

ArcelorMittal Europe - Long Products
Sections and Merchant Bars

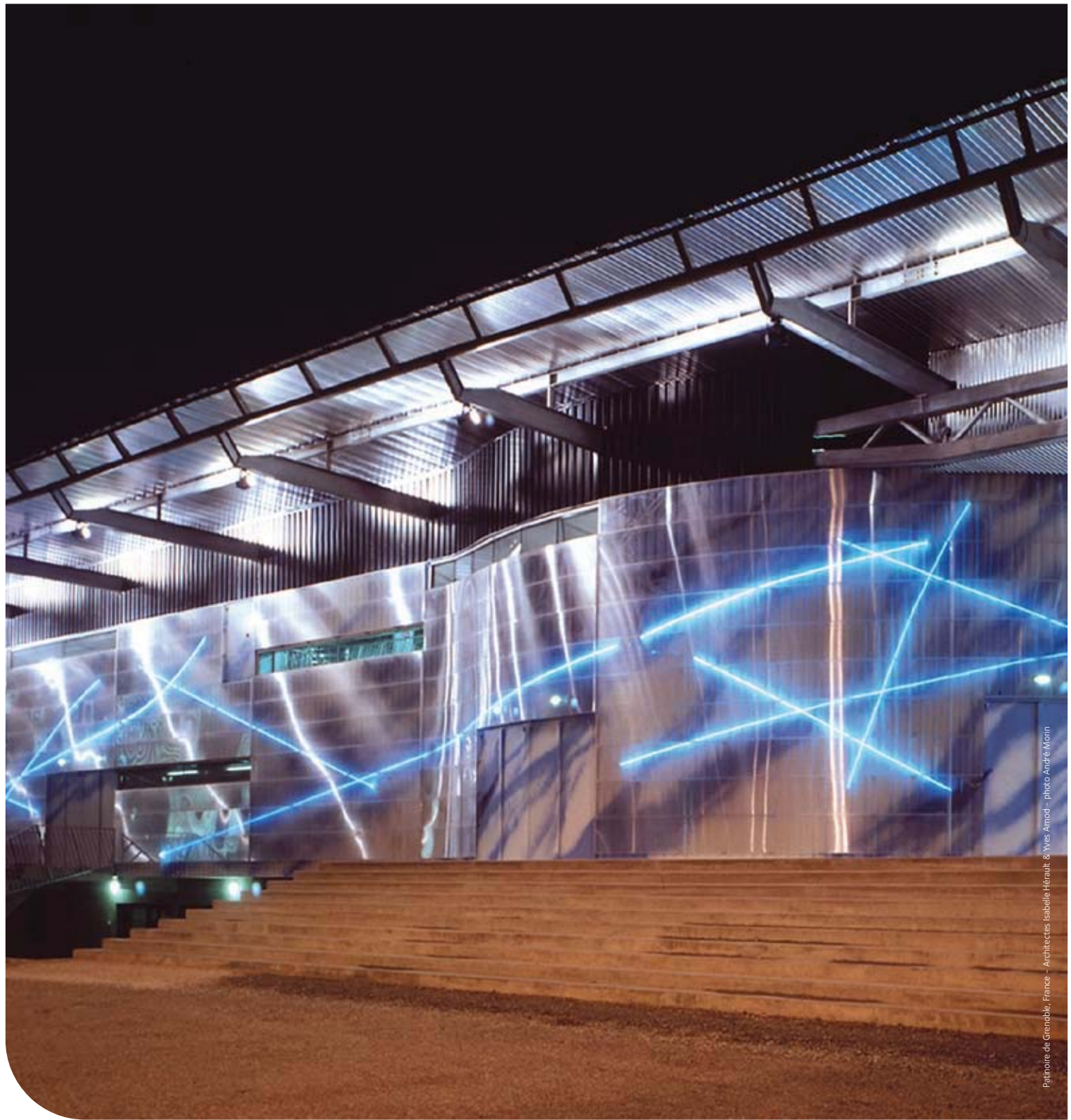


ArcelorMittal

Protection par galvanisation à chaud

des profilés laminés à chaud



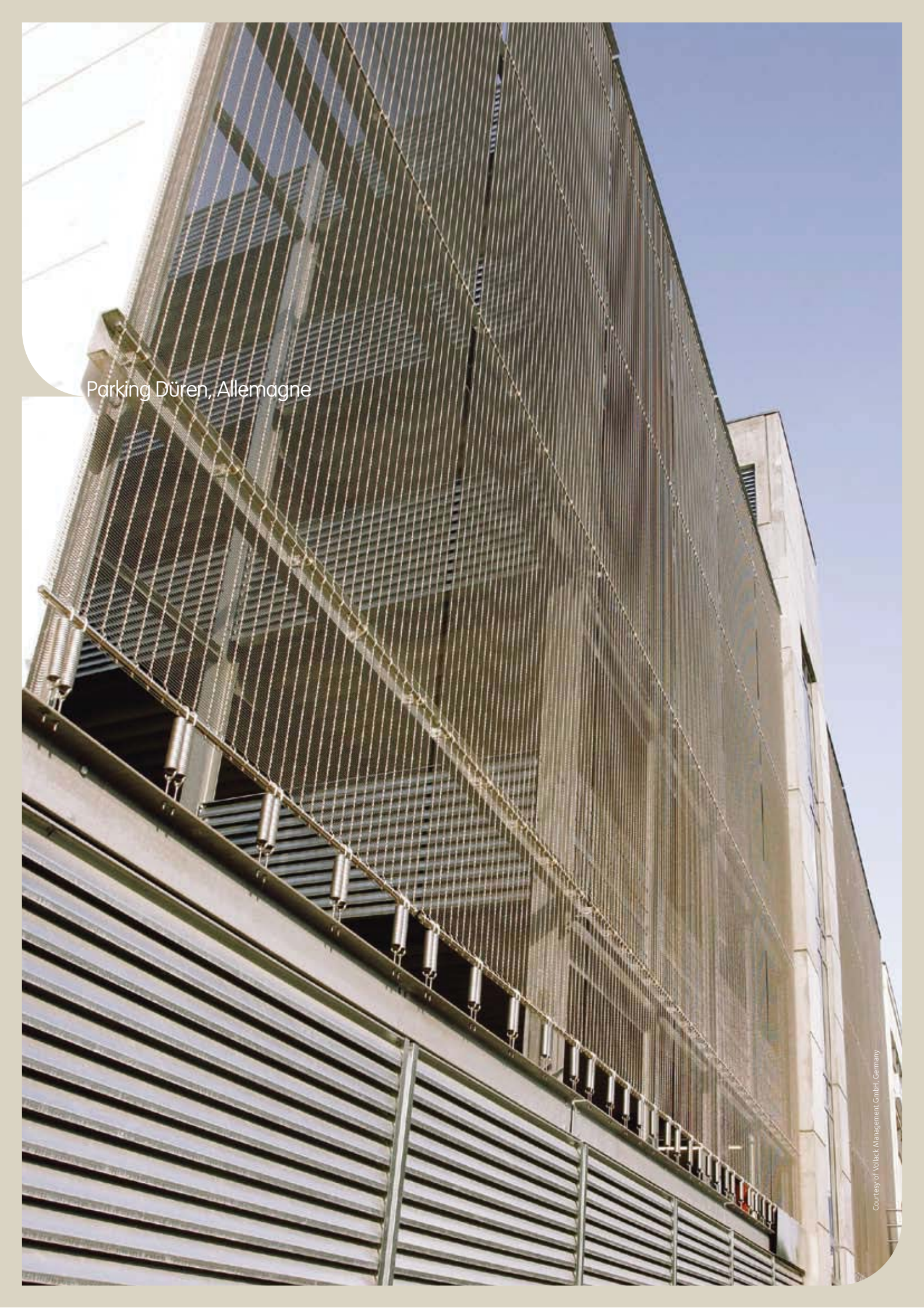


Patinoire de Grenoble, France – Architectes Isabelle Héault & Yves Anod – photo André Morn

L'acier constitue un matériau de construction économique, flexible, totalement recyclable et disponible en grande quantité

Sommaire

Remarques préliminaires	3
1. Charge corrosive et durée de protection	5
2. Procédés de protection anticorrosion	8
3. Galvanisation à chaud	10
4. Particularités propres à la galvanisation à chaud des structures en acier	17
5. Exigences relatives aux matériaux aptes à la galvanisation à chaud	21
6. Exigences relatives à la conception des structures aptes à la galvanisation à chaud	25
7. Exigences relatives à la fabrication de structures en acier aptes à la galvanisation à chaud	31
8. Exigences relatives au procédé de galvanisation à chaud	33
9. Systèmes Duplex	35
10. Rentabilité	37
Références	39
Assistance Technique & Parachèvement	42
Vos partenaires	43



Parking Düren, Allemagne

Remarques préliminaires

Grâce à ses propriétés physiques et mécaniques exceptionnelles, l'acier constitue un matériau économique, flexible et totalement recyclable, de surcroît disponible en grande quantité. Il se caractérise en particulier par son aptitude pratiquement illimitée à l'usinage et au façonnage ainsi que par sa propriété d'être indéfiniment recyclable. L'image de ce matériau est également marquée par sa tendance à réagir avec des composants de l'atmosphère pour former des liaisons thermodynamiques stables, à savoir les oxydes et/ou sels de fer.

La faculté de l'acier à revenir à l'état naturel ou initial est appelée corrosion.

En langage simplifié: l'acier rouille!

La qualité première de l'acier, à savoir son aptitude à conserver une résistance physique et mécanique ou, dans le cas de structures en acier, sa portance, est en général préservée longtemps. Elle ne diminue que si la corrosion provoque des réductions de sections préjudiciables à la sécurité.

La durée de vie des structures dépend de la vitesse de réactions entre l'acier et son environnement. Ces réactions dépendent, par ailleurs, de la nature et de la concentration des composants corrosifs.

Dans ce sens, la protection anticorrosion de structures en acier doit être comprise comme une intervention sur ce processus en vue d'empêcher la réaction ou d'en réduire fortement la vitesse.

De nombreuses structures en acier, parfois centenaires, ont montré de façon impressionnante les performances du matériau acier en combinant une protection anticorrosion adéquate avec des mesures de maintenance régulières. Les coûts d'entretien sont toutefois élevés et des constructions similaires ne se justifient plus de nos jours.

Pour les constructions en acier du 21^{ème} siècle, il ne peut plus être question de coûts d'entretien élevés.

- Les politiques de protection de l'environnement, menées à l'échelon national et international, ont permis de diminuer considérablement la charge corrosive présente dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années. Résultat: une réduction sensible de la vitesse moyenne de corrosion de l'acier et du zinc et une augmentation de la résistance des systèmes de revêtement.

- La conception des structures en acier a été substantiellement améliorée par des procédés de soudage efficaces et le vaste éventail de profilés laminés à chaud; elle contribue activement à garantir une durée de vie élevée des systèmes de protection anticorrosion. Le coût des travaux de maintenance et d'entretien ne cesse de baisser grâce à la réduction sensible des surfaces exposées et à la facilité d'accès.

- La résistance de nouveaux revêtements aux sollicitations du milieu environnant a été considérablement améliorée. De nouvelles techniques d'application autorisent un traitement peu coûteux dans les ateliers de constructions métalliques et sur les chantiers.

- La capacité et les dimensions des cuves de galvanisation permettent de généraliser aujourd'hui la galvanisation à chaud des structures en acier composées d'éléments de grande taille.

- La combinaison de la technique de galvanisation à chaud et de systèmes de peinture spécialement formulés pour des revêtements de zinc – systèmes dits duplex – supprime pour ainsi dire l'entretien et, dans la plupart des cas d'application, la protection anticorrosion ne requiert aucun entretien sur toute la durée de vie de la construction.

- La protection anticorrosion devient partie intégrante de la fabrication des structures en acier.



Entrepôts Erco, Lüdenscheid, Allemagne

1. Charge corrosive et durée de protection

1. Charge corrosive

Le risque de corrosion des structures en acier provient essentiellement des conditions atmosphériques ambiantes.

La nature et l'ampleur d'une corrosion éventuelle dépendent de la durée d'exposition à l'humidité des surfaces métalliques et du degré de pollution de l'air.

La durée d'exposition à l'humidité – le temps pendant lequel l'humidité relative de l'air est >80% à une température ambiante >0 °C – est le principal moteur de la corrosion atmosphérique ou de la vitesse de corrosion de l'acier et du zinc.

L'absence d'humidité ralentit considérablement la vitesse de corrosion du fer et du zinc, même en présence de concentrations élevées de polluants gazeux (SO₂, NO_x, etc.) ou solides (poussières contenant des particules agressives).

Ces dernières années, l'influence complexe des polluants atmosphériques sur la vitesse de corrosion de l'acier de construction non protégé et du zinc a été analysée dans le cadre de plusieurs programmes de recherche européens [1].

Les résultats de ces travaux ont débouché sur l'élaboration de la norme ISO 9223 "Corrosion des métaux et alliages – Corrosivité des atmosphères – Classification". Les informations techniques de base contenant la classification de la corrosivité des atmosphères et les taux de corrosion de l'acier au carbone, du zinc, du cuivre et de l'aluminium, déterminés en fonction de la charge corrosive, sont suffisamment précises pour évaluer de façon pratique la durée de protection de peintures et de revêtements de zinc.

Cette norme a également servi de base à la classification de la corrosivité des conditions atmosphériques ambiantes dans l'EN ISO 12944-2.

EN ISO 12944 caractérise les conditions atmosphériques ambiantes sous forme de catégories de corrosivité en se fondant sur des indications de perte de masse ou d'épaisseur par unité de surface d'acier et de zinc au cours de la première année d'exposition aux intempéries (tableau 1.1.1).

Des exemples de conditions ambiantes caractéristiques aident à classer les constructions réelles dans la catégorie de corrosivité adéquate et favorisent la mise au point d'un système de protection anticorrosion en mettant l'accent sur la durée de protection.

Exception faite de conditions spéciales, cette méthode permet une évaluation suffisamment fiable de la charge corrosive pour la majorité des structures en acier.

La teneur de l'air en SO₂ est mesurée sur de nombreux sites en Europe.

