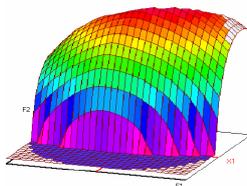


Année Universitaire : 2013-2014



**Master Sciences et Techniques CAC Agiq
Chimiométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion
industrielle de la qualité**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques**

**Réduction de la consommation du zinc par la
méthodologie des plans d'expériences**

Présenté par:

M. HAMCHI Mohammed

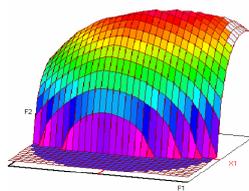
Encadré par:

- M. SAMIR Oussama, MAFERI
- M. ABDERAZZAK Bouchaib, MAFERI
- Pr. Mohammed EL ASRI, FST Fès

Soutenu Le 17 Juin 2014 devant le jury composé de:

- Pr. Mohammed EL ASRI
- Pr. Chakib AMEZIANE HASSANI
- Pr. El Hadi LAMCHARFI

Stage effectué à : MAFERI (Casablanca)



Master ST CAC Agiq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: M. HAMCHI Mohammed

Année Universitaire : 2013/2014

Titre : Réduction de la consommation du zinc par la méthodologie des plans d'expériences.

Résumé

Avec l'équipe de MAFERI, nous avons été amenés à réduire la consommation du zinc par la méthodologie des plans d'expériences.

Les analyses que nous avons développées dans le présent rapport consistent à déterminer les facteurs qui sont potentiellement influents sur l'épaisseur de revêtement de zinc à l'aide d'un plan de criblage, en vue de suggérer une stratégie optimale pour réduire l'épaisseur de revêtement de zinc.

Les résultats de ce plan nous a permis d'évaluer les effets des paramètres sur l'épaisseur de revêtement et de les hiérarchiser sur leur poids. Ceci nous a permis de proposer et d'essayer un réglage qui a donné des résultats très encourageant.

Mots clés :

- Epaisseur de revêtement,
- Plans d'expériences,
- Plan de criblage,
- Galvanisation à chaud,
- Stratégie optimale.

Table de matière

Introduction.....	5
Partie I : Présentation de l'entreprise d'accueil	6
1- Présentation générale de MAFERI	6
1.1- Historique	6

1.2-	Moyens humains.....	7
1.3-	Moyens de production	8
1.4-	Moyens de contrôle	9
1.5-	Produits et marché.....	9
1.6-	Système de management de la qualité.....	9
Partie II : Processus de galvanisation à chaud au sein de MAFERI.....		10
I-	Introduction	10
II-	Description du processus de galvanisation à chaud	11
1-	Préparation de la surface d'acier	12
a-	Réception :	12
b-	Accrochage :.....	12
c-	Décapage :	13
d-	Rinçage :.....	14
e-	Fluxage :	14
f-	Séchage :.....	14
2-	Galvanisation à chaud	14
a-	Galvanisation :	14
b-	Refroidissement et contrôle :	14
III-	Les atouts de la galvanisation à chaud	15
Partie III : Réduction de la consommation du zinc		16
I-	Formalisation du problème.....	17
II-	Diagnostic de l'existant	17
III-	Réduction de l'épaisseur de revêtement de zinc	18
1-	Objectifs de l'étude.....	19
2-	Variables d'entrée.....	20
3-	Variable de sortie.....	21
4-	Facteurs non contrôlables	21
IV-	Criblage des facteurs.....	21
1-	Stratégie expérimentale.....	21
2-	Facteurs – Modalités – Domaine expérimental	21
3-	Modèle empirique	22
4-	Construction de la matrice du modèle	22
5-	Expérimentation	23
V-	Traitement des résultats.....	24
1-	Outil informatique.....	24
2-	Analyse globale des résultats d'essais	24
3-	Analyse mathématique des résultats des essais.....	25

4-	Analyse graphique du modèle.....	26
a-	Diagramme en bâtons	26
b-	Analyse de Pareto	26
5-	Conclusion de l'étude	28
6-	Validation des résultats	28
VI-	Analyse des causes des non conformités.....	29
VII-	Plan d'actions et d'améliorations.....	30
	Conclusion	32
	Liste des figures.....	33
	Liste des tableaux.....	34
	Bibliographie	34
	Webographie	35
	Annexe 1 : Norme NM ISO 1461.....	35
	Annexe 2 : Plans d'expériences.....	36
	Annexe 3 : Outils de formulation du problème.....	37



Introduction

Actuellement, tous les industriels sont conscients de l'obligation de la réduction des pertes, qui sont devenus un gisement incontournable dans la survie de toute entreprise visant une part importante du marché et ayant une volonté d'amélioration.

La stratégie de MAFERI est fondée sur l'instauration de nouvelles démarches managériales ayant comme objectif final l'optimisation dans le domaine de la galvanisation à chaud.

En effet, la direction de MAFERI s'engage dans plusieurs démarches qui visent à réduire les pertes. Notamment, dans la réduction de la consommation du zinc, qui a connu dans les dernières années des augmentations accélérées et continues de prix.

Nous visons dans le cadre de ce projet de réduire la consommation du zinc dans le procédé de galvanisation à chaud. Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'équipe de MFEERI.

Le présent rapport est subdivisé en trois grandes parties :

La première partie porte sur la présentation de l'entreprise d'accueil, ses activités, et ses moyens,

La deuxième partie intitulée processus de galvanisation à chaud, donne un aperçu sur la galvanisation à chaud, ainsi que ses avantages par rapport aux autres méthodes de revêtement,

La dernière partie est consacrée au développement du projet. Dans cette partie, nous abordons la méthodologie qu'on a mise en œuvre pour traiter la problématique. Cette méthodologie s'articule selon trois étapes :

- La formalisation du problème expérimental et la réalisation,
- La construction du plan d'expériences : plan de criblage,
- Les analyses (statistiques, mathématiques et graphiques) et les résultats (interprétations, validations et conclusions).

Nous terminons ce rapport par une conclusion générale, des propositions et des perspectives.



Partie I :

Présentation de l'entreprise d'accueil

Cette partie constitue une présentation abrégée de MAFERI : lieu de déroulement de notre projet de fin d'études.

1- Présentation générale de MAFERI

1.1- Historique

MAFERI est une société à responsabilité limitée avec un capital social de 2 Millions de Dirhams. Sa mission principale est le développement de son activité dans le domaine de la



galvanisation à chaud et du traitement de surface avec une capacité de production de 40 Tonne par jour environ.

L'activité industrielle de MAFERI a débuté en 1996 en vue de devenir un acteur majeur dans la galvanisation à chaud. Le projet a été conduit par Mr Abdelfettah LEBBAR et Mr Noureddine LEBBAR.

MAFERI a connu deux étapes importantes depuis sa création :

- **Première étape : 1996-2000**

L'activité de galvanisation a démarré avec un bain de galvanisation d'une longueur de 6,8 mètres permettant une capacité de galvanisation de 2 tonnes par heure.

Durant cette période, la direction a centré ses efforts sur la maîtrise progressive du processus de galvanisation à chaud. Le marché était essentiellement composé de clients à faibles séries.

