural buildings. Romanian Institute for Standardization.
- [70] CEN – European Committee for Standardisation (2016). EN ISO 17637: Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints, Brussels, Belgium.
- [71] CEN – European Committee for Standardization (2020). EN ISO 7438: Metallic materials – Bend test, Brussels, Belgium.
- [72] CEN – European Committee for Standardisation (2018). EN 1090-4: Execution of steel structures and aluminium structures, Part 4: Technical requirements for cold-formed structural steel elements and cold-formed structures for roof, ceiling, floor and wall applications, Brussels, Belgium.
- [73] CEN – European Committee for Standardisation (2003). EN 10162: Cold rolled steel sections –Technical delivery conditions – Dimensional and cross-sectional tolerances, Brussels, Belgium.
- [74] CEN – European Committee for Standardisation (2006). EN 10143: Continuously hot-dip coated steel sheet and strip – Tolerances on dimensions and shape, Brussels, Belgium.
- [75] CEN – European Committee for Standardisation (2013). EN 14509: Self-supporting double skin metal faced insulating panels. Factory made products. Specifications, Brussels, Belgium.
- [76] CEN – European Committee for Standardisation (2006). EN 14782: Self-supporting metal sheet for roofing, external cladding and internal lining. Product specification and requirements, Brussels, Belgium.

- [77] International Standard (2010). ISO 13822: Bases for design of structures – Assessment of existing structures, Geneva, Switzerland.
- [78] Gulvanessian H, Calgar JA, Holický M (2012). Designer's guide to Eurocode: basis of structural design EN 1990, ICE Publishing, Thomas Telford, London (2nd edition).
- [79] Steenbergen RDJM, Vrouwenvelder ACWM (2010). Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges, Heron 55(2), 123-140.
- [80] Matthews S (2012). Structural appraisal of existing buildings, including for a material change of use, Part 3: Structural appraisal procedures, BRE-DG 366, Building Research Establishment, UK.
- [81] Sedlacek G, Spangemacher R, Hensen W, ARBED Research (1989). Background Documentation for EC3, Doc. 5.01, Background document for the justification of safety factor $\gamma_M = 1.0$ for rolled beams in bending about the strong axis. Commission of the European Communities.
- [82] Sedlacek G, Ungermaa D, Kuck J, Maquoi R, Janss J (1989). Background Document for EC3, Doc. 5.03, Evaluation of test results on beams with cross-sectional classes 1-3 in order to obtain strength functions and suitable model factors. Commission of the European Communities.
- [83] Charbrolin B, CTICM, Labein, ProfilARBED, RWTH, SCI, TNO, SAES (2002). Partial safety factors for resistance of steel elements to EC3 and EC4. Calibration for various steels products and failure criteria. Final report. Technical steel research series, European Communities, EUR 20344 EN.
- [84] SCI P358, Joints in steel construction: Simple joints to Eurocode 3, 2014. The Steel Construction Institute.
- [85] SCI P398 Joints in steel construction: Moment-resisting joints to Eurocode 3. The Steel Construction Institute.
- [86] CEN – European Committee for Standardisation (2023). prEN 1998-1-2: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1-2: Buildings, Brussels, Belgium.
- [87] CEN – European Committee for Standardisation (2005). EN 1998-3: Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Assessment and retrofitting of buildings, Brussels, Belgium.
- [88] AISC – American Institute of Steel Construction (2022). ANSI/AISC 342:2022: Seismic Provisions for Evaluation and Retrofit of Existing Structural Steel Buildings, Chicago, IL, USA.
- [89] ASCE – American Society of Civil Engineers (2017). ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Reston, Virginia, USA.
- [90] FEMA P-2208:2023: NEHRP Recommended Revisions to ASCE/SEI 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, USA.
- [91] CEN – European Committee for Standardisation (2007). EN 1993-6:2007 Eurocode 3. Design of steel structures. Crane supporting structures, Brussels, Belgium.
- [92] CEN – European Committee for Standardisation (2016). EN 13018: Non-destructive testing, Visual testing, General principles, Brussels, Belgium.

- [93] CEN – European Committee for Standardisation (2011). EN ISO 13385-1: Geometrical product specifications (GPS), Dimensional measuring equipment, Part 1: Callipers; Design and metrological characteristics (incorporating corrigendum Oct. 2015), Brussels, Belgium.
- [94] CEN – European Committee for Standardisation (2011). EN ISO 13385-2: Geometrical product specifications (GPS), Dimensional measuring equipment, Part 2: Calliper depth gauges; Design and metrological characteristics (incorporating corrigendum Oct. 2015), Brussels, Belgium.
- [95] CEN – European Committee for Standardisation (2013). EN ISO 3452-1: Non-destructive testing, Penetrant testing, Part 1: General principles (incorporating corrigendum Jun. 2014), Brussels, Belgium.
- [96] CEN – European Committee for Standardisation (2010). EN ISO 15549: Non-destructive testing – Eddy current testing – General principles, Brussels, Belgium.
- [97] CEN – European Committee for Standardisation (2015). EN ISO 17643: Non-destructive testing of welds – Eddy current examination of welds by complex plane analysis, Brussels, Belgium.
- [98] CEN – European Committee for Standardisation (2014). EN ISO 16810: Non-destructive testing, Ultrasonic testing, General principles, Brussels, Belgium.
- [99] CEN – European Committee for Standardisation (2018). EN ISO 17640: Non-destructive testing of welds, Ultrasonic testing, Techniques, testing levels, and assessment, Brussels, Belgium.
- [100] CEN – European Committee for Standardisation (2016). EN ISO 17638: Non-destructive testing of welds. Magnetic particle testing, Brussels, Belgium.
- [101] CEN – European Committee for Standardisation (2015). EN ISO 23277: Non-destructive testing of welds, Penetrant testing, Acceptance levels, Brussels, Belgium.
- [102] CEN – European Committee for Standardisation. EN ISO 17636: Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. X- and gamma-ray techniques (all parts), Brussels, Belgium.
- [103] FEMA 352:2000. Recommended Post earthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded. Steel Moment-Frame Buildings; Federal Emergency Management Agency USA.
- [104] CEN – European Committee for Standardisation. EN ISO 6507: Metallic materials. Vickers hardness test (all parts), Brussels, Belgium.
- [105] CEN – European Committee for Standardisation. EN ISO 6508: Metallic materials. Rockwell hardness test (all parts), Brussels, Belgium.
- [106] CEN – European Committee for Standardisation – EN ISO 6505: Metallic materials. Brinell hardness test (all parts), Brussels, Belgium.
- [107] ASTM – American Society for Testing and Materials (2017). A1038: Standard test method for portable hardness testing by the ultrasonic contact impedance method. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [108] ISO 19272:2015; Low alloyed steel – Determination of C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Al, Ti and Cu – Glow discharge optical emission spectrometry (routine method), 2015.

