

Durabilité de la protection anticorrosion par galvanisation des structures métalliques.

Simon Nuytten

Projet interdisciplinaire à option

ENAC Master Génie Civil semestre 2

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Professeur : A. Nussbaumer

Assistant : V. Gavillet

ICOM – Laboratoire de la construction métallique

Table des matières

Résumé	4
Absract.....	4
Introduction.....	5
Motivations	5
but	5
Contenu du rapport.....	5
1. La corrosion de l’acier.....	6
1.1. Définition.....	6
1.2. Développement du mécanisme.....	7
1.3. Corrosion de l’acier.....	8
2. Protection anticorrosion	10
2.1. Typologie des protections et procédés	10
2.1.1. Enrobage dans du béton.....	10
2.1.2. Coating	11
2.1.3. Peinture	11
2.1.4. Acier patinable (Corten).....	12
2.1.5. Acier inoxydable	12
2.1.6. Inhibiteurs.....	13
2.1.7. Protection cathodique active.	13
2.1.8. Protection cathodique par revêtement.....	14
2.2. La protection cathodique par revêtement en zinc en détail	14
2.2.1. La galvanisation à chaud par trempage.....	15
2.2.2. La galvanisation en continu de pièce d’acier.....	19
2.2.3. L’électrozingage	20
2.2.4. La projection thermique ou métallisation.....	21
2.2.5. La peinture au zinc et les systèmes duplex.....	22
2.2.6. Autres procédés :.....	23
2.2.7. Résumé :	24
3. Cas d’étude : First Zingage Electrolytique SA	25
3.1. Introduction à l’entreprise	25
3.2. Résumé de la visite :.....	25
3.3. Données pour le zingage électrolytique:	27
3.4. Données pour la galvanisation par trempage:.....	28
3.5. Première comparaison	28
4. Durabilité et impact environnemental	29
4.1. Définition.....	29
4.1.1. Durabilité	29
4.1.2. Impact social.....	29
4.1.3. Impact économique.....	29
4.1.4. Impact environnemental.....	30
4.2. Méthode d’évaluation de cette étude : hypothèses	30
4.2.1. Etat de référence	30
4.2.2. Données d’entrée et données de sortie : Périmètre d’étude.	31
4.2.3. Origine du zinc :	31
4.2.4. Origine de l’acier :	32
4.2.5. Transport considéré.....	33
4.3. Évaluation dans la durée.....	34

Nuytten S. : Durabilité de la protection anticorrosion par galvanization des pieces métalliques.	3
4.3.1. Notion de rentabilité environnementale	34
4.3.2. Hypothèse de cinétique de corrosion.....	34
4.3.3. Hypothèse de traitement	35
4.3.4. A propos du recyclage.....	35
5. Résultats de l'étude.....	37
5.1. Énergétique	37
5.2. Émission CO ₂	40
5.3. Consommation d'eau	41
5.4. Génération de déchets	42
5.4.1. Galvanisation.....	42
5.4.2. Zingage électrolytique.....	43
5.5. Emprise sur le sol	43
Conclusions	44
Bibliographie.....	45
ANNEXE	48
ANNEXE 1. Détail des étapes du procédé de zingage électrolytique appliqué par l'entreprise First Zingage Électrolytique à Crissier	48
ANNEXE 2. Données fournies par l'entreprise First Zingage Electrolytique.....	49
ANNEXE 3. Données fournies par l'entreprise Zingage Sablage Métalisation (Sion).	50
ANNEXE 4. Détails des calculs de l'étude.....	51

Résumé

Dans ce document sont abordées les questions de la corrosion de pièces d'acier et des protections possibles pour lutter contre ce phénomène. Le but de ce travail est d'étudier l'efficacité et la durabilité de deux méthodes de protection fortement utilisées : la galvanisation et le zingage électrolytique. Ces deux procédés sont présentés en détail, dans leurs principes, conditions spécifiques d'application et valeurs ajoutées. Une étude de durabilité est ensuite proposée en considérant les aspects sociétaux, économiques et surtout environnementaux via une étude d'impact environnemental détaillée selon plusieurs indicateurs. Pour des périodes de retour de 50 ans c'est la protection anticorrosion par zingage électrolytique qui produit l'impact le plus faible, aussi bien en terme d'énergie et d'eau consommé qu'en terme d'équivalent CO₂ émis.

Abstract

The present document deals with issues related to steel corrosion and current solution to tackle this phenomenon. The main objective of this report is to study the efficiency and sustainability of two major protection treatments: galvanization and zinc electrolysis deposition. These two processes are detailed through their working principle, specific conditions of application and value added. The sustainability is evaluated through social, economical and more deeply environmental aspects, with the study of environmental impacts estimated through several indicators. For a return period of 50 years the electrolysis deposition is the most efficient process with a smaller impact on environment according to energetic, water consumption and carbon emission.

Introduction

La corrosion de l'acier est un phénomène naturel qui dégrade le matériau en le transformant en rouille. La rouille n'ayant pas les mêmes propriétés mécaniques que l'acier, il en résulte une perte de la résistance de la pièce en acier atteinte par la corrosion. Cette perte de résistance est directement liée à la perte de section d'acier, et donc à la profondeur de rouille sur la surface exposée au phénomène. La profondeur de rouille augmente avec le temps, avec une vitesse de propagation dépendant fortement des conditions du milieu et allant de quelques μm à quelques mm par an. Afin de garantir dans le temps le niveau de performance mécanique exigée d'une pièce en acier, il est donc important de ralentir ou de stopper la progression de la corrosion, et pour cela de mettre en œuvre une ou plusieurs solutions de protection anticorrosion.

Si la corrosion n'est pas stoppée, une surveillance du phénomène doit être mise en place pour éviter une ruine, et un remplacement de la pièce corrodée ne satisfaisant plus les exigences de performance peut être envisagé. Tout ceci a un coût estimé à 4% du Produit National Brut d'un pays [LAN 87], pour la corrosion tout secteurs industriels confondus ; ce qui représente pour la Suisse pas moins de 16,1 milliards de dollar US en 2011 [BM 11]. L'application d'une protection permet non seulement de garantir une performance mécanique dans le temps, mais cela représente également un investissement qui peut être rentable si il est bien mis en œuvre.

De nombreuses solutions de protection anticorrosion de l'acier ont été développées, applicables selon le contexte ou le niveau de performance requis. Le traitement de surface consistant en la couverture de l'acier par une couche de zinc métallique est très utilisé dans le domaine de la construction, apportant une protection robuste et durable. Ce dépôt de zinc métallique peut se faire selon différents procédés, et les plus utilisés sont la galvanisation, et l'électrozingage. Notre étude va donc s'intéresser à ces deux procédés, les autres n'étant que simplement évoqués.

MOTIVATIONS

Notre environnement tel que nous le connaissons aujourd'hui est le résultat d'équilibres, qu'ils soient globaux tel que le climat, ou locaux telle que la qualité de l'air d'une ville. Depuis l'ère industrielle les activités de l'homme prennent de l'ampleur et perturbent ces équilibres, ce qui peut à terme modifier notre environnement. Or l'environnement représente une ressource qu'il faut préserver et savoir gérer durablement, ceci aussi bien à l'échelle locale qu'à un niveau global. Pour cette raison, il est essentiel d'évaluer l'impact énergétique et environnementale des activités industrielles, ceci afin de les connaître, de les comparer entre-elles et de privilégier les plus durables. Les protections anticorrosion par galvanisation et par électrozingage font partie de ces procédés industriels, et il est donc logique de les soumettre à cette évaluation.

BUTS

L'objectif de ce travail est l'étude de deux méthodes de protection anticorrosion très efficaces et fortement utilisées dans l'industrie, la galvanisation à chaud et le zingage électrolytique, en ce qui concerne leur efficacité, durabilité et effets sur l'environnement. Dans ce rapport sont proposés des éléments de réponse quant à la durabilité des deux procédés, ainsi qu'une étude plus approfondie concernant l'impact environnemental à partir de plusieurs indicateurs.

CONTENU DU RAPPORT

Après avoir défini le phénomène de corrosion de l'acier et ces facteurs d'influences, nous proposons une revue des méthodes de protection utilisées dans la construction et l'industrie de nos jours, avec une présentation détaillée des méthodes de protection par revêtement au zinc. Nous entrons ensuite dans l'étude plus détaillée de la durabilité de la galvanisation et du zingage électrolytique à l'aide de données fournies par des entreprises de la région, et nous définissons les termes utiles à l'étude de durabilité. Un calcul d'indicateurs d'impact environnemental est proposé et les résultats sont commentés autour d'une discussion des hypothèses et de la manière de les considérer dans le temps.

1. La corrosion de l'acier

1.1. DEFINITION

La corrosion est une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement [LAN 97].

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (entre 0,02 et 2% en masse [PHI 02]). La corrosion de l'acier désigne communément l'oxydation du fer métallique au degré 0 d'oxydation par l'environnement. Les oxydants de l'environnement sont entre autre le dioxygène de l'air, l'eau et d'autres acides présents selon le degré de pollution.



Ce phénomène est influencé par de nombreux facteurs cinétiques tels que l'humidité, la température de la pièce métallique ou l'acidité du milieu.



Figure 1 : Le phénomène de corrosion s'observe sur cette sculpture présente sur le campus de l'EPFL. Les anneaux en acier se corrodent et la surface se couvre de rouille. Les poteaux qui soutiennent la sculpture sont en acier galvanisé et ne présente aucun signe de corrosion pour la même durée d'exposition.

1.2. DEVELOPPEMENT DU MECANISME

Le phénomène de la corrosion est connu depuis bien longtemps, et celui ci n'est pas soumis à un seul mécanisme simple. On peut en effet établir une typologie des développements de la corrosion (table 1).



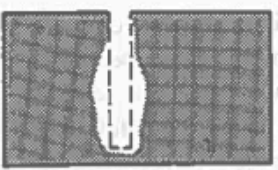

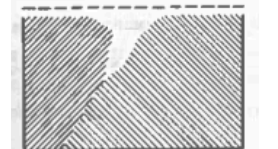
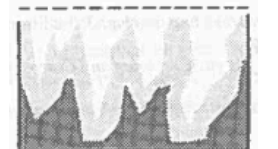
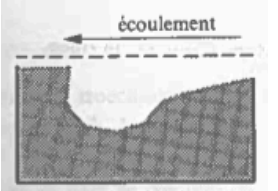
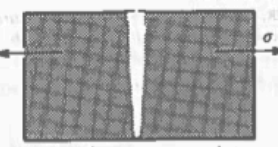
Corrosion	Schéma [LAN 97]	Origine
uniforme		La corrosion se propage uniformément sur toute la surface en contact avec l'environnement.
galvanique		Deux éléments aux propriétés électrochimiques différentes sont en contact. Seul l'un des deux est corrodé, l'autre ne l'est pas du tout.
caverneuse		La corrosion s'effectue de façon privilégiée au niveau d'une enclave, d'une irrégularité ou d'un trou dans le matériau. Cela est du à la différence de potentiel électrochimique de l'environnement entre la surface pleine et la surface de l'irrégularité. Par exemple dans le cas de la corrosion de l'acier, c'est la différence de concentration en oxygène à la surface et dans la caverne qui est à l'origine d'une différence de potentiel électrochimique, et donc de cette corrosion différentielle.
par piqûres		La corrosion par piqûre est issu du même phénomène que la corrosion caverneuse. La piqûre est initiée à partir d'un défaut dans la surface initialement lisse.
inter granulaire		La corrosion se développe entre deux grains constituant le matériau. Par exemple entre deux grains de cristal métallique d'orientation différente.
sélective		La corrosion ne s'effectue pas de façon uniforme, même si toute la surface du matériau est attaquée par la corrosion, et nous pouvons observer le développement simultané de piqûres.
Corrosion-érosion		Cette corrosion se développe lorsque le matériau est exposé à un écoulement, continu ou non, qui va favoriser son développement à certains endroits de la surface.
sous contrainte		Cette corrosion se développe dans un matériau contraint, tels que par exemple un élément métallique porteur dans une structure du génie civil.

Table 1 : Typologie des développements de la corrosion.

1.3. CORROSION DE L'ACIER

Le fer métallique Fe 0 (pour degré d'oxydation zéro) possède deux degrés d'oxydation (figure 2):

- Fe II, avec la formation d'ions ferreux Fe^{2+} , à partir du Fe 0
- Fe III, avec la formation d'ions ferriques Fe^{3+} à partir du Fe II

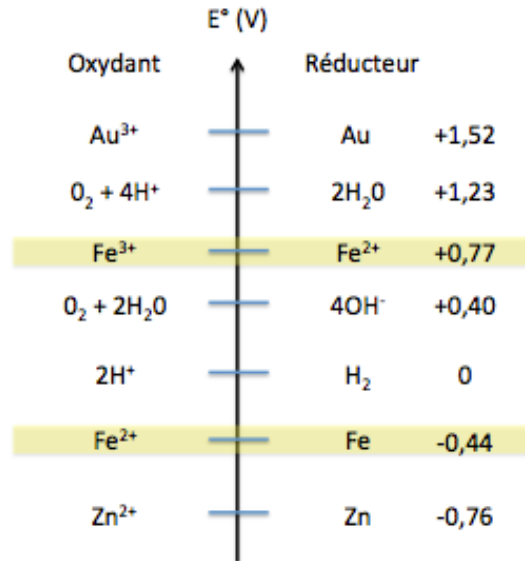


Figure 2 : Potentiel standard de quelques couples oxydo-réducteurs qui nous intéressent dans cet étude.

Comme il a été dit plus haut, la cinétique de la réaction d'oxydation dépend des conditions du milieu. Il est bon également d'avoir à l'esprit que la thermodynamique de la réaction dépend aussi des conditions du milieu telles que l'acidité, ou le potentiel électrochimique. C'est à dire que ces réactions d'oxydation du fer ne peuvent pas se faire du point de vue thermodynamique. On peut définir alors des domaines de validité de réaction, et cela se retrouve par exemple avec le diagramme de Pourbaix (figure 3). On peut ainsi dire qu'un milieu acide, et dont le potentiel électrochimique est élevé (supérieur à $-0,5V$) favorise l'oxydation du fer.

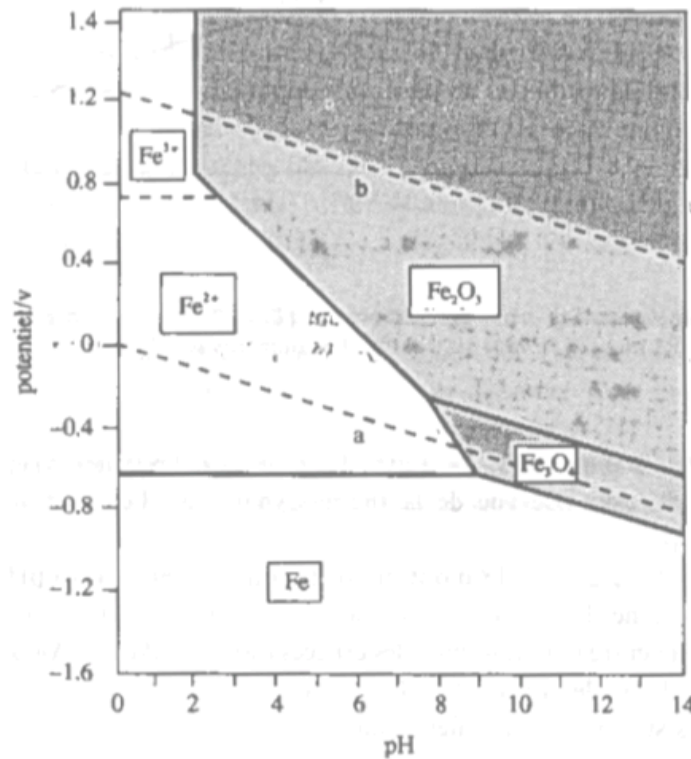


Figure 3 : Diagramme potentiel-pH (diagramme de Pourbaix) du fer.

On peut à cette occasion définir les trois produits principaux de la corrosion du fer présent dans l'acier :

- Formation d'oxyde Ferreux (FeO)
- Formation d'oxyde Ferrique (Fe_2O_3)
- Formation d'oxyde magnétique (Fe_3O_4)

D'une manière général le produit de corrosion du fer est appelé rouille. Il est de couleur brun-rouge et donne à la surface une texture irrégulière.

2. Protection anticorrosion

De la même manière qu’il n’existe pas un seul mécanisme de corrosion, il n’y a pas une solution unique proposée pour lutter contre celle-ci. Le but de cette partie est dans un premier temps de faire une revue des protections possibles en proposant une typologie, pour ensuite présenter plus en détail le type de protection qui nous intéresse : la protection par revêtement de zinc.

Catégories de corrosivité	Exemples d’environnement	
	Extérieur	Intérieur
C1 Très faible		Bâtiments chauffés avec une atmosphère propre – Halles de fabrication – Halles de stockage chauffées – Bureaux, écoles, magasins – Expositions, hôtels
C2 Faible	Atmosphères avec un faible niveau de pollution (zones rurales) – Avant-toits – Halles ouvertes	Bâtiments non chauffés avec des risques de condensation – Entrepôts – Salles de sport
C3 Moyenne (en cas de doutes: conseils par un spécialiste)	Atmosphères avec un niveau moyen de pollution (zones urbaines) – Zones industrielles – Ponts	Espaces de production avec une forte humidité et une pollution de l’air faible – Industrie alimentaire – Laiteries, brasseries – Blanchisseries – Stades de glace
C4 Elevée (conseils par un spécialiste)	Atmosphères avec de forts risques de pollution – Ponts soumis aux sels de déverglaçage – Ponts sur les cours d’eau – Installations de filtrage – Façades ventilées proche de routes principales – Régions côtières	Bâtiments ou zones avec une forte humidité et/ou une pollution de l’air élevée – Usines chimiques – Piscines – Fromageries – Usines d’incinération
C5-I (Industrie) Très élevée (conseils par un spécialiste)	Zones industrielles avec une humidité élevée et une atmosphère agressive	Bâtiments ou zones avec une condensation permanente et avec une pollution de l’air élevée – Installations de galvanisation et de décapage

Table 2 : Classe d’exposition et exemples correspondant, d’après [SIA 2022].