A partir de 1999, les processus de production sont maîtrisés et l'usine commence à fonctionner à pleine capacité.

D'autre part, les clients professionnels commencent à orienter leurs commandes vers MAFERI. La configuration de l'entreprise ne permettait de répondre convenablement aux exigences de ces clients.

- **Deuxième étape : 2000- à ce jour**

La Direction a entamé la construction d'un nouveau site de production bénéficiant d'une plus grande surface de travail, et l'installation d'un four doublant ainsi la capacité initiale (4 tonnes par heure). Le four installé permet de traiter des pièces de grandes dimensions (15m).

Par ailleurs, pour s'adapter aux changements brusques que connaît le marché national et international, et satisfaire les exigences des clients, face à une concurrence de plus en plus importante, la direction a accompagné l'évolution des moyens techniques d'une mutation vers une organisation structurée et efficace.

Pour réaliser cet objectif, la direction a opté pour la mise en place d'un système de management de la qualité conforme à la norme ISO 9001 versions 2000. Ce système a été certifié en décembre 2003 par l'organisme « Moody Certification »

L'année 2006 était marquée par des augmentations accélérées et continues du prix de zinc "plus de 250% par rapport à l'année 2005". Ce qui a poussé MAFERI d'entamer divers mesures d'ordre commercial, technique et managérial pour gagner d'abord sa survie et être ensuite plus compétitive sur le marché de la galvanisation.

1.2- Moyens humains

Actuellement une équipe de 50 personnes dont 7 cadres opèrent dans un esprit de groupe dans le but de réaliser les objectifs définis par la Direction générale.

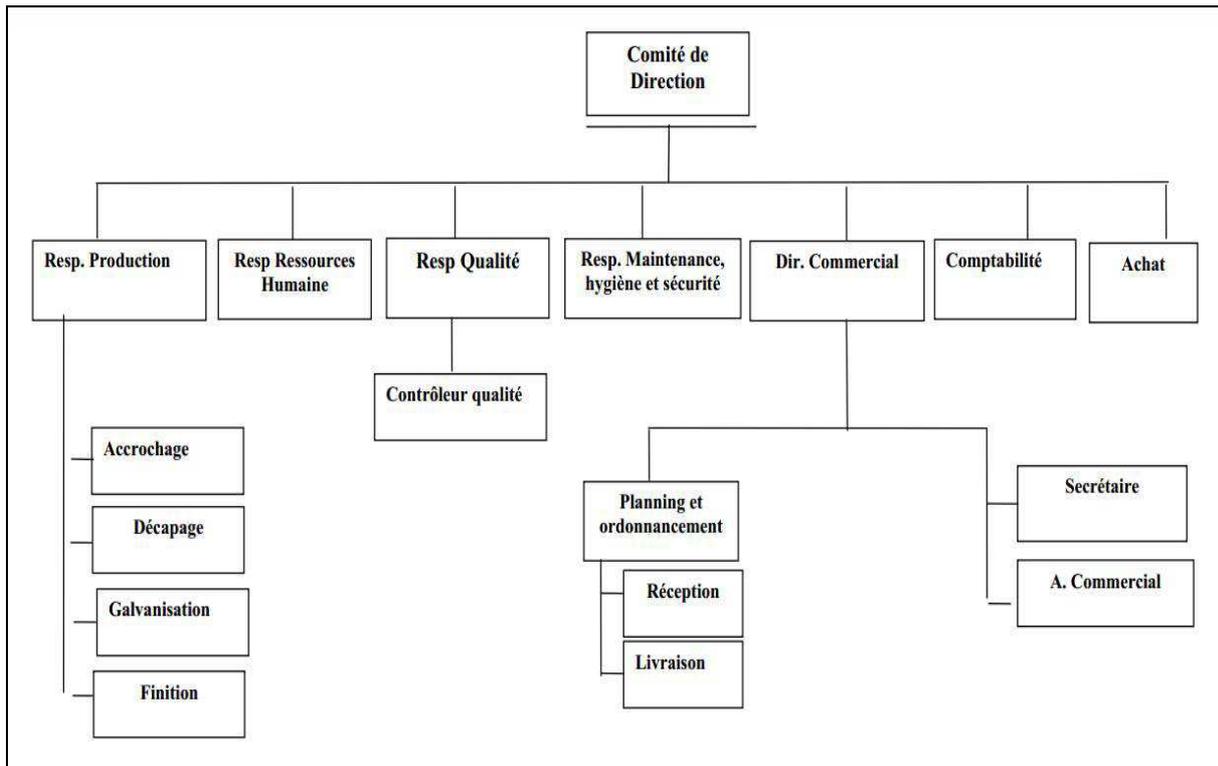


Figure 1.1 : Organigramme de MAFERI

1.3- Moyens de production

Les moyens de production dont dispose MAFERI sont le fruit d'une politique d'amélioration continue à la recherche de la satisfaction des exigences des clients.

- Surface couverte : 2000 m².
- Puissance installée : 320 kVa.
- Capacité de production : 4 t / heure
- Equipements de production :
 - Ligne de décapage à 5 baigns dont 4 baigns de dimension de Lxlxh : 7x1.42 x 2m et 1 baign de dimension de Lxlxh : 12.5x1.3x2 m
 - Baigns de rinçage de dimension de Lxlxh : 7x1.42x2 m
 - Baign de fluxage de dimension de Lxlxh : 7x1.42x 2 m
 - Four de galvanisation chauffé au mélange propane butane de dimension de Lxlxh : 12.20 x 1.60 x 2.00 m.



-
- Un four de galvanisation secourt de dimension 6.80x1.60x1.40 m
 - Une unité de traitement des effluents d'acide
 - Une étuve de chauffage de Lxlxh : 9x3x2 m

1.4- Moyens de contrôle

MAFERI dispose de l'équipement pour le contrôle d'épaisseurs de zinc suivant la norme ISO 1461. Les contrôles d'adhérence et de continuité sont sous-traités auprès d'un laboratoire agréé annuellement

1.5- Produits et marché

L'activité de MAFERI consiste en la galvanisation à chaud des pièces métalliques en sous-traitance pour le compte des clients.

Les secteurs qui font appel à la galvanisation sont :

- Bâtiment : Charpente, menuiserie métallique, ferronnerie...
- Electrique : Pylônes, candélabres...
- Télécommunication : Pylônes
- Maritime : chaudronnerie maritime
- Agriculture : Serres, tubes d'irrigation
- Transport : Glissières de sécurité, pylônes de voies ferrées,...
- Sport : Stades, complexes sportifs.

1.6- Système de management de la qualité

Vu que le secteur de la galvanisation au Maroc est très concurrentiel et pour gagner la confiance des plus importantes sociétés du royaume, MAFERI a commencé de développer sa stratégie en matière qualité par la mise en place d'un système de management de la qualité conforme à la norme ISO 9001 version 2000. Ce système a été certifié en décembre 2003 par l'organisme « Moody certification ».

Actuellement MAFERI prépare de certifier une autre fois son système de management de la qualité selon la norme ISO 9001 version 2008.