- [109] ASTM – American Society for Testing and Materials (2013). E572: Standard test method for analysis of stainless and alloy steels by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [110] ASTM – American Society for Testing and Materials (2014). E1476: Standard guide for metals identification, grade verification, and sorting, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [111] ISO 145775 (all parts). Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
- [112] CEN – European Committee for Standardisation (2007). CEN Workshop Agreement CWA 15627: Small punch test method for metallic materials, Brussels, Belgium.
- [113] CEN – European Committee for Standardisation (2017). prEN 15627: Metallic materials – Small punch test method, working document, ECISS/TC 1010/WG 1 committee.
- [114] CEN – European Committee for Standardisation (2020). EN ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature, Brussels, Belgium.
- [115] CEN – European Committee for Standardisation (2002). EN ISO 14284: Steel and iron – sampling and preparation of samples for the determination of chemical composition (incorporating corrigendum Dec. 2002), Brussels, Belgium.
- [116] CEN – European Committee for Standardisation (2016). EN ISO 148-1: Metallic materials – Charpy pendulum impact test, Part 1: Test method, Brussels, Belgium.
- [117] ASTM – American Society for Testing and Materials (2013). E112 Standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [118] SCI P427 – Structural Steel Reuse: assessment, testing and design principles, The Steel Construction Institute, 2019.
- [119] Simões da Silva L, Marques L, Tankova T, Rebelo C, Kuhlmann U, Kleiner A, Spiegler J, Snider HH, Dekker RWA, Dehan V, Taras A, Haremza C, Cajot LG, Vassart O, Popa N (2017). Standardisation of safety assessment procedures across brittle to ductile failure modes (SAFEBRITTLE). Research Fund for Coal and Steel (RFCS), Final report EUR 28906, European Commission, Brussels, Belgium.
- [120] Fujita M, Kuki K (2016). An evaluation of mechanical properties with the hardness of building steel structural members for reuse by NDT, Metals 6, 247, doi: 10.3390/met6100247.
- [121] CEN – European Committee for Standardisation (2013). EN ISO 18265: Metallic materials – Conversion of hardness materials, Brussels, Belgium.
- [122] CEN – European Committee for Standardisation (20174). EN ISO 377: Steel and steel products. Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing, Brussels, Belgium.
- [123] CEN – European Committee for Standardisation (2017). EN 13523-1: Coil coated metals. Test methods. Film thickness, Brussels, Belgium.
- [124] CEN – European Committee for Standardisation (2002). EN 13523-6: Coil coated metals. Test methods. Adhesion after indentation, Brussels, Belgium.

[125] CEN – European Committee for Standardisation (2014). EN 13523-7: Coil coated metals. Test methods. Resistance to cracking on bending (T-bend test), Brussels, Belgium.

[126] Holický M (2009). Reliability analysis for structural design. Sun Press.

Annexe A

Évaluation, mesures, échantillonnage et tests

A.1 Général

La détermination des propriétés des matériaux et la vérification de la structure ou des composants structuraux sont nécessaires pour évaluer la possibilité de réemploi. Les protocoles d'essais comprendront une série d'essais et devront être entrepris avec soin. Il convient de trouver un équilibre entre l'obtention d'informations suffisantes pour porter un jugement raisonnable sur le risque et le fait que l'échantillonnage intrusif n'endommage pas la structure elle-même, comme indiqué ci-dessous :

- sur un échantillon représentatif, plusieurs types d'essai peuvent être réalisés afin d'obtenir des informations sur différentes caractéristiques ;
- les procédures d'évaluation des performances faisant appel aux essais non destructifs (END) devraient être favorisées, si possible ;
- dans le cas d'un contrôle destructif (DT), le perçage ou la découpe doivent être soigneusement localisés, spécifiés et supervisés afin d'éviter tout dommage potentiel à la structure ;
- lorsque le soudage est prévu, la composition chimique doit être déterminée afin que la spécification de la procédure de soudage puisse être établie. L'aptitude du métal de base au soudage doit être démontrée par la valeur du carbone équivalent (CEV).

A.2 Évaluation qualitative et mesures

A.2.1 Généralités

L'organigramme de la Fig. 5.1 illustre le cadre général de la récupération des éléments structuraux en acier existants. La nécessité d'évaluer les processus de fabrication de la charpente métallique existante (principalement les soudures) a également été soulignée, afin de s'assurer que ces processus sont conformes aux exigences de qualité de la norme EN 1090. La section suivante fournit des conseils supplémentaires pour l'évaluation de la charpente métallique existante ainsi que pour l'inspection des soudures.

A.2.2 Techniques de diagnostic

Les techniques de diagnostic adaptées au projet sont résumées dans le Tableau A.1. Ces techniques très simples permettent de déterminer l'état général de la structure et de définir une procédure d'échantillonnage et d'essai appropriée. Dans la pratique, elles sont combinées à des essais plus précis. Les informations suivantes peuvent être recueillies :

- l'âge de la structure et les éventuelles modifications ou réparations ;
- les matériaux de la structure (ou qui ont été ajoutés au cours de la vie de la structure) ;
- la géométrie et la configuration structurale du bâtiment, la taille des éléments et les détails des assemblages.

Dans le cas où toute la structure est réemployée, le diagnostic du bâtiment comprend d'autres détails. Les dimensions des composants aux endroits critiques doivent être mesurées. Les dimensions des assemblages et des fixations doivent être enregistrées, y

compris les dimensions des soudures. L'inspection de toutes les soudures doit être effectuée. En outre, la résistance au flambement étant affectée par les imperfections géométriques, une mesure détaillée des défauts éventuels doit être effectuée conformément à la norme EN 1090-2.

Tableau A.1. Techniques de diagnostic

Technique	Description	Commentaires/Valeur
Inspection visuelle	Examen de la corrosion, des fissures, des déformations, des dommages, etc.	Essentiel. Évaluation générale de l'état physique de la structure. Ne révèle pas les fissures fines ou sous-jacentes. Les dispositions générales sont données dans l'EN 13018 [92]
Enquête sur le terrain	Relevé géométrique des positions et des dimensions des éléments et des détails	Essentiel en l'absence de dessins et pour (i) vérifier les modifications et les réparations, (ii) déterminer les dimensions de la section transversale, la rectitude, la verticalité, la déformation et la flexion des éléments
Contrôle dimensionnel	Mesures à l'aide de pieds à coulisse, de micromètres, de balayage laser tridimensionnel, de mesures ultrasoniques, etc.	Essentiel en l'absence des plans originaux de la structure. Collecte de données géométriques, taille des éléments. Pour l'équipement et les outils, voir par exemple EN ISO 13385-1 [93] et EN ISO 13385-2 [94]

A.2.3 *Essais non destructifs des soudures*

Les essais non destructifs (END) sont généralement effectués à l'aide d'un équipement proche, appliqué sur ou fixé à la surface de la structure. Ils présentent des avantages majeurs, à savoir qu'ils n'endommagent pas la structure et qu'ils éliminent la nécessité de procéder à un échantillonnage aléatoire qui prend du temps, ainsi qu'à des essais en laboratoire ultérieurs. Tableau A.2 présente certaines des techniques qui peuvent être utilisées au cours de cette phase d'examen. Les techniques END peuvent être utiles pour localiser et/ou mesurer la taille des défauts.

