

Galvanisation à chaud

1. Introduction

Le zinc est un des métaux les plus utilisés comme protection anticorrosion pour la galvanisation mais aussi pour l'électrozingage, la métallisation, les peintures riches en zinc, les dépôts en phase vapeur, la shérardisation.

Un revêtement par galvanisation à chaud assure, grâce au recouvrement de l'acier par le zinc, une double protection, d'une part physico-chimique en raison de l'effet barrière isolant l'acier de l'atmosphère, cette barrière perdurant à cause de la formation de sels de zinc protecteurs, d'autre part électrochimique due à l'effet de protection cathodique apporté par le zinc vis-à-vis du fer.

Le revêtement galvanisé n'est pas un simple dépôt de zinc à la surface de l'acier. Il se produit une réaction métallurgique de double diffusion entre le zinc et le fer qui conduit à la formation de couches d'alliages Fe-Zn, composés intermétalliques, liées à la fois aux caractéristiques des aciers à galvaniser mais aussi aux conditions opératoires [1].

Autres procédés peuvent également être utilisés sans offrir les mêmes performances anticorrosion : La galvanisation en continu s'applique pour les profilés longs tels que les tubes et tôles laminées à froid passent dans des bains. Ce type de procédé est utilisé pour les matériaux qui ont bonne aptitude à la déformabilité, tels que l'emboutissage et le pliage qui nécessitent de faibles épaisseurs de couches de zinc. Concernant le procédé par métallisation, les pièces reçoivent du zinc en fusion projeté en surface comme une peinture, mais il n'y a pas fusion entre les matériaux : ainsi l'efficacité est donc nettement moindre. Et enfin, le zingage électrolytique, la polarisation électrique dépose le zinc sur les pièces (par exemple procédé rapide utilisé pour des tôles en continu 200 m/mn).

Dans ce cours, nous nous intéressons à deux procédés qui sont largement utilisés dans l'industrie à savoir la galvanisation à chaud par immersion et en continu.

2. Préparation des surfaces

Pour pouvoir adhérer le zinc aux surfaces, il est nécessaire de préparer préalablement l'état de surfaces des matériaux. La qualité et l'adhérence de la couche galvanisée, dépend en grande partie de l'état de surface de l'acier. Ce dernier est généralement oxydé et couvert d'huile ou de graisses, donc nécessite une préparation rigoureuse en nettoyant préalablement et soigner la surface avant l'immersion dans le bain de zinc. A cet effet, les pièces métalliques sont immergées dans des bains acides dans lesquels l'attaque acide entraîne la dissolution des dépôts mais aussi partiellement celle de la surface métallique.

2.1. Préparation de Surface d'un matériau avant galvanisation [2].

La surface d'une pièce industrielle (Fig. 1a) est toujours contaminée par différents polluants : les pollutions organiques (huiles, graisses...) et les composés métalliques (oxydes, nitrure, carbures...). Il s'agira donc de passer d'une surface

métallique polluée à une surface physiquement et chimiquement propre en éliminant la couche souillure, le processus de préparation comporte les opérations suivantes :

La galvanisation de produits finis comprend 8 étapes principales :