Partie II :

Processus de galvanisation à chaud au sein de MAFERI

Cette partie est consacrée à la description du processus de galvanisation à chaud au sein de MAFERI dès la réception des articles jusqu'à la finition.

Il s'agit donc de décrire le procédé



et

les équipements des différentes entités utilisées à MAFERI.

I- Introduction

L'acier présente des qualités mécaniques, économiques et esthétiques qui le rendent incontournable que ce soit pour la construction métallique ou pour les travaux traditionnels. Mais son utilisation expose les professionnels à un risque important : la corrosion, phénomène pouvant venir altérer les propriétés ce matériau.



Il est donc indispensable d'apporter une protection efficace afin d'augmenter la durée de vie de l'acier et surtout de préserver ses qualités esthétiques.

Parmi les solutions anticorrosion efficaces, la galvanisation - ou protection par le zinc - tient une place prédominante. Dans le cas d'une pièce en acier galvanisée, les matériaux acier et zinc forment une pile électrochimique où l'acier est la cathode et le zinc l'anode. (Potentiel du fer = - 0,44V et potentiel du zinc = - 0,76V).

L'acier sera protégé par le zinc qui se dissoudra dans une réaction cathodique lente. L'attaque du zinc (perte d'électrons, ou oxydation $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$) se fera avec la formation d'oxydes, d'hydroxydes, d'hydrocarbonate, etc., sels à caractère protecteur conduisant à une cicatrisation locale de la détérioration de l'acier qui n'est pas recouvert.

La galvanisation à chaud consiste en un recouvrement par immersion dans un bain de zinc fondu. Les pièces en acier ainsi revêtues sont appelées produits galvanisés.

Ce procédé dépasse le simple dépôt de zinc : le revêtement de zinc est métallurgiquement lié à l'acier de base car il se produit une réaction métallurgique de diffusion entre le zinc et le fer.

A cette protection électrochimique s'ajoute bien évidemment la protection physico-chimique (ou protection barrière) que confère une couche sur une surface (comme une peinture, métal...).

II- Description du processus de galvanisation à chaud

Le procédé de galvanisation à chaud se déroule en plusieurs étapes et selon une technique éprouvée. Elle est assurée par des spécialistes dans des installations spécifiques avec un mode opératoire exécuté et contrôlé, et suivant des normes nationales et internationales précises, qui apportent une grande fiabilité à cette protection anticorrosive.

La mise en œuvre du procédé de galvanisation à chaud au sein de MAFERI se déroule en deux grandes étapes principales : la première étape a pour but de préparer la surface de l'acier (décapage, rinçage, fluxage et étuvage) pour éliminer les oxydes de fer et favoriser la réaction métallurgique fer-zinc. La deuxième étape consiste à l'immersion de l'acier dans un bain contenant le zinc fondu à 450 °C.

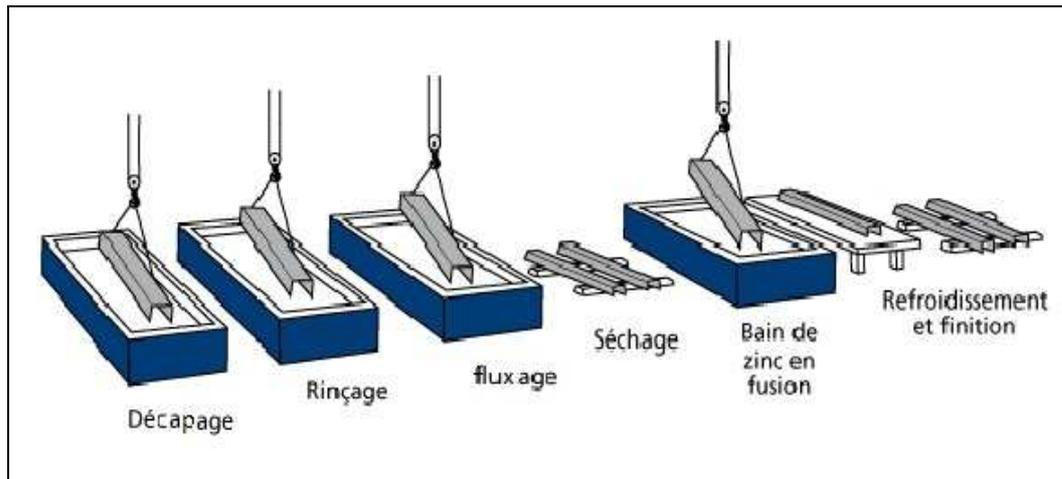


Figure 2.1 : Etapes de galvanisation à MAFERI

1- Préparation de la surface d'acier

a- Réception :

A l'arrivée de la marchandise livrée par le client, le réceptionniste procède à une vérification technique pour s'assurer de la nature des pièces livrées et qu'elles peuvent être traitées par galvanisation à chaud.

Pour cela, le réceptionniste vérifie et inspecte les paramètres suivants :

- Nature des matériaux : seuls l'acier et la fonte sablée qui sont acceptés,
- Aspect : absence de vernis et de peinture,
- Dimension : ne dépassant pas **15m × 1.45m × 3m**,
- Perçage : permettant une bonne évacuation de l'air et de zinc,
- Manutention : présence de solution pour la manutention (crochets, trou...),
- Forme : relever tout risque de déformation (tôle fine, pièces de décoration).

Ensuite, les pièces sont déchargées en évitant tout risque de déformation ou endommagement des pièces.

b- Accrochage :

Dans cette étape, la présence des solutions pour la manutention (crochets, trou...) est très importante pour assurer le déplacement facile de la charge et la sécurité du personnel.

L'accrochage des pièces à galvaniser doit permettre l'évacuation de l'air durant leur introduction dans les bains de traitement de surface et de galvanisation comme le montre la **figure 2.2** :

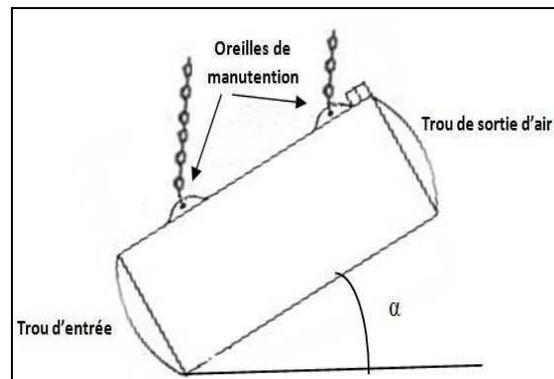


Figure 2.2 : Méthode d'accrochage des articles

c- Décapage :

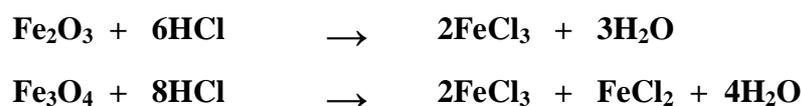
Le décapage de l'acier a pour objectif de mettre à nu la surface de l'acier, en éliminant les oxydes adhérents à sa surface. Les oxydes de fer étant incapable de réagir avec le zinc pour former les couches d'alliages du revêtement, ils vont s'opposer à la formation de l'alliage fer-zinc et empêchent la galvanisation à chaud en provoquant des tâches noires.