Tableau A.2. Techniques potentielles d'END pour les soudures

Technique	Description	Commentaires/Valeur
Inspection visuelle	Couvre l'examen visuel des soudures.	Garantit un contrôle de qualité minimum pour chaque assemblage soudé. EN ISO 17637 [70].
Essai de ressage	Le colorant met en évidence les fissures débouchant à la surface.	Indique les fissures superficielles dans les éléments qui ne sont pas visibles à l'œil nu, environ 25 µm. Les défauts superficiels peuvent être détectés avec précision. La norme EN ISO 3452-1 [95] donne les principes généraux de cette technique. Pour les soudures, voir EN ISO 23277 [101].
Inspection des soudures par courants de Foucault	Les méthodes par courants de Foucault sont utilisées pour localiser et caractériser de manière non destructive les discontinuités dans les matériaux conducteurs magnétiques ou non magnétiques.	Option pour détecter les fissures superficielles et proches de la surface. Ne s'applique qu'aux géométries simples. Ne permet pas de détecter les défauts sous la surface. Les principes généraux sont énoncés dans la norme EN ISO 15549 [96] et, pour les soudures, dans la norme EN ISO 17643 [97].
Essais par ultrasons	Le transducteur convertit l'énergie électrique en ondes sonores à très haute fréquence qui sont réfléchies par les défauts et enregistrées.	Convient à la détection des défauts planaires sous la surface, y compris les fissures, le manque de fusion des soudures, les arrachements lamellaires, les fissures induites par l'hydrogène. Les dispositions générales relatives à cette technique figurent dans la norme EN ISO 16810 [98]. Pour les soudures, voir EN ISO 17640 [99].
Essai par magnétoscopie	Les essais par magnétoscopie utilisent l'aimantation de sections transversales possibles dans des matériaux conducteurs d'électricité. Pour visualiser le champ magnétique, on utilise une suspension contenant généralement des éclats d'acier fluorescents.	Cette méthode d'inspection ne peut être utilisée que pour la détection des fissures superficielles dans les matériaux ferromagnétiques. Les fissures dans les matériaux non magnétiques ou dans les éléments en sandwich ne peuvent pas être détectées. La méthode peut être appliquée comme contrôle de la qualité du positionnement des trous percés pour arrêter les fissures de fatigue actives. La norme EN 17638 [100] peut être citée comme référence.
Inspection radiographique	L'inspection radiographique (rayons X, rayons γ, par exemple avec une source Iridium) est appliquée pour détecter les fissures et les défauts dans les sections construites afin d'évaluer les éléments en sandwich. La source radiographique est située d'un côté	L'inspection radiographique ou rayon γ est la seule méthode dont la capacité a été validée pour la détection en laboratoire et sur site des fissures internes et des fissures dans le centre d'éléments en sandwich. La norme EN ISO 17636 [102] peut être citée comme référence.

	de l'élément construit, le film radiosensible, le détecteur ou l'unité de stockage numérique de l'autre côté de la section inspectée.	
--	---	--

A.2.4 Protocole d'inspection des soudures

Les soudures entre les éléments (y compris les poutres cellulaires) doivent être contrôlées. Le nombre de tests de soudure requis par la norme EN 1090-2 (voir tableau 24) doit être appliqué aux éléments en acier récupérés. Un contrôle visuel de 100 % des soudures est obligatoire. Le tableau A.3 suggère un nombre minimum d'assemblages soudés à contrôler par des essais non destructifs. Un assemblage peut comporter différents segments de soudure. Dans un assemblage traverse-poteau typique, les soudures entre les semelles et les âmes doivent être évaluées. Chacune de ces soudures peut être considérée comme un assemblage selon le tableau A.3.

Tableau A.3. Pourcentage minimum suggéré de soudures à tester [3] et [103]

Nombre total de soudures	Nombre de soudures à tester	Total %
6	3 (minimum)	50 %
10	4	40 %
15	5	33 %
20	6	30 %
30	8	27 %
40	10	25 %
50	12	24 %
75	16	21 %
100	20	20 %
200	30	15 %
300	40	13 %
500	60	12 %
1 000	100	10 %
2 000	150	8 %

A.3 Définition d'un groupe d'éléments à tester – groupe d'essai

Les éléments en acier de réemploi doivent être considérés comme un groupe (ou lot de contrôle), à condition qu'ils proviennent de la même structure d'origine et qu'ils répondent aux exigences suivantes :

- acier de construction fabriqué après 1970 ;
- même dimensions nominales ;
- même fonction structurale, par exemple pannes, poutres de plancher, poteaux, contreventements, etc. ;
- détails identiques (longueur, assemblages, etc.) ;
- les raidisseurs locaux ne sont pas considérés comme nuisibles pour le groupement.

Si une structure métallique fabriquée à l'origine selon une autre spécification/norme de produit (autre que les normes EN) doit être mise sur le marché, les éléments fabriqués selon différentes normes de produit ne doivent pas être mélangés au sein d'un groupe – la source et la norme de fabrication de tous les éléments d'un groupe doivent être cohérentes.

Un groupe doit avoir un poids maximal de 20 tonnes. Plusieurs groupes de 20 tonnes seront nécessaires si un grand nombre d'éléments sont récupérés. La définition d'un groupe d'éléments à tester de cette manière permet d'établir certaines caractéristiques du matériau pour le groupe en testant un ou plusieurs éléments représentatifs du groupe. Pour les éléments formés à froid, un groupe doit avoir un poids maximum de 4 tonnes.

Dans ce protocole, le concept de « groupe » a une signification particulière, comme indiqué ci-dessus. Dans les normes produit telles que l'EN 10025-2 ou l'EN 10346, un terme similaire est « unité d'essai », indiquant une collection de produits en acier d'un poids total maximum spécifié, de même forme, nuance et qualité, et de même condition de livraison. Une « unité d'essai » peut contenir des produits de différentes épaisseurs, alors que dans le présent protocole, un « groupe » est limité aux éléments de mêmes dimensions nominales. Dans les normes produit, il est spécifié que les essais doivent être effectués à partir d'échantillons de l'unité d'essai ; dans le présent protocole, il est spécifié que les essais doivent être effectués à partir d'échantillons du groupe d'éléments récupérés.