2.1. TYPOLOGIE DES PROTECTIONS ET PROCÉDES

La corrosion étant un phénomène lié à l’environnement, toutes les protections vont d’une manière ou d’un autre obéir au même principe et chercher :

- soit à isoler l’acier de son environnement agressif
- soit à imposer un environnement qui va limiter ou empêcher l’oxydation du fer.

2.1.1. Enrobage dans du béton

Cette protection est utilisée pour limiter la corrosion des barres d’armature dans le béton armé. Le béton forme une barrière limitant l’exposition à l’eau, l’oxygène, la pollution acide et aux sels de déverglaçage. L’acier est ainsi isolé de l’environnement agressif, dans la limite de la porosité du béton qui à long terme laisse pénétrer les agents oxydants.

De plus le milieu alcalin du béton favorise la précipitation de la couche de passivation en imposant un pH élevé. La couche de passivation est une couche d'oxyde de fer précipité qui est stable en milieu basique ($\text{pH} > 12$), et imperméable. Elle forme ainsi une barrière supplémentaire entre le fer métallique et l'environnement oxydant.

2.1.2. Coating

Le coating consiste en l'isolation de l'acier par couverture de la surface avec un autre matériau ne réagissant pas à l'environnement. On peut par exemple penser à l'utilisation d'un métal plus noble ou d'un film organique. Cette technique n'étant pas utilisée dans l'industrie de la construction, nous n'irons pas plus loin dans sa description.

2.1.3. Peinture

La peinture est une technique de protection de surface utilisée depuis très longtemps. Son principe est similaire au coating (on peut même indiquer que la peinture peut être rangée dans la catégorie des coating) en reposant sur l'isolation de l'acier de son environnement agressif. La constitution de la peinture peut varier selon l'objectif recherché, et l'obtention d'une épaisseur suffisante de peinture est souvent obtenue par l'application de plusieurs couches successives. Un système de protection efficace comprend en effet en général une couche de fond, une couche intermédiaire et une couche de finition [LEB 09].

Une peinture est un matériau liquide, que l'on applique sur une surface et qui dans les conditions de l'environnement sèche et se solidifie, conférant à la surface sur laquelle on l'applique une valeur ajoutée (esthétique, durabilité, propriété isolante ou conductrice entre autre).

L'avantage de cette méthode est sa grande adaptabilité, on peut en effet l'appliquer en atelier ou sur place, sur une structure existante, même si celle-ci est difficile d'accès (figure 4).



Figure 4 : Un peintre applique une couche de peinture lors de la 19^{ème} campagne de peinture de la tour Eiffel. Photo Reuters/Benoit Tessier, d'après [BIR 09].

2.1.4. Acier patinable (Corten)

L'acier patinable est un acier faiblement allié contenant d'autres éléments tels que phosphore (P), cuivre (Cu), chrome (Cr), nickel (Ni) et molybdène (Mo) [LEB 09]. L'alliage d'acier utilisé se corrode en un oxyde insoluble, adhérent et quasi imperméable, qui forme une couche de protection en isolant l'acier de son environnement. Cette patine est comparable à la couche de passivation de l'acier traditionnelle, mais elle est plus robuste notamment vis à vis de la perméabilité et de la solubilité. La patine se développe rapidement aux premiers temps d'exposition de l'alliage, pour ensuite ralentir et former une protection efficace.

Cette technique est éprouvée et a été utilisée depuis les années 1970 pour des éléments porteurs de ponts. Réputée plus économique que la peinture avec jusqu'à 10% d'économie cette méthode présente également l'avantage de nécessiter peu d'entretien. Cependant cette technique de protection a des limites d'utilisations :

- Ne peut pas être utilisée à moins de 500 m des bords de mer ou dans des zones exposées au brouillard salin (marin ou de sels de déverglaçage).
- Ne peut pas être utilisé à moins de 1 m du sol ou à moins de 3 m au dessus d'une rivière.
- Ne peut pas être utilisé directement dans une atmosphère industrielle agressive.
- Limitation de l'épaisseur minimale des tôles

Il est important également de considérer que cette solution de protection offre des particularités esthétiques (figure 5). En effet la patine a une couleur brun foncée qui est fonction des conditions d'exposition, on peut ainsi observer une inhomogénéité dans la couleur de la surface. De plus la surface prend une texture rugueuse, et ce d'autant plus que l'humidité est élevée. Ces propriétés peuvent représenter un atout esthétique ou au contraire peuvent être à bannir, selon l'application recherchée [FIS 05].



*Figure 5 : (Gauche) Pont routier sur la Sarine (FR), avec poutre en acier patinable, d'après [LEB 05].
(Droite) Utilisation de l'acier Corten à des fins artistiques,
exposition de Richard Serra au musée Guggenheim de Bilbao [SER 96].*

2.1.5. Acier inoxydable

L'acier inoxydable est un acier allié avec du chrome (13 à 25%) et/ou du nickel (0 à 50%) [HIR 06]. Cet acier présente une résistance à la corrosion plus importante que l'acier classique, mais cette résistance n'est pas absolue et le matériau est toujours victime de la corrosion. Cette solution n'est donc pas efficace dans le cas de milieu d'exposition à la corrosion agressive [BRU 12].

2.1.6. Inhibiteurs

Des additifs chimiques peuvent être utilisés comme inhibiteur de corrosion, en conservant un pH élevé du milieu par l'utilisation d'ions alcalins par exemple. Cette méthode est utilisée pour protéger des structures existantes dont les armatures dans le béton sont exposées à une corrosion [BRU 13].

L'efficacité de cette méthode n'a pas été prouvée lorsqu'il s'agit d'une corrosion en présence de chlorure.

2.1.7. Protection cathodique active.

Cette méthode de protection consiste à imposer à la pièce métallique que l'on souhaite protéger un potentiel électrochimique empêchant sa corrosion. Ce potentiel est imposé au moyen d'un générateur de tension qui crée une différence de potentiel entre une référence ou une anode sacrificielle et la pièce métallique à protéger. En imposant ce potentiel, les électrons que la pièce d'acier perd par la réduction de l'oxygène sont remplacés par d'autres électrons venant d'une source (courant imposé) ou d'une anode qui cède ses électrons (par anode sacrificielle).

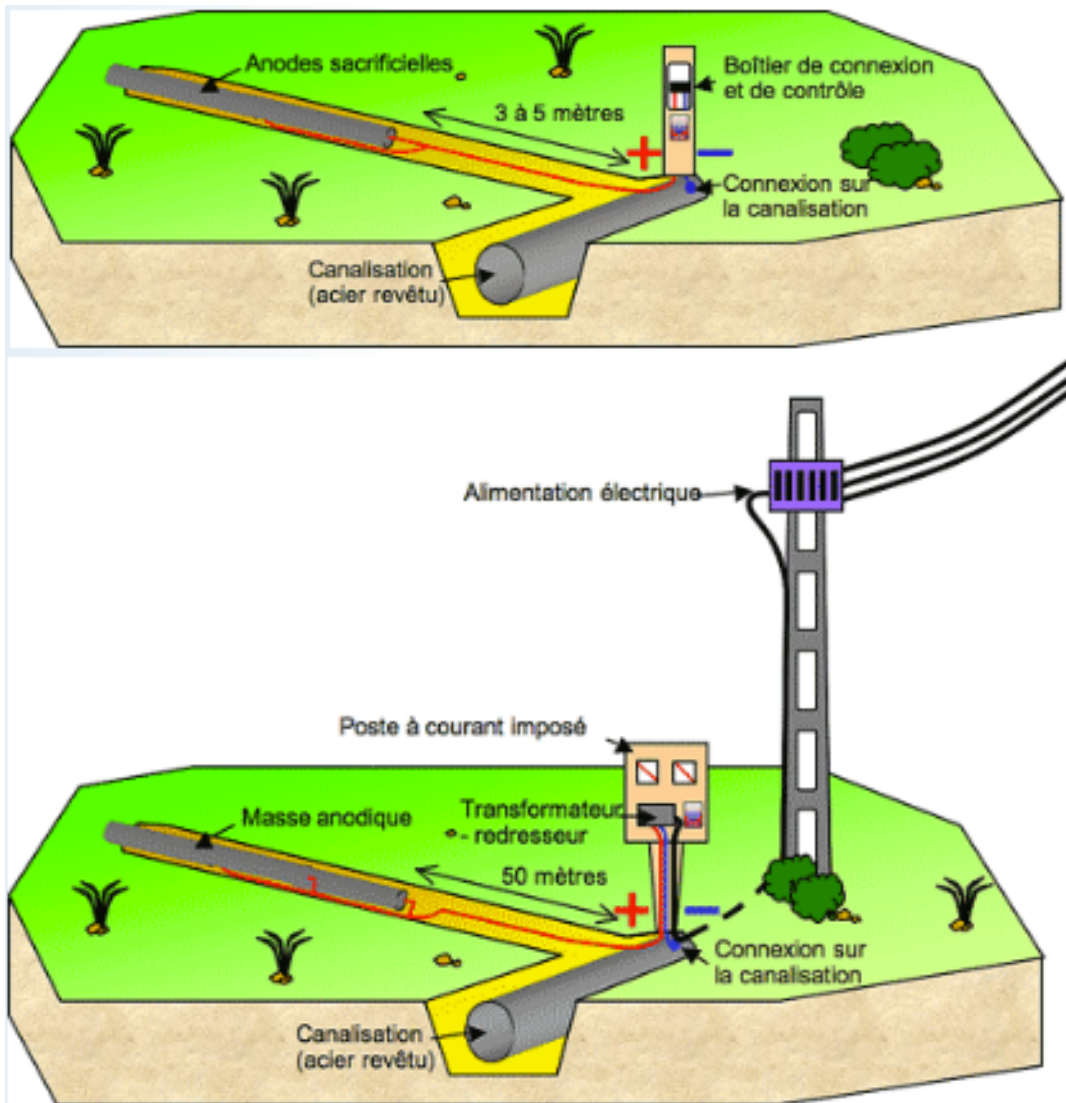


Figure 6 : Protection cathodique active par anode sacrificielle (haut) et par courant imposé (bas) [CCTA 13].

Cette technique de protection nécessite une infrastructure et un contrôle régulier approprié, elle n'est donc utilisée que pour des cas particuliers comme par exemple la protection anticorrosion de cuves ou de canalisations enfouies [CCTA 13].

2.1.8. Protection cathodique par revêtement.

Cette méthode de protection repose sur le même principe que la protection cathodique active, l'objectif étant de conserver le fer à l'état métallique en remplaçant les électrons perdus au moyen d'un métal moins noble (figure 7). La mise en œuvre est cependant différente avec la mise en surface d'un revêtement extérieur réagissant à l'environnement avant l'acier (métal moins noble, par exemple Zinc). Les méthodes de protection de l'acier par application d'une couche de zinc reposent sur ce principe, il est donc discuté plus en détail par la suite.

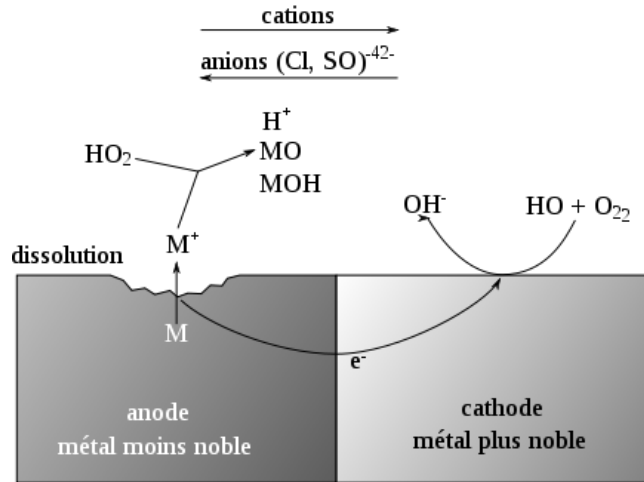


Figure 7 : Transfert d'électron entre la cathode (le fer) et l'anode (le zinc). Le zinc est oxydé alors que la surface en acier n'est pas transformée.

2.2. LA PROTECTION CATHODIQUE PAR REVETEMENT EN ZINC EN DETAIL

Les procédés détaillés ici répondent tous au même objectif : Traiter une surface d'acier en y apposant une couche de zinc remplissant une fonction de protection anticorrosion, dont le principe a été découvert au XVIIIème siècle par Luigi Galvani [WIK 13a]. Ce chapitre propose une revue des procédés industriels, ainsi que leurs conditions d'application.

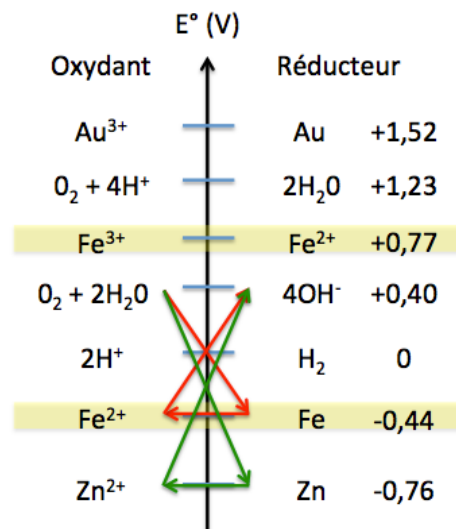


Figure 8 : Potentiel standard de couples oxydo-réducteurs. Le zinc étant un réducteur plus puissant que le fer, c'est lui qui sera oxydé préférentiellement (flèche verte).

Même si notre étude s'intéresse aux deux procédés majoritaires que sont la galvanisation et l'électrozingage (figure 9), une revue des autres procédés techniques est proposée dans cette section.

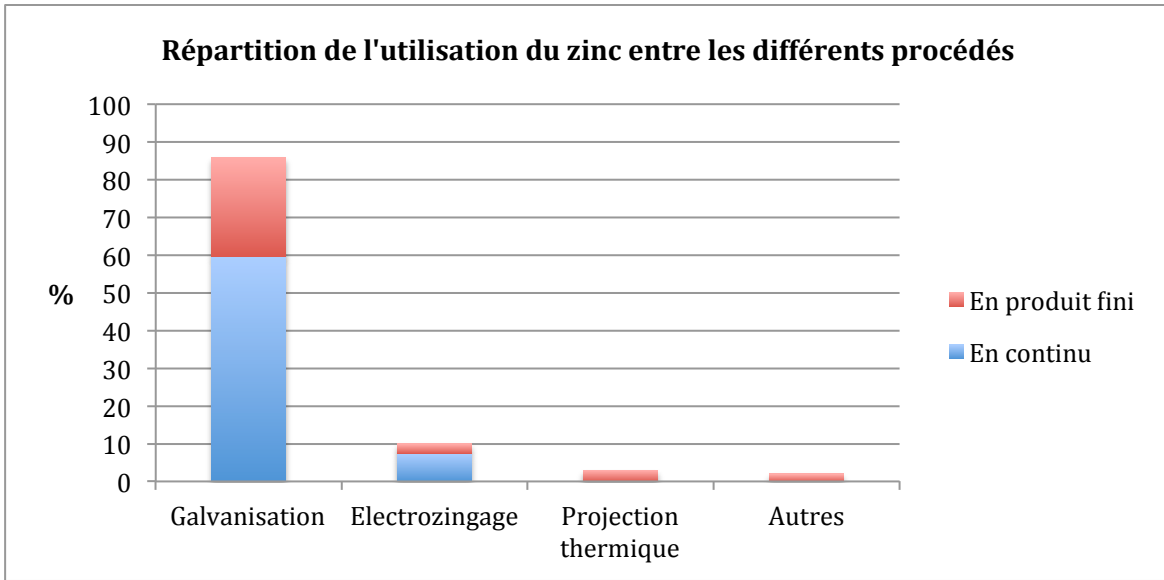


Figure 9 : Répartition de l'utilisation du zinc entre les différents procédés [GA 04].

2.2.1. La galvanisation à chaud par trempage

2.2.1.1. Principe

La galvanisation, souvent appelée galvanisation à chaud, est une technique de sidérurgie dont le premier brevet a été déposé au XIXème siècle par l'ingénieur Stanislas Sorel (vers 1840) [NOB 12].

Le dépôt du zinc peut se faire par trempage de la pièce fabriquée en acier dans un bain de zinc liquide à 450°C (figure 10). L'épaisseur de couche de zinc est contrôlée par la durée de trempage, avec une couche d'autant plus épaisse que le trempage est long. Ce procédé est régi par la norme EN ISO 1461

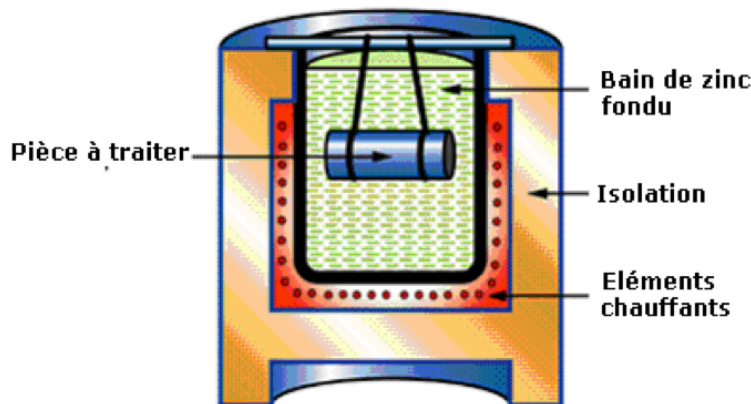


Figure 10 : Schéma de principe du procédé de galvanisation, [CES 11]

Au cours du trempage, l'acier traité est transformé et il y a diffusion d'atomes de zinc dans l'acier. On forme ainsi une protection en profondeur de la pièce d'acier, dont l'adhérence est assurée par liaison chimique à l'échelle du cristal métallique (figure 11).