- **le dégraissage**, qui a pour but d'enlever toutes les salissures et graisses qui empêcheraient la dissolution des oxydes de fer superficiels. Le dégraissage est effectué dans des bains contenant du carbonate de sodium ou de la soude avec addition de détergents et de tensioactifs à 60 C 80 C. Parfois, des dégraissants acides peuvent être utilisés;
- **le rinçage**, qui est effectué après le dégraissage afin de ne pas polluer les opérations suivantes ; bains contenant du carbonate de sodium ou de la soude avec addition de détergents et de tensioactifs à 60 C/80 C. Parfois, des dégraissants acides peuvent être utilisés ; le rinçage, qui est effectué après le dégraissage afin de ne pas polluer les opérations suivantes;
- **le décapage**, qui a pour but d'enlever la calamine et les autres oxydes présents à la surface de l'acier. Le décapage est effectué dans une solution d'acide chlorhydrique dilué à température ambiante, additionné d'un inhibiteur qui permet d'éviter l'attaque de l'acier lorsqu'il est débarrassé de ses oxydes. Des solutions d'acide sulfurique sont parfois utilisées avec l'inconvénient d'une mise en œuvre à 70 C nécessitant un chauffage. Un décapage mécanique (grenaillage) peut parfois remplacer le décapage chimique, en particulier dans le cas de la fonte, afin d'éliminer la silice se trouvant en surface;
- **le rinçage**, également effectué après le décapage afin de laver les pièces des sels de fer et des traces d'acide qui pollueraient l'opération suivante;
- **le fluxage**, qui permet d'éviter que l'acier ne se ré-oxyde avant l'entrée dans le bain de zinc. La décomposition du flux permet également de favoriser la réaction métallurgique fer/zinc lors de l'immersion de la pièce dans le bain de zinc. Le fluxage est effectué par une solution aqueuse de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium portée à 60 C;
- **le séchage**, effectué dans une étuve afin d'éviter les projections de zinc au moment de l'immersion de la pièce;
- **le zingage à chaud**. Les pièces sont immergées dans le bain de zinc fondu à 450 C (Fig.1b). Les temps d'immersion varient suivant l'importance des charges, des dimensions et de l'épaisseur des pièces : de 3 à 4 minutes pour des pièces de forme simple, et de 10 à 15 minutes pour des ensembles massifs ou des corps creux de grandes dimensions.

Effet des microadditions

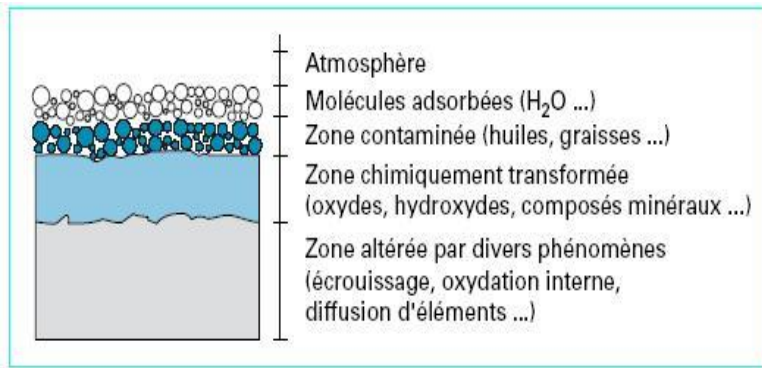
Pour des raisons environnementales, le plomb autrefois utilisé est désormais remplacé par de l'étain dans les bains de zinc. L'aluminium est également présent (moins de 0,01 %).

L'étain est utilisé en raison de sa faculté à favoriser la fluidité du zinc tandis que l'aluminium permet d'éviter l'oxydation superficielle du bain et de favoriser la brillance. D'autres éléments d'addition (Nickel, Bismuth, par exemple) peuvent également être intégrés dans le bain. Ils agissent, entre autres, sur la réactivité Fer-Zinc qui a lieu lors de cette opération;

- **le refroidissement** et le contrôle. Les pièces galvanisées sont refroidies à l'air libre et contrôlées [2].

Principes du procédé de galvanisation à chaud (immersion)

La galvanisation à chaud au trempé consiste à revêtir et à lier de l'acier avec du zinc en immergeant l'acier dans un bain de zinc en fusion à la température située entre 450 et 480°C. Le revêtement de zinc est chimiquement lié à l'acier de base, car il se produit une réaction chimique métallurgique de diffusion entre le zinc et le fer (Fig.3).



a)



b)

Fig.1 (a,b). a) Surface d'une pièce industrielle, b) Procédé de galvanisation par immersion [2]

Après solidification du zinc, il se forme avec le fer des couches Fe-Zinc (Fig.4). Ces différentes couches d'alliages, plus dures que l'acier de base pour certaines, ont une teneur en zinc de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface du revêtement. La galvanisation à chaud par immersion, permet aussi de protéger l'acier contre la corrosion. Ce procédé donne au revêtement protecteur de l'adhérence, de l'imperméabilité, et de la résistance mécanique.