A.4 Méthodes d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques et chimiques

A.4.1 Généralités

Les propriétés de l'acier dans un bâtiment peuvent varier considérablement, même si tous les éléments et tous les organes de fixation sont conformes aux mêmes spécifications et aux mêmes qualités de matériau. Il est seulement nécessaire de caractériser les propriétés du matériau dans une structure en se basant sur les distributions statistiques probables avec les valeurs moyennes et les coefficients de variation. La connaissance de la spécification et de la qualité du matériau auquel un élément structural est conforme, ainsi que son âge approximatif, suffisent à définir ces propriétés pour la quasi-totalité des évaluations.

Si les documents de construction originaux sont disponibles, y compris les plans et les spécifications, il ne sera généralement pas nécessaire d'effectuer des essais de matériaux. Lorsque les propriétés des matériaux ne sont pas clairement indiquées sur les plans et les spécifications, ou que les plans et les spécifications ne sont pas disponibles, les caractéristiques de produits indiquées dans le tableau 5.7 peuvent être utilisées. Sinon, un programme limité de prélèvement d'échantillons de matériaux et d'essais peut être mené pour confirmer les qualités probables de ces matériaux.

Si un échantillonnage est effectué, il doit avoir lieu dans des régions où les contraintes sont réduites afin de diminuer les effets de la striction, telles que les extrémités des semelles des poutres articulées aux extrémités, les bords des semelles à mi-portée des éléments des portiques.

A.4.2 *Essais non destructifs (END)*

Les essais de dureté non destructifs permettent d'estimer la résistance à la traction de l'acier. Le Tableau A.4 résume certaines des techniques non destructives alternatives qui peuvent être utilisées pour évaluer les propriétés de l'acier de réemploi.

Tableau A.4. Techniques potentielles d'END

Technique	Description	Commentaires/Valeur
Essai de dureté	Diamètre de l'empreinte mesuré lorsque la bille en acier trempé est pressée contre une surface lisse avec une force connue.	Fournit un indice de dureté, par exemple la dureté Vickers selon ISO 6507 [104], qui est une indication de la limite d'élasticité et de la résistance ultime du matériau. La méthode d'essai Vickers est décrite dans la norme EN 1090-2. D'autres alternatives sont les méthodes d'essai Rockwell ISO 6508 [105] et Brinell ISO 6505 [106]. Voir également ASTM 1038: 2017 [107].
Analyse chimique/spectrométrie	Utilise la fluorescence des rayons X et la spectrométrie d'émission optique pour établir la composition chimique de l'alliage métallique et l'identification de la qualité en lisant les quantités par pourcentage de ses éléments.	Essentiel pour la caractérisation de la soudabilité des éléments de structure en acier, en fonction du carbone équivalent. Fournit des informations supplémentaires sur le type et les propriétés physiques associées de l'acier et sur ses matériaux d'alliage. ISO 19272 [108]. Voir ASTM E572 [109] et ASTM 1476 [110].
Essais d'indentation instrumentés	L'appareil d'indentation instrumenté utilise une technique similaire à celle de l'essai de dureté avec une charge et une pénétration mesurée lors de cycles de chargement et de déchargement répétés.	Les résultats de l'essai d'indentation comprennent la relation contrainte-déformation, le module d'élasticité, la dureté et la rigidité. Voir ISO 14577-5 [111].
Essais par micro-emboutissage (small punch test)	Le test par micro-emboutissage utilise une bille en céramique pressée contre la face d'un petit échantillon circulaire (diamètre 8 mm, épaisseur 0,5 mm). La relation contrainte-déformation est ensuite dérivée de la charge mesurée en fonction du déplacement de la bille.	Le calcul selon la norme prEN 15627, [112] et [113], peut être utilisé pour prédire la limite d'élasticité et la résistance à la traction de l'acier. La relation contrainte-déformation équivalente du coupon de traction peut être obtenue par une modélisation par éléments finis plus avancée.

A.4.2 *Essais destructifs*

Les techniques d'essais destructifs (DT) nécessitent le prélèvement de petits échantillons de la structure existante. Les techniques de DT potentielles sont identifiées dans le Tableau A.5. Les échantillons à tester sont prélevés par découpage ou forage. Il est important de considérer la valeur probable des résultats d'essai par rapport aux dommages éventuels causés à la structure, par exemple la fragilisation à la suite d'un échauffement lorsque l'échantillon est prélevé par oxycoupage (découpe thermique), et de se demander si des méthodes indirectes ne seraient pas plus appropriées. Les propriétés mécaniques et métallurgiques peuvent généralement être établies par des essais en laboratoire sur le même échantillon. Des informations sur le prélèvement d'échantillons d'acier peuvent être trouvées dans les normes pertinentes, par exemple, pour l'acier, voir EN 10025.

Tableau A.5. Techniques potentielles de contrôle destructif (DT)

Technique	Description	Commentaires/Valeur
Essai de traction	Essais de traction sur des échantillons fournissant la limite d'élasticité et la résistance ultime à la traction, le module d'élasticité, l'allongement uniaxial et l'allongement à la rupture.	En l'absence de certificats matière. Pour les détails de l'essai, voir EN ISO 6892-1 [114].
Analyse de la composition chimique	Recherche de carbone, de silicium, de manganèse, de soufre et de phosphore.	Essentiel pour l'identification des matériaux et pour vérifier la soudabilité de l'acier en fonction du carbone équivalent, ainsi que des niveaux d'impuretés. Les essais sont réalisés sur des copeaux de forage ou des grattons. Il fournit des informations supplémentaires sur le type d'acier et les propriétés physiques associées. Voir EN ISO 14284 [115].
Essai d'impact Charpy	Détermination de la fragilité et de l'énergie de rupture à une gamme de températures en mesurant l'énergie nécessaire pour fracturer un échantillon standard entaillé en U ou en V sous l'effet d'un coup de pendule.	Permet de caractériser la sous-catégorie de l'acier lorsque les certificats matière ne sont pas disponibles. Pour plus de détails sur les essais, voir EN ISO 148-1 [116]. La résilience peut également être testée sur des éprouvettes de taille inférieure et les résultats recalculés pour correspondre au comportement des essais de taille normale.
Métallographie	Détermination de la taille moyenne des grains.	Détermination de la structure interne du matériau par examen microscopique d'un échantillon présentant une surface plane. Voir ASTM E 112 [117].