Tableau 1.1.1 Risque de corrosion – Classification des conditions ambiantes selon EN ISO 12944-2

Risque de corrosion	Perte d'épaisseur de zinc – 1 ^{ière} année [µm]*	Exemples d'environnements caractéristiques	
		Extérieur	Intérieur
C 1 insignifiant	≤ 0.1	–	Bâtiment isolé ; humidité relative de l'air ≤ 60 %
C 2 faible	> 0.1 – 0.7	Atmosphère faiblement polluée, climat sec, p. ex. zones rurales	Bâtiment sans isolation avec condensation d'eau passagère, p. ex. entrepôts, salles de sport
C 3 moyen	> 0.7 – 2.1	Atmosphère urbaine et industrielle ayant une faible pollution au SO ₂ ou zones côtières à faible salinité	Locaux caractérisés par une humidité rela- tive de l'air élevée et des impuretés, p. ex. des brasseries, blanchisseries, laiteries
C 4 important	> 2.1 – 4.2	Atmosphère industrielle ou atmosphère côtière à faible salinité	Piscines, installations chimiques
C 5 très important I	> 4.2 – 8.4	Atmosphère industrielle à humidité importante et à atmosphères agressives	Bâtiments ou zones à condensation d'eau quasiment permanente et forte pollution
C 5 très important M	> 4.2 – 8.4	Zones côtières et littorales à salinité importante	

* également appelée perte de masse [g/m²]



Architectes H. Muthelm - Photo K. Ideberger

Pour planifier un système de protection anticorrosion approprié, les charges corrosives SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], obtenues conformément à la norme EN ISO 12944-2, ne doivent toutefois pas être directement utilisées pour déterminer la catégorie de corrosivité correspondante.

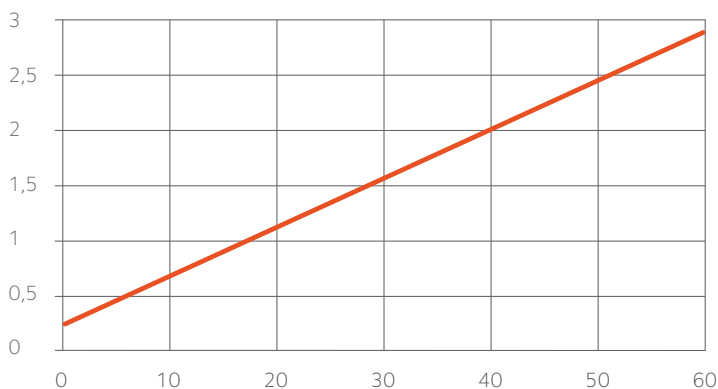
Des recherches européennes ont également permis d'analyser le rapport entre le taux de corrosion du zinc, la teneur de l'air en SO_2 et la durée d'exposition à l'humidité / la quantité des précipitations [2].

La représentation graphique de la perte de zinc en fonction de la concentration en SO_2 dans l'air résulte de ces études (figure 1.1.2). Elle montre une version simplifiée, mais parfaitement utilisable, qui permet de déterminer, à partir de valeurs disponibles pour la contamination au SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de certains sites, la catégorie de corrosivité selon EN ISO 12944-2.

Ceci étant, il convient de souligner que la catégorie de corrosivité ainsi déterminée caractérise la charge corrosive agissant au niveau macroclimatique. Les spécificités microclimatiques, pouvant résulter de sources d'émissions de substances corrosives situées à proximité des structures en acier ou d'une conception des structures inadaptée à la protection anticorrosion, ne sont pas couvertes par cette approche et doivent être spécifiées par le maître d'ouvrage, par exemple l'industrie chimique.

Figure 1.1.2 Perte de zinc en fonction de la contamination au SO_2 (selon Knotkova/Porter)

Perte de zinc/an [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Valeur annuelle moyenne de dioxyde de soufre [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

En Europe, la diminution sensible de la teneur de l'air en SO_2 a permis d'abaisser considérablement la charge corrosive. Le taux de corrosion annuel moyen annuel du zinc pour 1992/1993 a été de $8 \text{ g}/\text{m}^2$ ou $1,1 \text{ } \mu\text{m}$ [3]. De nos jours, ces valeurs sont toujours valables.



2. Durée de protection

La norme EN ISO 12944-1 définit la durée de protection de revêtements comme étant la durée de vie du système jusqu'au premier entretien.

Dans le cas de revêtements de zinc, EN ISO 14713 définit la durée de protection jusqu'au premier entretien comme l'intervalle entre l'application du premier revêtement et son premier entretien destiné à garantir la protection du matériau de base.

La durée de protection est un paramètre vital pour le choix et la définition de systèmes de protection anticorrosion. Cette notion technique peut aider le maître d'ouvrage à élaborer un programme d'entretien.

La durée de protection n'est pas une période de garantie. En règle générale, la période de garantie – une notion juridique – est plus courte que la durée de protection. Aucune règle n'établit de lien entre ces deux notions.

De nos jours, il devient possible d'envisager des protections anticorrosion sans ou presque sans entretien pour toute la durée de vie de structures en acier galvanisées à chaud, même en cas d'exposition aux intempéries.

La durée de protection du revêtement de zinc dépend largement, pour une charge corrosive donnée, de l'épaisseur de la couche appliquée. Pour représenter graphiquement le rapport entre la durée de protection/l'épaisseur de la couche de zinc et la charge corrosive, la figure 1.2.1 se base sur la perte d'épaisseur de zinc indiquée dans le tableau 1.1.1.

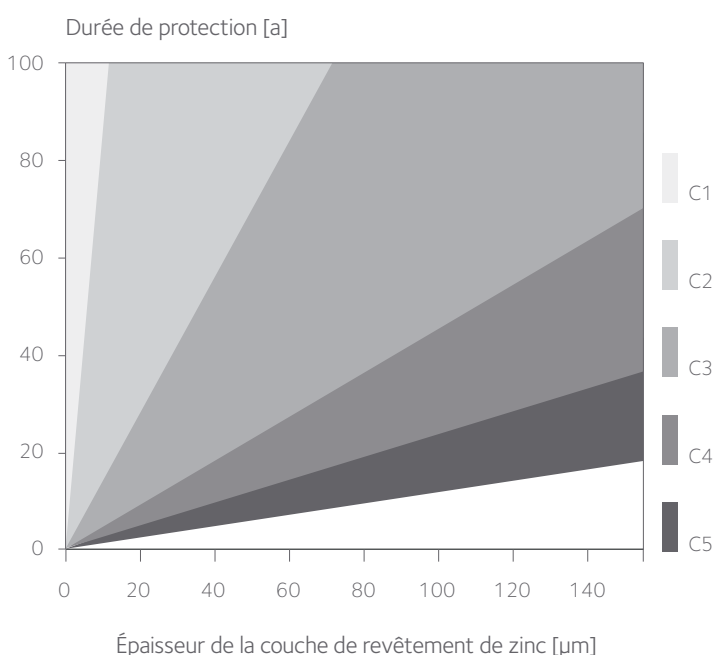
Dans l'ensemble, on peut supposer que la perte de zinc se produit de façon uniforme sur toute la surface revêtue. En considérant la charge corrosive macroclimatique de la catégorie C3, valable aujourd'hui en Europe et caractérisée par une perte de zinc de 0,7 à 2,1 μm pendant la première année, on obtient une durée de protection d'au moins 40 ans pour l'épaisseur de la couche de zinc minimale de 85 μm spécifiée dans EN ISO 1461 (tableau 6 – épaisseur produit acier $\geq 6 \text{ mm}$).

Force est de constater encore une fois que la durée de protection déterminée selon la méthode ci-dessus ne vaut que pour la charge corrosive agissant au niveau macroclimatique.

Des spécificités microclimatiques et des charges plus élevées propres à la construction, telles que des accumulations de poussières avec durée prolongée d'exposition à l'humidité, peuvent réduire considérablement la durée de la protection.

Grâce à la définition claire des conditions atmosphériques ambiantes – les catégories de corrosivité – et à l'accès aux valeurs de mesure servant de base au calcul de la durée de protection, il est désormais possible de planifier correctement des systèmes de protection anticorrosion adéquats selon EN ISO 12944-5 respectivement EN ISO 1461.

Figure 1.2.1 Durée de protection de revêtements de zinc en fonction de l'épaisseur de la couche et de la charge corrosive



2. Procédés de protection anticorrosion



Foundation Cognac-Jay, Rueil-Malmaison, France



Architectes Jean Nouvel & Didier Brault - Photo Philippe Ruault

On distingue dans la protection anticorrosion des structures en acier d'une part des mesures de protection actives et d'autre part des mesures de protection passives.

La protection anticorrosion active a pour objet de prévenir la corrosion ou au moins d'en diminuer la vitesse de réaction. Rentrent dans cette catégorie les mesures suivantes:

- Intervention dans le processus de corrosion, par exemple en réduisant les charges environnementales,
- Choix des matériaux,
- Conception des structures en acier orientée vers la protection anticorrosion.

Le but des mesures de protection passives est de tenir à distance des surfaces d'acier les agents à action corrosive.

Dans la protection anticorrosion des structures en acier, les procédés passifs suivants sont dominants compte tenu de leur large applicabilité et de leur grande efficacité:

- Systèmes de revêtements liquides ou en poudre,
- Application de couches métalliques (zinc, aluminium ou alliage de zinc/aluminium) par procédé d'immersion à chaud, par exemple la galvanisation à chaud, ou procédé de pulvérisation thermique au pistolet, par exemple métallisation au zinc.
- Combinaison de couches de revêtement métallique avec d'autres revêtements ou systèmes de revêtement.

Une protection anticorrosion optimale s'obtient en combinant les procédés passifs et actifs.

La conception tenant compte de la protection anticorrosion des structures en acier doit toujours précéder l'application de toute mesure de protection passive.

Dans ce qui suit seront traités le procédé passif le plus efficace de protection anticorrosion des structures en acier, à savoir la galvanisation à chaud, ainsi que les exigences spécifiques au procédé, aux propriétés des matériaux, à la conception constructive et à la fabrication des structures en acier.

3. Galvanisation à chaud





1. Procédé de galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud consiste à appliquer des revêtements de zinc ou des alliages fer-zinc en plongeant l'acier prétraité dans un bain de zinc en fusion.

Il convient de distinguer :

- Le procédé continu (pour feuillards, fils machine, etc.)
- Le procédé discontinu (pour profilés, éléments de structures et petites pièces).

Dans le cas de structures en acier, seul le procédé discontinu, appelé galvanisation à façon dans l'EN ISO 1461, peut être mis en œuvre.

Pour la galvanisation à chaud – et donc pour la réaction fer-zinc –, la surface de la pièce à galvaniser doit être métalliquement propre, c'est-à-dire, exempte de graisse, de rouille et de calamine.

Le degré élevé de préparation de surface – degré de préparation Be selon EN ISO 12944-4

– s'obtient en prétraitant la pièce à galvaniser dans des bains de dégraissage acides ou alcalins et en la décapant dans de l'acide chlorhydrique dilué avant de la soumettre à un fluxage. Dès que la pièce à galvaniser est plongée dans le bain de zinc (± 440 à 460°C), le flux – le plus souvent un mélange de chlorure de zinc et de chlorures d'ammonium – protège la surface métallique et améliore la mouillabilité par rapport au zinc en fusion.

Le bain de galvanisation se compose de zinc et la somme des éléments d'accompagnement (à l'exception du fer et de l'étain) est limitée à 1,5%.

La pièce à galvaniser, nettoyée et fluxée, peut être séchée dans un four à une température de $80 \div 100^\circ\text{C}$.

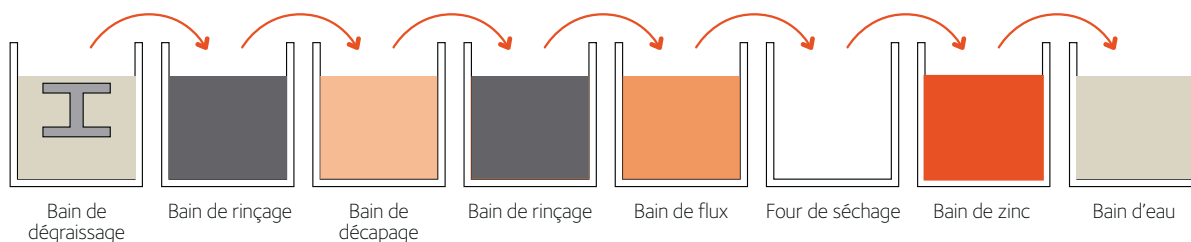
Pendant la durée d'immersion de la pièce à galvaniser dans le bain de zinc, des couches d'alliage fer-zinc se forment à la surface de l'acier. Elles sont couvertes par une couche de zinc pur, créée lors du retrait de l'élément du bain.

La rapidité de la réaction fer-zinc dépend des conditions de galvanisation et de la composition chimique des aciers, notamment de la teneur en silicium et en phosphore. Les aciers dits réactifs forment des couches d'alliage fer-zinc relativement épaisses et peuvent même transformer, en raison de la chaleur résiduelle de la pièce à galvaniser, la couche de zinc pur en couche d'alliage fer-zinc à la sortie du bain de zinc.

Cette réaction peut être évitée ou fortement ralentie par une trempe immédiate de la pièce galvanisée dans un bain d'eau.

La figure 3.1.1 présente schématiquement le principe du procédé de galvanisation à façon.

Figure 3.1.1 Principe du procédé de galvanisation à façon



2. Réaction fer-zinc

Toutes les nuances d'acier de construction courantes actuelles sont en principe aptes à la galvanisation à chaud.

Il existe cependant des particularités propres aux nuances d'acier pouvant influencer le résultat final de la galvanisation à chaud.

La galvanisation à chaud est une réaction de la surface d'acier avec le zinc en fusion. Le résultat de cette réaction est un revêtement de zinc dont l'épaisseur et l'aspect sont essentiellement conditionnés par la composition chimique des aciers et les conditions de galvanisation (composition du bain, température de fusion, durée d'immersion, conditions de refroidissement). La rugosité de surface de l'acier peut également influencer le résultat de la galvanisation.

Le comportement à la galvanisation des aciers peut être classé approximativement en quatre groupes selon les teneurs en Si et P (tableau 3.2.1).

Avec une teneur en silicium comprise entre 0,15 et 0,25% et une teneur en phosphore inférieure à 0,040%, les aciers des produits longs d'ArcelorMittal se situent dans le groupe des aciers Sebisty.