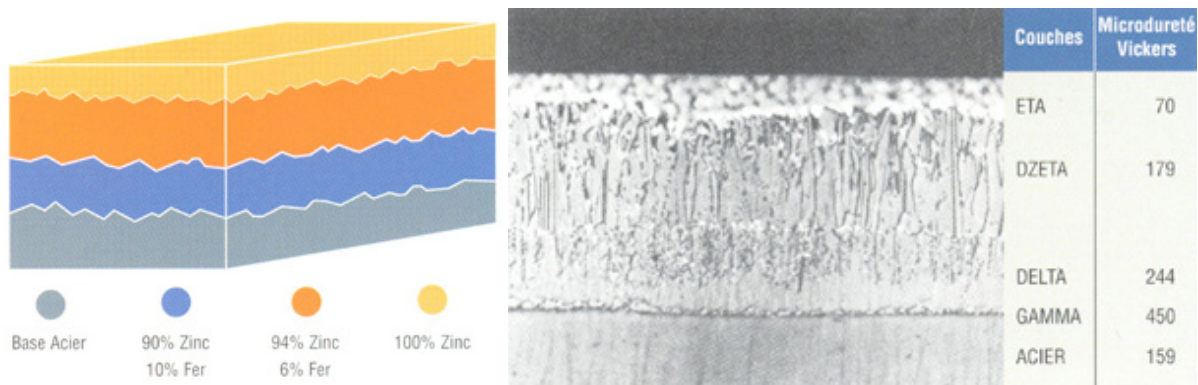


Figure 11 : Diffusion des atomes de zinc dans l'acier et des atomes de fer dans le zinc lors du trempage. Formation des couches gamma, delta, dzeta et eta. [G.A. 13]

2.2.1.2. Conditions d'application

Au préalable la pièce doit être nettoyée de ses impuretés (graisse, poussière, résidu d'usinage) et décapée de tout élément pouvant nuire au bon dépôt de la couche de zinc. Pour se faire la surface de la pièce métallique est traitée par trempage dans des bains chimiques successifs de dégraissage et de décapage [GA 13] :

- Le dégraissage : sert à enlever les salissures et graisses qui empêcheraient la dissolution des oxydes de fer lors des opérations de décapage. Ce dégraissage peut être fait dans des bains de carbonates de sodium, de soude ou de dégraissant acide avec addition de détergents et de tensioactifs à 60°C-80°C.
- Le décapage : a pour but d'enlever les oxydes présents à la surface de l'acier (calamine et oxyde ferriques). Il peut être fait dans des bains de solution d'acide chlorhydrique dilué à température ambiante ou de solution d'acide sulfurique chauffée à 70°C. On ajoute en général un inhibiteur qui évite à l'attaque de l'acier débarrassé de ses oxydes par les acides. Un décapage mécanique et aussi possible par grenailage.
- Le fluxage : permet d'éviter que l'acier ne se ré-oxyde avant l'entrée dans le bain de zinc. Ce bain peut également servir à favoriser la réaction métallurgique fer-zinc lors de l'immersion dans le bain de zinc. Pour cette opération on peut utiliser une solution aqueuse de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium portée à 60°C, on appelle alors ce procédé le zingage humide [LED 13].

Entre chaque bains de préparation un bain de rinçage est utilisé pour deux raisons : débarrasser les pièces et la pellicule d'entraînement après immersion pour rendre plus efficace les traitements suivants et éviter le transport des produits utilisés dans les bains suivants et ainsi les pollueraient (figure 12).

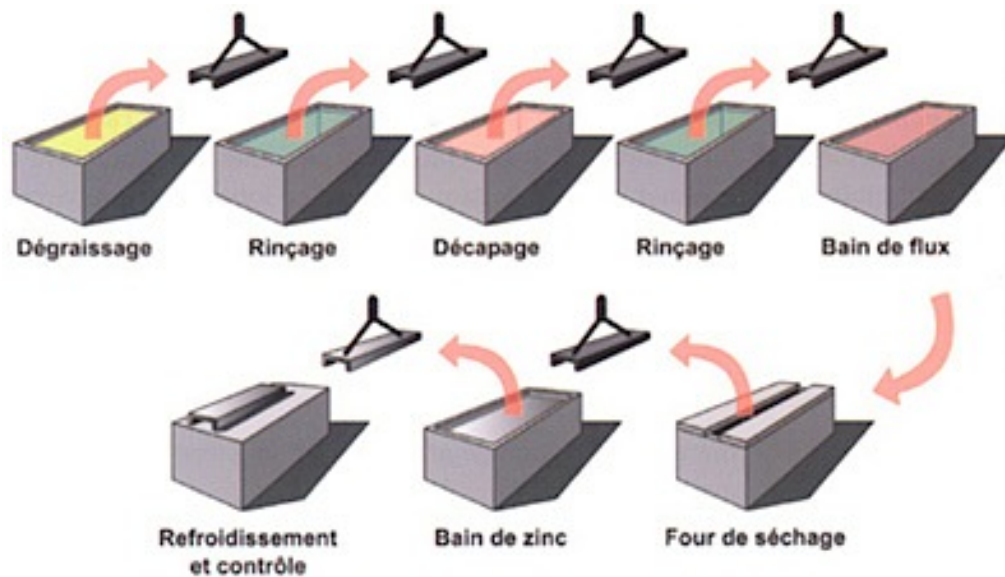


Figure 12 : Etapes du procédé de galvanisation, d'après [G.A. 13]

Le bain de zinc : Le temps d'immersion dans le bain de zinc est fonction des dimensions et de l'épaisseur des pièces, variant de 3 minutes pour des pièces de forme simple à 15 minutes pour des ensembles massifs ou des corps creux de grandes dimensions [GA 13].

Le bain de zinc est composé à plus de 99,95% de zinc, mais on y ajoute également de l'étain en raison de sa faculté à favoriser la fluidité du zinc et de l'aluminium (0,01%) afin d'éviter l'oxydation superficielle du bain et de favoriser la brillance. On peut également y intégrer d'autres éléments afin de favoriser la réactivité fer-zinc (Nickel, Bismuth entre autre).

De plus la circulation des fluides doit être assurée en tout point de la pièce. Lorsque la pièce est creuse, cette circulation est assurée par perçage de la pièce, et le trempage doit être fait de tel façon à ce que aucun fluide (air lors du trempage ou zinc lors du retrait) ne puisse rester prisonnier.

De part le passage de la pièce en acier dans un bain chaud, des autocontraintes peuvent se développer dans les sections et la fragiliser. Afin d'éviter une dégradation des propriétés mécaniques le refroidissement doit-être contrôlé, en particulier lorsque les sections présentent des géométrie susceptible de provoquer un gradient de température important au sein de la pièce.

Il faut en moyenne 60 à 70kg de zinc pour protéger une tonne d'acier [GA 13], avec un apport moyen de 10% du poids de la pièce traitée. Les épaisseurs de dépôt possible varient selon les sources entre 10 μ m et 250 μ m (table 3). Cette épaisseur est dictée par les besoins du client, par la catégorie d'exposition de la pièce et par la composition de l'acier traité [GAL 13].

Source	Epaisseur de couche obtenues
[CES 11]	10 μ m à 130 μ m
[LED 13]	100 μ m à 200 μ m
[GA 13]	45 μ m à 250 μ m

Table 3 : Épaisseur des couches de zinc déposée par galvanisation par trempage, selon plusieurs sources.

Cependant la norme EN ISO1461 recommande des épaisseurs minima pour le revêtement des pièces d'acier par galvanisation à chaud (table 4).

Épaisseur de plaque	Épaisseur locale minimum (μm)	Épaisseur moyenne minimum (μm)
Acier $\geq 6\text{mm}$	70	85
Acier $\geq 3\text{mm}$ à $< 6\text{mm}$	55	70
Acier $\geq 1,5\text{mm}$ à $< 3\text{mm}$	45	55
Acier $< 1,5\text{ mm}$	35	45

Table 4 : Épaisseur du revêtement de zinc à vérifier pour le proc édé de galvanisation à chaud [EN ISO 1461].

Dans le cadre de cette étude nous respecterons ces épaisseurs minimales afin de se placer au plus proche des conditions réelles.

2.2.1.3. Variantes technologiques [IZA 00]

Galfan® : Ce procédé déposé remplace le zinc à pureté commerciale (99,95%) par un alliage contenant 5% d'aluminium pour le bain de trempage. Ce procédé est réputé pour améliorer la protection anticorrosion de part le fort pouvoir de passivation de l'aluminium et d'améliorer la formabilité des pièces après traitement par rapport à la galvanisation classique. Résistant au formage et offrant une bonne adhésion entre la couche de protection et la surface d'acier.

Galvalume® : Ce procédé lui aussi déposé utilise un alliage de zinc contenant 55% d'aluminium, améliorant d'autant la résistance à la corrosion. En effet l'oxyde d'aluminium ne se dissout pas et forme ainsi un dépôt protecteur sur l'acier. Cependant les pièces traitées par ce procédé présentent des faibles performances de formabilité. Ce procédé est utilisé pour des panneaux de construction et de toiture peints ou non, et pour des applications avec des températures d'utilisations élevées.

Galvanneal : Au bain de zinc est ajouter du fer, ceci afin d'améliorer la surface obtenue et ses possibilité de peinture, soudabilité et emboutissabilité (formage par emboutissage). Ce procédé est surtout utilisé dans l'industrie automobile pour ces qualités de processabilité.

2.2.1.4. Considérations esthétiques

L'acier galvanisé offre une couleur gris métallique brillant et est en général bien accepté du point de vue esthétique puisque le procédé est parfois appliqué premièrement pour son rendu esthétique avant toute considération de durabilité. La surface obtenu peut être ensuite peinte pour obtenir la teinte souhaitée avec des peintures poudres (thermolaquage) ou liquide afin d'obtenir un revêtement duplex.



*Figure 13 : Rendu de surface de la galvanisation.
Ce rendu peut-être recherché par les architectes dans la réalisation de projets de construction.*

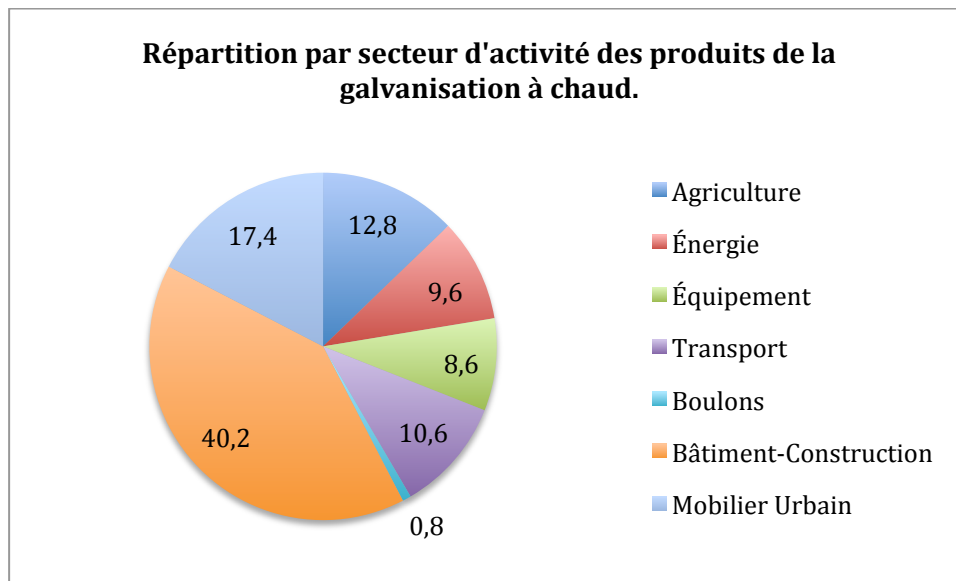


Figure 14 : Répartition par secteur d'activité des produits de la galvanisation à chaud. Source [GA 04].

2.2.2. La galvanisation en continu de pièce d'acier

2.2.2.1. Principe

Le dépôt de la couche de zinc peut également se faire en continu sur des lignes automatiques, on appelle alors ce procédé Sendzimir du nom de son inventeur Tadeusz Sendzimir [WIK 13a]. Le principe de dépôt est le même que pour la galvanisation par trempage, ce sont les conditions d'application qui changent.

2.2.2.2. Conditions d'application

Le trempage se fait en continu sur des lignes automatiques et les surfaces à traiter sont alors de géométrie simple (tôle, plaque, tube ou fil d'acier). Après trempage l'épaisseur de la couche de zinc est contrôlée et l'excédent de zinc peut être retiré par soufflage à haute pression. On peut estimer la production annuelle mondiale d'acier galvanisé en continu à 70 Mt, à raison de 200m de section traitée par minutes [IZA 00]

Après ce procédé les éléments simples en acier galvanisé produits sont ensuite transformés par opérations de cisailage, grugeage et soudage entre autre, afin de former la pièce désirée, avec un nombre d'application croissant au fil des années. Ce procédé est régi en Europe par les normes EN 10327 et EN 10326 [GA 13].

Type de section	Épaisseur du revêtement
Tôles	7 à 42 μm par face
Tubes	25 à 55 μm
Fils	4 à 40 μm

Table 5 : Épaisseurs caractéristiques de revêtement de zinc par galvanisation en continue, d'après [GA 04].

2.2.2.3. Considérations esthétique

Les considérations esthétique de ces pièces sont les mêmes que pour la galvanisation par trempage à priori. Cependant la qualité de la surface peut être altérée par traitement de formage après galvanisation, notamment par perte de l'aspect uniforme de la texture ou de la couleur de la surface.

2.2.3. L'électrozingage

2.2.3.1. Principe

Le dépôt de la couche de zinc est assuré par la précipitation d'ions métallique de zinc que l'on a dissous dans un électrolyte depuis une anode par circulation d'un courant continu (figure 15). La pièce à traiter étant ici la cathode et la source de zinc jouant le rôle d'anode. Le zinc est oxydé et transformé en ions dissous dans une solution électrolytique. Ces ions zinc sont ensuite réduits en zinc métallique à la cathode et se déposent ainsi en formant une couche superficiel de zinc. Les réactions d'oxydo-réduction en jeux sont les suivantes [AYE 07]:

Anode : oxydation du zinc :
$$\text{Zn} + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO}_2^{2-} + 2\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O}$$

Cathode : Réduction du zinc :
$$\text{ZnO}_2^{2-} + 2\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zn} + 4\text{OH}^-$$

L'épaisseur souhaitée de la couche est obtenue en contrôlant à la fois le courant imposé au système électrolytique et le temps d'exposition. Il n'y a pas de diffusion entre les couches de zinc et d'acier.

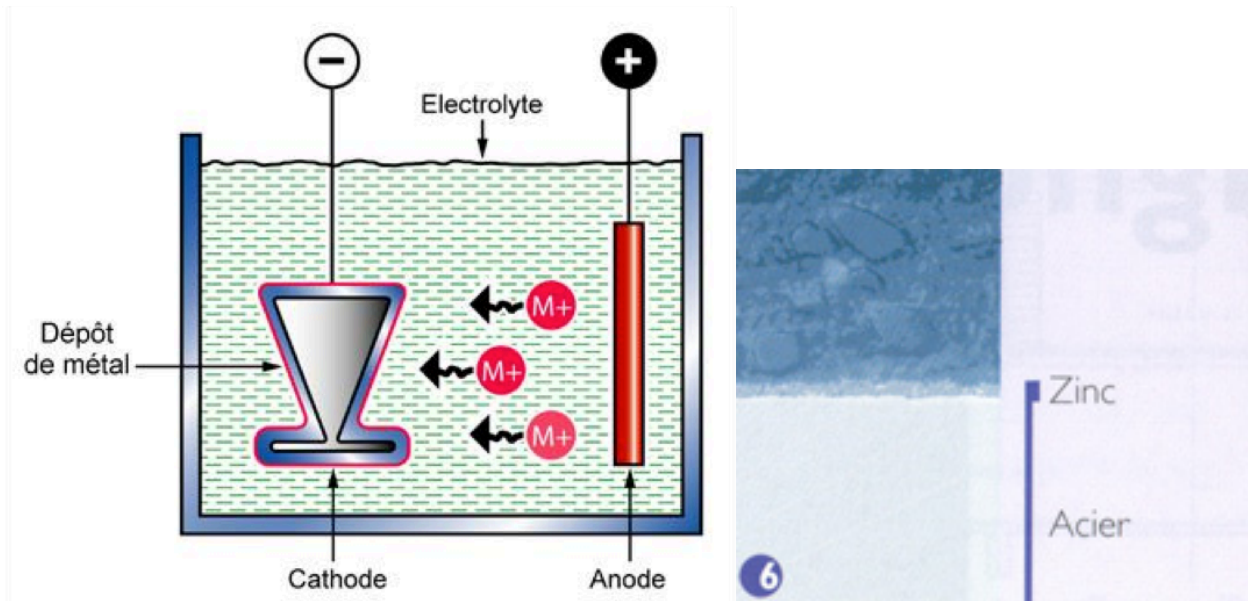


Figure 15 : Schéma de principe du procédé d'électrozingage [CES 11] et dépôt de la couche de zinc [GA 13].

Le dépôt sur la cathode est en général fait par trempage pour des pièces déjà fabriquées, mais il peut aussi être fait en continu dans le cas de fils ou de tôles [GA 13].

2.2.3.2. Conditions d'application

Avant le passage dans la solution électrolytique de zinc, la pièce doit être nettoyée de la même manière que pour la galvanisation. En effet les résidus de graisse ou les copeaux d'usinage doivent être éliminés afin d'offrir une surface propre à l'application de la couche de zinc.