MAFERI dispose d'une ligne de décapage de quatre bains de densité initiale de 1.11 environ contenant :

- L'acide chlorhydrique 16%,
- L'antifumée pour réduire l'évaporation de l'acide chlorhydrique,
- Les tensioactifs qui enlèvent toutes les salissures et les graisses qui empêcheraient la dissolution des oxydes de fer superficiels,
- L'inhibiteur pour éviter l'attaque excessive de l'acier (surdécapage).

Elle utilise donc un décapage chimique en attaquant les oxydes de fer par l'acide chlorhydrique à 16% et les transformés en sels solubles dans l'eau. L'aspect de surface des pièces décapées par l'acide chlorhydrique est plus satisfaisant, relativement lisse et de couleur gris clair.

Les opérations de décapage successives conduisent à une diminution de la teneur en HCl et une augmentation de la teneur en fer suivant les réactions chimiques ci-dessous :





Quand la densité des bains atteignent 1.26, le responsable décapage procède au changement du bain.

d- Rinçage :

Le rinçage consiste à immerger les pièces sortant des bains de décapage dans l'eau, de façon à éliminer les entrainements d'acide et les particules métalliques (fer et oxyde de fer). Les entrainements d'acide vont polluer le bain de fluxage et diminuer la valeur du pH de la solution et augmenter le risque d'attaque de l'acier. Par conséquent, la consommation en ammoniacque sera plus importante pour maintenir le pH entre 2 et 4.5.

MAFERI utilise un rinçage courant (avec renouvellement continu de l'eau de rinçage) pour diminuer la charge en impuretés du bain de rinçage.

e- Fluxage :

La dernière étape avant la galvanisation proprement dite est une étape de prévention de la réoxydation de l'acier entre la sortie du décapage et l'entrée dans le bain de Zinc et qui favorise aussi la réaction métallurgique fer-zinc.

Le fluxage utilisé à MAFERI est appelé « procédé sec » où les pièces sont plongées dans une solution aqueuse à pH égale à 2, composée essentiellement du chlorure d'ammonium (NH_4Cl) et le chlorure de zinc (ZnCl_2) pendant 15s environ et séchées avant galvanisation.

f- Séchage :

Les pièces sont mises à sécher dans une étuve à une température de 40°C environ pour éviter les projections du zinc pendant la galvanisation et réduire le temps d'immersion.

2- Galvanisation à chaud

a- Galvanisation :

Après l'étape préparatoire de la surface, l'acier est plongé dans un bain de zinc en fusion (température comprise entre 445 et 455°C). La durée de cette immersion est fonction de la nature et l'épaisseur des pièces à galvaniser, elle peut prendre entre trois et dix minutes.

Afin d'uniformiser l'épaisseur du dépôt, les pièces doivent être immergées et émergées avec des vitesses bien déterminées.

b- Refroidissement et contrôle :



Les pièces galvanisées à chaud sont ensuite refroidies à l'air libre et contrôlées avant d'être livrées aux clients.

III- Les atouts de la galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud offre plusieurs avantages évidents par rapport aux autres méthodes de protection contre la corrosion. C'est pourquoi ce traitement est considéré prioritaire pour les professionnels de la construction métallique.

La galvanisation à chaud offre plusieurs avantages à savoir :

- **La durée de vie du revêtement est prévisible**

La durée de vie du revêtement est prévisible pourvu que les conditions climatiques auxquelles le revêtement est soumis soient connues. Une pièce galvanisée à chaud ne demande aucun entretien pendant plus de 30 ans, dans des conditions normales d'utilisation.

- **Des propriétés mécaniques remarquables**

La surface d'une pièce en acier galvanisée à chaud est constituée de plusieurs couches intermétalliques zinc-fer plus dures que l'acier. Ce revêtement offre une résistance exceptionnelle, ainsi qu'une bonne adhérence.

- **La galvanisation offre une protection sacrificielle**

Grâce à une protection galvanique, le revêtement de zinc se sacrifie pour protéger l'acier auquel il est lié. Cette protection dite "sacrificielle" continuera tant qu'il y aura du zinc à une proximité immédiate.

Si le revêtement qui a été galvanisé à chaud devient égratigné ou endommagé, l'acier agressé sera protégé contre la corrosion grâce au zinc qui l'entoure. Ceci est attribuable à la nature électrochimique du zinc plus élevée que celle de l'acier.

- **Un choix esthétique et durable qui met en valeur un ouvrage**

La galvanisation brute est une matière esthétiquement appréciée. On peut laisser la galvanisation brute, mais on peut aussi facilement appliquer sur cette protection un dépôt de peinture, dont la teinte s'harmonise avec l'esprit d'une réalisation et d'un site.



Partie III :

Réduction de la consommation du zinc

Cette partie est consacrée au traitement du projet, Les différentes études que nous allons développer dans la suite de cette partie sont :

- Déterminer les facteurs qui sont potentiellement influents sur la consommation du zinc par un plan de criblage.
- Suggérer une stratégie expérimentale optimale pour réduire la consommation du zinc.

Une analyse des causes de non conformités des produits est mentionnée à la fin de la partie.



I- Formalisation du problème

L'élément essentiel dans un procédé de galvanisation à chaud est le zinc. Ce métal 50% des dépenses dans les unités de galvanisation. Ce qui exige de ces unités de galvanisation des investissements importants liés principalement à l'achat du zinc

Or, depuis l'année 2006, le prix du zinc a connu des augmentations accélérées et continues dans le marché mondial (**figure 3.1**). Cela constitue une sérieuse contrainte pour le secteur de la galvanisation à chaud au Maroc. Alors une utilisation optimale de zinc est de plus en plus demandée pour atteindre un meilleur équilibre économique.



Figure 3.1 : Les prix du zinc dans le marché mondiale en USD/ Tonne

MAFERI en tant que spécialiste de la galvanisation à chaud au Maroc, cherche toujours à optimiser sa consommation du zinc. A cet égard, nous nous sommes engagés dans cette étude pour présenter une stratégie expérimentale optimale, permettant la réduction de la consommation du zinc et les coûts de non qualité.

II- Diagnostic de l'existant

Après la description du processus de galvanisation à chaud et le diagnostic des problèmes ayant une influence sur la consommation du zinc au sein de MAFERI, nous avons pu dégager plusieurs causes à l'aide de diagramme d'Ishikawa (**figure 3.2**).

Alors, au cours de cette période de stage, nous avons essayé d'étudier ces paramètres afin de réduire la consommation du zinc.