Diagramme d'équilibre Fe-Zn: Formation des phases

Le diagramme d'équilibre Fe-Zn est représentée par la figure 3, nous pouvons constater l'existence de la phase Γ (gamma), ou couche d'adhérence:

En formant un composé de Fe_5Zn_{21} de structure cubique, d'épaisseur d'ordre 1 à 2 μm , elle est difficilement visible. Sa diffusion parfois, fait qu'elle est transformée en phase delta.

La phase δ (delta), ou couche en palissade :

Présentant un alliage de formule $FeZn_7$ se cristallise dans le système hexagonal, et d'épaisseur d'environ 30 à 40 μm qui est particulièrement fragile.

La phase ζ (dzêta) :

Composée de Fe_3Zn_{13} sa cristallisation structurale est monoclinique, d'épaisseur variant de 7 à 20 μm , elle est légèrement cassante.

La phase η (êta), ou zinc pur :

Contenant la teneur en fer du bain de galvanisation, c'est-à-dire 0.020%, elle cristallise dans le système hexagonale, son épaisseur est de 8 à 12 μm

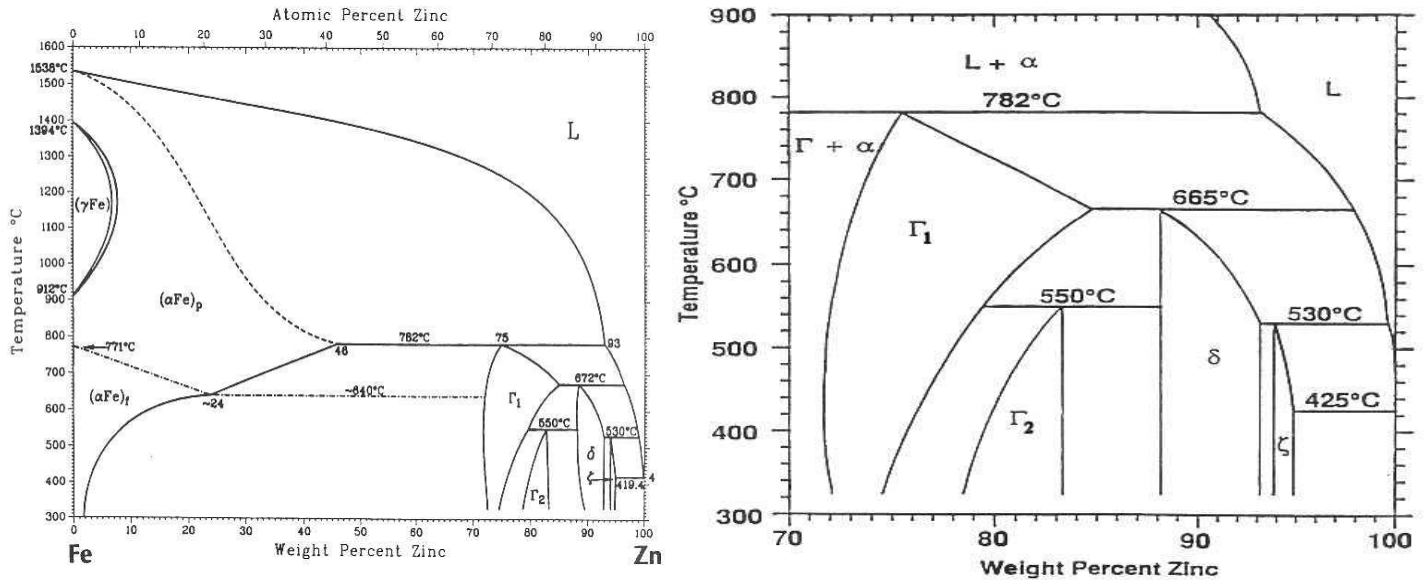
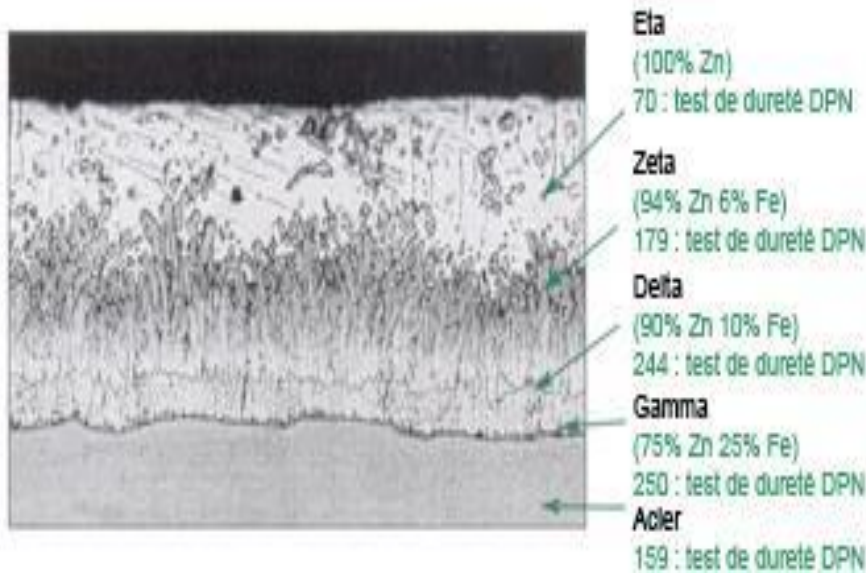