Les limites d'un groupe à l'autre ne sont pas tout à fait fixes et dépendent de la température du zinc en fusion. Dans le cas particulier des aciers qui se situent dans la zone de transition entre le groupe des aciers pauvres en Si+P et le groupe Sandelin, la topographie de la surface de l'acier influence considérablement la réaction fer-zinc. Celle-ci peut provoquer soit des différences

d'épaisseur et des différences d'aspect sur la totalité de la surface de la couche de zinc, soit des différences plus localisées.

Des phénomènes analogues peuvent également être favorisés par des contraintes thermiques locales à la surface de l'acier, telles que celles apparaissant lors de l'oxycoupage ou du dressage à la flamme. Ils sont probablement dus à des variations locales de la composition chimique induites par l'oxydation des éléments réactifs de l'acier (Si, P). Dans la zone de la surface affectée thermiquement, ces éléments perdent ainsi leur influence sur la réaction fer-zinc.

La différence du comportement à la galvanisation des soudures par rapport aux surfaces d'acier voisines est due aux variations de la composition chimique de la soudure liée aux matériaux d'apport. Le revêtement de zinc de soudures meulées avant la galvanisation peut également être plus épais et présenter un aspect visuel différent, le distinguant des zones voisines.

En général, des surfaces qui ont été grenillées ou sablées à l'air comprimé avant la galvanisation, réagissent plus rapidement

au contact du zinc en fusion, ce qui crée des revêtements de zinc plus épais que sur des surfaces d'acier qui ont seulement été décapées.

En règle générale, les inégalités et les irrégularités de la surface de l'acier résultant du laminage, du dressage ou d'autres opérations de fabrication, ne sont pas nivelées par le revêtement de zinc. La plupart du temps, ces effets sont même amplifiés visuellement.

Le galvanisateur ne dispose que de très peu de moyens pour influencer la qualité du revêtement de zinc.

En principe, il est possible d'influencer l'épaisseur de la couche du revêtement de zinc en contrôlant la durée d'immersion, la composition chimique du bain et la température de fusion du zinc. Mais, comme le montre la figure 3.2.2, il n'existe pas de règle unique.

L'épaisseur de couche croît avec la température pour des teneurs en Si + P jusqu'à environ 0,12 %. Pour des teneurs comprises entre environ 0,12% et 0,27%, cette relation s'inverse, c'est-à-dire que pour les aciers du groupe Sebisty, l'épaisseur de couche diminue lorsque la température augmente. Pour des teneurs

Tableau 3.2.1 Classification du comportement des aciers de construction à la galvanisation selon la teneur en silicium et en phosphore

Groupe	Silicium + Phosphore [%]	Aspect du revêtement de zinc
1 Aciers à faible teneur en Si/P	< 0.03	Argenté brillant, fleurs de zinc, couche peu épaisse
2 Aciers Sandelin	0.03 ÷ < 0.13	Gris, par parfois granuleux, couche très épaisse
3 Aciers Sebisty	0.13 ÷ < 0.28	Argenté brillant à gris pâle, couche d'épaisseur moyenne
4 Aciers à forte teneur en Si/P	≥ 0.28	Gris pâle couche, très épaisse

supérieures à environ 0,27% de Si + P, la relation entre épaisseur de couche et température de fusion du zinc redevient normale, un accroissement de température entraînant à nouveau une augmentation d'épaisseur de la couche.

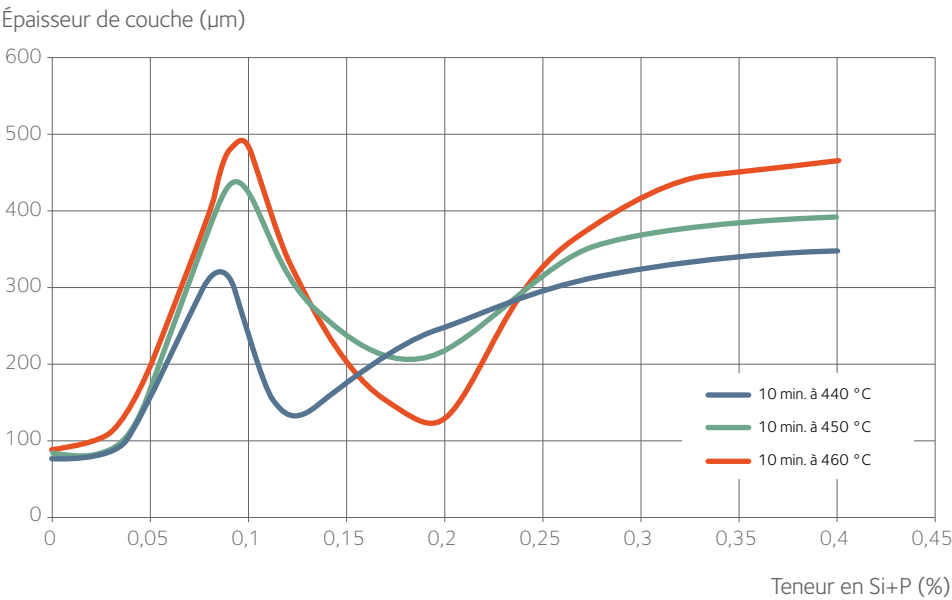
Ceci explique que l'EN ISO 1461 n'indique que des valeurs minimales pour l'épaisseur de couche locale et moyenne (tableau 3.2.3) et ne donne pas de limite supérieure.

Dans la pratique, cela implique que le galvanisateur doit connaître la composition chimique de la pièce à galvaniser pour pouvoir ajuster la durée d'immersion et la température. Les variations de températures du bain de zinc ne peuvent être envisagées techniquement et économiquement que sur de longues périodes de temps.

Sortant du cadre des prescriptions de qualité posées habituellement aux revêtements de zinc

selon EN ISO 1461, si l'épaisseur de couche ou l'aspect visuel des revêtements de zinc fait l'objet d'exigences particulières (ex. des revêtements de zinc brillants argentés comme le souhaitent généralement les concepteurs), il convient d'accorder une attention particulière au choix de matériaux homogènes, à la conception et à la fabrication ainsi qu'à la composition du bain de zinc. Une concertation avec le galvanisateur est dans ce cas absolument indispensable.

Figure 3.2.2 Rapport entre l'épaisseur du revêtement de zinc, la teneur des aciers en Si+P et la température de fusion du zinc pour un temps d'immersion de 10 minutes [4]



Une influence active de la réaction fer zinc, c'est-à-dire l'élimination ou du moins la réduction de l'impact de la composition chimique de l'acier sur le résultat de la galvanisation est possible par ajout de faibles quantités de Sn, Ni, Bi ou Al au zinc en fusion. Les effets de cette opération sont traités dans les chapitres 4 à 8 ci-après.

Tableau 3.2.3 Épaisseurs minimales des revêtements de zinc en fonction de l'épaisseur du matériau selon EN ISO 1461

Épaisseur de matériau	Épaisseur de couche locale (valeur minimale) [µm]	Épaisseur de couche moyenne (valeur minimale) [µm]
≥ 6 mm	70	85
≥ 3 mm et < 6 mm	55	70

3. Adhérence des couches de zinc

D'après EN ISO 1461, il est généralement inutile de vérifier l'adhérence entre le revêtement de zinc et le matériau de base, car les revêtements de zinc résistent en général sans s'écailler ni s'effeuiller aux efforts mécaniques liés à des manipulations normales et à un usage courant.

S'il s'avère nécessaire de vérifier l'adhérence, par exemple pour des pièces exposées à des efforts mécaniques prononcés, des essais de résistance aux chocs ou aux entailles sont préconisés.

La vérification du pouvoir d'adhérence n'est toutefois pas normalisée au niveau européen.

Les méthodes courantes, tel que l'essai de quadrillage, l'essai au marteau articulée ASTM (ASTM A 123) ou l'essai à percussion selon DIN 50978, sont limitées à des épaisseurs de couches maximales d'environ 150 µm et ne fournissent, par ailleurs, que des informations qualitatives. En outre, ces méthodes vérifient surtout la ductilité et la sensibilité à l'écaillage des revêtements de zinc et non leur pouvoir d'adhérence.

La méthode d'essai pour revêtements organiques, "essai d'arrachement en vue de l'évaluation de l'adhérence selon EN ISO 24624" [5], permet de déterminer l'adhérence de revêtements de zinc avec une sécurité statistique jusqu'à ≤ 45 MPa.

Ces valeurs d'adhérence constituent un niveau de résistance à la traction ou au décollement des revêtements de zinc et permettent d'évaluer, en liaison avec les mécanismes de rupture (ruptures adhésives ou cohésives), le pouvoir d'adhérence de revêtements de zinc.

Les valeurs moyennes d'adhérence des couches de zinc selon la norme EN ISO 1461 sont généralement supérieures à 20 MPa, sauf pour les aciers Sebisty. Pour ces derniers, les valeurs sont comprises entre 10 et 18 MPa.

L'affirmation de l'EN ISO 1461 selon laquelle des revêtements de zinc intacts présentent une adhérence suffisante a pu être confirmée par des essais appropriés [6].



4. Réparation de revêtements de zinc endommagés

Conformément à l'EN ISO 1461, des revêtements de zinc ne peuvent présenter de défauts dont la somme excède 0,5 % de la surface de la pièce. Un défaut individuel ne peut dépasser une superficie de 10 cm² et doit être réparé suivant les prescriptions.

Dans le cas de structures creuses non accessibles, les surfaces intérieures sont exclues de la réglementation des défauts, car elles sont difficiles ou impossibles à contrôler et ne peuvent pas être réparées correctement en raison de leur inaccessibilité.

La norme présente trois méthodes de réparation :

- Métallisation au zinc,
- Peinture riche en zinc,
- Brasure avec baguette d'alliage au zinc.

Les méthodes de réparation ne sont pas classées par ordre d'application.

A défaut de dispositions contraires, le choix de la méthode incombe au galvanisateur.

Le galvanisateur doit informer le maître de l'ouvrage ou l'utilisateur final de la méthode de réparation mise en œuvre. La réparation est habituellement effectuée avec des peintures riches en zinc adéquates. L'application d'une couche de fond polyuréthane/zinc à une composante, dont l'adéquation doit être attestée par le fabricant, présente des avantages. Cette méthode de réparation est pratique, efficace (si elle est correctement appliquée), et constitue en outre une solution intéressante pour un coût raisonnable.

La réparation de défauts par métallisation au zinc (avec ou sans bouche-pores ultérieur) est certes la méthode la plus coûteuse et fastidieuse, mais elle confère à la réparation une durée de protection comparable à celle du revêtement de zinc initial. Il convient de s'assurer au préalable de sa faisabilité technique, notamment en ce qui concerne l'accessibilité des points concernés. En outre, le surcoût des travaux doit faire l'objet d'un accord.

La réparation à l'aide d'une peinture riche en zinc s'avère également efficace, mais la qualité de la réparation dépend en grande partie de la préparation de la surface, de l'adéquation de la peinture, de son application et de l'épaisseur de la couche.

La réparation par brasure avec baguette d'alliage au zinc est relativement coûteuse et le résultat obtenu n'est, en général, pas satisfaisant. En particulier, les soudures à l'étain à bas point de fusion donnent de mauvais résultats. Par conséquent, cette méthode de réparation tend à disparaître du marché.

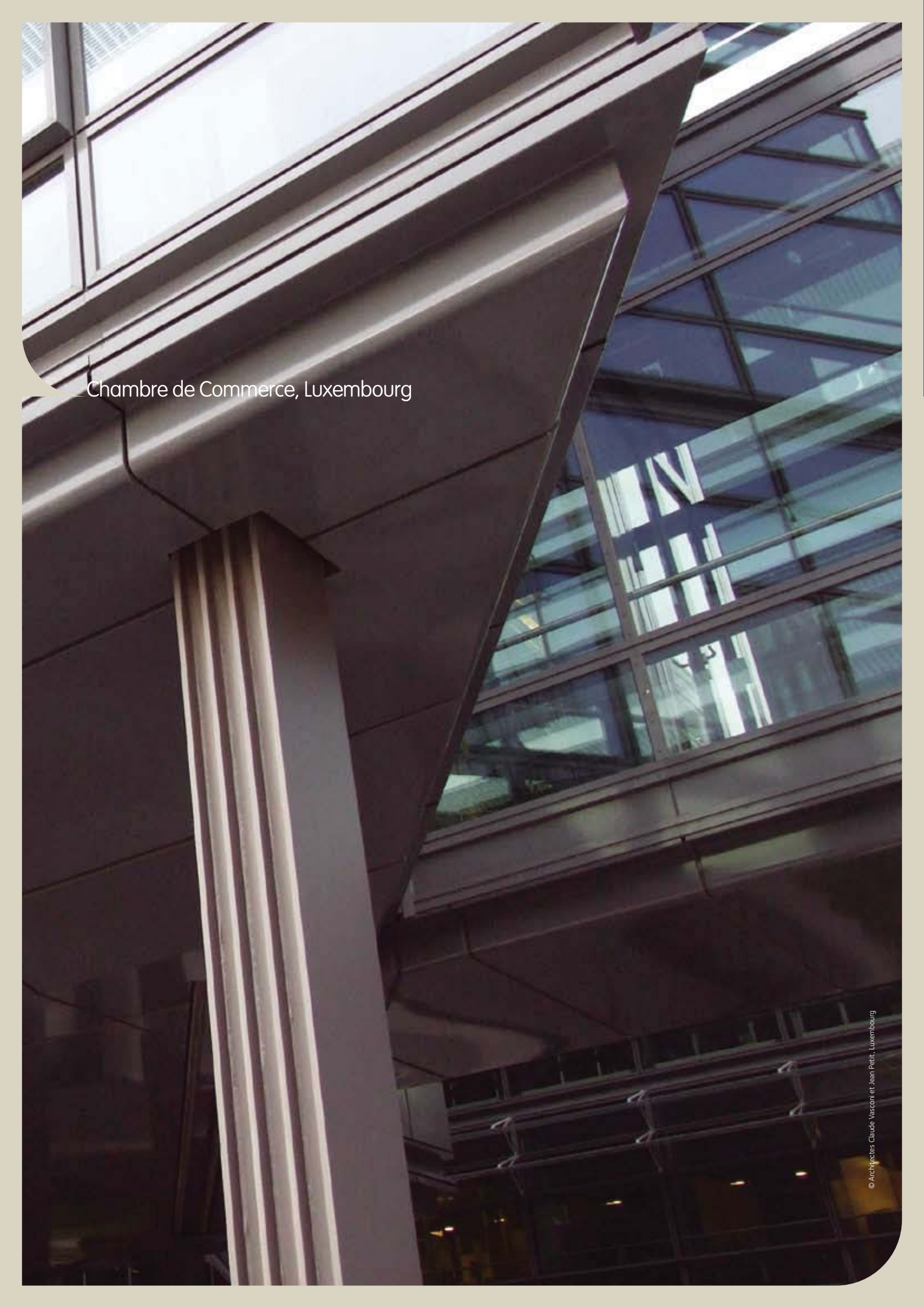
Les spécificités propres au type de réparation et à l'application des couches suivantes doivent être respectées. La "compatibilité" du revêtement de réparation et des couches suivantes doit être garantie. Si le revêtement suivant est une peinture en poudre, il convient de faire attention aux températures de cuisson qui peuvent, avec cette méthode, atteindre 200 °C.