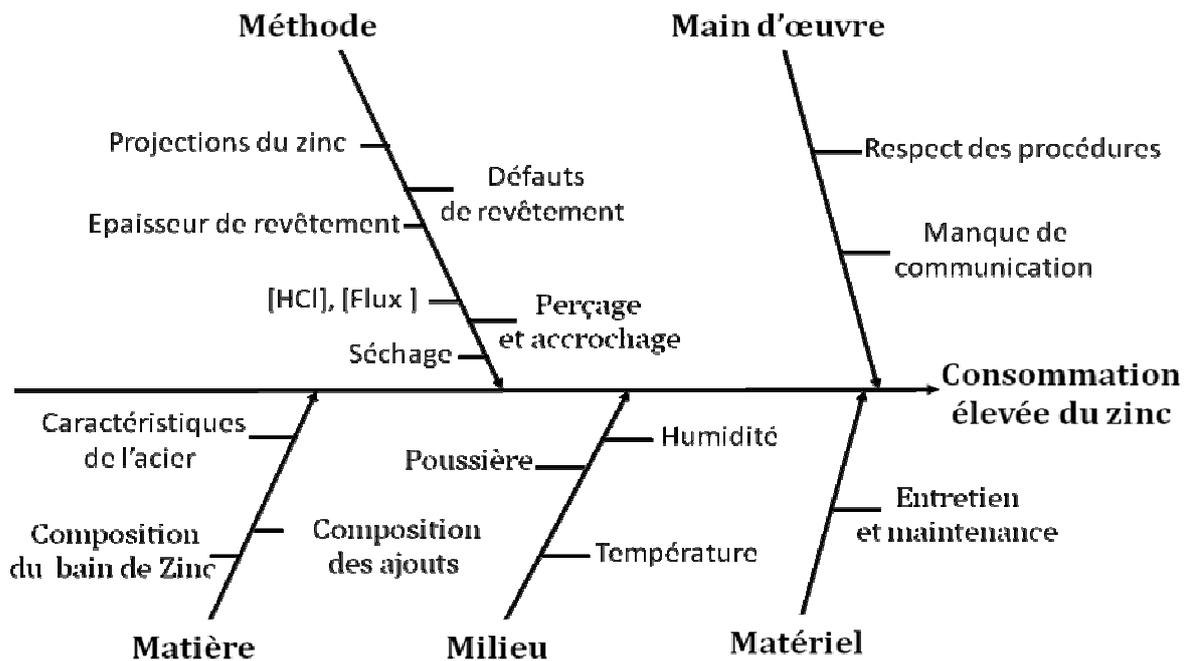


Figure 3.2 : Causes probables de la consommation élevée du zinc

Nous constatons donc que les principales sources de pertes des consommables et particulièrement le zinc se manifestent sous trois formes :

- l'épaisseur de revêtement de zinc des pièces revêtues dépasse beaucoup la norme ISO 1461,
- le nombre des pièces regalvanisées est très considérable,
- le taux des projections lors de l'immersion des pièces dans le bain de zinc fondu à 450 °C.

Alors, au cours de cette période de stage, nous avons essayé de jouer sur ces trois volets pour optimiser la consommation du zinc.

III- Réduction de l'épaisseur de revêtement de zinc

Comme on l'a évoqué précédemment, parmi les paramètres qui ont une influence sur la consommation du zinc est la surcharge. Autrement dit, l'épaisseur des pièces après galvanisation dépasse celui exigé par la norme NM ISO 1461 :2004.

Nous représentons sur la **figure 3.3** l'épaisseur de revêtement de zinc appliqué sur les différentes pièces galvanisées.



Sur la **figure 3.3**, on remarque que pour toutes les formes de pièces, l'épaisseur dépasse celui exigé par la norme. Ce qui engendre une surcharge et par la même occasion la consommation excessive de zinc.

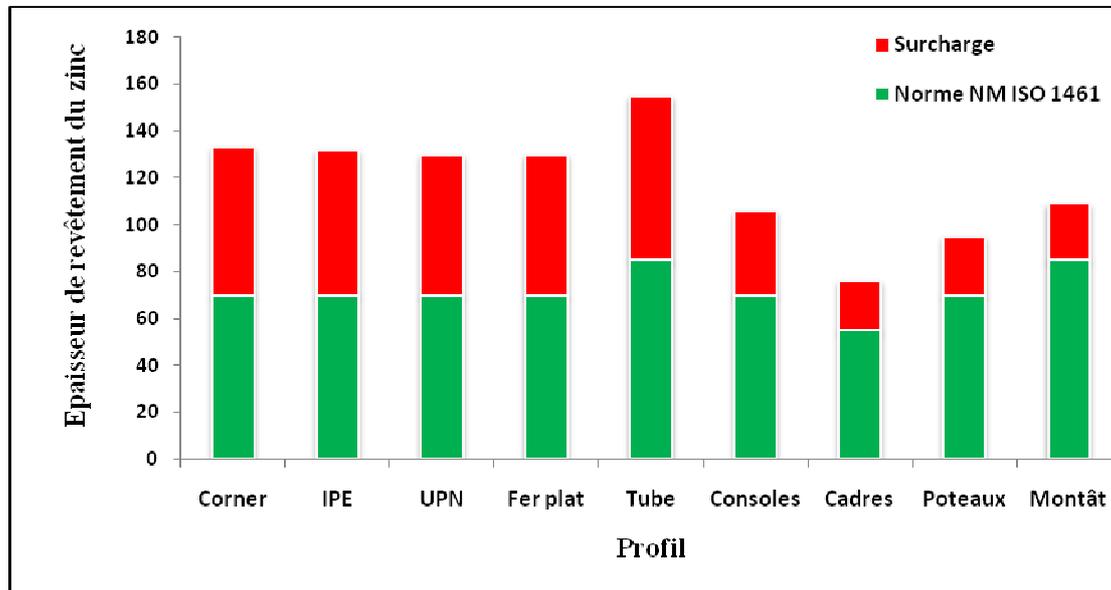


Figure 3.3 : Consommation du zinc de chaque profil

1- Objectifs de l'étude

Les exigences de la norme NM ISO 1461 : 2004 sont indiquées dans le tableau suivant :

Epaisseur de la pièce (mm)	Epaisseur locale de revêtement (μm)	Epaisseur moyenne de revêtement (μm)
$e \geq 6$	70	85
$3 \leq e < 6$	55	70
$1.5 \leq e < 3$	45	55
< 1.5	35	45
Pièces moulées ≥ 6	70	80
pièces moulées < 6	60	70

Tableau 3.1 : Epaisseur locale et moyenne de revêtements selon NM ISO 1461 : 2004.

Les objectifs des différentes analyses que nous allons développer dans la suite de cette partie sont :

- Estimer les effets des variables d'entrée sur les fluctuations de la variable de sortie et détecter les facteurs les plus influents.
- Suggérer une stratégie optimale pour minimiser l'épaisseur de revêtement de zinc

On souhaite réduire l'épaisseur de revêtement de zinc à $85\mu\text{m}$ et par la même occasion réduire la consommation du zinc.

2- Variables d'entrée

Les facteurs susceptibles d'influencer l'épaisseur de revêtement de zinc sont déterminés à l'aide au diagramme d'Ishikawa (**figure 3.4**).

Sur le diagramme d'Ishikawa sont positionnés les facteurs qui peuvent influencer l'épaisseur de revêtement de zinc.