Figure 2. Diagramme d'équilibre Fe-Zn

- La micrographie montre la formation des multicouches Fe-Zn déposées sur un acier galvanisé.



- | | | |
|----------|--|------------------------|
| Eta | Zn | 100% (teneur massique) |
| Dzêta | $\text{Fe}_2\text{Zn}_{13}$ | 92-95 % |
| Delta | FeZn_7 | 88-93 % |
| Gamma | FeZn_3 , FeZn_{10} , $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ | 75% |
| Substrat | acier | |

Figure 3. Micrographie d'un acier galvanisé. Multicouches Fe-Zn

Applications de la galvanisation à chaud

Elle est indispensable dans les milieux très exigeant tels que :

- Matériels agricoles, éléments d'élevage, mobiliers routier, pontons marins.
- Lorsque la corrosion présente un véritable danger :
- garde-corps, ligne de vie, barrière, échafaudage, chandelier.

Les différentes couches zinc fer, et la dureté supplémentaire qu'elles apportent, protègent contre le l'abrasion. Sa dureté et sa résistance à l'abrasion en font enfin un

partenaire incontournable des processus industriels. Exemple: machines de tri, silos et cuves, fils revêtus (tiges et crochets) [3].

Paramètres technologiques et les facteurs métallurgiques

Les qualités et les caractéristiques du développement sont essentiellement fonction de la composition de l'acier, de la composition et la température du bain de zinc, de la durée d'immersion et de l'état de surface. Les études ont montré qu'une bonne galvanisation ne peut s'obtenir qu'avec une préparation de surface de l'acier adaptée. Les épaisseurs de zinc par galvanisation à chaud au trempé sont plus importantes que les autres procédés de galvanisation. A titre d'exemple, l'augmentation du temps d'immersion influe fortement sur la cinétique de croissance des couches Fe-Zn. La micrographie 4(a,b,c) montre le dépôt des couches Fe-Zn sur un acier à bas carbone préalablement préparé obtenu par le procédé de galvanisation à chaud par immersion.