A.5 Protocoles de requalification

Quatre protocoles de requalification, de A à D, sont décrits dans les recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et dans le CEN / TS 1090-201 [3]. Des recommandations pour le choix d'un protocole spécifique sont données ci-dessous et illustrées dans la Fig. 5.3. Si la structure récupérée a été fabriquée conformément à l'EN 1090-2 et que les qualités des composants structuraux peuvent être identifiées, les documents d'inspection originaux conformes à l'EN 10204 peuvent être utilisés pour déclarer les propriétés du composant ; voir le protocole A dans les recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et dans le CEN / TS 1090-201 [3]. Les composants structuraux dont la provenance est connue doivent être regroupés en lots de contrôle conformément au paragraphe 8.2.2 des recommandations professionnelles de juin 2024 [2], ou de la section 5.3.4.2 de la norme CEN / TS 1090-201 [3].

La provenance doit être considérée comme connue lorsque l'on connaît au moins l'emplacement géographique, l'année de construction et l'ancienne fonction des éléments. Les mesures effectuées pour un ou quelques éléments représentatifs d'un lot de contrôle peuvent constituer la base des propriétés déclarées pour tous les éléments de ce lot (voir le paragraphe 8.2 des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et les sections 5.3.4.4 et 5.3.4.5 du document CEN / TS 1090-201 [3]).

Il convient de distinguer les aciers de construction de type 1 et de type 2.

On peut s'attendre à ce que l'acier de construction de type 1 ait des propriétés mécaniques et une soudabilité similaire aux nuances d'acier conformes aux normes européennes listées dans l'article 5.3 de la norme EN 1090-2: 2018 + A1: 2024. On peut supposer que la variabilité de leurs propriétés mécaniques est conforme à l'annexe E de la norme EN 1993-1-1.

Les propriétés mécaniques de l'acier de construction de type 1 peuvent être déterminées en testant un seul échantillon représentatif conformément au protocole d'essai B des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et du document CEN / TS 1090-201 [3].

Pour l'acier de construction de type 2, la variabilité des propriétés ne peut pas être prise en compte de manière fiable, et il convient d'effectuer davantage d'essais ainsi qu'une analyse statistique des résultats, conformément au protocole C des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et du document CEN / TS 1090-201 [3].

Les éléments structuraux de provenance inconnue ne doivent pas être regroupés dans des lots de contrôle et des essais sur chaque élément sont nécessaires, conformément au protocole D des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et du document CEN / TS 1090-201 [3].

Une autre méthode d'essai pour la limite d'élasticité, la résistance ultime, l'allongement et la composition chimique en fonction de la classe de conséquences est présentée dans la référence [118].

A.6 Mise en œuvre de tests complets pour la limite d'élasticité et la résistance à la traction

A.6.1 *Introduction*

La résistance et l'allongement des matériaux peuvent être évalués par des essais destructifs et non destructifs. La section suivante fournit des indications sur ces deux types d'essais.

A.6.2 *Évaluation de la fiabilité – produits laminés à chaud et profilés creux*

Les résultats des essais non destructifs et destructifs doivent être comparés aux valeurs minimales présentées dans le Tableau A.6 afin de déterminer la nuance d'acier. Les valeurs minimales sont établies en réduisant la valeur moyenne de 1,64 fois l'écart type pour chaque nuance d'acier sur la base des données du Tableau A.7.

Tableau A.6. Valeurs minimales recommandées pour la limite d'élasticité et la résistance à la traction afin de procéder à l'évaluation de la fiabilité des produits laminés à chaud et des profilés creux

Nuance de l'acier	Limite d'élasticité (N/mm ²)			Résistance ultime (N/mm ²)			f_u/f_y moyen	Norme de référence
	f_y Calcul	Min.	Moyenne	f_u Calcul	Min.	Moyenne		
S235	235	267	293	360	397	432	1,47	EN 10025-2 ; EN 10219
S275	275	313	343	410	452	492	1,43	EN 10025-2 ; EN 10219
S355	355	391	426	470	505	540	1,26	EN 10025-2 ; EN 10219
S460	460	490	529	540	560	594	1,12	EN 10025-3/4 ; EN 10219

Tableau A.7. Caractéristiques de l'acier selon la référence [119]

Qualité de l'acier	Limite d'élasticité		Résistance à la traction	
	Moyenne (valeur caractéristique X)	CoV	Moyenne (valeur caractéristique X)	CoV
S235	1,25	0,055	1,20	0,050
S275	1,25	0,055	1,20	0,050
S355	1,20	0,050	1,15	0,040
S460	1,15	0,045	1,10	0,035

A.6.3 Évaluation de la fiabilité – produits formés à froid

Les résultats des essais non destructifs et destructifs doivent être comparés aux valeurs minimales présentées dans le tableau A.8 afin de déterminer la nuance d'acier. Les valeurs minimales sont établies en réduisant la valeur moyenne de 1,64 fois l'écart type pour chaque nuance d'acier sur la base des données du Tableau A.7.

Comme les courbes de flambement ne dépendent pas de la limite d'élasticité pour les éléments en acier formés à froid selon la norme EN 1993-1-3, des valeurs moyennes pour la résistance moyenne (limite d'élasticité et traction) et le coefficient de variation sont proposées pour toutes les nuances d'acier jusqu'à S450 dans le Tableau A.9.

Tableau A.8. Valeurs minimales recommandées pour la limite d'élasticité et la résistance à la traction afin de procéder à l'évaluation de la fiabilité des produits en acier formés à froid

Nuance de l'acier	Limite d'élasticité [N/mm ²]			Résistance à la traction [N/mm ²]			f_u/f_y moyenne	Norme de référence
	f_y Calcul	Min.	Moyenne	$f_{(u)}$ Calcul	Min.	Moyenne		
S220	220	226	242	300	303	330	1,364	EN 10346
S250	250	257	275	330	333	363	1,320	
S280	280	288	308	360	364	396	1,286	
S320	320	329	352	390	394	429	1,219	
S350	350	360	385	420	424	462	1,200	
S390	390	401	429	460	465	506	1,179	
S420	420	432	462	480	485	528	1,143	
S450	450	463	495	510	515	561	1,133	

Tableau A.9. Caractéristiques de l'acier selon la référence

Nuances d'acier	Limite d'élasticité		Résistance à la traction	
	Moyenne (valeur caractéristique X)	CoV	Moyenne (valeur caractéristique X)	CoV
S220 à S450	1,10	0,04	1,10	0,05

A.6.4 *Essais de dureté non destructifs*

Introduction

Chaque élément récupéré doit être soumis à un essai de dureté non destructif afin de pouvoir obtenir une estimation de la valeur de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction. Il existe une relation entre la dureté mesurée et la résistance de l'acier qui est considérée comme une approximation pour définir la nuance du matériau. La relation entre la dureté mesurée et la résistance du matériau dépend du type d'essai de dureté effectué.

Les essais de dureté doivent être effectués sur des éléments récupérés, à des endroits où les contraintes étaient faibles. Pour les poutres simplement appuyées, il est recommandé de les placer près de l'extrémité de l'élément. Tout traitement de surface doit être retiré de la zone à tester.