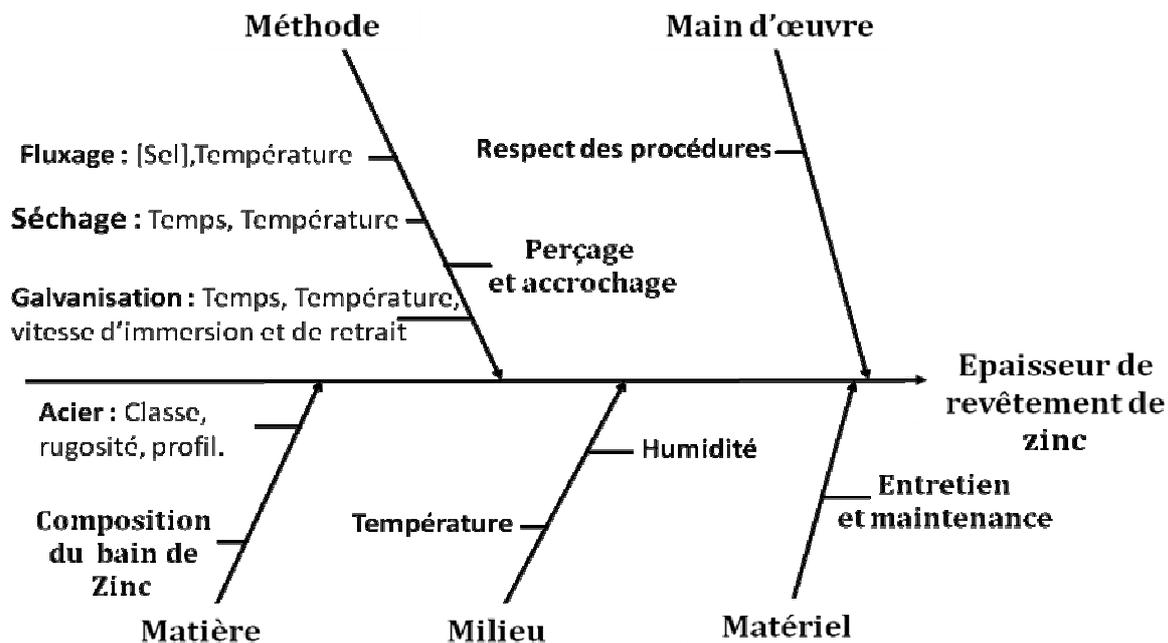


Figure 3.4 : Diagramme d'Ishikawa – Criblage des facteurs

Avec l'équipe de MAFERI, nous avons retenu les paramètres suivants :

- **Prof** : profil ou type des pièces à galvaniser à chaud.
- **$E_{p\text{pièce}}$ (mm)** : épaisseur des pièces en acier.
- **$D_{\text{séchage}}$ (min)** : durée de séchage des pièces dans le séchoir.
- **$\text{Temp}_{\text{four}}$ (°C)** : température du bain du zinc fondu.
- **D_{imm} (min)** : durée d'immersion dans le bain du zinc fondu.
- **V_{imm}** : vitesse d'immersion dans le bain du zinc fondu.



- V_{retrait} : vitesse de retrait du bain du zinc fondu.

Pour chaque facteur, on a fixé deux niveaux. Ces facteurs vont être menés vers un plan de criblage (matrice d'Hadamard) pour déterminer rapidement parmi les facteurs potentiellement influents sur la variable de sortie ceux qui le sont réellement.

3- Variable de sortie

La réponse mesurée au cours de ce projet est l'épaisseur de revêtement des pièces galvanisées à chaud. Cette épaisseur est déterminée par la méthode magnétique.

L'objectif de cette étude est de réduire l'épaisseur de revêtement des pièces galvanisées à chaud. Et cela, se fait en respectant les critères conduisant à la conformité du revêtement tels que l'aspect et l'adhérence selon la norme NM ISO 1461.

4- Facteurs non contrôlables

- Classe d'acier,
- Composition chimique du bain de zinc fondu,
- Rugosité des pièces d'acier.

IV- Criblage des facteurs

1- Stratégie expérimentale

La technique de criblage permet de déterminer rapidement parmi les facteurs potentiellement influents sur une réponse ceux qui le sont réellement.

On a sept paramètres, il est conseillé de faire une étude de criblage. Cette étude permettra de confirmer, sans ambiguïté, le poids de l'influence de ces paramètres sur l'épaisseur de revêtement de zinc. Nous allons choisir la matrice d'Hadamard, ce plan exige huit essais pour sept facteurs.

2- Facteurs – Modalités – Domaine expérimental

Le tableau suivant regroupe les niveaux des facteurs sujets de cette étude :

	Facteur	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
X ₁	Prof	Corner	Tube
X ₂	E _p pièce (mm)	3	4
X ₃	D _{séchage} (min)	5	15
X ₄	Temp _{four} (°C)	445	451
X ₅	D _{imm} (min)	3	6



X_6	V_{imm}	I	II
X_7	$V_{retrait}$	I	II

Tableau 3.2 : Niveaux des facteurs de l'étude de criblage

3- Modèle empirique

Les objectifs d'un plan d'expérience renvoient à une forme de modélisation. Les modèles additifs sans interaction sont associés aux études de criblage des facteurs.

Dans le criblage, l'additivité est une hypothèse forte : on détermine donc le poids de chacun des facteurs et on considère qu'il n'y a pas d'interactions. Ainsi, le modèle mathématique utilisé est un modèle linéaire du 1^{er} degré.

$$Y = c^{te} + \sum_{i=1}^k b_i X_i$$

Dans le cas présent, en utilisant les abréviations des facteurs, on obtient :

$$Y = b_0 + b_1.Prof + b_2.E_{pi\grave{e}ce} + b_3.D_{s\acute{e}chage} + b_4.T_{four} + b_5.D_{imm} + b_6.V_{imm} + b_7.V_{retrait}$$

Cette écriture reflète bien les objectifs de l'étude, en identifiant le poids de chacun des facteurs par le coefficient b_i .

4- Construction de la matrice du modèle

La matrice d'Hadamard se construit selon un algorithme qui donne la 1^{ère} ligne de la matrice d'expériences présentée dans la **figure 3.5**, puis les autres lignes sont générées par permutation circulaire de cette ligne. La dernière ligne de la matrice d'Hadamard est toujours une ligne ne comportant que des signes (-). Pour notre cas, on a sept facteurs, on doit donc choisir la deuxième ligne génératrice (N=8).

N = 4	+	+	-																					
N = 8	+	+	+	-	+	-	-																	
N = 12	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-													
N = 16	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+								
N = 20	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+				
N = 24	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+

Figure 3.5 : Lignes génératrices d'une matrice d'Hadamard



La matrice d'expériences que nous avons utilisé pour $N = 8$ est donc celle fournie dans le **tableau 3.3** :

Essais	Prof	$E_{\text{pièce}}$	$D_{\text{séchage}}$	T_{four}	D_{imm}	V_{imm}	V_{retrait}
1	+	+	+	-	+	-	-
2	-	+	+	+	-	+	-
3	-	-	+	+	+	-	+
4	+	-	-	+	+	+	-
5	-	+	-	-	+	+	+
6	+	-	+	-	-	+	+
7	+	+	-	+	-	-	+
8	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 3.3 : Matrice d'expériences de l'étude de criblage

5- Expérimentation

Les pièces qui ont été utilisées durant l'expérimentation sont galvanisées selon le processus de galvanisation à chaud décrit dans la deuxième partie.