- La dépassivation peut être faite par moyens électrochimiques en plaçant la pièce à traiter comme étant l'anode et ainsi dissoudre les oxydes de fer, ou par moyens chimiques en plaçant la pièce dans un bain d'acide (par exemple acide nitrique).
- Le dégraissage peut être fait par moyen chimique ou électrochimique dans un bain basique (par exemple de la soude). Les traitements chimiques et électrochimiques peuvent être appliqués successivement afin d'obtenir une qualité de surface optimum, le traitement chimique étant plus grossier et le traitement électrochimique plus fin.
- Le décapage se fait par moyen chimique dans un bain d'acide (par exemple une solution d'acide chlorhydrique et d'acide sulfurique).

- Les rinçages sont des bains qui ont la même fonction que pour le procédé de galvanisation. Ils servent à éliminer la couche d'entraînement de produit à la surface de la pièce et servent de barrières aux produits chimiques afin de limiter la pollution des bains suivants.

Pour être trempée dans le bain, si la pièce est creuse celle-ci doit être bouchée et trempée de telle façon à ce qu'il n'y ait pas de solution électrolytique qui reste prisonnière de la pièce au moment du levage, ceci non seulement pour des soucis d'économie de matière (conservation du bain électrolytique) mais aussi pour des questions de sécurité et de qualité du traitement. En effet on peut imaginer que la solution électrolytique restée prisonnière se répande ensuite lors de la manipulation de la pièce, représentant un danger potentiel pour le manutentionneur et l'environnement. Il est bon de noter que si la pièce creuse n'est pas bouchée (par exemple un tube), le dépôt de zinc ne sera pas observé à l'intérieur du tube mais quasi exclusivement à l'extérieur. Ceci représente une différence par rapport au procédé de galvanisation.

Ce procédé est en général appliqué à des surfaces relativement petites, qui en général ne peuvent pas être traitées par galvanisation ou dont l'utilisation exige un contrôle précis de l'épaisseur du dépôt. Il peut aussi être appliqué en continu à des tôles ou des fils d'acier, comme pour la galvanisation.

L'épaisseur de zinc obtenue par ce procédé varie entre 20 et 25 μm [LED 13], mais selon les sources on trouve une fourchette d'épaisseur plus large (table 6).

Source	Épaisseur de couche obtenues
[CES 11]	1 μm à 125 μm
[LED 13]	20 μm à 25 μm
[GA 13]	5 μm à 25 μm

Table 6 : Épaisseur des couches de zinc déposée par zingage électrolytique, selon plusieurs sources.

2.2.3.3. Considérations esthétiques

La surface obtenue est lisse, et plusieurs rendus peuvent être obtenus selon le post-traitement appliqué. En effet on peut obtenir un effet de passivation bleu ou jaune par trempage supplémentaire dans des bains contenant des agents chimiques, notamment du Chrome III [LED 13] ce qui améliore la protection anticorrosion [GA 13].

2.2.4. La projection thermique ou métallisation.

2.2.4.1. Principe

La projection métallique est un traitement de surface largement utilisé dans l'industrie pour effectuer des dépôts sur une surface à traiter. On distingue en général la projection thermique par flamme, par arc électrique à partir d'un filament, par arc plasma ou à l'aide d'une flamme à partir de poudre métallique. Le principe reste le même en utilisant une source de chaleur pour fondre le zinc de revêtement et un flux de gaz sous pression pour le projeter en fines gouttelettes sur la surface à traiter. Ces gouttelettes s'étalent ensuite sur la surface et la recouvrent et coalescent en se solidifiant [CES 11]. Ces procédés sont régulés par la norme EN 22063 au niveau européen [GA 13].

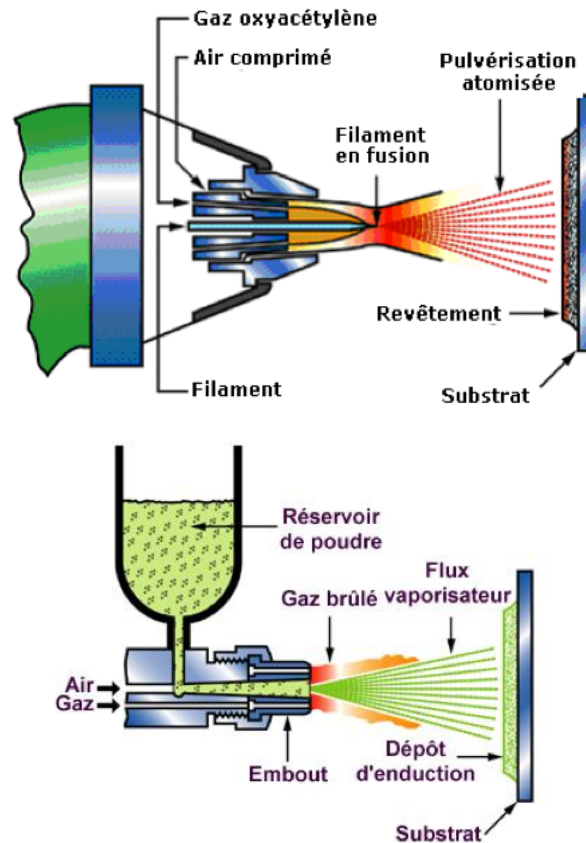


Figure 16 : Haut : Schéma de principe du traitement de surface par pulvérisation à l'aide d'une flamme
Bas : Schéma de principe du traitement de surface par enduction à l'aide d'un polymère. [CES 11]

2.2.4.2. Condition d'application

La surface doit être au préalable grenillée et nettoyée pour offrir une adhérence suffisante au zinc projeté, cette adhérence n'étant que mécanique puisqu'il n'y a pas d'interaction entre le substrat et le revêtement.

Avec ce procédé on peut obtenir des revêtements épais (entre 25 et 250 μm [GA 13]), mais en général poreux et un traitement supplémentaire doit être effectué pour colmater le revêtement un fois refroidis. L'épaisseur du revêtement est obtenue par passage successif du projecteur sur la surface.

Ce procédé est couramment utilisé pour augmenter la résistance à l'usure d'une surface, pour rendre compatible un matériau avec son environnement d'utilisation (industrie alimentaire ou application médicale) ou comme protection contre la corrosion, principalement dans l'industrie pétrolière ou gazière [CES 11].

2.2.4.3. Considérations esthétiques

La qualité de la surface obtenue dépend fortement de la géométrie de la pièce ainsi que du mode de projection et du savoir faire de l'opérateur. On obtient en général une surface granuleuse beaucoup moins lisse qu'avec de l'électrozingage.

2.2.5. La peinture au zinc et les systèmes duplex

2.2.5.1. Principe

Le dépôt de la couche de zinc est assuré par l'application d'une couche de peinture contenant du zinc. Cette proportion de Zinc varie d'une recette de peinture à l'autre, mais elle est en générale composée au moins de 75% de zinc dans l'extrait sec. On distingue en générale les peintures utilisant un solvant organique et un solvant inorganique. A noter que dans le cas d'une surface peinte, la corrosion peut se développer sous la protection à partir d'un défaut de celle ci (figure 17 et 18).

On peut également considérer l'application d'une couche de peinture (classique ou contenant du zinc) sur une surface d'acier déjà traitée au zinc, apportant ainsi une double protection contre la corrosion. Ce système est appelé système duplex et permet ainsi d'augmenter la résistance à la corrosion en offrant une barrière supplémentaire entre l'acier et l'environnement.



Figure 17 : Développement de la corrosion à un joint de peinture sur une surface galvanisée (gauche) et non galvanisée (droite). Source [IZA 00].

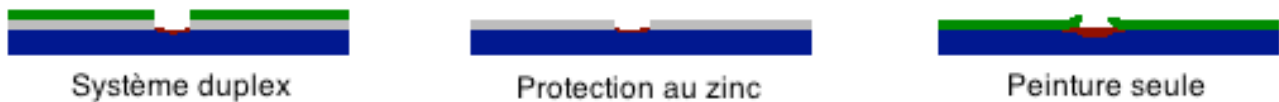


Figure 18 : Développement de la corrosion au droit d'un défaut dans la surface de protection avec système duplex, protection au zinc ou peinture seule.

On peut également considéré la combinaison de plusieurs traitements, notamment la galvanisation avec la projection par poudre ou le laquage [GAL 13]. Ces variantes confèrent des propriétés de durabilité variables et également des textures de surface différente.

2.2.5.2. Condition d'application

Tout comme la peinture classique énoncée plus haut, la surface à traiter doit être au préalable nettoyée de ses impuretés et éventuellement décapée pour assurer une bonne adhésion de la couche de peinture. Le dépôt de la peinture se fait par pinceau ou au pistolet, en général en plusieurs étapes avec une première couche d'accroche, une ou plusieurs couches d'application et une couche de finition en atelier ou sur place. L'épaisseur totale du revêtement varie selon le nombre de couche appliqué entre 40 et 160 μm .

2.2.5.3. Considérations esthétiques

Toutes les couleurs sont possibles par application de la peinture, et la surface obtenue est plus lisse et homogène que celles obtenues par galvanisation ou par projection thermique.

La combinaison duplexe de la galvanisation avec le laquage ou la projection par poudre est une variante qui confère d'autres textures et degrés de finition, selon la volonté du client. Il est également proposé par les fournisseurs l'utilisation d'un vernis qui permet au zinc de conservé un aspect brillant en limitant la formation de rouille blanche, c'est à dire d'oxyde de zinc [GAL 13].

2.2.6. Autres procédés :

2.2.6.1 Shérardisation :

Dans ce procédé utilisé en métallurgie en générale, les pièces à traiter de petite taille sont secouées dans un mélange de poudre de zinc et de silice dans un caisson fermé à une température comprise entre 380°C et 400°C. Il se forme un alliage fer-zinc à la surface des pièces par diffusion du zinc dans l'acier. L'épaisseur de dépôt obtenue varie selon le temps de traitement et la température, mais elle est en général plus faible que par application de la galvanisation et peut aller de 15 à 45 μm , et ne comporte pas de

couche de surface uniquement composée de zinc (couche η). La surface obtenue est réputée très résistante à l'usure [GA 13].

2.2.6.2. Matoplastie :

Dans ce procédé, aussi appelé galvanisation mécanique, la pièce à revêtir est préparée puis mise en caisson avec de la poudre de zinc, des billes de verre, de l'eau et des produits chimiques. Le dépôt de zinc se forme mécaniquement par impact des billes de verre sur la surface de la pièce, générant un revêtement quasi uniforme avec des épaisseurs variant de $6\mu\text{m}$ à $107\mu\text{m}$.

2.2.7. Résumé :

Nom du procédé	Principe	Condition d'application	Esthétique	Epaisseurs de zinc déposée	Coût du procédé [LED 13]
Galvanisation	Trempe dans bain de zinc fondu	En usine, préparation de la surface par bains.	Texture lisse à granuleuse, couleur gris mat.	10 à $250\mu\text{m}$	0,6 à 10 CHF/kg
Zingage électrolytique	Dépôt de zinc métallique par précipitation sur la surface	En usine, préparation de la surface par bains	Texture lisse, couleurs gris avec possibilité de d'aspect bleu, jaune ou olive.	1 à $125\mu\text{m}$	1,5 à 5 CHF/kg
Projection thermique	Projection de zinc fondu sur la surface	En usine. Surface au préalable nettoyée et grenillée pour assurer la liaison	Granuleuse, mais autre rendu possible par traitement de surface secondaire.	25 à $250\mu\text{m}$	Inconnu
Peinture	Dépôt d'une peinture contenant du zinc	En usine ou sur place, si structure existante.	Surface lisse et homogène, mat ou brillant. Toutes les couleurs à priori possibles.	40 à $160\mu\text{m}$	11 à 27 CHF/m ² [HIL 09]

3. Cas d'étude : First Zingage Electrolytique SA

3.1. INTRODUCTION A L'ENTREPRISE

Le mercredi 24 avril 2013 je pu me rendre à l'entreprise First Zingage Electrolytique SA située à Crissier (VD) accompagné par M. Valentin Gavillet. M. Marcel Ledermann nous accueilli et nous présenta l'activité de l'entreprise, ceci afin de nous familiariser avec le procédé industriel d'électrozingage par trempage aussi bien au niveau de ses aspects technologiques, techniques et économiques. Fort d'une expérience de nombreuses années, l'entreprise est dotée depuis 2009 d'un automate de zingage très performant avec une capacité de traitement de 1600 tonnes par année [FIR 13].

En plus de son activité de zingage, le site de Crissier de l'entreprise produit également des traitements de surface à base de thermolaquage, ainsi qu'un système duplex avec dépôt d'une peinture sur la surface zinguée et ainsi assurer une protection plus importante.

Il est bon de savoir que l'entreprise First Zingage Electrolytiques fait partie depuis 2005 du groupe First, qui regroupe des activités liés à la métallurgie telles que la fonderie de précision, le chromage, nickelage, et cuivrage de pièce métallique, le chromage dur afin de renforcer des pièces métalliques usées, ainsi qu'une activité de production de maintien métallique pour gaines électriques. La variété de ces activités permet au groupe de capitaliser une expérience importante dans les activités métallurgiques et de traitement de surface qui assure son expertise.

3.2. RESUME DE LA VISITE :

Pendant plusieurs heures nous avons pu nous comprendre comment fonctionne l'entreprise, ainsi que les différentes productions qu'elle assure. M. Ledermann apporta toutes les réponses à nos questions pour identifiés les paramètres du procédé, et M. Crisinel nous fourni l'ensemble des données chiffrées utiles à notre étude. Nous avons ainsi pu observer le fonctionnement du robot de traitement des pièces ainsi que leur préparation en amont. Le détail des étapes de traitements du procédé appliqué est présenté en annexe A.



Figure 19 : Préparation des pièces creuses : des bouchons sont placés afin de contrôler l'infiltration de fluide dans les parties creuses.



Figure 20 : Mise en place manuelle des pièces à traiter sur les bâtis de trempage avant la mise en place dans la ligne de traitement automatisée.



*Figure 21 : Traitement automatisé des pièces et passage dans les bains successifs.
Gauche : Pièces de type plaque.
Droite : Utilisation de tambours pour les pièces de petites tailles (par exemple boulon).*



Figure 22 : Anode de zinc au contact de la solution électrolytique basique.



Figure 23 : Ventilation de la halle

3.3. DONNEES POUR LE ZINGAGE ELECTROLYTIQUE:

Suite à la visite de l'entreprise First Zingage Électrolytique nous avons obtenues des données utiles à notre étude. Ces données sont détaillées en annexe B. Les données principales sont ici résumées (table 7) :

Zinc/matière traité	$6,34 \cdot 10^{-3}$	kg/kg
Electricité/matière traitée	$1,53 \cdot 10^2$	kWh/t
Déchet/matière traitée	$1,45 \cdot 10^{-1}$	kg/kg
Eau consommée par matière traitée	$1,74 \cdot 10^{-2}$	m ³ /kg

Table 7 : Résumé des données utiles à l'étude, d'après [LED 13].

3.4. DONNEES POUR LA GALVANISATION PAR TREMPAGE:

Au printemps 2010 M. Valentin Gavillet, alors étudiant en Master de l'EPFL, a réalisé un projet de Génie Civil dont le sujet était *Protection des structures métalliques par galvanisation à chaud : écobilans et développement durable*. Il a à cette occasion réalisé une étude de l'écobilan de la galvanisation à chaud et visité pour cela l'entreprise Zinguerie Sablage Métallisation à Sion [VS] qui lui a fourni des données pour réaliser son étude. C'est sur la base de ces données que je vais établir une estimation de l'impact environnemental du procédé de galvanisation à chaud par trempage des pièces métalliques. Ces données sont présentées en annexe C de ce rapport.

Zinc/matière traité	$6,13 \cdot 10^{-2}$	kg/kg
Electricité/matière traitée	$4,89 \cdot 10^2$	kWh/t
Déchet/matière traitée	$1,2 \cdot 10^{-2}$	kg/kg
Eau consommée par matière traitée	$2,7 \cdot 10^{-5}$	m ³ /kg

Table 8 : Résumé des données utiles à l'étude, d'après [GAV 10]

On peut noter que l'on trouve dans la bibliographie une quantité de zinc moyenne nécessaire pour la galvanisation est de 10% en masse de la pièce à traiter [GA 13]. Ce rapport est du même ordre de grandeur que le rapport observé pour l'entreprise Zingage Sablage Métallisation à Sion, avec 6,1% en masse de zinc utilisé.

3.5. PREMIERE COMPARAISON

On peut avec ces premier chiffre effectuer une comparaison brut des ratios observés pour ces deux entreprises (table 9).

Indicateur	Rapport $\frac{\text{donnée relative à la galvanisation}}{\text{donnée relative au zingage électrolytique}}$
Zinc/matière traité	9,7
Electricité/matière traitée	3,2
Déchet/matière traitée	$8,2 \cdot 10^{-2}$
Eau consommée par matière traitée	$1,6 \cdot 10^{-3}$

Table 9 : Rapport des ratios observés à partir des données obtenues des deux entreprises de l'étude.

On peut observer que la galvanisation consomme dix fois plus de zinc, mais cela s'explique par le fait que l'épaisseur du dépôt de zinc est plus importante. La quantité d'électricité consommée est également plus importante pour le procédé de galvanisation (plus de trois fois). Cependant le procédé de galvanisation génère 12 fois moins de déchet (en masse) et consomme beaucoup moins d'eau. Ceci s'explique de part l'importance des bains de préparation et de traitement dans le procédé de zingage électrolytique. Ces bains sont en effet renouvelés plus régulièrement, ce qui génère plus de déchet et consomme plus d'eau.