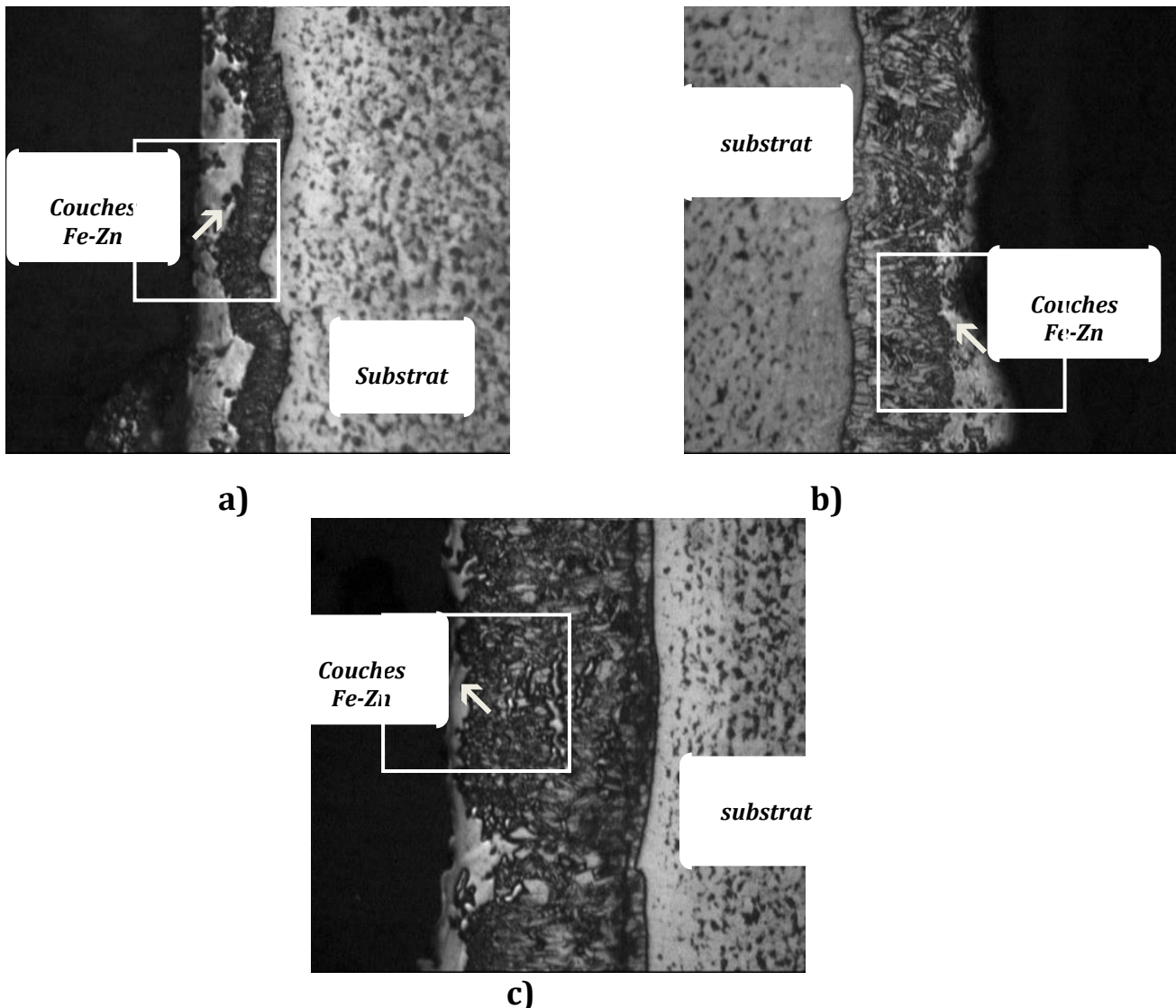


Figure 4(a,b,c).Micrographies de l'acier XC10 d'épaisseur 5mm galvanisé à 455°C pour différentes durées d'immersion :a) 1 mn, b) 5 mn, c) 10 mn. [4a]

Normes, masse et épaisseur :

Le tableau 1 montre les masses et épaisseurs sur divers produits galvanisés

Tableau 1. Produits Masse Épaisseur de Normes [4].

Produits	Masse Zinc (g/m ²)	Épaisseur couche de zinc (µm)	Normes AFNOR
Produits manufacturés (galvanisation à chaud au trempé)	350 à 500	50 à 70	NFA 91-121
Tôles	Double face 100 à 600	7 à 42	NFA 36-322 NFA 36-321
Fils	30 à 290	4 à 40	NFA 91-131

Galvanisation en continu

Procédé

La galvanisation en continu s'applique pour les demi-produits sidérurgiques (tôles, tubes, fils). Le procédé est bien décrit par le schéma de la figure 7. Pour les bandes laminées à froid doivent subir au préalable un recuit de recristallisation qui doit être effecteur dans un four à atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation et la formation des couches d'oxydes. La présence de ces couches d'oxydes de l'ordre micrométrique peuvent altérer le processus diffusionnel du zinc et servent comme barrière pour leurs adhérence.