Le résultat de la dureté du matériau doit être considéré comme la moyenne de trois mesures effectuées au même endroit. Le système de revêtement de la charpente métallique doit être enlevé pour permettre les mesures.

Les résultats de chaque membre d'un groupe doivent être évalués conformément à la norme EN 1990 afin de déterminer la valeur représentative de l'ensemble du groupe. Une fois la valeur de dureté du groupe déterminée, la limite d'élasticité et la résistance à la traction doivent être calculées et comparées aux valeurs minimales du Tableau A.6 et du Tableau A.8 pour définir la nuance d'acier.

Évaluation des résultats des essais de dureté

La dureté d'un élément individuel doit être considérée comme la moyenne de dix mesures. Si cette valeur moyenne pour un élément individuel diffère de plus de 10 % de la valeur moyenne obtenue pour le groupe de contrôle, l'élément doit être retiré du groupe.

La valeur caractéristique de dureté H_v de l'ensemble du groupe doit être déterminée à l'aide du tableau D.1 de l'EN 1990, en supposant que « V_x inconnu » et calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$H_v = m - k_n S_x \quad (\text{A.1})$$

où :

H_v est la valeur caractéristique de la dureté pour le groupe ;

m est la valeur moyenne du groupe (dureté moyenne des éléments du groupe) ;

S_x est l'écart-type des résultats ;

k_n est tiré du tableau D1 de la norme EN 1990 pour « V_x inconnu », présenté au Tableau A.10.

Tableau A.10. Valeurs de k_n pour la valeur caractéristique de 5 % (EN 1990, tableau D.1)

Nombre de membres du groupe (n)	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x inconnu	-	-	3.37	2.63	2.33	2.18	2.00	1.92	1.76	1.73	1.64

Un essai de dureté par ultrasons peut être utilisé comme méthode d'essai. Tous les éléments sont soumis à un essai de dureté Vickers conformément à la norme EN ISO 6507 [104].

Corrélation entre la dureté et la résistance des matériaux

EN ISO 18265 : 2013 [121], l'annexe A comprend des tables de conversion de la dureté à la résistance ultime à la traction. La conversion implique une dispersion considérable, et la résistance à la rupture obtenue n'est qu'informative.

Comme alternative, la référence [120] présente la relation entre l'essai de dureté Vickers et la résistance à utiliser pour estimer les propriétés du matériau.

Toutefois, le document CEN/TS 1090-201 [3] ne recommande pas cette approche en raison de la dispersion trop importante des résultats.

A.6.5 Essais destructifs de traction : essais non statistiques et statistiques

Introduction

L'emplacement des échantillons pour les essais destructifs doit être choisi conformément aux recommandations de la norme du produit. L'annexe A de l'EN 10025-1 fournit des conseils pour les pièces et les tôles laminées à chaud. L'annexe C de l'EN 10219-1 fournit des recommandations pour les sections creuses soudées formées à froid, tandis que l'annexe C de l'EN 10210-1 fournit des recommandations pour les sections creuses finies à chaud.

Les essais de traction destructifs sont utilisés pour déterminer les propriétés suivantes de l'acier :

- limite d'élasticité ;
- résistance ultime à la traction ;
- rapport entre la limite d'élasticité et la résistance ultime à la traction ;
- allongement à la rupture.

Les essais destructifs de traction doivent être réalisés conformément à la norme EN ISO 6892-1 [114]. À titre de référence, les emplacements des échantillons d'essai peuvent être définis conformément à la norme ISO 377 [122]. Il est également possible de suivre les indications de la norme de produit pertinente, par exemple EN 10025 ou EN 10219.

La limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement déclarés doivent être basés sur les résultats des essais destructifs et non sur les essais non destructifs. La limite d'élasticité et la résistance à la traction déclarées doivent correspondre aux résistances indiquées dans la norme de produit appropriée pour la nuance d'acier déterminée, qui est identifiée à l'aide des résultats des essais destructifs et non des essais non destructifs.

Il convient de noter que si un élément récupéré n'est pas conforme à une certaine norme de produit, telle que la norme EN 10025-2, l'élément peut toujours être utilisé à condition que les propriétés pertinentes du matériau soient déclarées, comme l'exige la norme EN 1090-2, clause 5.1. Par exemple, si l'allongement à la rupture mesuré par un essai destructif n'est pas conforme aux valeurs minimales de la norme EN 10025-2 pour une nuance d'acier spécifique, mais si l'allongement mesuré est tel que les valeurs minimales

de la norme EN 1993-1-1 pour l'analyse globale élastique sont respectées (voir Tableau 5.1), l'acier récupéré peut toujours être réemployé.

Tests non statistiques

En plus des essais 100% non destructifs, un seul test destructif (réalisé sur n'importe quel membre du groupe) est requis pour respecter les valeurs minimales de Tableau A.6 ou du Tableau A.8. Un essai unique n'a pas de valeur statistique et est donc qualifié de « non statistique ».

Les essais destructifs non statistiques (c'est-à-dire un seul essai destructif à partir d'un groupe ou lot) sont recommandés pour l'acier destiné à être utilisé dans des structures de classe de conséquences 1 ou 2. Les propriétés mécaniques de l'acier de construction de type 1 peuvent être déterminées en testant un seul échantillon représentatif selon le protocole d'essai B des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et du document CEN / TS 1090-201 [3].

La procédure d'essai non statistique n'est pas recommandée pour les éléments formés à froid.

Essais statistiques – évaluation des résultats des essais de traction

En plus des essais 100 % non destructif, un minimum de trois essais destructifs est requis, prélevés sur les éléments d'un groupe. L'augmentation du nombre d'essais améliore la précision des valeurs calculées et se traduit généralement par des valeurs plus élevées.

La valeur caractéristique de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction de l'ensemble du groupe doit être déterminée à l'aide du tableau D1 de l'EN 1990, en supposant que « V_x est connu » et calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$X_d = m - k_n S_x \quad (A.2)$$

où :

X_d est la valeur caractéristique d'intérêt (limite d'élasticité ou résistance ultime) ;

m est la valeur moyenne de l'échantillon ;

S_x est l'écart-type ;

k_n est tiré du tableau D1 de la norme EN 1990 pour « V_x connu », présenté au Tableau A.11.

Tableau A.11. Valeurs de k_n pour la valeur caractéristique de 5 % (EN 1990 Tableau D.1)

Nombre de DT	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x connu	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64

L'utilisation de « V_x connu » se justifie par le fait que le coefficient de variation de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction est connu.