4. Durabilité et impact environnemental

4.1. DEFINITION

4.1.1. Durabilité

La durabilité de l'acier peut être définie comme le fait que ses propriétés mécaniques ne se dégradent pas dans le temps. Le matériau s'inscrit alors dans la durée, il est donc jugé durable. En ce qui concerne la durabilité du procédé de galvanisation et de l'électrozingage, nous ne pouvons la juger sur la simple performance de durabilité du matériau obtenu par le procédé, et il nous faut faire appel à une notion plus large de durabilité. On peut alors utiliser le concept de développement durable pour définir ce que nous appelons la durabilité d'un procédé.

Le développement durable est un concept que l'on entend aujourd'hui partout, et qu'il ne faut pas confondre avec des notions liées à l'écologie, aux énergies renouvelables ou au commerce équitable par exemple.

Un procédé est jugé durable s'il est viable dans le temps selon trois critères :

- Viable écologiquement
- Viable économiquement
- Viable socialement

Lorsque ces trois critères sont respectés, une activité, un procédé ou une technologie est jugée durable (figure 24).



Figure 24 : Les bases du développement durable [WIK 13b].

4.1.2. Impact social

L'impact social d'un procédé peut être considéré comme les modifications qualitative ou quantitative que celui-ci va apporter directement ou indirectement à la société dans laquelle il est réalisé. D'une manière générale les traitements de surfaces de l'acier au zinc sont tout à fait acceptés par la société, et sont même recherchés au vu des qualités esthétiques que cela apporte à ces surfaces. On peut donc les juger viables socialement.

4.1.3. Impact économique

Les différents procédés de traitement de surface au zinc détaillés plus haut ont des domaines d'applications variés, et chacun correspond également à un coût moyen. D'une manière générale ces traitements produisent de la valeur et ont donc un impact économique positif. Pour étudier la viabilité économique des procédés il faudrait réaliser une étude de marché, et mettre en compétition les procédés en termes de coût rapporté à la performance du procédé. Cette étude complète n'est pas réalisée dans le cadre de mon projet interdisciplinaire à option. Nous pouvons simplement observer que des investissements sont encore réalisés dans les domaines de l'électrozingage et de la galvanisation. Ces procédés étant très

largement utilisés, on les jugera donc économiquement viable. A titre indicatif on donnera des coûts moyens estimés pour les procédés de galvanisation et de zingage électrolytique, ceci à partir des informations fournies par M. Ledermann lors de la visite de l'entreprise First Zingage Électrolytique à Crissier (VD) (table 10). Ce prix est en général débattu entre le client et le fournisseur, et il dépend du type de pièce à traiter, de la qualité désirée ainsi que de la quantité de matériel concerné. En effet un prix de galvanisation par pièce n'est pas le même pour traiter 1 pièce ou pour traiter un lot de 10000 pièces sur plusieurs années.

Procédé	Coût (CHF/kg de pièce traitée)
Galvanisation	0,6-10
Zingage électrolytique	1,5-5

Table 10 : Fourchette de prix de traitement des deux procédés principaux de revêtement de surface au zinc [LED 13].

4.1.4. Impact environnemental

L'impact environnemental peut être défini comme l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par un projet, un processus, un procédé, un ou des organismes et un ou des produits, de sa conception à sa fin de vie [WIK 13b]. Cette définition englobe par exemple l'impact sur un terrain qui peut avoir une installation industrielle par sa consommation d'espace (aménagement étendus), les pollutions éventuelles des sols ou des cours d'eau, des rejets atmosphériques ou de l'énergie nécessaire alimentant un procédé. De part la grande diversité des paramètres que l'on peut considérer lors d'une étude d'impact environnemental il est important d'utiliser des méthodes d'analyses aussi bien qualitatives que quantitatives afin de pouvoir tirer un bilan de tous les impacts environnementaux à considérer.

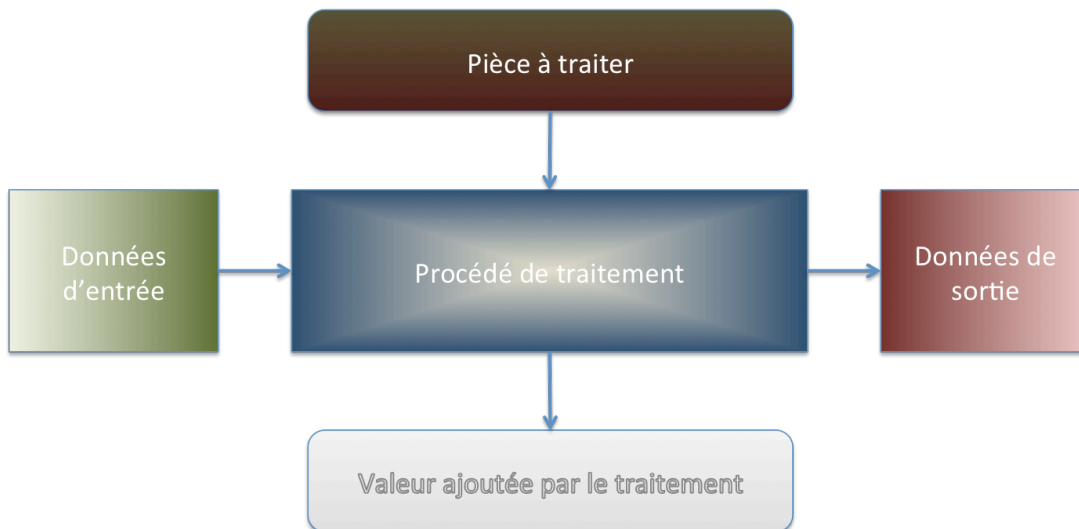


Figure 25 : Éléments à considérer lors de l'étude d'impact environnemental d'un procédé de traitement.

4.2. METHODE D'EVALUATION DE CETTE ETUDE : HYPOTHESES

4.2.1. Etat de référence

Pour étudier l'impact environnemental de ces procédés, il nous faut les comparer avec un état de référence. L'état de référence que je défini est celui d'une pièce en acier qui n'a pas reçu de traitement de surfaces particulier, exposé à des conditions d'exposition similaire à une pièce galvanisée. Les vitesses de corrosion seront tirées de la littérature, permettant de comparer l'investissement concédé en traitant les surfaces de la pièce avec le zinc par rapport à la durée de vie de celle-ci. Dans le cadre de mon étude je

suppose que la pièce présente une **géométrie de type plaque avec une surface de 1m² et une épaisseur de 10mm** pour fixer les idées.

4.2.2. Données d'entrée et données de sortie : Périmètre d'étude.

Le périmètre de notre étude se limite à l'étude des procédés de dépôt du zinc. Les impacts environnementaux propres des matériaux entrants dans le procédé sont considérés comme des données que l'on extrait de plusieurs sources bibliographiques.

Les procédés de traitement des déchets générés par les procédés de galvanisation et de zingage électrolytique ne sont pas considérés du fait de la grande diversité de ceux-ci. On citera néanmoins les déchets générés, ainsi que la gestion qui en est faite. Ces déchets sont en effet pour la plupart vendus à des entreprises spécialisées de traitement, celles-ci ont la charge d'élimination, du stockage ou du recyclage de ces déchets selon le cas (annexe B).

4.2.3. Origine du zinc :

4.2.3.1. Production et marché :

Le zinc est un élément métallique présent dans l'écorce terrestre à une concentration moyenne de 70mg/kg de matière du sol. La concentration atteint à certains endroits 5 à 15% en masse de minerai à cause d'événements géologiques ou géochimiques particuliers, et ce sont en général ces endroits présents un peu partout dans le monde que l'on exploite comme gisement de minerai. La Chine, l'Australie, le Pérou, l'Inde et le Canada sont parmi les plus gros producteurs de zinc par extraction de minerai [IZA 08]. Les applications du zinc sont principalement liées à la protection anticorrosion, même si il a une part d'application dans le domaine de la chimie, de la métallurgie (par alliage), de la fabrication du bronze (figure 26). Le zinc s'échange actuellement sur les marchés boursiers à un prix entre 1900 et 2000 US\$/t (figure 27). A titre indicatif nous pouvons mentionner le fait que le zinc est acheté par l'entreprise FZEL par courtage et que le prix moyen est de 2,5 CHF/kg, ce qui reste cohérent avec les prix du marché actuel.

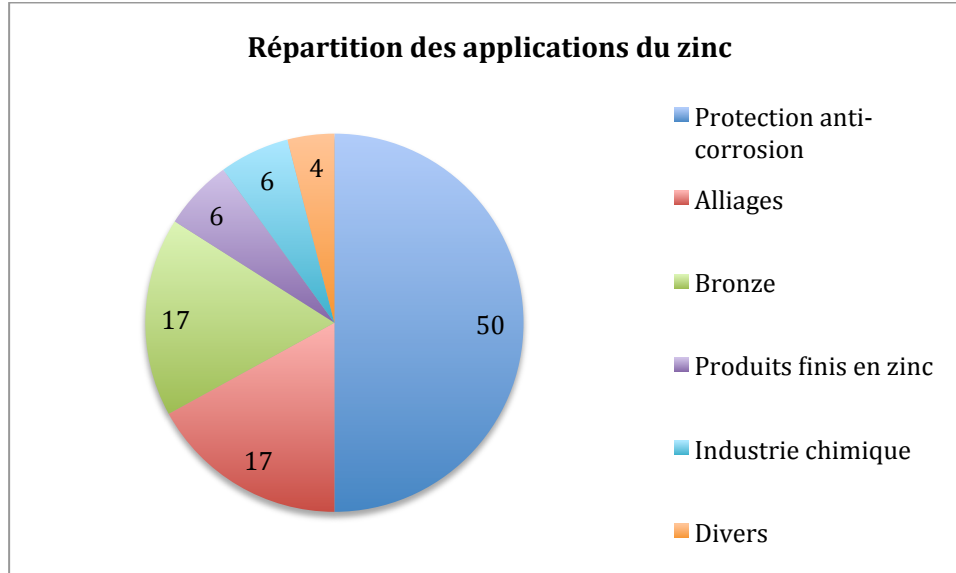


Figure 26 : Répartition des applications du zinc [IZA 08].



Figure 27 : Prix d'achat à court terme du zinc les six dernières années. Source [LME 13a].

4.2.3.2. Impact énergétique :

Le zinc utilisé pour les procédés de galvanisation et de zingage électrolytique est du zinc à pureté commerciale. Sa fabrication a également un coût environnemental, du principalement à l'extraction du minerai, la séparation de ses composants et leurs purification, ainsi que le conditionnement en matière première (lingot de zinc par exemple). Ce coût ne tiens pas compte du transport du zinc depuis les lieux de production jusqu'en Suisse, et on peut en trouver des estimations dans la bibliographie (Base de données EcoInvent ou CES EduPack, ou données industrielles [IZA 00]) (table 11).

Energie grise, production primaire	70-75	MJ/kg
Emission de CO ₂	3,65-4,04	kg/kg
Consommation d'eau	160-525	l/kg

Table 11 : Impact environnemental de la production de zinc à pureté commerciale, d'après [CES 11b].

4.2.4. Origine de l'acier :

4.2.4.1. Production et marché :

Il n'existe pas un seul acier mais plusieurs types d'acier selon la proportion de carbone et la façon dont la pièce est formée. La voie classique de production de l'acier consiste en l'oxydation de la fonte produite par brulage de minerai et de coke. La fonte contient 92 à 96% de fer et 3 à 4% de carbone [HIR 06]. En oxydant la fonte à l'air ou au dioxygène, le carbone est consommé et permet de produire de l'acier. Plus l'acier contient du carbone, moins il sera résistant mais plus il sera ductile. Pour contrôler les propriétés mécaniques du matériau de nombreux traitements ont été développés, notamment au niveau du formage de la pièce (acier coulé à chaud, forgé, étiré à froid entre autres) et des traitements thermiques appropriés (recuits et trempes). On peut également considérer les traitements visant à réduire les défauts de la structure cristalline (à l'oxydation du carbone par exemple) et l'incorporation d'atomes d'éléments étrangers, produisant ainsi des alliages métalliques à base de fer qui permettent de produire des aciers aux performances souhaitées, tels que l'acier inoxydable avec l'ajout de chrome et de nickel, ou l'acier corten comme déjà présenté plus haut.

La matière première nécessaire à la fabrication de l'acier provient de l'extraction de minerai un peu partout dans le monde, mais les matériaux ferreux étant recyclés avec des proportions importantes, cette filière du recyclage apporte également une quantité non négligeable de matière utilisée pour la production

de nouvel acier. La quantité d'acier produite en Europe de l'Ouest est estimée à 140 Mt/an, avec 18% de cette production protégée de la corrosion par galvanisation [GA 13]. On peut remarquer que l'acier est une matière première bien moins chère que le zinc avec un prix d'achat à court terme actuel inférieur à 200US\$/t (figure 28). Le traitement de surface est donc une valeur ajoutée importante à la pièce d'acier, et la minimisation des pertes de zinc lors de la galvanisation est un facteur de réduction des coûts de galvanisation non négligeable. Néanmoins pour considérer le prix d'une pièce il faut ajouter à cela l'ensemble des coûts nécessaire au formage de la pièce.



Figure 28 : Prix d'achat à court terme de la bille d'acier les six dernières années. Source [LME 13b].

4.2.4.2. Impact énergétique :

Je fais l'hypothèse que la pièce d'acier à traiter est à teneur moyenne en carbone avec un taux de 0,25% à 0,7% de carbone. De même que pour le zinc il nous faut considérer le coût énergétique de production du matériau, mais il nous faut également considérer le coût de formage de la pièce métallique (plaque de 1m² et de 10mm d'épaisseur). Je suppose que cette pièce est formée par extrusion, et je peux donc en déduire les coûts de production à partir de la bibliographie (Base de données EcoInvent ou CES EduPack) (table 12).

Production du matériau	Energie grise, production primaire	29-35	MJ/kg
	Emission de CO ₂	2,2-2,8	kgCO ₂ /kg
	Consommation d'eau	24,4-73,3	l/kg
Formage par extrusion.	Energie	5,94-6,57	MJ/kg
	Emission de CO ₂	0,45-0,49	kgCO ₂ /kg
	Consommation d'eau	Donnée manquante	l/kg

Table 12 : Impact environnemental de la production d'acier à teneur moyenne en carbone et formage de la pièce 1mx1mx10mm. [CES 11a et CES 11b]

4.2.5. Transport considéré

4.2.5.1. Acheminement de la matière

La matière première utilisée dans ces procédés provient d'un peu partout dans le monde. Il est donc difficile d'estimer l'impact de l'acheminement de ces matières jusqu'en Suisse. Pour fixer les idées j'ai considéré un transport réalisé par camion et une distance de **3000km**.

Cette distance couvre plus que le trajet Lausanne-Moscou. Le trajet de Lausanne à Rotterdam (d’où les marchandises du monde entier arrivent en Europe) est de 790km. Sachant que le transport en bateau à un impact plus faible que le transport en camion, j’estime que le coût de transport total équivaut raisonnable à 3000km parcouru en camion.

4.2.5.2. Transport des produits finis.

En ce qui concerne le transport des produits finis (formé et éventuellement traités) je considère une distance de **200km** entre le lieu de fabrication et le lieu de mise en place de la pièce.

Cette distance est une distance moyenne estimée suite à la discussion menée avec M. Ledermann de la société FZEL, et également à l’aide de la carte de répartition des entreprises de galvanisation en Suisse.

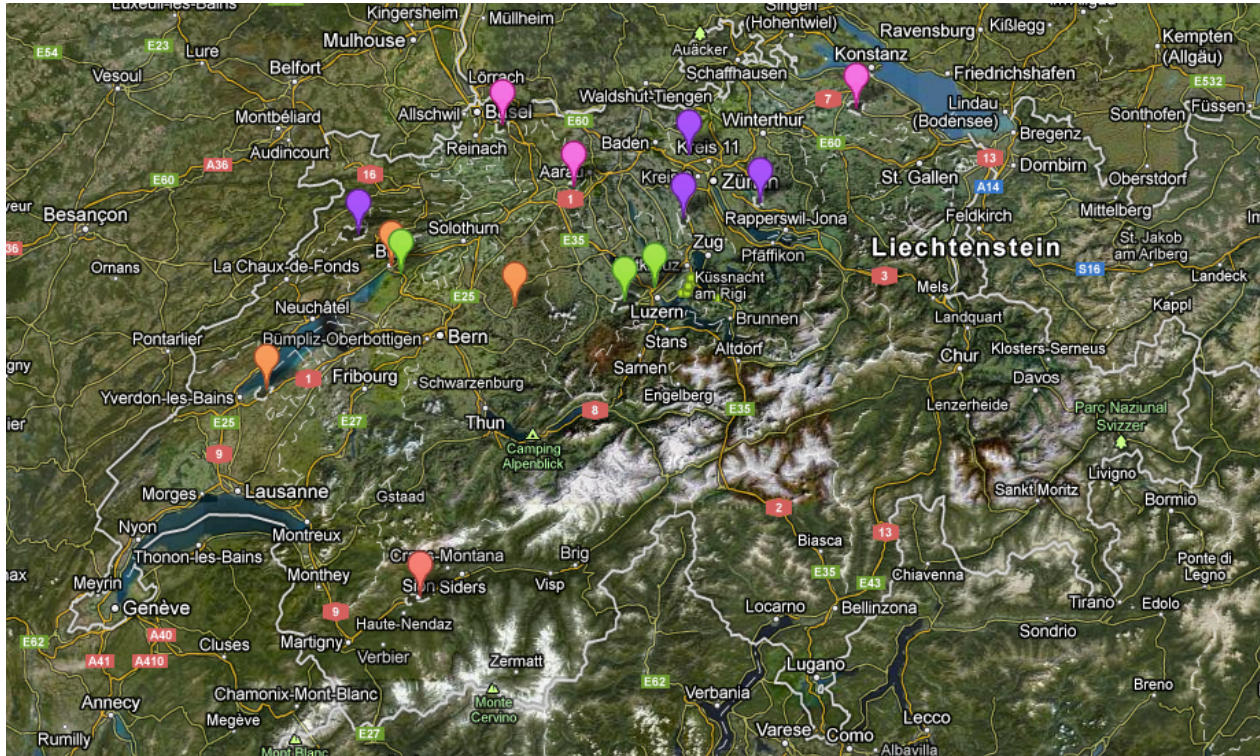


Figure 29 : Répartition des entreprises de galvanisation en Suisse. Carte GoogleMaps, source [EUR 13]

4.3. EVALUATION DANS LA DUREE

4.3.1. Notion de rentabilité environnementale

Avec les données que nous avons à ce stade de l’étude nous pouvons réaliser un calcul de coût environnemental selon plusieurs indicateurs (Énergie, CO₂ et eau). Cependant ces procédés apportent une valeur ajoutée à la pièce traitée puisqu’ils la protègent de la corrosion. La protection n’étant pas la même pour un procédé de galvanisation et un procédé de zingage électrolytique. Le coût environnemental de traitement peut donc être rapporté à la durée de vie de la pièce pour considérer une rentabilité environnementale et ainsi comparer les procédés entre eux et également comparer les procédés avec le fait de ne pas protéger la pièce d’acier.