La galvanisation s'opère dans un bain de zinc avec microéditions d'éléments chimiques comme l'aluminium, fer, étain et autres à une température entre 450 et 460°C à des temps relativement faibles (de l'ordre de quelques secondes). Ce temps est fonction de la vitesse de défilement, pour ces conditions et après solidification du zinc, y'a la formation des multicouches qui sont généralement ductiles pour pouvoir après exercer des grandes déformations plastiques comme l'estampage et le pliage.

Les paramètres technologiques qui peuvent influencer sur la formation des couches galvanisées sont les suivants :

Température du bain

Durée d'immersion

Composition du bain

Vitesse de défilement de la bande

La micrographie 5 montre clairement la formation des multicouches Fe-Zn obtenue par galvanisation à chaud en continu et déposée sur un acier à bas carbone de type A9. Elle montre les différentes phases constituant ces multicouches.

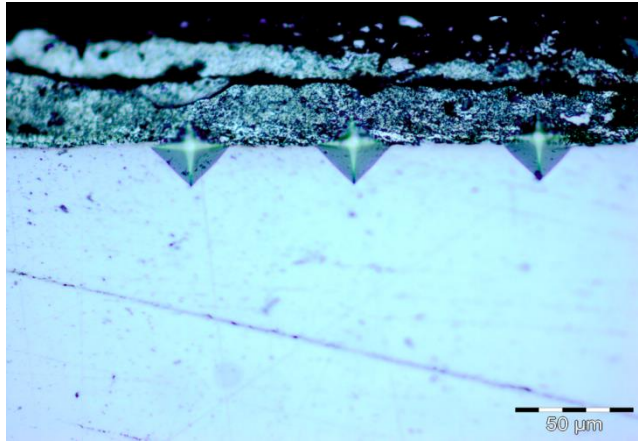
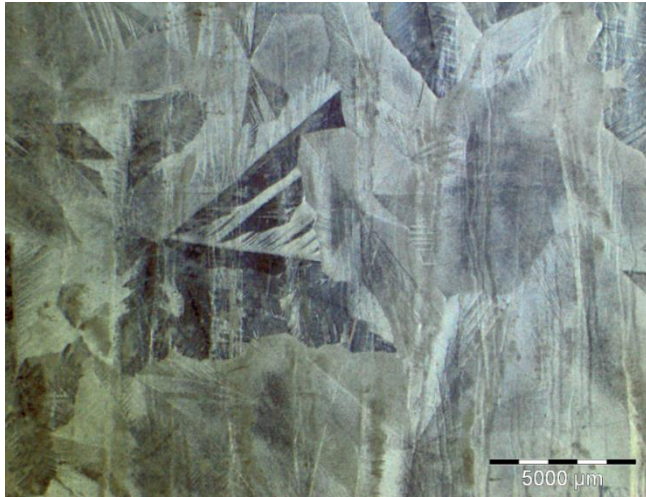


Figure 5. Micrographie montrant des tests d'indentation interfaciale réalisés sur des dépôts Fe-Zn obtenu par galvanisation en continu sur un acier à bas carbone de type A9[5].

Les observations macrographiques effectuées sur les surfaces des échantillons ayant subi la galvanisation montrent un fleurage régulier dans la taille des cristaux varie d'un revêtement à un autre. Ce fleurage (apparition des cristaux de zinc) est constaté dans tous les échantillons de différentes épaisseurs *Fig.6 (a,b)*.



a) Tôles minces,



b) tôles moyennes,

Figure 6(a,b). Macrographies des états de surface des échantillons galvanisés [5]

Essais et Propriétés de surfaces exigés par les couches Fe-Zn

1. *Etat de surface (Rugosité)*
2. *Dureté des multicouches*
3. *Limite élastique, résistance à la rupture, allongement de l'échantillon galvanisé (Test de traction)*
4. *Résistance à la corrosion (Essai de corrosion)*
5. *Adhérence –test d'indentation interfaciale*
6. *Test de pliage*