Avant l'application de la couche de réparation, la zone du défaut doit être nettoyée et, le cas échéant, décapée. La surface du défaut peut être sablée à un degré de qualité Sa 2½ ou poncée avec une machine portable à un degré de qualité PMA selon EN ISO 12944-4. En fonction du type de réparation, il convient de faire attention aux exigences posées en matière de rugosité de surface.

L'épaisseur de la couche de réparation doit être supérieure d'au moins 30 µm à la valeur locale exigée pour le revêtement de zinc (tableau 3.2.3).

Selon la norme, les défauts du revêtement de zinc résultant d'interventions de tiers dans le cadre d'opérations de transformation ou de montage doivent être réparés de la même manière. Les revêtements de zinc résistent mieux aux efforts mécaniques que les peintures organiques. Il est cependant techniquement impossible d'éviter tout à fait les endommagements ou les sous-épaisseurs locales de couche aux points d'application des engins de levage et ce en dépit de toutes les précautions prises.

Des défauts dont la superficie dépasse 10 cm² peuvent résulter soit d'éventuelles modifications constructives des structures galvanisées, soit de sollicitations exceptionnelles occasionnées pendant le montage. Si le défaut peut être réparé sans compromettre la protection anticorrosion de la structure, par exemple par une métallisation au zinc, il n'y a en général pas lieu de démonter et de galvaniser à nouveau. Comme pour les défauts relevant de la responsabilité du galvanisateur, il convient de rechercher ici une solution équitable entre les parties contractantes.



Chambre de Commerce, Luxembourg

4. Particularités propres à la galvanisation à chaud des structures en acier

1. Remarques préliminaires

La galvanisation à chaud est un procédé de protection anticorrosion des structures en acier qui est à la fois fort efficace et économique.

Le procédé de galvanisation à chaud (préparation de surface par décapage dans des acides, immersion de la structure en acier dans un bain de zinc à environ 450° C, gradient de température au sein de l'élément en acier lors de la phase d'immersion) impose cependant, en comparaison avec les autres procédés de protection anticorrosion, des exigences plus sévères en matière de

- Qualité et propriétés de l'acier,
- Planning, conception structurelle
- Fabrication de la structure en acier,

qui doivent être prises en compte par toutes les parties contractantes du projet. En fait, une combinaison critique de certains facteurs lors de la galvanisation ou lors du traitement des éléments d'acier dans les solutions aqueuses servant au dégraissage, au décapage et au fluxage pourrait provoquer un risque de formation de fissures. Les connaissances actuelles permettent toutefois d'affirmer que la composition chimique du bain de zinc est l'action prédominante dans le cadre de la fissuration. En conséquence, une attention toute particulière doit être apportée aux alliages réactifs qui augmentent le potentiel de fissuration des bains de galvanisation.

Dans le cadre de la galvanisation à chaud, on fait généralement la distinction entre la LME (Liquid Metal induced Embrittlement = Fragilisation induite par Métal Liquide) et la formation ou l'élargissement de fissures induits par l'hydrogène (fragilisation par l'hydrogène).

De nombreuses recherches métallographiques ont montré que la formation de fissures dans les éléments usuels des structures en acier lors de la galvanisation à chaud doit être attribuée à la LME. Par contre, le danger d'une fragilisation par l'hydrogène est très limité lors de la galvanisation à chaud des structures en acier de construction [7].

Pour satisfaire aux exigences de la norme EN ISO 1461 relatives à la qualité de la couche de zinc (en particulier dans des structures en acier comportant beaucoup de soudures), une collaboration entre le producteur de l'acier, le constructeur métallique et le galvaniseur est absolument indispensable.

2. Fragilisation par l'hydrogène

La fixation de l'hydrogène par les métaux résulte fondamentalement de la présence d'hydrogène en quantités suffisantes, par exemple lors de l'élaboration de l'acier en fusion et coulée, lors de la mise en œuvre (soudage) ou aussi lors des procédés de prétraitement de la surface tels que le dégraissage, le décapage, etc.

Selon la norme ISO 4964, le danger de fragilisation induite par l'hydrogène est particulièrement présent lorsque la résistance à la rupture par traction réelle locale est supérieure à 1200 MPa, la dureté est supérieure à 34 HRC ou la dureté de la surface est supérieure à 340 HV. Des entailles microscopiques en surface ou des manques d'homogénéité dans le matériau accroissent le risque de dommages.

Les aciers de construction usuels ne se fragilisent normalement pas par fixation d'hydrogène lors du décapage, même si de l'hydrogène devait subsister dans le métal. Dans ces aciers, l'hydrogène s'échappe en fait lors de l'immersion dans le zinc en fusion.



3. Corrosion sous contrainte induite par métaux liquides (Liquid Metal Embrittlement – LME)

Les conditions pour que survienne la LME sont:

- Présence de contraintes de traction, flexion ou torsion statiques ou dynamiques suffisantes (contraintes résiduelles ou provenant de charges)
- Métal liquide corrosif
- Métal sensible à la LME
- Intervalle de température critique
- Solubilité mutuelle des métaux du couple critique
- Bonne mouillabilité du métal solide par le métal liquide
- Formation de phases/liaisons intermétalliques à bas point de fusion

Si les conditions énoncées ci dessus sont réunies lors de la galvanisation à chaud des pièces de construction, les propriétés du matériau acier peuvent être affectées de manière préjudiciable par suite du mouillage des bords des grains proches de la surface ou de surfaces d'entailles et de fissures par un métal liquide corrosif, comme le zinc et/ou les éléments d'addition dans le bain tels que le plomb, l'étain ou le bismuth.

A cause de

- la diminution de la capacité de déformation (allongement – voir figure 6),
- la réduction de la résistance à la propagation des fissures,

les contraintes de traction ne peuvent plus être transmises. Par suite du dépassement d'une contrainte critique naissent et se développent au sein de l'acier des fissures intercrystallines ramifiées qui détruisent en fin de compte l'élément par rupture en surcharge. Les extrémités des fissures sont la plupart du temps remplies par du zinc et, s'il y en a, par des concentrations accrues d'éléments d'alliage.

Le niveau de contrainte critique, au-delà duquel l'acier risque de fissurer par LME dans le bain de zinc, est actuellement encore inconnu. Ceci est dû à la difficulté d'estimer et de mesurer le niveau de contraintes dans l'élément de construction d'abord après fabrication, ensuite dans le bain de zinc. Ici, en effet, des contraintes additionnelles difficilement quantifiables sont créées en fonction des paramètres technologiques lors de la galvanisation à chaud, en particulier par la vitesse d'immersion de l'élément dans le zinc en fusion et par le niveau de transfert de chaleur entre le métal en fusion et l'élément sous traitement. Il est généralement reconnu dans la littérature que la sensibilité à la LME croît avec une plus grande dureté et une plus grande résistance mécanique des aciers de construction. A cet égard, il a été constaté que les produits S275 et inférieurs présentent un risque à la LME réduit, alors que celui ci devient plus élevé dans les produits supérieurs au S460.

Il peut être estimé avec une forte probabilité que la composition chimique du bain de zinc, en particulier son contenu de plomb, d'étain et de bismuth, influence sensiblement le risque de fissuration par LME. Sur base des connaissances actuelles, des valeurs limites sont données au chapitre 8 pour ces 3 éléments.

5. Exigences relatives aux matériaux aptes à la galvanisation à chaud



1. Composition chimique

Dans le cadre des parties 2 et 4 de la norme EN 10025:2004, l'aptitude à la galvanisation à chaud peut être convenue pour les aciers de construction des produits longs d'ArcelorMittal jusqu'aux nuances S460. Cependant, cette spécification se limite simplement à l'effet de la composition chimique de l'acier par rapport aux teneurs en silicium et en phosphore sur l'épaisseur et l'aspect de la couche de zinc.

Le niveau d'un risque éventuel de LME, lié à la composition chimique, n'est pas réglementé dans le cadre des normes européennes.

D'importantes recherches à cet égard furent effectuées en particulier au Japon, pour tenter de définir – de manière similaire à la formule du carbone équivalent en tant que mesure de l'aptitude au soudage – une relation entre la composition chimique de l'acier et son potentiel de risque LME. En [9] se trouvent des informations sur l'état actuel des connaissances à ce sujet.

Lors de la recherche des causes de fissures dans les structures en acier en Europe, il y eut cependant lieu de constater que même une composition chimique optimale de l'acier selon les expériences japonaises ne peut prévenir la LME à elle seule si d'autres facteurs suffisamment critiques sont présents. On ne peut que constater de manière générale qu'un bas carbone équivalent tend à minimiser le risque de la LME.



Chambre de commerce, Luxembourg

2. Propriétés mécaniques de l'acier

La connaissance des propriétés de l'acier est la base pour une bonne conception de structures en acier prévues pour la galvanisation.

Lors du dimensionnement des éléments de construction, la limite d'élasticité R_e constitue en général la valeur de résistance déterminante par rapport aux sollicitations quasi-statiques. Elle est déterminée en même temps que la résistance à la traction R_m , le module d'élasticité E , l'allongement de rupture A , l'allongement uniformément réparti A_g et la striction Z dans un essai de traction uniaxial à température ambiante et à faible vitesse de mise en charge.

Le diagramme contrainte - déformation de cet essai de traction révèle que des déformations substantielles apparaissent au-delà de la limite d'élasticité et avant la rupture. Par conséquent, la rupture est annoncée par d'importantes déformations dans l'élément de construction. Cette ductilité a une influence déterminante sur l'évaluation de la tenue aux contraintes, sur le choix de la méthode et des modèles de calcul ainsi que sur la détermination des coefficients de sécurité de la structure en acier. Une ductilité suffisante de l'acier est également indispensable pour pouvoir mettre en œuvre la plupart des techniques de parachèvement.

La capacité de déformation plastique conduit à une diminution du niveau de contrainte par redistribution des pointes de contraintes générées par des sollicitations secondaires et les contraintes résiduelles. C'est ainsi que par exemple des contraintes résiduelles dues aux procédés de soudage ou de laminage - qui peuvent souvent être aussi élevées que la limite d'élasticité - n'ont pas besoin d'être prises en compte (ou partiellement seulement) lors du dimensionnement des éléments d'acier.

Des éléments de construction en acier ductile peuvent également être utilisés pour un "dimensionnement plastique", ce qui signifie qu'une déformation du matériau au-delà de celle de la limite d'élasticité est admissible.

La capacité de déformation (ductilité) évolue différemment selon la nuance d'acier, comme l'illustre le diagramme de la Figure 5.2.1.

D'autre part, on constate une réduction de la capacité de déformation de l'acier lors du processus de galvanisation à chaud (Figure 5.2.2).

Un augmentation en température de l'acier provoque une diminution de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction et du coefficient d'élasticité.

Dans les diagrammes Contraintes - Température (Figure 5.2.3) est représentée la diminution des limites d'élasticité pour trois aciers courants : le S 235, le HISTAR 355 (S 355) et le HISTAR 460 (S 460).

La dureté constitue une autre propriété d'évaluation de la résistance. La valeur de la dureté permet entre autres de contrôler l'uniformité de la résistance d'un demi-produit et de déterminer approximativement de façon non destructive la résistance à la rupture.

La nécessité et les avantages d'une ductilité élevée ont déjà été mentionnés.

Outre l'allongement A et la striction Z , l'énergie absorbée au choc K_v ou résilience constitue un critère important d'évaluation de la ténacité d'un acier.

Les valeurs de résilience ne peuvent toutefois pas être employées en tant que telles dans un calcul de résistance.

Figure 5.2.1 Relations Contrainte - Allongement caractéristiques de différents aciers

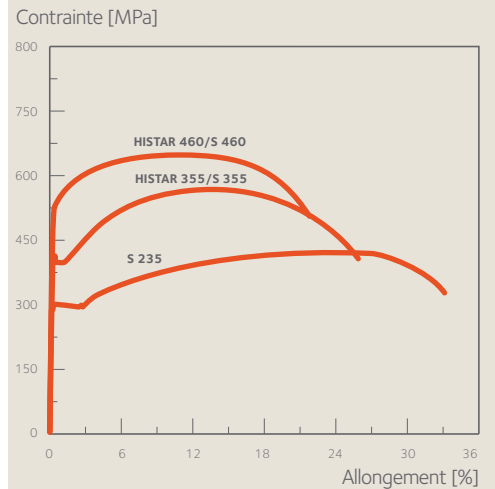


Figure 5.2.2 Diagramme Contrainte - Allongement pour l'acier de construction S355 - Comparaison du comportement à température ambiante (TA), sous 460 °C à l'air et dans le bain de zinc en fusion

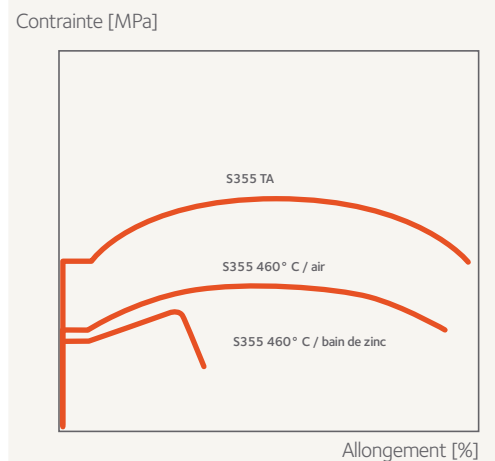
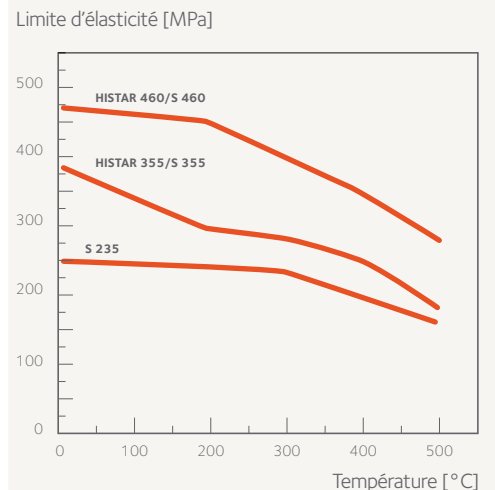


Figure 5.2.3 Diagramme Limite d'élasticité - Température caractéristique de différents aciers



Elles facilitent essentiellement une comparaison qualitative des aciers sur le plan de la ténacité. Combinées à l'expérience acquise avec des aciers dont la tenue aux contraintes et la résilience sont connues, elles permettent de déterminer si, sous certains états de contraintes (contraintes planes ou tridimensionnelles, charges ou contraintes résiduelles), de températures ou modes de mise en charge (lente ou rapide), un acier donné peut être employé sans risque de rupture fragile.