Si des essais statistiques sont effectués, les valeurs calculées à partir des essais destructifs doivent être utilisées pour déterminer la nuance d'acier à partir du Tableau A.6 ou du Tableau A.8

A.7 Résistance aux chocs – énergie de rupture

À moins que des essais destructifs ne soient effectués, il faut supposer que l'acier est de qualité JR conformément à la norme EN 1993-1-10. Il peut y avoir des avantages économiques à réaliser des essais destructifs pour démontrer que l'acier récupéré est d'une qualité supérieure, en particulier sur les sections plus épaisses.

Si nécessaire, des essais destructifs doivent être utilisés pour établir la qualité d'acier des éléments d'un groupe, sur la base de l'essai d'un élément représentatif. Selon la norme EN 10025-1, six échantillons sont nécessaires pour les essais, prélevés aux endroits identifiés dans l'annexe A de la norme EN 10025-1.

Pour chaque lot de 20 tonnes, une série d'essais (six échantillons) provenant d'un seul élément doit être utilisée pour déterminer la valeur Charpy pour tous les éléments du lot. L'essai Charpy doit être effectué conformément à la norme EN ISO 148-1 [116].

A.8 Composition chimique

A.8.1 *Introduction*

La composition chimique de l'acier de réemploi doit être déterminée de manière que la valeur du carbone équivalente (CEV) puisse être calculée en utilisant l'expression de la section 7.2.3 de l'EN 10025-1 ou de la section 6.6.1 de l'EN 10219-1.

La composition chimique peut être évaluée à l'aide de techniques non destructives et destructives. Le CEV pour le groupe doit être considéré comme le CEV maximal de tout essai, y compris les résultats des essais non destructifs et des essais destructifs.

La composition chimique de chaque élément individuel doit être testée et enregistrée. Si la teneur en carbone ou en manganèse mesurée pour un élément individuel diffère de plus de 10 % de la valeur moyenne du groupe, cet élément doit être retiré du groupe.

La composition chimique anticipée d'un acier spécifique peut être trouvée dans la section 6.6.1 de la partie correspondante de l'EN 10025 et de l'EN 10219. Pour les produits formés à froid, on peut utiliser la norme EN 10346, où le tableau 2 de la même norme présente la composition chimique prévue pour les aciers de construction.

Il n'est pas nécessaire d'évaluer la composition chimique des éléments formés à froid si ces éléments ne seront pas soudés.

A.8.2 *Essais non destructifs pour déterminer la composition chimique*

La spectroscopie d'émission optique peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'un élément en acier. Bien que cette technique soit considérée comme une méthode d'essai non destructive, une petite trace est laissée à la surface de l'acier.

La composition chimique peut être évaluée conformément à la norme ISO 19272 [108].

A.8.3 *Essais destructifs pour déterminer la composition chimique*

La composition chimique de l'acier peut être déterminée en analysant les copeaux provenant d'une cavité forée. L'élément doit être percé à un endroit où les contraintes sont

faibles. La composition chimique peut être évaluée conformément à la norme EN ISO 14284 [115].

A.9 Tolérances géométriques

A.9.1 Dimensions de la section transversale

Les dimensions de la section transversale (hauteur, largeur, épaisseur de la semelle, épaisseur de l'âme, épaisseur de la paroi, etc.) doivent être déterminées pour l'ensemble des éléments. Une déclaration des dimensions mesurées doit être fournie par le requalificateur.

Si les dimensions de la section se situent en dehors des écarts autorisés par la norme produit, les dimensions mesurées doivent être utilisées pour déterminer les propriétés de la section transversale.

A.9.2 Imperfections de l'arc (défaut de rectitude)

La rectitude de chaque élément, dans les deux axes, doit être mesurée et comparée aux écarts autorisés par la norme EN 1090-2. Les éléments qui se situent en dehors des écarts autorisés doivent être redressés dans le cadre du processus de fabrication.

A.10 Remarques complémentaires pour les produits en acier formés à froid

A.10.1 Composition du revêtement métallique, désignation et masse des couches

La composition du revêtement métallique doit être spécifiée conformément à la norme EN 10346 (Z, ZF, ZA, ZM, AZ, AS). La section 3 de la norme EN 10346 spécifie les principaux composants chimiques pour chaque type de revêtement. Tous les éléments doivent être testés par des procédures d'essai non destructives.

Pour l'évaluation du poids de la couche de revêtement, la section 7.3 de la norme EN 10346 doit être prise en compte. La valeur minimale de la masse du revêtement local peut être utilisée pour évaluer la désignation réelle du revêtement. Pour l'évaluation de l'épaisseur du revêtement, les recommandations de la section 7 de la norme EN 10346 doivent être appliquées. L'épaisseur du film des métaux revêtus en bobine peut être évaluée conformément à la norme EN 13523-1 [123].

A.10.1 Rapport rayon de courbure/épaisseur et adhérence du revêtement métallique

Comme les éléments récupérés sont déjà pliés, une inspection visuelle visant à évaluer les éventuelles fissures et l'adhérence du revêtement métallique à proximité de la zone de pliage doit être effectuée pour chaque élément récupéré. Il ne doit pas y avoir de fissures visibles à l'œil nu dans les zones de pliage (EN1090-4 section 6.1). L'évaluation de l'adhérence a pour objectif de détecter toute adhérence qui n'est pas « parfaite ». L'évaluation de l'adhérence peut être réalisée par des méthodes telles que la pression, le martelage, le pliage, le battage, le chauffage, le sciage, le meulage, l'arrachage, le traçage, le ciselage, ou une combinaison de méthodes de ce type. Si le revêtement se détache, s'écaillle ou se décolle du substrat, l'adhérence n'est pas parfaite. La section 7.10 de la norme EN 10346 précise que l'adhérence du revêtement doit être testée à l'aide d'une

« méthode appropriée », en précisant que le choix de la méthode est « laissé à la discrétion du fabricant ». Voir également les références [124] et [125].

A.11 Évaluation de l'acier de réemploi selon le protocole D

A.11.1 *Produits laminés à chaud et profilés creux*

Pour l'acier de construction dont la provenance est inconnue, des valeurs sécuritaires sur les propriétés des matériaux peuvent être utilisées pour l'analyse et la conception. Les propriétés conservatrices des matériaux indiquées dans le Tableau A.12 peuvent être prises en compte.

Tableau A.12. Propriétés des matériaux recommandées pour l'acier de construction non testé

Matériaux	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E [N/mm ²]	ε_{uk} [%]	ν	ρ [kg/m ³]	α_T [10 ⁻⁶ /°C]
Acier – Profilés	235	360	81000	210000	15+	0.30	7850	10
Acier – Soudures	-	360	-	-	-	-	-	-

En fonction de l'âge et de la localisation du bâtiment, les normes locales peuvent être utilisées pour établir la base de la valeur prudente des résistances à la traction et à l'élasticité. Cependant, la prise en compte de valeurs sécuritaires peut nécessiter l'utilisation de valeurs plus importantes pour les coefficients partiels.