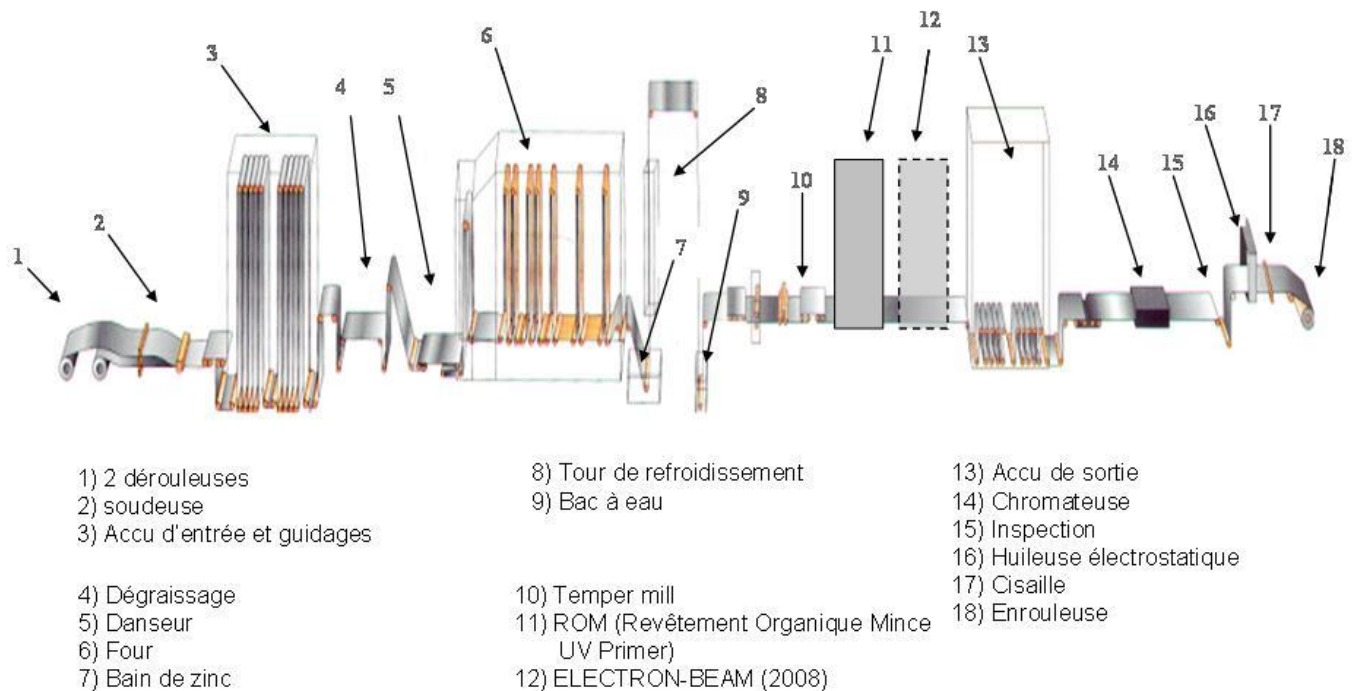


Figure 7. Ligne de la galvanisation en continu [6]

Bibliographie

- [1].Danièle QUANTIN, Techniques de l'Ingénieur, Principe de la galvanisation à chaud, 2004.
- [2].Site Google Encyclopédie Wikipédia, Galvanisation à chaud
- [3]. Site Google, Groupe France Galva.
- [4']. M.Z. Touhami, Dépt. Métallurgie, UBMAAnnaba, Rapport d'Expertise sur les aciers galvanisés, Entreprise Protouil Berrahal, 2016.
- [4]. Site Google, Étude technique/Qualité, La Galvanisation à Chaud, FAYNOT.
- [5]. Darsouni Lamia et al. Etude de l'adhérence par indentation interfaciale et du comportement à la corrosion des couches galvanisées de l'acier A9, Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Dépt. Métallurgie, UBMAAnnaba, 2018.
- [6]. Sabine-Estelle - Travail personnel, CC BY-SA 3.0,<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18155359>