Conditions d'expérimentation :

- Densité du bain de décapage,
- Température des bains de décapage : 22 °C,
- Température de rinçage : 24°C,
- pH du bain de rinçage : 2,
- Densité du sel de fluxage : 1.14,
- pH du bain de fluxage : 2,
- Température de fluxage : 20 °C,
- Agitation des pièces dans le bain du zinc fondu a été faite de la même façon pour toutes les expériences.



Le plan d'expérimentation consiste à traduire la matrice d'expériences en variables naturelles. C'est un tableau contenant des données directement utilisables au cours de la réalisation des expériences.

Le plan d'expérimentation avec lequel nous avons travaillé est donc fourni dans le **tableau 3.4** :

Essais	Prof	E _{pièce}	D _{séchage}	T _{four}	D _{imm}	V _{imm}	V _{retrait}	Epaisseur du zinc
		mm	min	°C	min			µm
1	Tube	4	15	445	6	I	I	121.00
2	Corner	4	15	451	3	II	I	103.00
3	Corner	3	15	451	6	I	II	98.60
4	Tube	3	5	451	6	II	I	103.00
5	Corner	4	5	445	6	II	II	110.00
6	Tube	3	15	445	3	II	II	79.00
7	Tube	4	5	451	3	I	II	94.50
8	Corner	3	5	445	3	I	I	87.50

Tableau 3.4 : Plan d'expérimentation de l'étude de criblage

V- Traitement des résultats

1- Outil informatique

L'outil informatique est nécessaire à la réalisation rapide et précise d'une étude menée à l'aide des plans d'expériences. Ceci peut être utile tout d'abord pour bénéficier d'une assistance à la génération du plan d'expérience (plan de criblage, plans optimaux, etc...), puis pour réaliser tous les calculs fastidieux (recherche des estimateurs, tests d'hypothèses, etc...) et enfin pour obtenir tous les types de sorties conviviales existant (diagrammes de Pareto, droite d'Henry, représentations graphiques des surfaces de réponses, etc...).

Toute l'analyse présentée dans cette partie a été menée à l'aide du logiciel NemrodW (Version 2000, Didier Mathieu, Jean Nony et Roger Phan-Thau-Luu, LPRAI, Marseille, France), qui nous a permis de générer la matrice d'expériences (matrice d'Hadamard) et de réaliser la plupart des traitements statistiques.

2- Analyse globale des résultats d'essais

Pour les résultats observés, il faut tout d'abord vérifier que leurs variations sont significatives. Nous pouvons observer rapidement l'étendue des réponses à l'aide de la boîte à moustache.

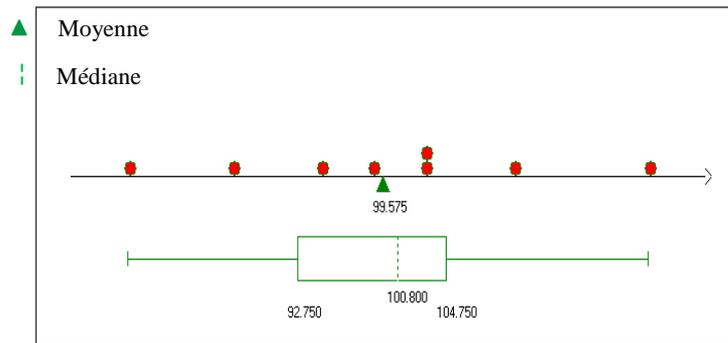


Figure 3.6 : Boîte à moustache de la réponse de criblage

Le tableau suivant regroupe les différents paramètres statistiques observés à partir de la boîte à moustache:

Réponse	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Médian	Q ₁	Q ₃
Épaisseur de revêtement	99.575	13.022	79.00	121.00	100.80	92.75	104.75

Tableau 3.5 : Statistiques de la réponse

Nous pouvons observer à partir du tableau ci-dessus qu'on a pu atteindre une épaisseur de 79µm. Et cela nous a donné un espoir pour diminuer l'épaisseur de revêtement de zinc à 85 µm malgré l'instabilité du procédé de galvanisation à chaud au sein de MAFERI.

Il convient maintenant de savoir si ces variations de l'épaisseur de revêtement du zinc traduisent la manifestation des effets des facteurs au cours du plan d'expériences ou la variabilité naturelle des réponses. L'analyse mathématique puis l'analyse statistique des résultats des essais, vont permettre de répondre également à cette question.

3- Analyse mathématique des résultats des essais

Dans le cas des plans de criblage, l'analyse mathématique des résultats consiste seulement à estimer les p inconnus du modèle en se basant sur l'emploi d'un modèle polynomial adapté qui peut faciliter par la suite la mise en œuvre de certains tests statistiques. Le logiciel NemrodW utilise la méthode du moindre carré pour calculer les coefficients du modèle. Le **tableau 3.6** regroupe les résultats obtenus :

Effets moyens	Coefficients (b _j)	
Moyenne	b ₀	99.575
Prof	b ₁	-0.200
E _{acier}	b ₂	7.550
D _{séchage}	b ₃	0.825
T _{four}	b ₄	0.200



D_{imm}	b5	8.575
V_{imm}	b6	-0.825
V_{retrait}	b7	-4.050

Tableau 3.6 : Estimations des coefficients de l'étude de criblage

4- Analyse graphique du modèle

La représentation des résultats sous forme graphique facilite souvent l'interprétation des informations obtenues. Il existe différents types de graphiques pour illustrer les effets moyens des facteurs : les plus courants sont le diagramme en bâtons et Pareto.

a- Diagramme en bâtons

L'histogramme des effets permet de juger directement des effets des facteurs. La surface de chaque bâton est proportionnelle à la valeur de ce facteur sur la variation de la réponse.

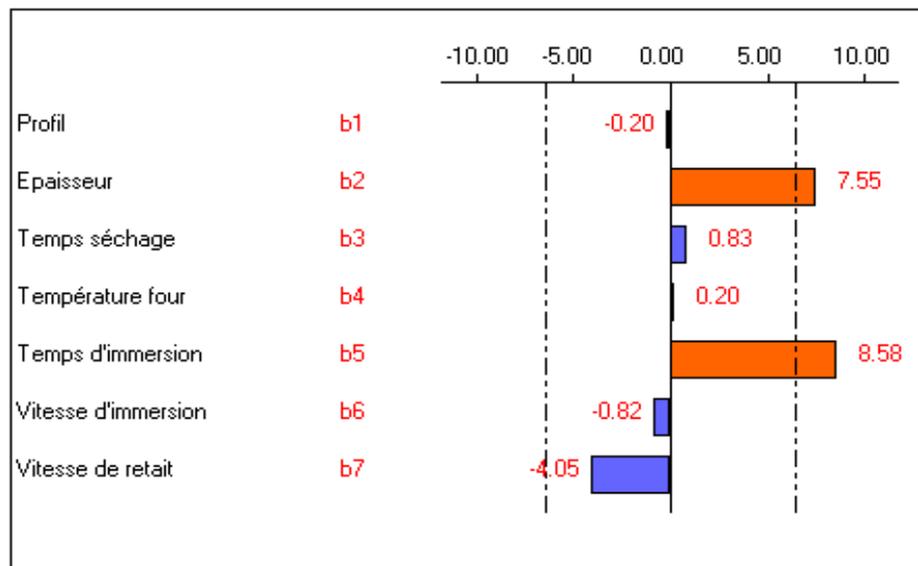


Figure 3.7 : Diagramme en bâtons des effets moyens

C'est ainsi que l'on note l'extrême importance des facteurs *temps d'immersion* et *épaisseur des pièces galvanisées*. Dans une moindre mesure Il vient ensuite le facteur qualitatif *vitesse de retrait*.