Dans les sections laminées, la ténacité est déterminée dans le sens du laminage. Sans mesures particulières, des différences de ténacité ne sont pas exclues dans la direction transversale au laminage et dans le sens perpendiculaire à la surface du produit. Ce phénomène est dû à la présence d'inclusions non métalliques qui se forment parallèlement à la surface. En cas de contrainte appliquée perpendiculairement à la surface (principalement dans le cas de structures soudées) et en cas de faible ténacité, on peut aboutir à un « arrachement lamellaire ». La présence d'inclusions peut être réduite ou modifiée par apport d'alliages appropriés, la « qualité Z » étant alors conférée à ces aciers.

L'utilité restreinte de l'application des valeurs de résilience résulte de la connaissance imparfaite de l'état de contraintes (planes ou tridimensionnelles, contraintes résiduelles) et de déformation de la structure. Ainsi, ce sont principalement les contraintes élevées apparaissant aux extrémités de fissures naturelles ou de fabrications et d'entailles, les contraintes résiduelles provenant de la fabrication, la température et la vitesse de mise en charge qui influencent la tenue à la rupture fragile.

Pour mieux cerner la tendance des aciers à la rupture fragile d'un point de vue quantitatif, la « ténacité à la rupture » est déterminée à l'aide de la théorie de la mécanique de la rupture ainsi que par des essais spéciaux réalisés sur des

éprouvettes fissurées par fatigue. Leur état est représentatif des tensions dans un élément de construction affecté par une fissure. On obtient ainsi, pour certains niveaux de contraintes, une température critique à partir de laquelle une fissure se propage rapidement et engendre soudainement une rupture de l'éprouvette complète.

Dans la fabrication des aciers et des demi-produits, le mode de production (p. ex. type de calmage lors de la coulée) peut influencer la sensibilité à l'arrachement lamellaire et la résilience. Pour les aciers de construction, plusieurs niveaux de résiliences sont disponibles (p. ex. JR, JO, J2, M, ML).

Une structure à grains fins des aciers permet aussi de diminuer la tendance à la rupture fragile et d'améliorer la soudabilité. Ces aciers permettent de combiner une résistance élevée et une bonne ténacité.

3. Aptitude au soudage

Une bonne aptitude au soudage est généralement exigée pour les aciers de construction et ceci est normalement le cas. Ainsi, le procédé de soudage et les métaux d'apport seront choisis de telle manière que ne survienne pendant le soudage aucune diminution ni de la résistance mécanique, ni de la ténacité (fragilisation) à la fois dans la zone affectée thermiquement et dans la soudure, et que la tendance aux fissures n'y soit pas plus importante que dans le matériau de base.

Lors de la production des aciers, l'aptitude au soudage peut être améliorée par une augmentation du degré de pureté, par un meilleur contrôle des éléments d'alliage et par des procédés bien définis tels qu'un laminage thermomécanique, combiné idéalement avec une trempe et un auto-revenu.



Patinoire de Grenoble, France

4. Indications relatives aux matériaux pour la conception et la fabrication de structures en acier aptes à la galvanisation à chaud

La figure 5.2.1 montre que les différentes qualités d'acier présentent un très grand potentiel d'allongement avant rupture. A l'état limite de la sollicitation, seule une faible partie de cet allongement d'acier est exploitée. La capacité d'allongement de l'acier peut être réduite par une fragilisation du matériau, par exemple par la présence d'impuretés ou la création d'états de contrainte plans ou tridimensionnels dans le cas d'éléments épais ainsi que par des contraintes résiduelles (p. ex. dans le fond d'une entaille). Un dépassement de la limite d'allongement provoque bien évidemment une rupture dans l'élément de construction. L'expérience montre que plusieurs de ces influences peuvent se superposer.

Il s'agit ici de phénomènes très complexes et les résultats de recherche pour l'évaluation de la ténacité respectivement de la tendance à la rupture fragile sont en général sujets à de très grandes dispersions. Il y a lieu de constater que la susceptibilité à la rupture fragile est considérablement influencée par la fabrication (p. ex. des changements de la microstructure dans la zone affectée thermiquement suite à des vitesses de refroidissement trop élevées), par la conception (p. ex. par les contraintes résiduelles) et par l'utilisation (p. ex. vitesse de mise en charge élevée).

Il est évident que les éléments de construction soudés peuvent être particulièrement affectés. En particulier, l'hydrogène exerce en présence de contraintes de retrait une influence sur la sensibilité à la fissuration à froid et à chaud de l'acier dans la soudure ou dans la zone affectée thermiquement. L'hydrogène provoque ici une diminution de la capacité de déformation.

La prise en considération de ces indications pendant les phases de planification, de conception et de fabrication des structures en acier prévues pour la galvanisation à chaud est d'une importance particulière, vu que les charges significatives supplémentaires produites dans le bain de zinc interviennent au moment où la limite d'élasticité et la capacité de déformation de l'acier sont réduites, ce qui peut provoquer une fissuration par LME ou éventuellement une fragilisation par hydrogène.

L'apparition de ruptures fragiles lors de la galvanisation à chaud est possible pour tous les aciers. Comme mentionné précédemment, les contraintes de traction (principalement les contraintes résiduelles) qui apparaissent dans l'élément de structure suite aux procédés de fabrication, ont une influence significative sur la tendance à la fissuration.

5. Développement des aciers de construction

Le développement des aciers de construction vise à augmenter la limite d'élasticité et la soudabilité tout en gardant ou en améliorant la ténacité.

Ces améliorations sont réalisées grâce à un degré de pureté élevé et à un affinement de la microstructure de l'acier suite au remplacement dans les usines sidérurgiques de la coulée en lingot par la coulée continue ainsi que la mise en œuvre des procédés de laminage thermomécanique et de trempe et auto-revenu.





6. Exigences relatives à la conception des structures aptes à la galvanisation à chaud

1. Généralités

La conception de structures aptes à la galvanisation à chaud constitue un sous-groupe de la conception de structures protégées contre la corrosion. Elle doit tenir compte d'exigences spécifiques et inhérentes au procédé de la galvanisation à chaud.

La galvanisation à chaud est un procédé d'immersion à chaud dont toutes les étapes – du prétraitement de la surface (dégraissage, décapage, rinçage, fluxage) au processus de galvanisation proprement dit – ont lieu dans des installations (cuves, creusets) remplies de solutions et du bain de zinc liquide ($440 \div 460^\circ\text{C}$). Dans la phase de conception, toutes les exigences qui en découlent doivent être prises en compte:

- Exigences techniques liées au procédé,
- Exigences de sécurité,
- Exigences imposées aux matériaux, à la conception et à la fabrication des éléments de construction afin d'éviter les déformations et les fissures.

L'EN ISO 1461 et l'EN ISO 14713 donnent des informations détaillées à ce sujet.

La forme des structures en acier et leur conception en vue d'une protection anticorrosion ont également une influence déterminante sur l'efficacité (durée de protection) et l'entretien (accessibilité) de la protection anticorrosion.

À cet égard, les règles fondamentales applicables à la conception de structures aptes à recevoir une protection anticorrosion selon EN ISO 12944-3 valent également pour des structures à galvaniser.

2. Exigences techniques pour le procédé

2.1 Géométrie des éléments de construction

Les dimensions des éléments de construction à galvaniser sont choisies de manière à permettre une immersion en une seule opération.

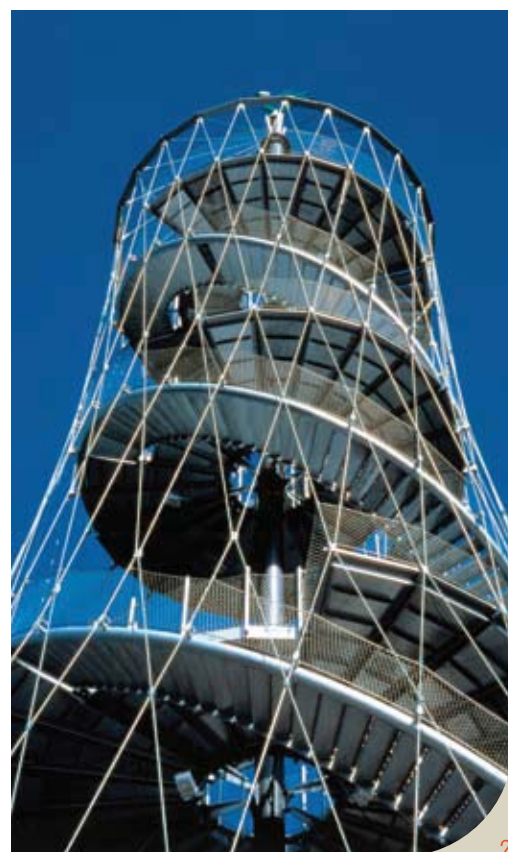
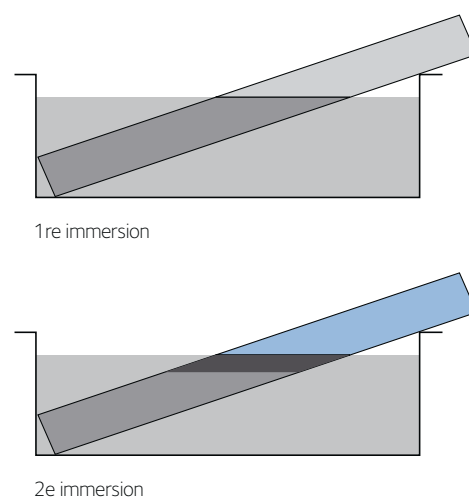
Par conséquent, les dimensions maximales des cuves de galvanisation à disposition doivent déjà être connues du concepteur.

Pour des structures en acier, les dimensions des cuves utilisables économiquement sont les suivantes:

- Longueur: $\pm 7.00 \div 16.50$ m
- Largeur: $\pm 1.30 \div 2.00$ m
- Profondeur: $\pm 2.20 \div 3.50$ m

Lorsque la galvanisation d'éléments de construction n'est pas possible en une seule opération (figure 6.2.1), il convient de prendre des mesures particulières, car l'échauffement différentiel de l'élément accroît le risque de déformation et/ou de fissuration (voir aussi chapitre 6.2.4). Il est utile d'en discuter au préalable avec le galvanisateur.

Figure 6.2.1 Exemple de double immersion



2.2 Évidements, ouvertures d'écoulement et événements

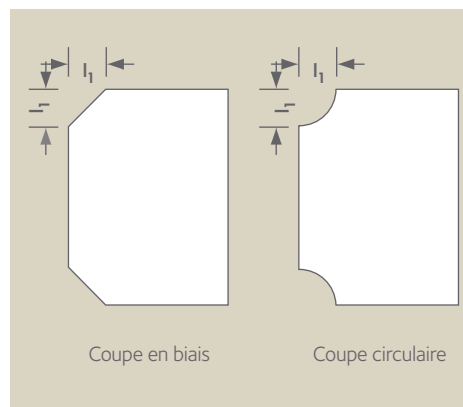
Afin de garantir un bon traitement de la surface et une galvanisation de qualité, les éléments de construction doivent être conçus pour que les liquides de prétraitement et surtout le zinc liquide puissent être en contact avec toutes les surfaces et s'écouler sans problème lors de l'extraction de la pièce du bain.

Les poches et inclusions d'air entraînent l'apparition de zones non galvanisées et sont à éviter au niveau de la conception.

Ceci vaut non seulement pour les structures en profilés creux et réservoirs, mais aussi pour les structures en profilés dotées de raidisseurs, de plaques de cloisonnement ou de recouvrement, etc., qui, en l'absence d'évidements appropriés, sont susceptibles de former des poches d'air lors de l'immersion.

La grandeur des ouvertures d'écoulement et des événements est fonction de la quantité de zinc qui doit passer par ces ouvertures. La vitesse d'immersion constitue un paramètre important pour la diminution du risque lié à la LME. Ce point sera encore discuté au chapitre 8. Il a été expérimentalement établi que le risque de LME diminue avec l'augmentation de la vitesse d'immersion. On considère que la vitesse d'immersion optimale est d'environ 5 m/min [11].

Figure 6.2.2 Exemples d'évidements



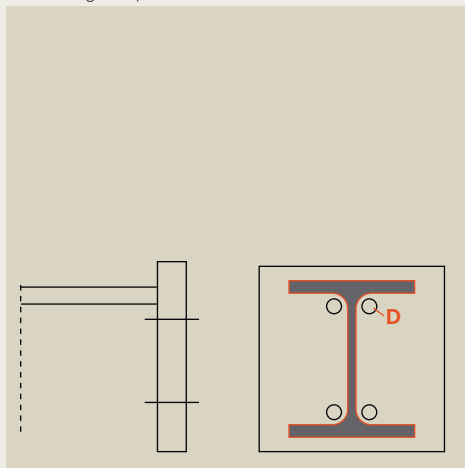
La Figure 6.2.2 donne des exemples de conception d'évidements, tandis que la Figure 6.2.3 représente des exemples d'ouverture d'écoulement.