4.3.2. Hypothèse de cinétique de corrosion

Nous pouvons trouver dans la littérature des estimations de la vitesse de corrosion selon l’environnement. Cependant ces vitesses sont estimées à partir de campagnes d’essais réalisées sur un temps relativement court comparé à la durée de vie de la pièce. Il nous faut donc extrapoler les vitesses de corrosion moyennes estimées sur un an d’étude et les appliqués pour toute la durée d’exposition de la pièce. On fait donc l’hypothèse d’une **vitesse de corrosion constante**.

Cette hypothèse forte est justifiée par le fait que la quantité de réactif peut être jugée infinie, et donc grande devant la quantité de produit. On peut donc a priori supposer une vitesse de réaction constante. Cependant cette hypothèse ne tient pas compte de la passivation apportée par la formation d'une couche d'oxyde métallique imperméable et qui ralentit fortement le processus de corrosion. Faute de données plus détaillées nous assumerons donc cette hypothèse, avec des vitesses de corrosion données par la littérature (table 13).

Corrosion de l'acier	40 g d'acier/m ² /an
Corrosion du zinc	0,44 g de zinc/m ² /an

Table 13 : Vitesse de corrosion dans un milieu d'exposition de type C2. D'après [WIL 04].

A partir de ces vitesses de corrosion nous pouvons estimer la durée de vie des pièces en supposant que la ruine de la pièce est atteinte lorsque **5% de la masse de l'acier** a été consommé par corrosion.

4.3.3. Hypothèse de traitement

A partir des données fournies par les entreprises de l'étude nous avons pu estimer la quantité moyenne de zinc utilisée pour traiter un kilogramme d'acier. Cependant cette quantité est différente de la quantité de zinc déposée sur la surface, et donc ce n'est pas celle-ci qu'il faut considérer pour déterminer l'épaisseur de zinc déposée. En effet pour le traitement par galvanisation une certaine quantité de zinc n'est pas exploitée et se dépose en fond de cuve sous forme de matte. Cette matte est constituée principalement de zinc avec également des impuretés apportées par les pièces lors du trempage. Ce zinc perdu n'est donc pas déposé sur la pièce traitée.

Pour prendre en compte cette différence nous faisons donc des hypothèses quant à l'épaisseur de zinc déposée par procédé (table 14). Cette épaisseur détermine la durée de vie de la pièce en combinaison avec la vitesse de corrosion considérée au paragraphe précédent.

Galvanisation	100 µm
Zingage électrolytique	25 µm

Table 14 : Hypothèse de l'épaisseur de zinc déposée par traitement.

4.3.4. A propos du recyclage

Dans le cadre d'une analyse de cycle de vie complète il faudrait également considérer l'impact du recyclage du matériau produit. L'évaluation de cet impact n'est pas considérée dans cette étude, et seuls les aspects qualitatifs sont considérés.

L'acier recouvert de zinc se recycle déjà de nos jours, et les réseaux de collecte et de traitement sont déjà établis depuis des années. A titre indicatif en figure 30 la part de zinc produite en 1996 est donnée par rapport au zinc en circulation la même année.

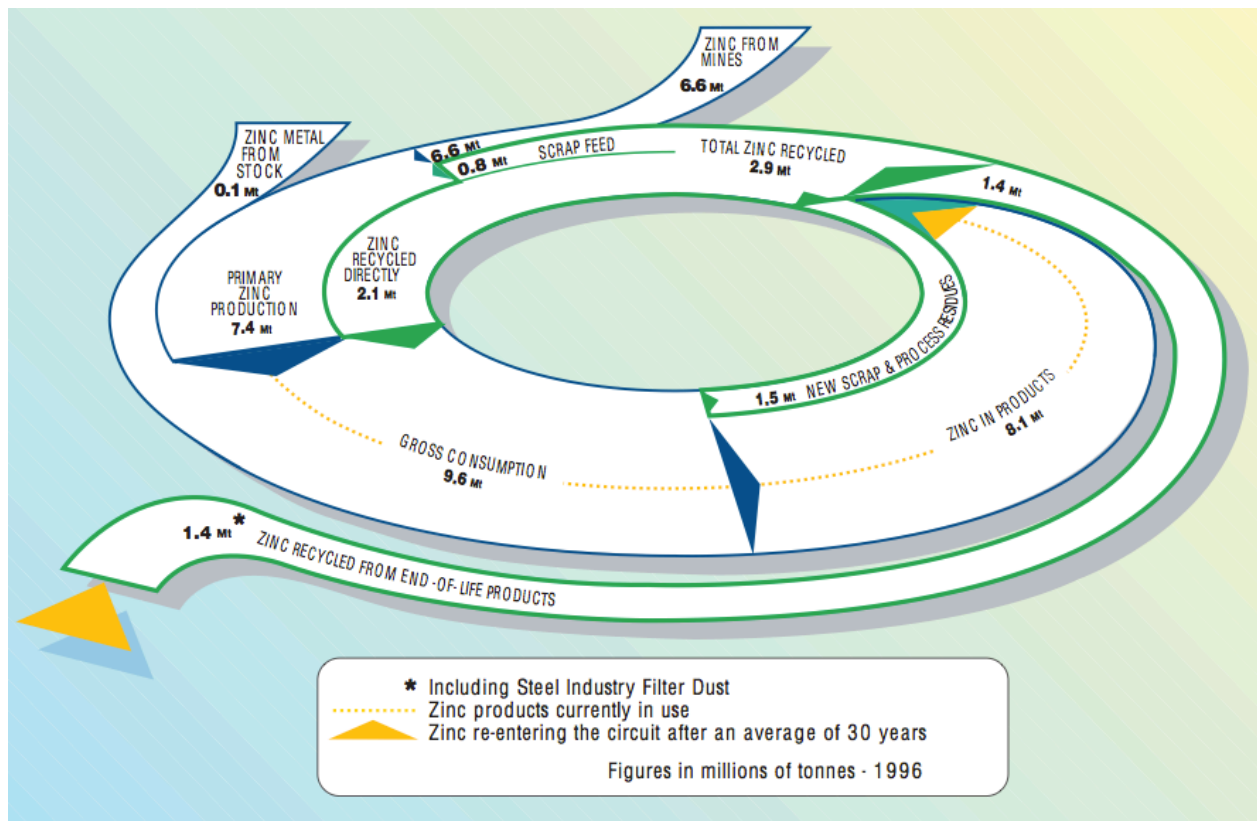


Figure 30 : Le marché du zinc, origine de production et recyclage. [IZA 99].

En Europe le taux de récupération de produits en acier est de 70% en masse et le taux de récupération du zinc est de 80% [GA 13]. Le recyclage des pièces en acier galvanisé représente 35% de la quantité totale de zinc recyclé. Une part importante du zinc recyclé provient du recyclage des résidus des procédés de galvanisation (matte), qui sont des produits très riches en zinc.

Le recyclage de l'acier vêtu de zinc se fait principalement par l'utilisation d'un four électrique à arc qui permet de produire à partir de ferraille d'acier (galvanisé ou non) du nouvel acier, du laitier de haut fourneau et de la poussière contenant entre autre du zinc. Cette poussière était autrefois mise en décharge, mais elle est aujourd'hui de plus en plus stockée en attente de recyclage ou recyclée directement. Ce recyclage de la poussière de zinc se fait quant à lui à partir d'un four rotatif Waelz qui permet de concentrer le zinc sous forme d'oxyde. Cet oxyde de zinc fourni ensuite de la matière première utilisée dans la fabrication de zinc commercial [GA 13].

L'ensemble de ces procédés de traitement sont néanmoins coûteux, et il serait intéressant de poursuivre avec une étude plus approfondie sur le sujet du recyclage de l'acier galvanisé ou vêtu de zinc. On peut par exemple en référer au cours *Material Recycling* donné au semestre de printemps dans la section de génie des matériaux à l'EPFL.

5. Résultats de l'étude

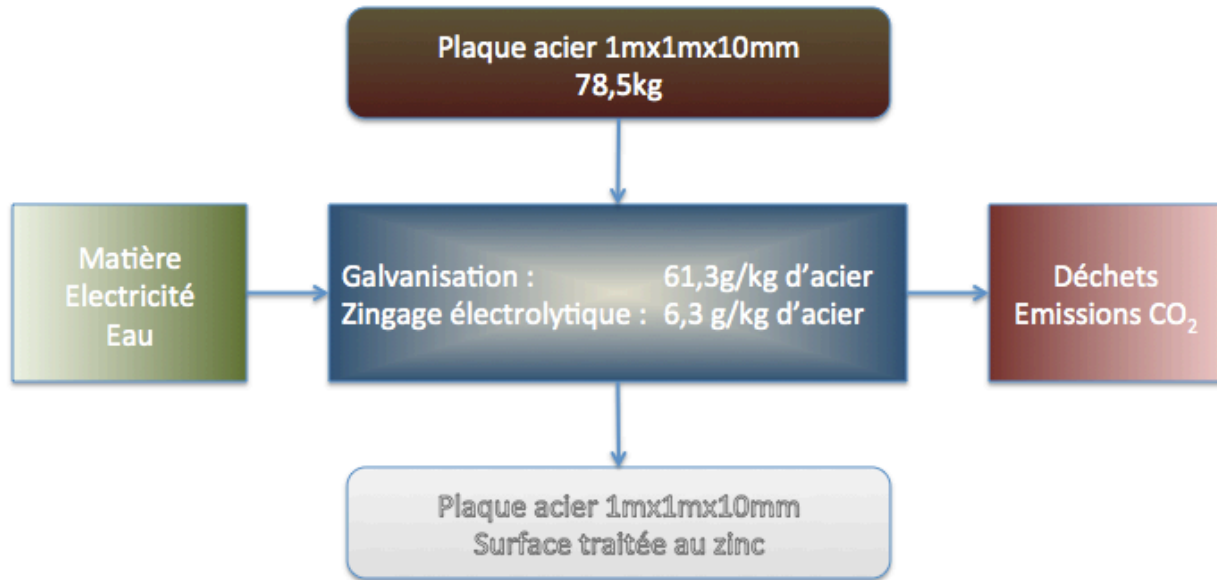


Figure 31 : Hypothèses de l'analyse

5.1. ENERGETIQUE

L'indicateur pour l'évaluation considéré dans cette section est l'indicateur énergétique, c'est à dire la quantité d'énergie nécessaire pour chaque étape du procédé. Les détails de calcul sont proposé en annexe 4 du rapport.

Energie (MJ)	Pas de traitement	Traitement galvanique	Traitement Electrochimique
Matière première (Acier)	2748	2748	2748
Transport de l'acier	545	545	545
Fabrication de la pièce (Laminage)	516	516	516
Matière première (Zinc)	0	361	37
Transport de matière (Zinc + Traitement)	0	51	21
Energie de traitement de la surface	0	176	91
Total	3808	4396	3958
Rapport avec l'état de référence	1,000	1,154	1,039
Durée de vie de la pièce (an)	48	1656	450
Energie par an (MJ/an)	79,1	2,7	8,8

Table 15 : Estimation de l'impact des procédés en terme d'énergie

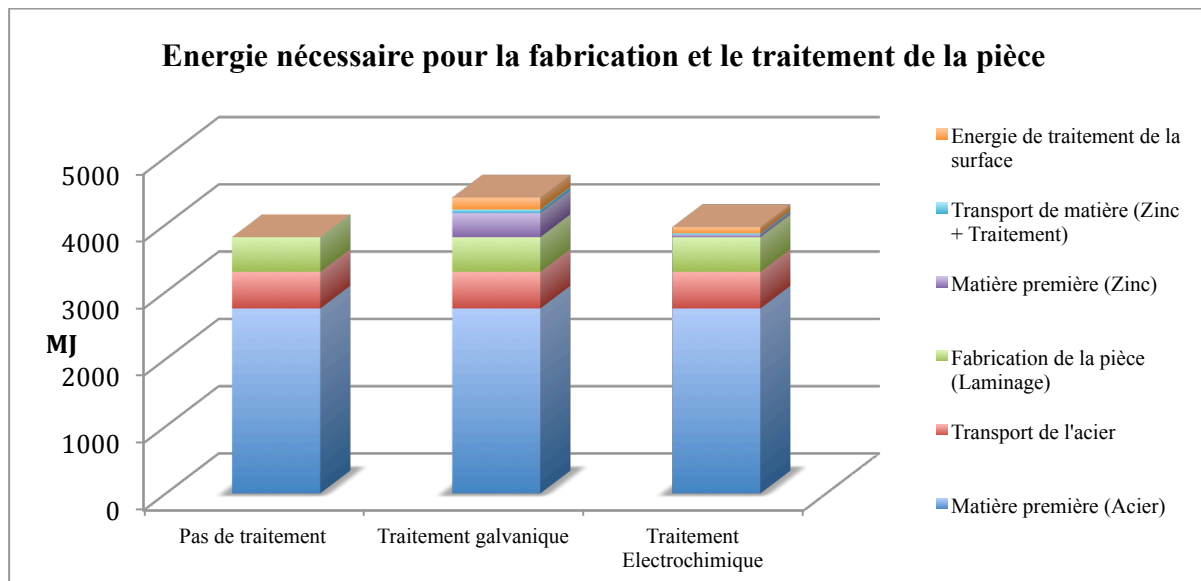


Figure 32 : Comparaison des impacts en terme d'énergie par étape des procédés.

On peut remarquer que le procédé de galvanisation est 15% plus coûteux en terme d'énergie que le non traitement de la pièce, alors que le traitement électrochimique est quant à lui seulement 4% plus coûteux que l'état de référence (table 15). Le coût énergétique du traitement galvanique vient principalement de l'énergie associée à la consommation de zinc pour le traitement d'un kilogramme d'acier (figure 32). Le traitement électrochimique représente quant à lui un investissement énergétique faible comparé au coût de fabrication de la pièce traitée. Son impact est donc faible voir quasi négligeable par rapport à l'état de référence (table 14).

Si nous considérons l'impact énergétique du procédé ramené à la durée de vie estimée de la pièce nous observons que le coût énergétique annuel de la galvanisation est le plus faible avec seulement 2,7 MJ/an. Le coût énergétique rapporté à la durée de vie de l'acier traité par zingage électrolytique est trois fois plus élevé avec 8,8 MJ/an. Le coût du non traitement de la pièce est quant à lui beaucoup plus élevé avec 79,1 MJ/an. En considérant une application industrielle appelée à durer 1600 ans la galvanisation est donc le procédé le plus performant et présentant l'impact énergétique annuel le plus faible. Cependant cette période de retour paraît absurde lorsqu'on sait que la durée de vie indicative d'un bâtiment est de 50 ans, celle d'un ouvrage est de 100 ans et la durée de vie des pièces traitées assurée sans aucun entretien nécessaire par les fournisseurs est de 35 ans pour la galvanisation [GAL 13]. La période de retour de l'investissement énergétique à considérée n'est donc pas la durée de vie de la pièce, mais plutôt la durée prévue d'exploitation.

On peut mettre en compétition les différents procédés et évaluer leur rentabilité selon la période de retour considérée (figure 33). Sans considérer aucun autre facteur d'arbitrage, la solution de ne pas appliquer de traitement est la solution la plus rentable pour des périodes de retour inférieure à la durée de vie de la pièce. Cependant cette durée de vie dépend fortement des conditions du milieu, et celle ci peut être très courte dans des conditions agressives. Il peut donc être rapidement plus rentable de traiter la pièce par zingage électrolytique. En effet c'est cette solution qui offre l'impact énergétique le plus faible tout en présentant une durée de vie conforme aux exigences du secteur de la construction. La galvanisation est quant à elle une solution dont l'impact énergétique est à peine plus élevé que celui du zingage électrolytique, avec cependant un dépôt de zinc plus épais et donc plus résistant à des milieux plus agressifs que celui considéré dans ce calcul.