A.11.2 *Produits formés à froid*

Dans le cas de l'acier de réemploi formé à froid, étant donné qu'une large gamme de nuances d'acier est susceptible d'être disponible, il n'est pas recommandé de supposer une limite d'élasticité et une résistance à la traction supérieure à 120 MPa et à 260 MPa respectivement. Voir EN 10346, section 7 et EN 1993-1-3, section 3 pour plus de détails.

A.11.3 *Assemblages soudés*

Si aucun essai n'est entrepris, le scénario de réemploi doit idéalement éviter les procédures de soudage. Dans les cas où des procédures de soudage sont nécessaires, une valeur de 0,51 pour le CEV peut être supposée (sur la base de la norme BS 4360 de 1969 [58]). Des essais non destructifs peuvent être utilisés pour évaluer la valeur supposée du CEV.

Annexe B

Coefficient partiel du matériau pour le flambement des éléments à utiliser pour les charpentes métalliques récupérées

B.1 Contexte pour les coefficients partiels de matériaux selon l'EN 1990

Cette annexe contient une approche pour la dérivation d'un coefficient partiel modifié $\gamma_{M1,mod}$ pour la résistance des éléments vis-à-vis de l'instabilité pour les éléments en acier réemployés. Cette approche est basée sur les principes de l'EN 1990, et les références ci-dessous concernent ce code. Il définit un coefficient partiel γ_m pour une propriété matérielle qui tient également compte des incertitudes du modèle et des variations dimensionnelles. La clause 8.3.5(2) donne :

$$\gamma_M = \gamma_{Rd}\gamma_m \quad (B.1)$$

avec : γ_m facteur de sécurité partiel pour la résistance du matériau ;
 γ_{Rd} coefficient partiel couvrant l'incertitude dans le modèle de résistance, plus les déviations géométriques si elles ne sont pas modélisées explicitement.

La norme EN 1090 ne spécifie pas de valeur pour γ_{Rd} car elle dépend des matériaux de construction et du comportement de l'élément structurel. Typiquement, pour les structures en acier, il varie entre 1,05 et 1,15 [126]. Le coefficient partiel γ_m est obtenu à partir de la clause 8.3.6 :

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_d} \quad (B.2)$$

avec X_k valeur caractéristique d'un matériau ou d'une propriété d'un produit ;
 X_d valeur de calcul d'un matériau ou d'une propriété de produit.

Pour le coefficient partiel γ_{M1} , X_k est la limite d'élasticité nominale pour une nuance d'acier spécifique, $f_{y,nom}$, et X_d est défini dans l'article C4.4.2 (3), équation (C.14) pour une distribution normale :

$$X_d = \bar{X}(1 - \alpha_R \beta V_X) \quad (B.3)$$

avec \bar{X} valeur moyenne d'une propriété d'un matériau ou d'un produit ;
 α_R facteur d'importance de la propriété du matériau, atteignant des valeurs comprises entre 0 (aucune importance) et 1 (importance maximale) ; la clause C4.4.2(3) suggère une valeur de 0,8 ;
 β indice de fiabilité cible ;
 V_X coefficient de variation de la propriété du matériau ou du produit.

B.2 Dérivation de $\gamma_{M1,mod}$ pour la conception utilisant de l'acier de réemploi

La valeur du coefficient partiel dépend de la valeur de l'indice de fiabilité cible et des incertitudes des paramètres influençant la résistance de l'élément, telles que les incertitudes concernant les dimensions et les propriétés des matériaux.

Si les protocoles d'évaluation des recommandations professionnelles de juin 2024 [2] et du document CEN / TS 1090-201 [3] sont appliqués, on peut supposer que l'incertitude des propriétés est au moins similaire à celle des nouveaux profils. Il est donc raisonnable de considérer la même valeur du coefficient partiel que celle utilisée pour les nouveaux profils.

Dans d'autres cas, il peut être nécessaire de procéder à une évaluation de la fiabilité au cas par cas.

Dans le projet RFCS PROGRESS [55], une approche simplifiée est proposée, conduisant à un coefficient partiel modifié. Par prudence, on peut supposer que le coefficient partiel pour l'incertitude du modèle et l'écart géométrique prend la valeur maximale de 1,15, si les écarts géométriques attendus pour les éléments en acier réutilisés ont une importance pour les vérifications de la stabilité. Le coefficient partiel modifié $\gamma_{M1,mod}$ est alors calculé. Ce coefficient est défini comme suit :

$$\gamma_{M1,mod} = K_{\gamma_{M1}} \gamma_{M1} \quad (B.4)$$

avec

$K_{\gamma_{M1}}$ Facteur de corrélation

Le facteur de corrélation peut prendre la valeur sûre de 1,15.

$$K_{\gamma_{M1}} = 1.15 \quad (B.5)$$

Par conséquent, on obtient une valeur modifiée du coefficient partiel de 1,15.

$$\gamma_{M1,mod} = 1.15 \quad (B.6)$$



**Funded by
the European Union**

L'ambition du projet ADVANCE est de contribuer aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre et d'économie circulaire en s'attaquant à ces défis à la fois dans la déconstruction et le réemploi des bâtiments en acier existants, ainsi que dans la conception de nouveaux bâtiments, leur construction et la documentation pour faciliter le futur réemploi. Son champ d'application comprend le réemploi des produits constitutifs, des composants fabriqués et le réemploi de composants assemblés. Les matériaux réemployés peuvent provenir de structures primaires, de structures secondaires et d'enveloppes. La réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie sidérurgique est devenue essentielle ces dernières années, l'accent étant mis sur les produits de construction, qui ont la plus grande contribution à l'empreinte environnementale de cette industrie. Le secteur de la construction offre la possibilité d'être leader dans l'établissement des technologies à base d'acier pour la décarbonation d'autres industries importantes dépendant des solutions sidérurgiques.



EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK
CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
EUROPÄISCHE KONVENTION FÜR STAHLBAU

publications@steelconstruct.com | www.steelconstruct.com

Le TC14 est le comité technique de la convention européenne de la construction métallique (CECM) en charge des sujets de durabilité et d'éco-efficacité de la construction en acier. Le comité vise à promouvoir des développements dans les communautés de l'industrie, de la recherche et de l'enseignement qui renforcent les connaissances et les capacités en matière de construction métallique durable. Le vaste domaine des questions comprend, par exemple, les aspects suivants : la gestion de la performance globale des bâtiments tout au long du cycle de vie ; des techniques pour améliorer la performance environnementale ; des techniques pour une haute qualité et un confort de l'environnement intérieur ; le rendement énergétique ; la minimisation des ressources et l'utilisation des matières premières.