Pour des hauteurs de profilé jusqu'à 300 mm, l_1 devrait être supérieur ou égal à 20 mm; pour des hauteurs de profilé au delà de 300 mm, l_1 devrait être supérieur ou égal à 30 mm. Pour obtenir la vitesse d'immersion optimale, il y a lieu de définir le dimensionnement des évidements d'un commun accord entre le constructeur métallique et le galvanisateur.

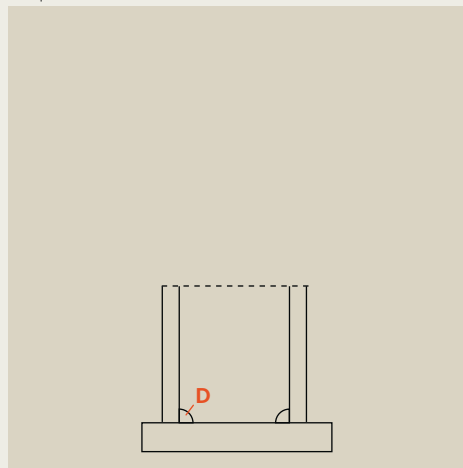
Les ouvertures d'écoulement pour les connexions de poutres, les plaques d'assises, les angles de portiques, etc., doivent présenter un diamètre compris entre 10 mm et ± 35 mm. La figure 6.2.3 présente quelques exemples.

Figure 6.2.3 Exemples d'ouvertures d'écoulement

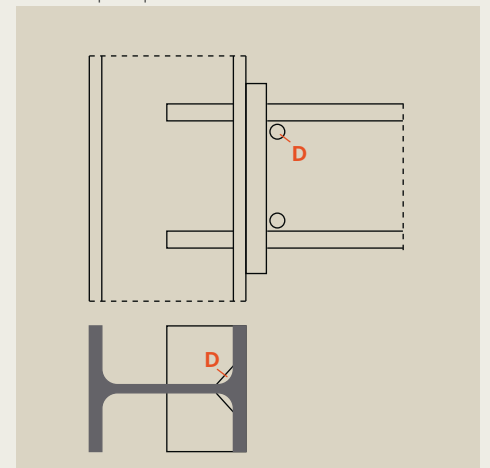
Assemblage de poutres



Plaque d'assise



Nœud de portique



2.3 Exigences de sécurité pour le procédé

A la température du zinc fondu (440 à 460 °C), l'air contenu dans des poches (corps creux, zones de recouvrement de sections soudées de manière étanche) s'étend et engendre un risque d'explosion. Les liquides provenant des bains de prétraitement peuvent également s'infiltrer dans des fentes dont les recouvrements n'ont pas été soudés de façon étanche et présenter ainsi un risque d'explosion en s'évaporant lors de l'immersion dans le bain de zinc.

Pour des raisons de sécurité mais aussi de protection contre la corrosion, il convient d'éviter autant que possible les surfaces de recouvrement.

Au cas où ces surfaces de recouvrement ne pourraient pas être évitées, le tableau 6.2.3 donne quelques indications.

L'exécution de trous dans de grandes surfaces de recouvrement élimine certes le risque d'explosion lors de la galvanisation, mais crée d'un l'autre côté un manque de protection anticorrosion pour ces structures. En effet, les infiltrations de solutions de prétraitement ne s'évaporent pas intégralement dans les fentes et laissent des traces de sels. Bien souvent, l'évaporation de ces liquides pendant la galvanisation empêche la fermeture des fentes par le zinc, ce qui peut engendrer une corrosion dans cette zone de la structure.

Tableau 6.2.3 Recommandations pour la taille maximale des surfaces de recouvrement

Surfaces de recouvrement	Mesures
Jusqu'à 100 cm ² (épaisseur de tôle <12mm)	Soudage étanche
Jusqu'à 400 cm ² (épaisseur de tôle ≥ 12mm)	Soudage étanche



2.4 Conseils pour la conception des structures aptes à la galvanisation à chaud

La conception et le parachèvement des éléments de construction en acier doivent respecter les principes fondamentaux de la conception de structures destinées à recevoir une protection anticorrosion et, en particulier, un revêtement de galvanisation. C'est le seul moyen à la fois d'obtenir une protection anticorrosion suffisante et des couches de zinc satisfaisantes et d'éviter autant que possible les déformations de structure, les fissures ou tout autre endommagement des composants. Une concertation avec le galvanisateur doit intervenir le plus tôt possible dans la conception des éléments en acier.

Le risque de formation de fissures et de déformation des structures en acier lors de la galvanisation à chaud peut être minimisé en prenant les mesures constructives et technologiques suivantes.

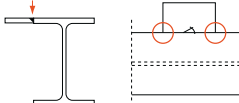
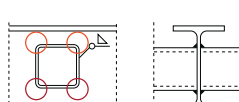
- Dès le stade de planification, le constructeur doit veiller à garder au niveau le plus bas les contraintes résiduelles dues à la fabrication, principalement celles dues au soudage. A cet effet, il est utile d'établir une procédure de soudage et de respecter son strict respect. Pour des épaisseurs élevées des éléments de construction, le risque d'apparition de contraintes tridimensionnelles ainsi que celui de vitesses de refroidissement élevées augmente le potentiel d'apparition de fissures.
- Les différences d'épaisseur entre éléments directement soudés entre eux ne devraient pas excéder un rapport de 1 : 2,5. Pour les grosses épaisseurs et en cas d'éléments à haut degré de soudage, il est recommandé de choisir des rapports d'épaisseur inférieurs.
- Respect conséquent des exigences en matière de conception des structures aptes à la galvanisation à chaud, en particulier lors de l'utilisation d'aciers de construction à résistance élevée et à faible résilience.

Les événements et orifices d'écoulement seront réduits à un minimum; en cas d'exécution inappropriée, le risque de fissuration croît, plus particulièrement dans la zone d'influence de la soudure. Une concertation avec le galvaniseur est recommandée.

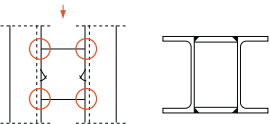
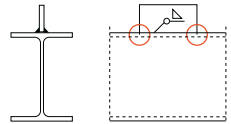
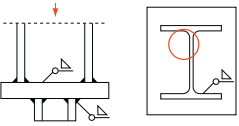
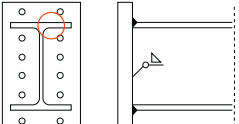
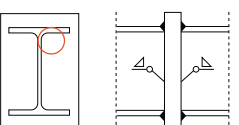
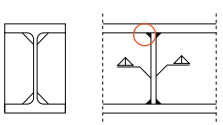
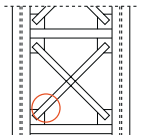
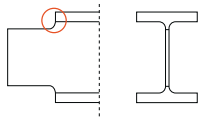
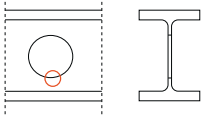
- Les éléments de construction hyperstatiques développent des contraintes secondaires dans le bain de zinc et devraient être évités.
- Les caractéristiques réelles du matériau et la composition chimique des aciers doivent être connues avant la galvanisation. Le galvaniseur devrait être informé de la nature des aciers à galvaniser.
- Les immersions répétées doivent être évitées.

Le tableau suivant montre quelques détails de construction estimés comme critiques pour ce qui concerne le risque de LME dans le cadre de la galvanisation à chaud.

Tableau 6.2.4 Détails constructifs et recommandations de mise en œuvre

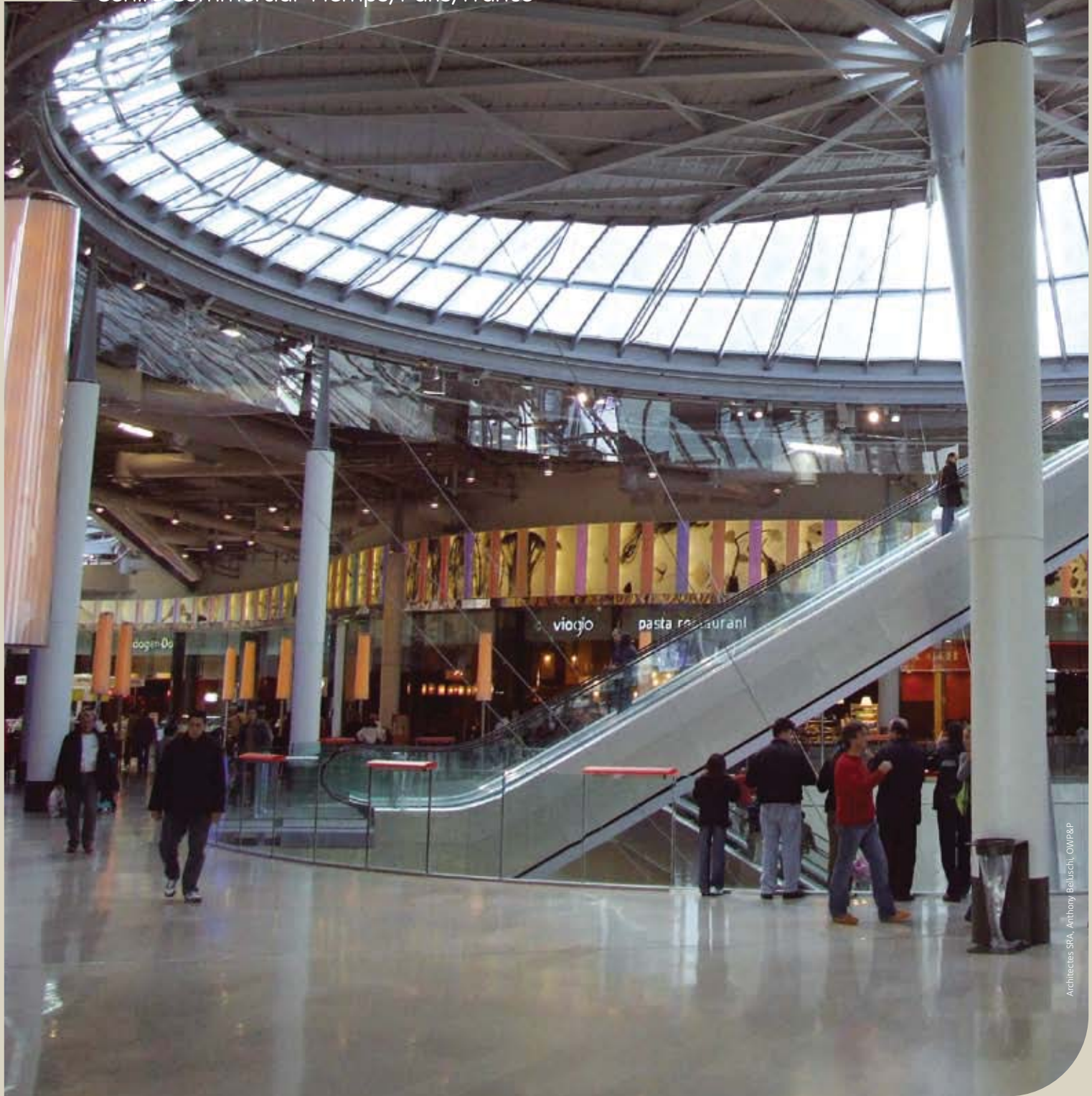
Nr	Détail constructif	Description
1		Dans la zone indiquée, le soudage de "plaques d'about" induit une pointe de contraintes de retrait. Recommandation : prévoir la plaque sur toute la hauteur du profilé ou réaliser un assemblage boulonné. Sinon, pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
2		Dans la zone indiquée, le soudage de la plaque induit une pointe de contraintes de retrait. Recommandation : pratiquer un recuit de détentionnement dans les zones indiquées et/ou les arrondir.
3		Les soudures induisent des pointes de contraintes de retrait aux quatre coins du profil creux. Recommandation : pratiquer un recuit de détentionnement dans les zones indiquées.

6. Exigences relatives à la conception des structures aptes à la galvanisation à chaud

Nr	Détail constructif	Description
4		Les soudures induisent des pointes de contraintes de retrait aux quatre coins de la plaque de liaison. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
5		Les soudures induisent des pointes de contraintes de retrait aux extrémités de la plaque. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
6		Les différences de rigidité entre le profilé et la "plaque d'assise épaisse" et les soudures induisent des contraintes de bridage. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
7		Des contraintes résiduelles naissent lors du soudage du fait de la différence de rigidité entre le profilé en H et la "plaque d'about épaisse". Le forage des trous pour boulons génère un durcissement des bords. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée, percer soigneusement les trous.
8		Les différences de rigidité entre le profilé et la plaque d'about et les soudures induisent des contraintes de bridage. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée..
9		Le soudage des raidisseurs entre les ailes des profilés induit des contraintes de bridage. Recommandation: pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
10		Le système possède une hyperstaticité interne. Les différences inévitables d'échauffement des éléments peuvent créer de fortes contraintes de bridage, en particulier dans les diagonales. Recommandation: boulonner les diagonales aux cordes après la galvanisation.
11		Du fait d'une exécution mal appropriée, des durcissements et des entailles peuvent survenir aux arrondis. Recommandation: Fabriquer soigneusement les arrondis et pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.
12		Une exécution non conforme des ouvertures peut provoquer des durcissements et engendrer des entailles. Recommandation: soigner les arrondis, pratiquer un recuit de détentionnement dans la zone indiquée.



Centre Commercial 4 temps, Paris, France



7. Exigences relatives à la fabrication de structures en acier aptes à la galvanisation à chaud

1. Contraintes résiduelles dans l'élément de construction

Des fissures lors de la galvanisation à chaud de structures en acier apparaissent le plus souvent en des endroits où furent opérés des

- soudages,
- découpages au chalumeau,
- meulages,
- perçages,
- poinçonnages,
- déformations à froid (vieillessement),
- dressages,

Ces opérations peuvent engendrer des contraintes résiduelles élevées (contraintes de traction), des entailles et/ou des durcissements.

Des contraintes résiduelles naissent également dans le bain de zinc en cas de structures bridées. Pendant la galvanisation, l'action de la chaleur de galvanisation ($\pm 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) modifie aussi bien l'état de contraintes que les propriétés mécaniques de l'acier (abaissement de la limite d'élasticité et du module d'élasticité), ce qui réduit dès lors la rigidité des éléments de construction. Des contraintes – souvent limitées localement – peuvent apparaître ou disparaître et les éléments de construction peuvent se déformer.