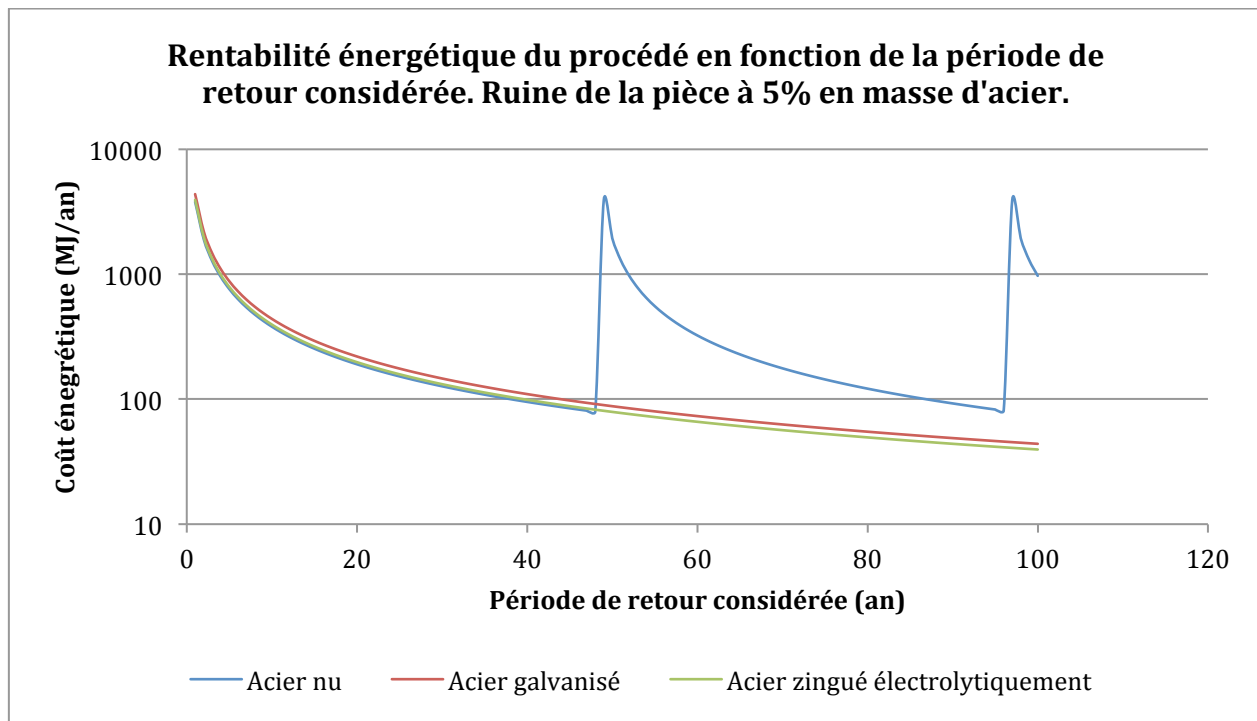


Figure 33 : Mise en compétition de l'état de référence et des deux traitements de surface évalués dans cet étude, par rapport à l'impact énergétique. Les pics observés à 48 et 96 ans de période de retour pour la solution acier nu correspondent au remplacement de la pièce arrivée à la ruine par corrosion.

Si nous revenons maintenant à l'hypothèse de la ruine de la pièce atteinte à 5% de la perte de la masse de l'acier nous pouvons citer le fait qu'une hypothèse de ruine plus restrictive telle que 2% influe beaucoup sur la rentabilité énergétique de la solution acier nu et qu'elle n'influe quasiment pas sur la rentabilité des autres procédés (figure 34). En effet la durée de vie de la pièce d'acier nu va être fortement réduite avec cette hypothèse de 2%, et donc le remplacement de la pièce sera plus régulier. La durée de vie des pièces traitées au zinc ne sera quasiment pas modifiée, et l'impact environnemental pour des périodes de retour inférieures à 100 ans sera identique à celle calculé sous l'hypothèse de ruine de la pièce d'acier après consommation de 5% de la masse de la pièce.

A cela nous pouvons ajouter le fait qu'une pièce d'acier nu qui se corrode présente une surface rouillée (figure 1), ce qui peut parfois être un avantage esthétique mais n'est en général pas souhaitable. Un traitement de surface est donc envisagé même pour des courtes durées d'utilisation de la pièce. Ce traitement peut être envisagé par l'ensemble des traitements de surface présenté précédemment dans ce rapport.

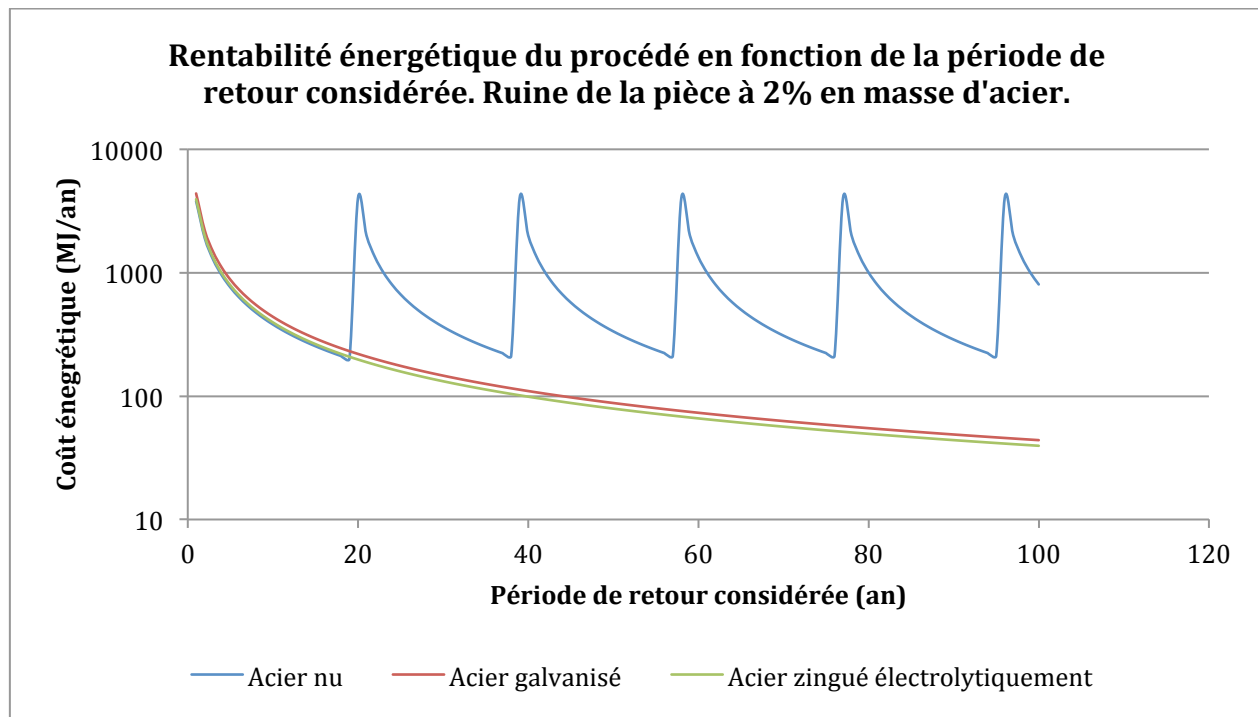


Figure 34 : Mise en compétition de l'état de référence et des deux traitements de surface évalués dans cet étude, par rapport à l'impact énergétique. Avec une hypothèse de ruine de la pièce atteinte après consommation de 2% de la masse d'acier.

5.2. EMISSION CO₂

Les émissions de CO₂ générées par un procédé sont souvent utilisées comme indicateur pour évaluer l'impact environnemental d'un procédé, et l'emprunte carbone est aujourd'hui quelque chose qui est entré dans le vocabulaire courant.

Cependant pour réaliser une étude de l'emprunte carbone cohérente il manque une donnée importante qui est l'estimation des émissions de CO₂ des procédés en eux même. En effet ce n'est pas une donnée que les entreprises peuvent fournir facilement puisque son estimation s'accompagne d'une étude approfondie de l'ensemble des procédés de l'entreprise [ADE 10]. On considère ainsi par exemple le mode de chauffage des bâtiments puisque un chauffage électrique n'a pas le même impact CO₂ qu'un chauffage au mazout ; ou encore le mode de transport utilisé par les employés pour se rendre à leur lieu de travail, ceci afin de favoriser la mise en place de plan de déplacement dans les entreprises.

Néanmoins à partir des données que nous avons nous pouvons estimer qualitativement les émissions de CO₂ des deux procédés et proposé une comparaison en première approximation (table 16).

Tout comme pour l'impact énergétique, c'est la quantité de zinc consommée par le procédé de galvanisation qui est responsable de la majeure partie des émissions CO₂ supplémentaires à l'état de référence. Le traitement galvanique génère une augmentation de 8% des émissions d'équivalent CO₂ par rapport à l'état de référence, alors que cette augmentation n'est que de 1,6% pour le traitement électrolytique. Le résultat étant le même que pour l'impact énergétique, les conclusions tirées au paragraphe précédent sont également applicables pour cet indicateur de l'impact environnemental qui est l'émission d'équivalent CO₂. Pour les durées de vie envisagée des pièces dans le secteur de la construction et une exposition modérée la solution du traitement électrochimique est la plus rentable puisqu'elle génère moins d'émission d'équivalent CO₂ par an (figure 35). Cependant la solution galvanique reste compétitive si l'on considère des milieux plus agressifs (table 2), ou un remplacement de la pièce traité par zingage électrolytique serait à envisager.

En kg équivalent CO ₂	Pas de traitement	Traitement galvanique	Traitement Electrochimique
Matière première (Acier)	219,80	219,80	219,80
Transport de l'acier	31,64	31,64	31,64
Fabrication de la pièce (Laminage)	38,62	38,62	38,62
Matière première (Zinc)	0,00	19,43	2,01
Transport de matière (Zinc + Traitement)	0,00	2,00	0,21
Traitement de la surface	0,00	1,89*	2,44*
Total	290,06	313,38	294,72
Rapport avec l'état de référence	1,000	1,080	1,016

*Table 16 : Estimation de l'impact environnemental des procédés en terme d'émission de dioxyde de carbone. Les chiffres noté * sont à considérer avec prudence car leur estimation est incomplète. Il n'est considéré dans cette estimation que les émissions d'équivalent CO₂ liées à l'utilisation des produits chimiques de préparation des pièces. (Voir le détail en annexe 4).*

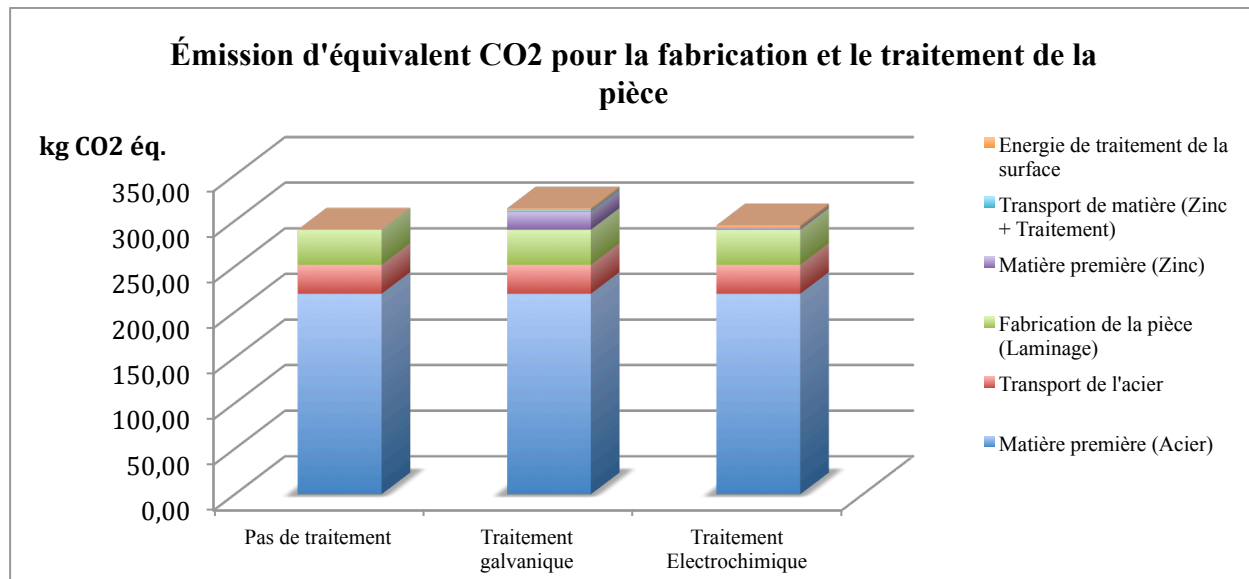


Figure 35 : Comparaison des impacts en terme d'équivalent CO₂ émit par étape des procédés.

5.3. CONSOMMATION D'EAU

La consommation d'eau est également un indicateur de l'impact environnemental. Cependant en ce qui concerne cet indicateur je n'ai pu estimé les consommations d'eau liées au transport des matières et à la fabrication de la pièce à partir de l'acier. Ces données sont donc manquantes dans l'étude et les résultats de cette section sont soumis à cette approximation (table 17).

On peut observer pour cet indicateur que le procédé de zingage électrolytique consomme beaucoup plus d'eau que le procédé de galvanisation (figure 36). Ceci est dû au principe de fonctionnement du procédé qui utilise des bains de solutions électrolytiques en quantité importante. Néanmoins sur l'ensemble des étapes du procédé à considérer la galvanisation consomme plus d'eau de part la plus grande quantité de zinc utilisée. La galvanisation est donc une fois de plus le procédé qui présente l'impact environnemental le plus forte, et l'étude de la rentabilité de ce procédé dans le temps nous donne les mêmes conclusions que pour l'impact énergétique et les émissions d'équivalent CO₂.

Eau consommée (L)	Pas de traitement	Traitement galvanique	Traitement Electrochimique
Matière première (Acier)	5385	5385	5385
Transport de l'acier	0	0	0
Fabrication de la pièce (Laminage)	0	0	0
Matière première (Zinc)	0	2525	261
Transport de matière (Zinc + Traitement)	0	0	0
Traitement de la surface	0	2	1365
Total	5385	7912	7011

Table 17 : Estimation de l'impact environnemental des procédés en terme d'émission de dioxyde de carbone. La consommation d'eau liée au transport de matière et à la fabrication de la pièce n'a pas pu être estimée à partir de la bibliographie.

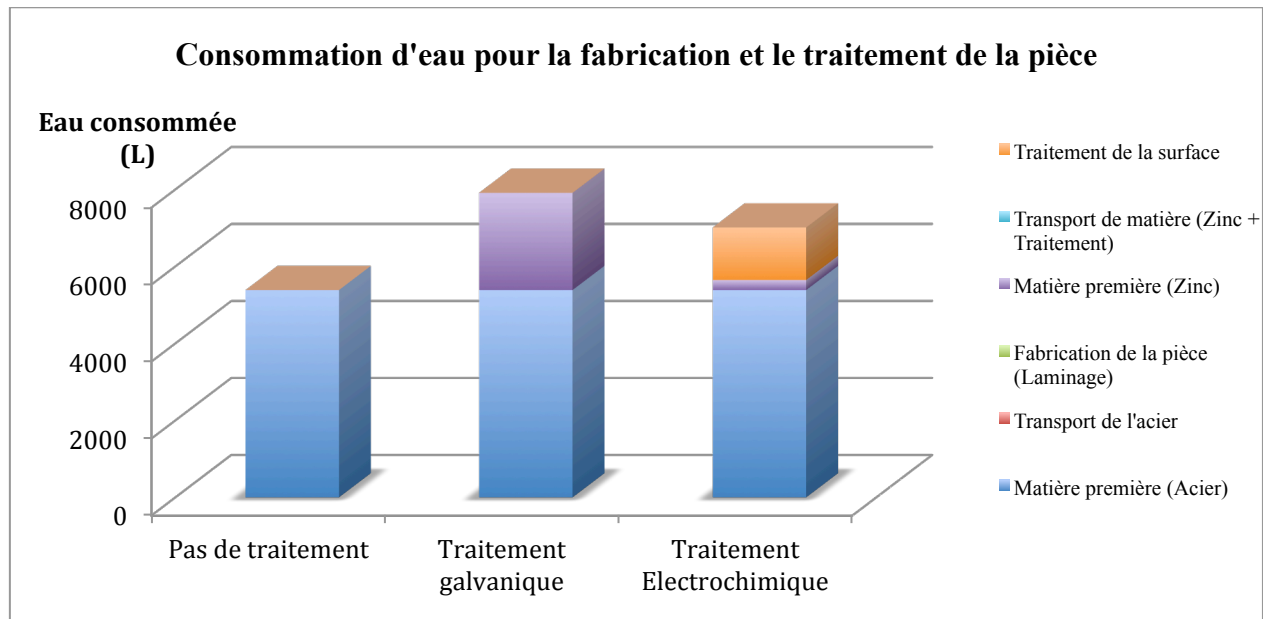


Figure 36 : Comparaison des impacts en terme d'eau consommée par étape des procédés.

5.4. GENERATION DE DECHETS

Comme nous avons pu le voir plus haut, la pratique des deux procédés étudiés produit des déchets. Ces déchets doivent être traités par stockage, neutralisation ou revalorisation, ce qui représente un impact potentiel sur l'environnement. La quantité de déchet en jeu n'est pas équivalente en masse pour les deux procédés, avec 12g de déchets par kilogramme d'acier traité par galvanisation et 145g de déchets par kilogramme d'acier traité par zingage électrolytique. Néanmoins ces déchets sont de natures différentes et il est ici brièvement présenté leur nature ainsi que leur devenir selon le procédé considéré.

5.4.1. Galvanisation

Le déchet principal produit par galvanisation est la matte qui est un dépôt de zinc et d'impuretés au fond des cuves de zinc fondu. Les autres déchets sont produits lors du renouvellement des cuves de traitement préalable de la surface (dégraissage, décapage, fluxage et rinçage), et sont sous forme de solutions d'acide chlorhydrique et de sels d'ammoniac. Ces trois déchets sont revalorisés par l'entreprise Zinguerie Sablage Métallisation visitée en 2010 à Sion. Ils sont en effet revendus à des entreprises spécialisées dans le

traitement des déchets. La matte est recyclée et sert à produire du zinc [GA 13], et les solutions des bains de préparation sont neutralisées.

5.4.2. Zingage électrolytique

En ce qui concerne le zingage électrolytique, les déchets sont produits par renouvellement des solutions de préparation et de traitement électrolytique. Ces solutions sont renouvelées régulièrement, et les déchets sont repris par des entreprises spécialisées dans le traitement des déchets qui les neutralisent ou les valorisent selon la nature de la solution [LED 13].

L'ensemble de ces déchets est détaillé en annexe 2 de ce rapport.

5.5. EMPRISE SUR LE SOL

Pour considérer l'impact environnemental d'une activité on doit également considérer l'emprise sur le sol nécessaire. Pour les deux procédés considérés cette emprise est faible puisqu'une usine de galvanisation et une usine de zingage électrolytique consomment peu d'espace comparativement aux entreprise métallurgiques (aciérie, haut fourneaux, atelier de formage) qui nécessite des infrastructures lourdes. En effet lors de la visite nous avons pu constater le faible besoin en infrastructure pour réaliser ce traitement de surface, puisqu'un hangar aménagé suffit. D'une manière général et comparativement aux autres activités liées à la production d'acier l'impact sur l'environnement mesuré par l'emprise au sol des installations est faible pour les traitements de surface au zinc.

Conclusions

Les procédés de galvanisation et de zingage électrolytique sont des solutions efficaces pour allonger la durée de vie de pièces en acier exposées à la corrosion. Ils permettent en effet de réduire la vitesse de corrosion et donc de limiter la propagation du phénomène. Le zingage électrolytique semble être la solution qui produit l'impact environnemental le plus faible dans les hypothèses considérées, et ce en considérant aussi bien l'indicateur énergétique, les émissions d'équivalents CO₂ que la consommation d'eau. Néanmoins dans des conditions plus agressives que celles considérées dans cette étude (par exemple C3-C4), la solution galvanique peut s'avérer plus compétitive puisque plus robuste à la corrosion de part la plus grande quantité de zinc déposée. En effet le coût environnemental ramené à la quantité de zinc déposé, et donc à la résistance à la corrosion, est favorable à la galvanisation et ce quelque soit l'indicateur considéré.

En comparaison avec l'état de référence que nous avons défini, les procédés de galvanisation et de zingage électrolytique sont durables avec des impacts positifs sur la société (esthétique), l'économie (création de valeur ajoutée) et l'environnement (impacts environnementaux raisonnables ou faibles devant l'état de référence, et vite rentabilisés dans le temps).

Bibliographie

- [ADE 10] ADEME, Juin 2010, *Bilan carbone*[®], *Entreprises-collectivités-Territoires*, Guide méthodologique, Version 6.1, Objectifs et principes de comptabilisation.
- [AYE 07] Hassine Ferid Ayedi, Martine Depetris-Wery, sept. 2007, *Électrozingage, Techniques de l'ingénieur Traitements de surface des métaux en milieu aqueux*, ref. article : m1600, base documentaire : TIB359DUO, Editions T.I..
- [BIR 09] BIRCK D., 2009, *La tour Eiffel célèbre ses 120 ans [Internet]*, site internet radio France internationale, 2013 avr 21, 16 :51 UTC. Disponible à l'adresse :
http://www.rfi.fr/francefr/articles/112/article_79738.asp
- [BM 11] Banque Mondiale (2011)
- [BRU 12] Eugen Brühwiler, septembre 2012, *Structure existante I, Sécurité et Durabilité*, Cours de Master – section Génie Civil, EPFL, PPUR.
- [BRU 13] Eugen Brühwiler, Février 2013, *Structure existante II, Interventions*, Cours de Master – section Génie Civil, EPFL, PPUR.
- [CCTA 13] C.C.T.A. sas, *La protection cathodique [Internet]*, site internet de l'entreprise, 2013 avr 04, 13 :30 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://www.ccta.fr/ccta.php?page=principe>
- [CES 11a] CES EduPack, 2011, *Database Process Universe*, Granta Design Limited. Software used in the Material Engineering section at the EPFL, available in the Material Engineering's computer room.
- [CES 11b] CES EduPack, 2011, *Database Material Universe*, Granta Design Limited. Software used in the Material Engineering section at the EPFL, available in the Material Engineering's computer room.
- [EUR 13] Europages.fr, *Entreprise suisses de galvanisation des aciers et métaux [Internet]*, Site internet consulté 2013, avr 03, 11 :05 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://www.europages.fr>
- [FIR 13] First Zingage Electrolytique SA, *Présentation de l'entreprise [Internet]*, site internet de l'entreprise, 2013 avr 22, 10 :00 UTC. Disponible à l'adresse :
http://www.firstindustries.ch/cms/init.php/page/content?l=fr&id_page=622
- [FIS 05] Manfred Fischer, *Acier patinable, propriétés et applications*, Steeldoc 03/05, septembre 05, Construire en acier, Documentation du Centre Suisse de la Construction Métallique.
- [GA 04] Galvazinc Association, 2004, *La galvanisation à chaud, une protection universellement employée*, Brochure d'information, Association française pour le développement de la galvanisation à chaud, fondée en 1956.
- [GA 13] Galvazinc Association, Site web de l'association consulté 2013 mar 03, 19 :00 UTC. Disponible à l'adresse : <http://www.galvazinc.com>
- [GAL 13] Galvaswiss AG, 2013, Site web de l'association consulté 2013 mai 31, 18 :50 UTC.
- [GAV 10] Valentin Gavillet, 2010, *Protection des structures métalliques par galvanisation à chaud : écobilans et développement durable*, Projet génie civil, ICOM, EPFL.
- [GFN 09] Global Footprint Network, November 2009, *Ecological footprint atlas 2009*, Global footprint network, research and standards department.
- [HIL 09] Baptiste Hildebrand, 2009, *Protection anti-corrosion des structures métalliques et développement durable*, Projet génie civil, ICOM, EPFL.

- [HIR 06] Manfred A. Hirt, Rolf Bez et Alain Nussbaumer, 2006, *Construction métallique, Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement*, Traité de génie civil, volume 10, Nouvelle édition, 512 pages, PPUR, Lausanne.
- [IZA 99] International Zinc Association – Europe, 1999, *Zinc Recycling, The General Picture*.
- [IZA 00] International Zinc Association, Feb 2000, *Zinc Coating, Protecting Steel*, Brochure d'information sur les applications du zinc et la protection de l'acier dans tous les secteurs de l'industrie.
- [IZA 08] International Zinc Association, 2008, *Zinc Environmental Profile, Life Cycle Assessment*, Rapport d'information sur l'analyse de cycle de vie du procédé de galvanisation.
- [LAN 87] Latanision R. M., 1987, *Materials Performance*.
- [LAN 97] LANDOLT T., 1997, **Corrosion et chimie de surfaces des métaux**, *Traité des matériaux n°12*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [LEB 05] Jean-Paul Lebet, Thomas Lang, *Ponts en acier patinable*, Steeldoc 03/05, septembre 05, Construire en acier, Documentation du Centre Suisse de la Construction Métallique.
- [LEB 09] Jean-Paul Lebet et Manfred A. Hirt, 2009, *Pont en acier, Conception et dimensionnement des ponts métalliques et mixtes acier-béton*, Traité de génie civil volume 12, Nouvelle édition, 581 pages, PPUR, Lausanne.
- [LED 13] Marcel Ledermann, First Zingage Electrolytique, Responsable clientèle et formation. Rencontré le 24 avril 2013 sur le site de production de l'entreprise, 36 rte de Bussigny, 1023 Crissier-[VD].
- [LME 13a] London Metal Exchange, 2013, *Historical price for Zinc* [Internet], consulté 2013, mai 27, 23 :00 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://www.lme.com/metals/non-ferrous/zinc/#tab2>
- [LME 13b] London Metal Exchange, 2013, *Historical price for steel billet* [Internet], consulté 2013, mai 27, 23 :50 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://www.lme.com/metals/steel-billet/#tab2>
- [NOB 12] Grégoire Noble, 2012, *La galvanisation, un procédé industriel plus que centenaire mais toujours d'actualité*, Batiactu [Internet], 2013, mar 03, 11 :05 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://www.batiactu.com/edito/la-galvanisation-un-procedé-industriel-plus-que-ce-32417.php>
- [PHI 02] PHILIBERT et coll. 2002, *Métallurgie du minerai au matériau*, Dunod, p. 660
- [SER 96] Richard Serra, 1996, *Torsions elliptiques*, Musée Guggenheim Bilbao [Internet], 2013, avr 23, 16 :03 UTC. Disponible à l'adresse
<http://www.guggenheim-bilbao.es/fr/expositions/richard-serra-3/>
- [WIL 04] Roger Wildt, 2004, *Corrosion performance of galvanized steel framing in residential construction*, International Zinc Association.
- [WIK 13a] Contributeurs wikipedia, *Galvanisation*, Wikipedia [Internet], 2013, mars 01, 20 :50 UTC. Disponible à l'adresse :
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Galvanisation>
- [WIK 13b] Contributeurs wikipedia, *Impact environnemental*, Wikipedia [Internet], 2013, mai 11, 22 :05 UTC. Disponible à l'adresse :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_environmental

Normes

[EN ISO 1461] Comité Européen de normalisation, mai 1999, *Revêtements pas galvanisation à chaud sur produits finis ferreux – Spécifications et méthodes d’essai (ISO 1461:1999)*. Association Suisse de Normalisation.

[SIA 2022] Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, 2003, *Traitement de surface des constructions en acier*, Cahier technique 2022.

ANNEXE**ANNEXE 1. Détail des étapes du procédé de zingage électrolytique appliqué par l'entreprise First Zingage Électorlytique à Crissier.**

Bain	Nomination	Composition bu bain
1	Stock	
2	Stock	
3	Stock	
4	Stock	
5	Chargement	
6	Etuve	
7	Soufflage	
8	Cuve de réserve	
9	Rinçage seul	Eau déminéralisée
10	Rinçage passivation jaune	Acide nitrique + nitrate cobalt + sels chrome III
11	Passivation jaune	Acide nitrique + nitrate cobalt + sels chrome III
12	Rinçage passivation bleu	Acide nitrique + nitrate cobalt + sels chrome III + Fluorure
13	Passivation bleue	Acide nitrique + nitrate cobalt + sels chrome III + Fluorure
14	Dépassivation	Acide nitrique + fluorure
15	Rinçage avant dépassivation	Eau déminéralisée
16	Dégraissage chimique	Soude caustique
17	Dégraissage chimique	Soude caustique
18	1er rinçage dégraissage	Soude caustique
19	2ème rinçage dégraissage	Soude caustique
20	Dézingage	Acide sulfurique + Acide chlorhydrique
21	Décapage chimique	Acide sulfurique + acide chlorhydrique
22	Décapage chimique	Acide sulfurique + Acide chlorhydrique
23	1er rinçage décapage	Acide sulfurique + Acide chlorhydrique
24	2ème rinçage décapage	Acide sulfurique + Acide chlorhydrique
25	Dégraissage électro	Soude caustique
26	Rinçage dégraissage électro	Soude caustique
27	2ème rinçage électro	Soude caustique
28	1er rinçage électro	Soude caustique
29	Rinçage éco	Soude caustique
30	Bain de zingage	Soude caustique + Zinc
31	Bain de zingage	Soude caustique + Zinc
32	Bain de zingage	Soude caustique + Zinc
33	Bain de zingage	Soude caustique + Zinc
34	Bain de zingage	Soude caustique + Zinc

Table 18 : Détail des bains gérés par l'automate de traitement.

L'ordre des bains est celui d'ordre de placement dans la chaîne, non pas l'ordre dans lequel une pièce de zinc est traitée. En effet les pièces font un aller-retour dans cette chaîne, passant ainsi par toutes les étapes de préparation avec les bains de zingage et les étapes de finition après les bains de zingage.

ANNEXE 2. Données fournies par l'entreprise First Zingage Electrolytique

Les données récoltées lors de notre visite de l'entreprise First Zingage Electrolytique que nous utilisons pour notre étude sont les suivantes :

Quantité de Zinc utilisée	2645kg	Année 2012
Provenance du zinc	Monde	(Acheté par courtage à Impag)
Eau utilisée	7252 m3	Année 2012
Acide Sulfurique 38%	2600kg	Année 2012 (Cuve de neutralisation)
Acide Chlorhydrique	8860kg	Année 2012 (Dézingage-décapage)
Metex LC 40A et B	1980kg	Dégraissage chimique alcalin
Metex IT	350kg	Dépassivation
Tripass	625kg	Additif passivation bleu
Energie électrique consommée par l'activité de zingage	63714kWh	Novembre 2011
Quantité de pièces traitée	417'071,5 kg	Année 2012
Provenance des pièces	Suisse Romande-France	
Temps d'un cycle	2h30'	Passage dans l'automate de zingage
Boues hydroxyde	6286kg	Déchets retraités par Veolia
Carbonates	736kg	Déchets retraités par Thommen
Bain de rinçage	17200kg	Déchets retraités par Veolia
Dégraissage	12855kg	Déchets retraités par Veolia
Huile anticorrosion Motorex	183kg	Déchets retraités par Veolia
Dézingage-décapage	16470kg	Déchets retraités par Veolia
Passivation	6320kg	Déchets retraités par Veolia
Soude cristallisée (nettoyage canaux)	357kg	Déchets retraités par Veolia

Table 19 : Données utilisées pour l'étude, d'après [LED 13].

ANNEXE 3. Données fournies par l'entreprise Zingage Sablage Métalisation (Sion).

Dimension du bain de zinc	7x1,2x1,9 m	
Volume du bain de zinc	15,96 m ³	
Température du bain en travail	445°C	
Température du bain au repos	430°C	
Zinc utilisé	113950 kg	Année 2009
Matte extraite	21365 kg	Année 2009
Sel d'ammoniac utilisé	2000 kg/an	Année 2009
Aluminium utilisé	730 kg/an	Année 2009
Électricité pour toute la halle	910344 kWh/an	Année 2009
Pratique du zingage	5 h/j	
Tonnage de matériel traité	155 t	mensuel
Dimension d'un bain d'acide chlorhydrique intérieur	14x1,6x1,8 m	
Volume d'un bain d'acide chlorhydrique intérieur	40,32 m ³	
Dimension d'un bain d'acide chlorhydrique extérieur	6,5x1,6x0,95 m	
Volume d'un bain d'acide chlorhydrique extérieur	9,88 m ³	
Composition des bains d'acide	HCl 16,5%	
Acide utilisé	50,2 m ³ /an	
Taux de chlorure ferrique	250 g/l	Critère de renouvellement pour les bains intérieurs
Taux de chlorure de zinc	1400 g/l	Critère de renouvellement pour les bains extérieur
Déchets récupérés dans les filtres d'aération	55 kg/mois	
Masse monétaire générée	3000 CHF/h	Satisfaisant la viabilité de l'entreprise
Prix de revente de la matte	1,5 CHF/kg	
Prix de revente du sel d'ammoniac	0,15 CHF/kg	
Prix de revente du chlorure ferrique	140 CHF/t	
Provenance du zinc	Monde	
Provenance de l'acide chlorhydrique	Zurich (AG)	

Table 20 : Données utilisées pour l'étude concernant la galvanisation par trempage, d'après [GAV 10].

ANNEXE 4. Détails des calculs de l'étude.

Pièce à traiter :

	Largeur (m)	Longueur (m)	Epaisseur (m)	Volume (m ³)	Surface de pièce (m ²)	Densité (kg/m ³)	Poids plaque (kg)
Pièce à traiter	1	1	0,01	0,01	2,04	7850	78,5

Table 21 : Détail de la pièce à traiter considérée dans l'étude.

Données de traitement :

	Zinc nécessaire (kg/kg)	Zinc nécessaire pour la pièce (absolu, kg)	Densité zinc (kg/m ³)	Epaisseur de zinc (µm)	Densité surfacique de zinc kg/m ²	Zinc déposé (kg)
Traitement Galvanique	$6,13 \cdot 10^{-2}$	4,81	7140	100	0,71	1,46
Traitement Electro	$6,34 \cdot 10^{-3}$	0,50	7140	25	0,18	0,36

Table 22 : Estimation des quantités de zinc nécessaire au traitement de la pièce.

Vitesse de corrosion

	Acier galvanisé	Acier nu
Vitesse de corrosion (g/m ² /mois)	0,037	3,33
Vitesse de corrosion (g/m ² /ans)	0,444	39,96

Table 23 : Vitesses de corrosion considérées [WIL 04]

Durée de vie

La pièce est considérée ruinée lorsque 5% en masse de l'acier est consommé.

Durée de vie sans protection, marge 5%	48
Durée de vie de la protection galvanisée	1656
Durée de vie de la protection zinguée	450

Table 24 : Durée de vie calculée des pièces traitées, avec l'ensemble des hypothèses énoncées.

Coût des procédés

Indicateur	Energie	CO ₂ éq	Eau	Source
Unité	MJ/kg	kg/kg	l/kg	
Production acier	35,00	2,80	68,60	EduPack 2011
Production zinc	75,00	4,04	525,00	EduPack 2011
Transport matières (3000km par camion)	6,72	0,39	Pas de données	EcoInvent
Traitement formage pièce	6,57	0,49	Pas de données	EduPack 2011
Traitement galvanique	2,25	0,024*	0,027	V. Gavillet
Traitement électro	1,16	0,03*	17,39	M. Ledermann
Transport pièces (200km par camion)	0,448	0,026	Pas de données	EcoInvent

Table 25 : ensemble des données considérées dans l'étude ramenée en kg de pièce traité.

**Ces valeurs ne sont pas significatives car elles ne prennent en compte que*

Procédé	Matière	kg/kg d'acier	MJ/kg d'acier	CO ₂ eq kg/kg
Traitement galvanique	Acide chlorhydrique	0,027	0,448	0,022
	Ammoniac	0,001	0,038	0,002
	Total		0,486	0,024
Traitement électro	Acide sulfurique	0,00623	0,01247	0,00075
	acide cholhydrique	0,02124	0,35264	0,01742
	Traitement dégraissage	0,00709	0,24940	0,01297
	Total		0,615	0,031

Table 26 : Impact carbone dû à l'utilisation des produits chimiques pour les bains de préparation de la pièce.