La difficulté réside néanmoins dans la détermination des contraintes résiduelles qui ne peuvent en pratique être évaluées que de façon approximative. Les multiples facteurs d'influences liés à la fabrication et à la conception structurelle ne peuvent pas être identifiés de façon précise. En général, le concepteur ignore l'état des contraintes résiduelles dans la structure.

La capacité de déformation plastique des aciers de construction permet dans la plupart des cas de pouvoir renoncer à une détermination précise des contraintes résiduelles ; elles sont locales et se dissipent en général par plastification de

l'acier après superposition avec les contraintes provenant des charges. La condition est que le matériau a été correctement sélectionné au niveau de sa ténacité avec considération des dimensions et de la température de service de l'élément de construction (voir à ce propos la EN 1993-1-10). Il est particulièrement important de veiller à ce que les contraintes résiduelles restent faibles dans les éléments de construction prévus pour la galvanisation à chaud. Ceci se fait normalement par application de mesures constructives appropriées en vue d'éviter autant que possible un traitement à chaud ultérieur (recuit de détentionnement).

Au niveau de la fabrication des structures, il faut veiller à éviter les contraintes résiduelles élevées et les durcissements:

- par l'exécution des soudures en plusieurs cordons, même si la technique actuelle permet le soudage en un seul cordon
- par l'établissement de plans de soudage,
- en évitant les soudures épaisses et longues,
- en évitant les grandes déformations à froid

à moins d'éliminer les contraintes résiduelles par un traitement à chaud (il faut rappeler ici que les effets de la déformation à froid ne sont jamais neutralisés à 100%),

- en limitant les entailles, particulièrement dans les éléments de construction minces des structures soudées et dans les zones ayant subies des modifications de la microstructure lors de la fabrication (formage à froid, soudage, découpage au chalumeau, perçage, poinçonnage et autres), ou en les enlevant par des moyens appropriés..

2. État de surface des produits longs laminés à chaud

Normalement, l'état de surface du produit de laminage prévu pour la galvanisation à chaud, est dégraissé et satisfait à l'exigence de base selon EN 10163-3: 1991, Classe C, Sous-groupe 1.

Les imperfections qui pourraient compromettre le comportement anticorrosion de la couche de zinc doivent être éliminées avant la galvanisation à chaud.





Parking Rheda Wiederaufbau, Rheda-Wiedenbrunn, Germany

8. Exigences relatives au procédé de galvanisation à chaud

Comme développé au chapitre 4.3, la condition de base pour la fissuration par LME est le contact d'un métal solide susceptible à la LME avec un métal liquide à effet corrosif. Cette condition est nécessairement remplie lors de la galvanisation à chaud (métal liquide = zinc en fusion, métal solide = acier) car seule cette façon d'opérer permettra de mettre la couche de zinc en place.

Au même titre que les exigences relatives à la production de l'acier, à la planification et à la construction ainsi qu'à la fabrication des structures en acier (les contraintes résiduelles seront en particulier maintenues aussi basses que possible par des mesures appropriées), des mesures doivent également être prises lors du procédé de galvanisation à chaud afin de réduire autant que possible le risque relatif à la fragilisation par l'hydrogène et à la fissuration par LME.

Parmi les nombreux paramètres du procédé de galvanisation à chaud, des recherches étendues [9, 12, 13] permettent de déduire que le gradient de la température, créé lors de l'immersion de l'élément de construction dans le bain de zinc, revête une importance particulière pour la LME. En effet, le risque de fissuration par LME est d'autant plus faible que le gradient de température est petit [14].

Le coefficient de transfert de chaleur et la mouillabilité du zinc en fusion augmentent avec des teneurs élevées en éléments d'alliage, en particulier l'étain (Sn), le plomb (Pb) et le bismuth (Bi). Ces éléments réduisent la durée de réchauffage à cœur et augmentent le risque de LME.

Sur base des connaissances susmentionnées, des recherches furent exécutées dans le but de réduire le gradient de température par modification des paramètres du procédé de galvanisation à chaud [11].

Le gradient de température peut être réduit par :

- une modification de la composition chimique du bain de zinc par rapport à la teneur optimale en éléments d'addition, en particulier du Sn, du Pb et du Bi,
- une augmentation de la vitesse d'immersion (environ 5 m/min),
- un grand angle d'immersion,
- une augmentation de la teneur en sel du flux (environ 500 g/l),
- une température de séchage après fluxage idéalement de 100° C, qui permet d'atteindre une température de préchauffage élevée de l'élément de construction avant son immersion dans le bain de zinc,

- une température du bain de zinc aussi basse que possible afin d'obtenir un écart de température entre l'élément de construction et le bain aussi bas que possible.

D'après les résultats de recherches récentes, on considère aujourd'hui que l'étain et/ou le bismuth n'ont pas d'influence notable sur le phénomène de la LME jusqu'à une teneur de 0,1%. L'addition de plomb est à limiter à 0,8%.

Il doit toutefois être signalé ici que les bains de zinc classiques ou modifiés d'après les indications ci-dessus peuvent quand même être critiques pour la fissuration par la LME, particulièrement lorsque les exigences par rapport à la qualité du matériau et à la fabrication (voir les chapitres 5 à 7) ne sont pas respectées.



Chambre de Commerce, Luxembourg



9. Systèmes Duplex

De nombreux architectes utilisent les structures en acier galvanisées pour des raisons esthétiques.

Pourtant, l'application additionnelle de peintures liquides ou en poudres sur le revêtement de zinc – le système duplex – a largement été utilisée au cours des dernières années.

Les systèmes duplex se révèlent intéressants au cas où les aspects suivants sont d'importance:

- Longue durée de protection.
La durée de protection du système duplex est de 1,2 à 1,5 fois supérieure à la somme des durées de protection de la couche de galvanisation et de celle de la peinture (effet de synergie).
- Diversité des teintes,
- Signalisation / identification / camouflage.
- Réduction des quantités de zinc relâchées dans l'environnement

Il est avantageux d'appliquer au moins la première couche du système de peinture dans l'atelier, si possible dans la foulée de la galvanisation à chaud. Cette façon de procéder évite les opérations coûteuses de préparation des surfaces sur chantier.

Les systèmes duplex de qualité présupposent une compatibilité optimale entre la couche de galvanisation et la peinture.

Il est particulièrement important de bien choisir les produits de revêtement. Seuls des systèmes de peinture ayant démontré leur compatibilité avec la galvanisation à façon selon EN ISO 1461 doivent être mis en œuvre.

Les exigences posées en matière de préparation/ prétraitement des surfaces dépendent de la nature du produit de revêtement.

Les surfaces de zinc destinées à recevoir une peinture en poudre doivent être brossées, phosphatées ou chromatées juste avant l'application.

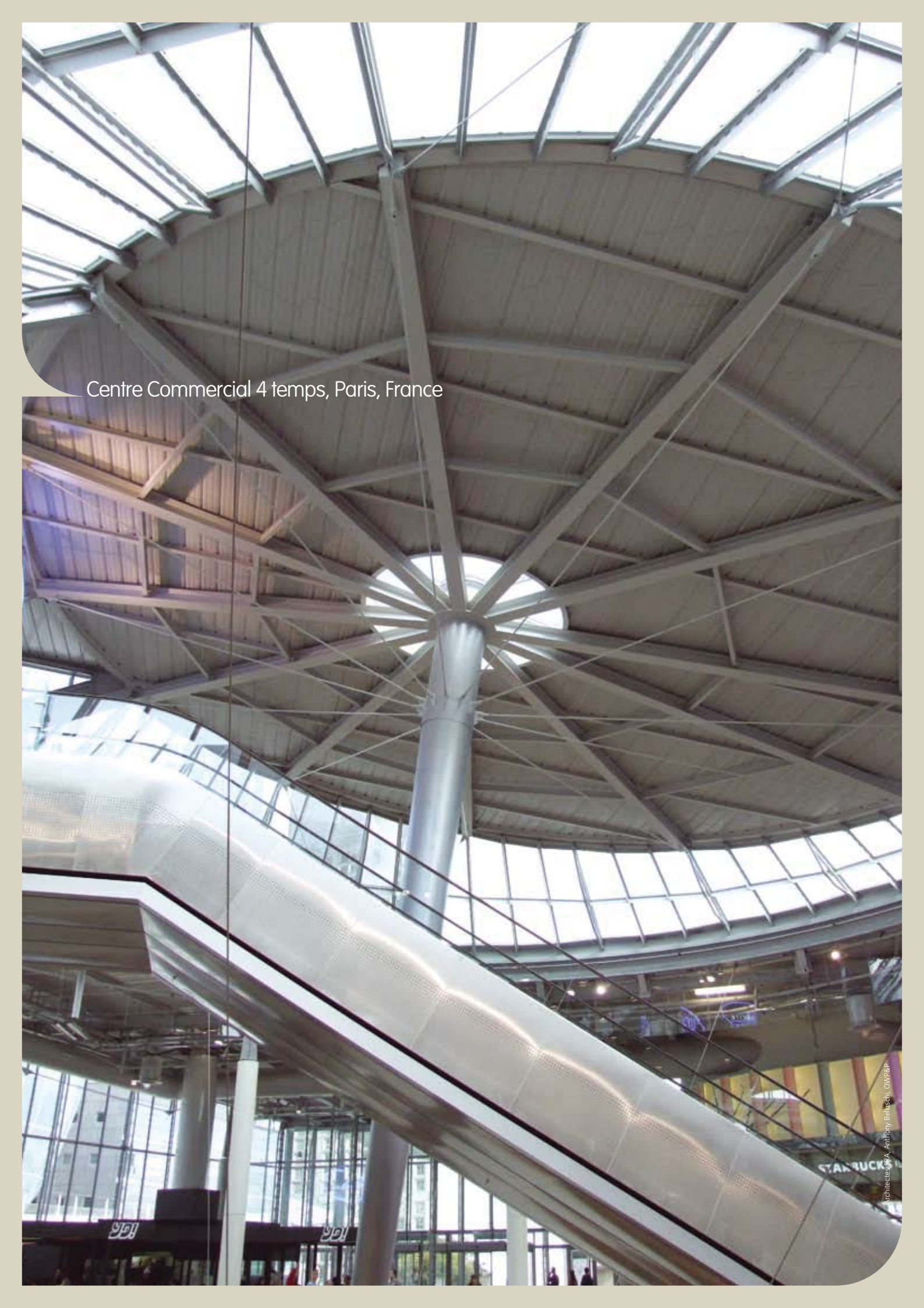
Dans le cas de peintures liquides, la surface du revêtement de zinc ne doit être nettoyée dans l'état actuel de la technique que si un dépôt important de produits de corrosion du zinc (rouille blanche) sur la surface compromet le pouvoir d'adhérence ou que, en liaison avec les charges corrosives, la nature du produit de revêtement prévu requiert un nettoyage au moyen d'un décapage par jet d'abrasifs conformément aux recommandations techniques du fabricant du produit de revêtement.

Ce sablage léger doit être effectué de telle sorte que toutes les impuretés et les produits corrosifs soient éliminés de la surface de zinc. Le sablage provoque également une légère rugosité de la surface, ce qui améliore l'adhérence. Ce prétraitement représente une contrainte mécanique importante pour le revêtement de zinc et peut, s'il est mal exécuté, l'endommager (fissures, écaillage).

Les paramètres optimaux pour le sablage léger sont [15] :

- Abrasif: scories non métalliques, corindon, perles de verre
- Taille des particules de l'abrasif: $0,25 \div 0,50$ mm
- Pression de pulvérisation à la buse : $2,5 \div 3,0$ bars
- Angle de pulvérisation : $< 30^\circ$ (attention à la géométrie de l'élément de construction)

La référence [16] comprend de plus amples informations sur les systèmes duplex à peintures liquides et en poudre.

A low-angle, upward-looking photograph of the interior of the Centre Commercial 4 temps in Paris. The image captures a vast, circular atrium with a complex, radial steel truss ceiling. A large, white, curved architectural element, possibly a ramp or a large staircase, dominates the foreground, curving from the bottom left towards the center. The ceiling is composed of numerous steel beams radiating from a central point, supporting a glass and steel skylight structure. Natural light filters through the skylight, illuminating the interior. In the background, various retail stores are visible, including a Starbuck's and a store with a '99' logo. The overall atmosphere is modern and spacious.

Centre Commercial 4 temps, Paris, France

10. Rentabilité

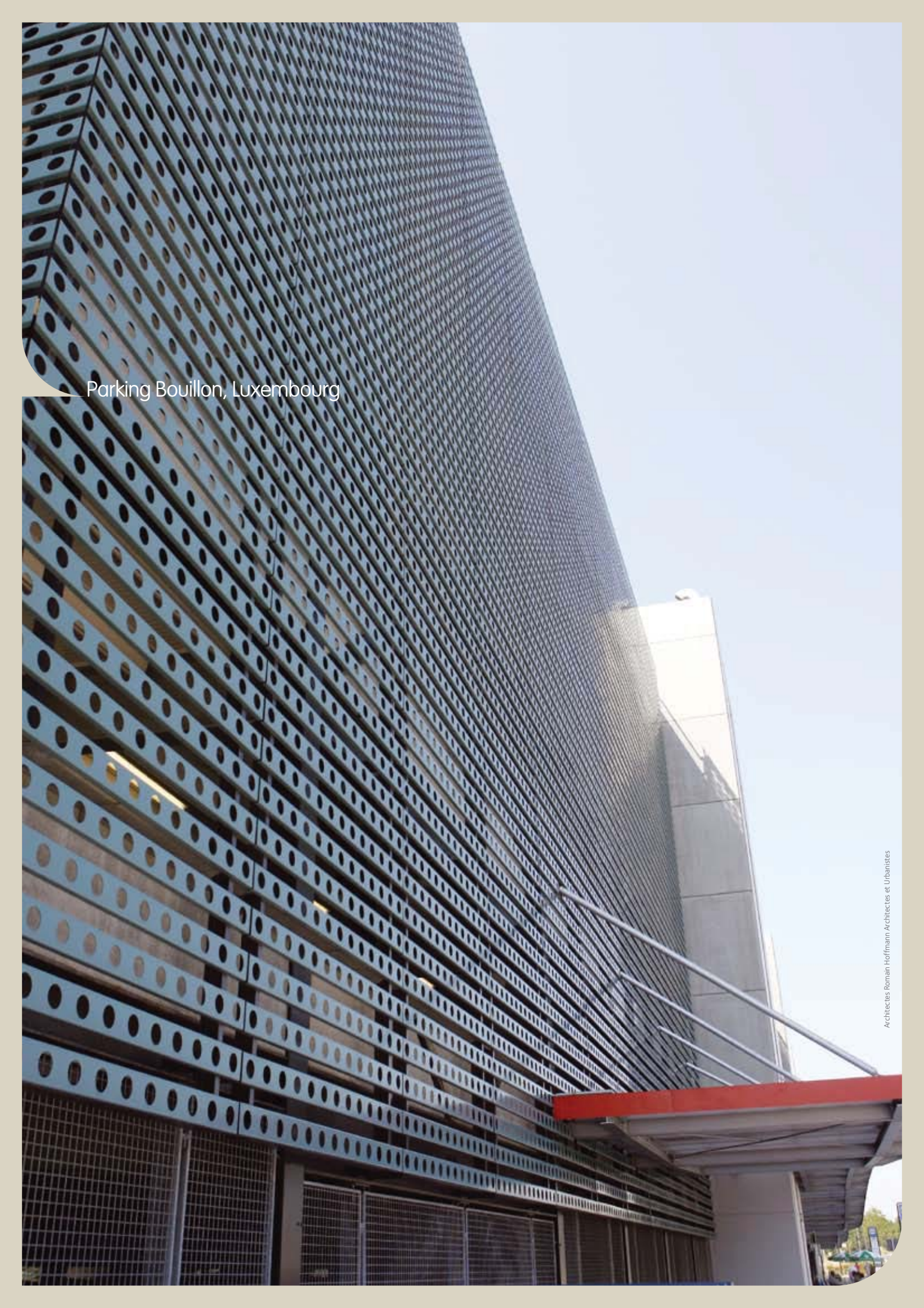
La galvanisation à chaud offre une protection anticorrosion durable et très efficace aux éléments de construction en acier exposés aux conditions atmosphériques. Dans de nombreux cas d'application, la durée de protection de la couche de zinc coïncide avec la durée de service de l'ouvrage. Les revêtements de zinc sont des protections de surface sans ou pratiquement sans entretien. Sur le plan des coûts de mesures de protection anticorrosion sur la durée de vie des structures, maintenance et entretien compris, la galvanisation à chaud est de loin la méthode de protection anticorrosion la plus rentable pour des structures en acier.

Contrairement à l'idée très répandue selon laquelle la galvanisation à chaud ne devient rentable que si l'on tient compte du facteur temps, ce procédé offre aujourd'hui, pour de nombreux types de constructions, des avantages de coûts substantiels par rapport à d'autres systèmes de revêtement, et ce dès le départ. Des études ont montré qu'à partir d'une surface spécifique de 15 à 20 m²/t, un système de protection anticorrosion par galvanisation à chaud revient déjà au niveau des coûts initiaux moins cher qu'une peinture à trois couches [17].

Les architectes et les concepteurs doivent considérer cet aspect quand ils choisissent un système de protection anticorrosion.

Afin de répondre à des exigences esthétiques auxquelles les revêtements de zinc sont incapables de satisfaire, un système duplex simple – par exemple l'application d'une couche de zinc et de produits de revêtement ne nécessitant pas de grenaillage léger – peut être envisagé de cas en cas.

En tout état de cause, il est intéressant de comparer les coûts des différentes options avant de choisir un système de protection anticorrosion.



Parking Bouillon, Luxembourg

Références

1. Littérature

- [1] DR.-ING. D. KNOTKOVKA
Aktuelle Erkenntnisse zum
Korrosionsverhalten von Zink und
Zinküberzügen (Etat actuel des
connaissances sur la tenue à la corrosion du
zinc et des revêtements de zinc),
Exposé prononcé à l'occasion du 4e
Deutscher Verzinkertag 1995, Cologne
- [2] DR.-ING. KNOTKOVKA et F. PORTER
Longer life of galvanized steel in the
atmosphere due to reduced SO₂- pollution
in Europe (Augmentation de la durée de vie
de l'acier galvanisé dans l'atmosphère par
la réduction de SO₂ en Europe),
Compte rendu d'Intergalva 1994, Paris
- [3] F. VAN ASSCHE
Atmospheric conditions and hot dip
galvanizing performance (Conditions
atmosphériques et performances de la
galvanisation à chaud),
Compte rendu d'Intergalva 1997,
Birmingham, EGGA UK,
- [4] KATZUNG, W. et al.
Zum Einfluss von Si und P auf das
Verzinkungsverhalten von Baustählen
(De l'influence du Si et du P sur la tenue à la
galvanisation des aciers de constructions),
Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 28, 575 -
587 (1997)
- [5] KATZUNG, W. et al.
Rapport R&D de l'Institut für Stahlbau
Leipzig GmbH
Arno-Nitzsche-Str. 45, D- 04277 Leipzig
(non publié)
- [6] KATZUNG, W., RITTIG, R., SCHUBERT, P. et
SCHULZ, W. D.
Zum Einfluss von Abkühlverlauf und
Tauchdauer auf die Haftfestigkeit und
das Bruchverhalten von Zinküberzügen
nach DIN EN ISO 1461 (De l'influence du
refroidissement et de la durée d'immersion
sur l'adhérence et le comportement à la
rupture de revêtements de zinc selon EN
ISO 1461),
Mat.-wiss. und Werkstofftechnik 32, 483
- 492 (2001)
- [7] KATZUNG, W. et SCHULZ, W. D.
Zum Feuerverzinken von
Stahlkonstruktionen – Ursachen und
Lösungsvorschläge zum Problem der
Rissbildung (La galvanisation à chaud
de constructions en acier – Causes
et propositions de solutions pour la
problématique de formation de fissures)
Stahlbau, 74e année (2005), cahier 4
- [8] PARGETER, R.
Liquid metal penetration during hot dip
galvanizing
Publié: TWI Website
- [9] KINSTLER, THOMAS J.
Current Knowledge of the Cracking of
Steels During Galvanizing
GalvaScience LLC, PO Box 501, Springville,
AL 35146
- [10] KIKUCHI, M.
Liquid Metal Embrittlement of Steels
during Hot Dip Galvanizing
Tetsu to Hagane, Iron and Steel, Volume
68, Number 14, 1982,
Pages 1870-1879
- [11] PANKERT, R., DHAUSSEY, D., BEGUIN, P.,
GILLES, M.
Three Years Experience with the Galveco Alloy
Proceedings Twentieth International
Galvanizing Conference
Amsterdam, 2003, European General
Galvanizers Association
- [12] Interpretation zinc assisted cracking on big
scale steel structures and preventive methods
2001, présenté à ILZRO
Project ZC – 21 – 2
- [13] POAG, G., ZERVOUDIS, J.
Influence of various parameters on steel
cracking.
AGA Tech Forum, Oct. 8 2003 Kansas City,
Missouri.
- [14] PINGER, T.
Vermeidung von Flüssigmetall induzierter
Spannungsrisskorrosion an feuerverzinkten
Stahlkonstruktionen (Prévention de la
fragilisation de structures galvanisées
induite par les métaux liquides) RWTH
Aachen, dissertation en préparation (2006)
- [15] SCHULZ, W. D., SCHUBERT, P., KATZUNG,
W.; RITTIG, R.
Richtiges Sweepen von
Feuerverzinkungen nach DIN EN ISO
1461 (Nettoyage par sablage adéquat de
revêtements de zinc galvanisés selon EN
ISO 1461),
Der Maler- und Lackierermeister 7/99
- [16] Recommandation commune
"Korrosionsschutz von Stahlbauten Duplex-
Systeme" (Protection anticorrosion de
structures en aciers, systèmes duplex), édité
par le Bundesverband Korrosionsschutz e.V.,
Cologne, le Deutscher Stahlbauverband
e.V., Düsseldorf, l'Industrieverband
Feuerverzinken e.V., Düsseldorf et le
Verband der Lackindustrie e.V., Frankfurt
- [17] DIPL.- ING. P. KLEINGARN
Wirtschaftlicher und zuverlässiger
Korrosionsschutz durch Feuerverzinken
(Une protection anticorrosion rentable et
sûre grâce à la galvanisation à chaud),
Feuerverzinken (28e année) Nr. 3, Sept.
1999

2. Normes et références

- EN ISO 1461
Durch Feuerverzinken auf Stahl
aufgebrachte Zinküberzüge
(Stückverzinken)
(Revêtements par galvanisation à chaud
sur produits finis ferreux)
- KATZUNG, W. et MARBERG, D.
Beuth-Kommentare
Korrosionsschutz durch Feuerverzinken auf
Stahl aufgebrachte Zinküberzüge
(Stückverzinken), Kommentar zu DIN EN
ISO 1461 (2002)
(Protection anticorrosion par revêtements
de zinc par galvanisation sur l'acier
(galvanisation à façon))
Commentaire sur EN ISO 1461, 2002
- EN ISO 14713
Schutz von Eisen - und
Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Zink-
und Aluminiumüberzüge - Leitfäden
(Protection contre la corrosion du fer
et de l'acier dans les constructions -
Revêtements de zinc et d'aluminium -
lignes directives)
- EN ISO 12944-1-8
Korrosionsschutz von Stahlbauten durch
Beschichtungssysteme (Protection
anticorrosion des structures par systèmes
de peinture)
- DIN 267, partie 10
Mechanische Verbindungselemente
- Technische Lieferbedingungen -
Feuerverzinkte Teile
(Éléments d'assemblage mécaniques -
Conditions techniques de livraison - Pièces
galvanisées)
- EN 10025:2004
Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen
(Produits d'acier de construction laminés
à chaud)
- EN 1993-1-10
Bemessung und Konstruktion von
Stahlbauten - Stahlgütewahl
(Dimensionnement et construction
de charpentes d'acier - Choix des nuances
de l'acier)
- DAST Richtlinie 009
Stahlsortenauswahl für geschweißte
Stahlbauten (Sélection de nuances d'acier
pour charpentes métalliques soudées)
- KORROSIONSSCHUTZ DURCH
FEUERVERZINKEN (STÜCKVERZINKEN)
(Protection anticorrosion par galvanisation
à chaud (galvanisation à façon))
Institut Feuerverzinken GmbH,
Sohnstraße 70, D-40237 Düsseldorf
- MAAß, P. et PEIßKER, P.
Handbuch Feuerverzinken (Manuel de
Galvanisation à Chaud)
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig, Stuttgart 1993
- ARBEITSBLÄTTER FEUERVERZINKEN
(Fiches de travail Galvanisation à Chaud)
Institut Feuerverzinken GmbH,
Sohnstraße 70, D-40237 Düsseldorf

Notes

Handwriting practice lines consisting of multiple horizontal dotted lines on a white background.

Assistance Technique & Parachèvement

Assistance Technique

Nous vous proposons des conseils techniques gratuits pour optimiser l'emploi de nos produits et solutions dans vos projets et pour répondre à vos questions relatives à l'utilisation des profilés et aciers marchands. Ces conseils techniques couvrent la conception d'éléments de structures, les détails constructifs, la protection des surfaces, la protection incendie, la métallurgie et le soudage.

Nos spécialistes sont à votre disposition pour accompagner vos initiatives à travers le monde.

Pour faciliter le dimensionnement de vos projets, nous proposons également un ensemble de logiciels et documentations techniques que vous pouvez consulter ou télécharger sur le site

sections.arcelormittal.com

Parachèvement

Pour compléter les possibilités techniques de nos partenaires, nous nous sommes dotés d'outils de parachèvement performants et offrons un large éventail de services, tels que :

- forage
- oxycoupage
- découpes en Tés
- crantage
- contrefléchage
- cintrage
- dressage
- mise à longueur exacte par sciage à froid
- soudage de connecteurs
- grenaillage
- traitements de surface

Building & Construction Support

ArcelorMittal dispose d'une équipe de professionnels multi-produits dédiée au marché de la construction.

Une palette complète de produits et solutions dédiés à la construction sous toutes ses formes : structures, façades, couvertures, etc. est disponible sur le site

www.constructalia.com

Vos partenaires

FRANCE

ArcelorMittal
Commercial Sections
5, rue Luigi Cherubini
F-93212 La Plaine Saint Denis Cedex
Tél. : +33 (0) 1 71 92 16 30
Fax : +33 (0) 1 71 92 17 97
sections.arcelormittal.com

OTUA
Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier
5, rue Luigi Cherubini
F-93212 La Plaine Saint Denis Cedex
Tél. : +33 (0) 1 71 92 17 21
Fax : +33 (0) 1 71 92 17 89
www.otua.org

CTICM
Centre Technique Industriel de la
Construction Métallique
Domaine de Saint-Paul
F-78471 St-Rémy-lès-Chevreuses Cedex
Tél. : +33 (0) 1 30 85 25 00
Fax : +33 (0) 1 30 52 75 38
www.cticm.com

BELGIQUE

ArcelorMittal
Commercial Sections
Benelux B.V.
Boompjes 40
NL-3011 XB Rotterdam (Pays-Bas)
Tél. : +31 1 020 60 555
Fax : +31 1 020 60 559
sections.arcelormittal.com

Centre Information Acier
Chaussée de Zellik 12
B-1082 Bruxelles (Berchem-Sainte-Agathe)
Tél. : +32 2 509 15 01
Fax : +32 2 511 12 81
www.infosteel.be

SUISSE

ArcelorMittal
Commercial Sections
Innere Margarethenstrasse 7
CH-4051 Basel
Tél. : +41 61 227 77 77
Fax : +41 61 227 77 66
sections.arcelormittal.com

SZS
Centre Suisse de la Construction Métallique
Seefeldstrasse 25
CH-8034 Zürich
Tél. : +41 44 261 89 80
Fax : +41 44 262 09 62
www.szs.ch

ArcelorMittal
Commercial Sections

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
LUXEMBOURG
Tel. + 352 5313 3010
Fax + 352 5313 2799

sections.arcelormittal.com



Sources Mixtes

Groupe de produits issu de forêts bien
gérées et d'autres sources contrôlées.
www.fsc.org Cert no. EUR-COC-051203
© 1996 Forest Stewardship Council