A l'opposé, on remarquera les très faibles valeurs des effets pour les facteurs *profil*, *temps séchage*, *température four* et *vitesse d'immersion*.

Certains résultats étaient attendus, en particulier en ce qui concerne la faiblesse de l'influence du facteur *profil*, ainsi que l'aspect fortement significatif du facteur *épaisseur* des pièces et, ceci est confirmé par la norme NM ISO1461 : 2004.

b- Analyse de Pareto



L'analyse de Pareto permet de calculer les contributions apportées par chacun des facteurs pour expliquer la variation de la réponse étudiée.

Les contributions sont calculées par la relation suivante :

$$P_j(\%) = (b_j^2 / \sum b_j^2)$$

La contribution de chaque facteur est reportée dans le **tableau 3.7** :

b_j	b_j^2	P_j
b_1	-0.200	0,04
b_2	7.550	57,00
b_3	0.825	0,68
b_4	0.200	0,04
b_5	8.575	73,53
b_6	-0.825	0,68
b_7	-4.050	16,40

Tableau 3.7 : Contributions des facteurs

Les contributions des facteurs sont alors ordonnées par ordre croissant puis représentées sous forme de diagramme en bâtons. Le diagramme de Pareto est complémentaire au tracé des effets moyens. Il permet de déterminer les facteurs influents par ordre de contribution décroissante.

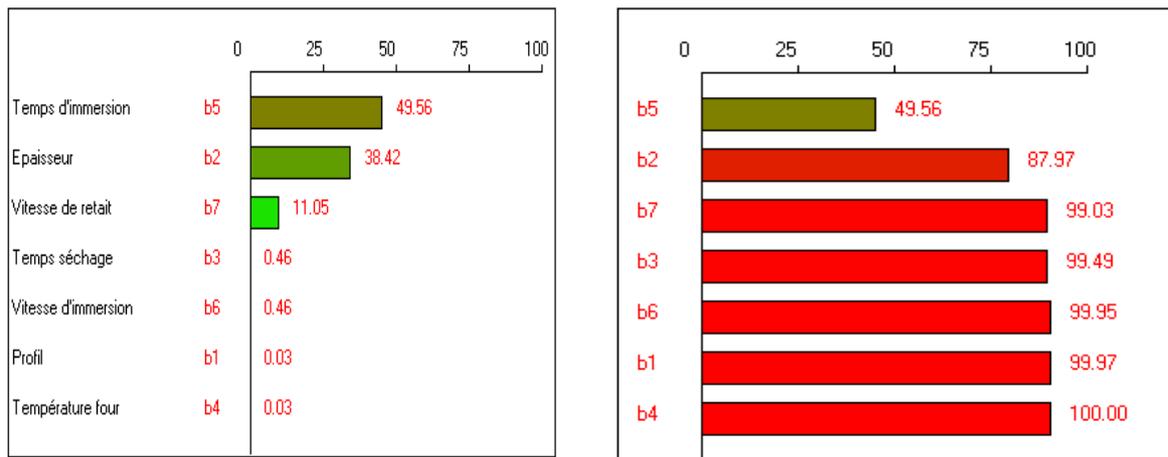


Figure 3.8 : Diagramme de Pareto



Le diagramme de Pareto (**figure 3.8**) renforce la prédominance des facteurs *temps d'immersion et épaisseur des pièces galvanisées* qui apparaissent les premiers avec des bâtons beaucoup plus grands que les autres.

Il est également possible de tracer la fonction cumulée de ces contributions (diagramme de Pareto cumulé).

Nous pouvons voir qu'à eux seuls, les deux premiers facteurs (*temps d'immersion et épaisseur des pièces*) expliquent plus de **87%** de la variation de la réponse (*Épaisseur de revêtement du zinc*).

5- Conclusion de l'étude

L'étude de criblage permet de regrouper les facteurs en trois classes :

- Les paramètres influents : *Temps d'immersion et l'épaisseur de la pièce*
- Les paramètres non négligeables : *Vitesse de retrait*
- Les paramètres négligeables : *Temps de séchage, Vitesse d'immersion, Température du four et le profil des pièces.*

6- Validation des résultats

Pour réduire l'épaisseur de revêtement de zinc, nous avons choisi de mettre le *temps d'immersion* au niveau bas (3 min) car l'épaisseur de revêtement en zinc varie proportionnellement avec le *temps d'immersion* (voir **figure 3.10**).

La validation des résultats a été réalisée sur des corners de 4 mm. Le **tableau 3.8** résume les conditions expérimentales. Les résultats obtenus à partir du plan de criblage sont indiqués dans le **tableau 3.9**.

Essais	Prof	Ep _{acier}	D _{séchage}	Temp _{four}	D _{imm}	V _{imm}	V _{retrait}
		<i>mm</i>	<i>min</i>	<i>°C</i>	<i>min</i>		
i	Corner	4	10	450	3	I	II

Tableau 3.8 : Conditions expérimentales

Essai	Épaisseur de revêtement en zinc (µm)	Aspect du métal
-------	--------------------------------------	-----------------



1	95	Conforme
2	87	Conforme
3	94	Conforme
4	89	Conforme
5	94	Conforme
6	96	Conforme
7	97	Conforme
8	92	Conforme

Tableau 3.9 : Résultats des essais

Le tableau suivant regroupe les différents paramètres statistiques des réponses obtenues dans l'étape de validation :

Réponse	Moyenne	Ecart-Type	Min	Max	Médian
Epaisseur de revêtement	93	3,46	87	97	93

Tableau 3.10 : Statistiques de la réponse des essais de validation

Malgré qu'on nous n'avons pas pu atteindre l'objectif fixé par le projet. Les résultats obtenus sont très satisfaisants car la surcharge a été minimisée de 90% à 35 % tout en gardant les critères de conformité du revêtement selon la norme NM ISO 1461 : 2004.

VI- Analyse des causes des non conformités

Après un suivi continu et rigoureux du processus de galvanisation au sein de MAFERI, pour déterminer les causes principales des défauts de revêtement, nous avons pu dégager plusieurs paramètres.

Sur le diagramme d'Ishikawa (**figure 3.9**) sont positionnés les facteurs qui peuvent affecter la conformité de revêtement des pièces galvanisées à chaud au sein de MAFERI.

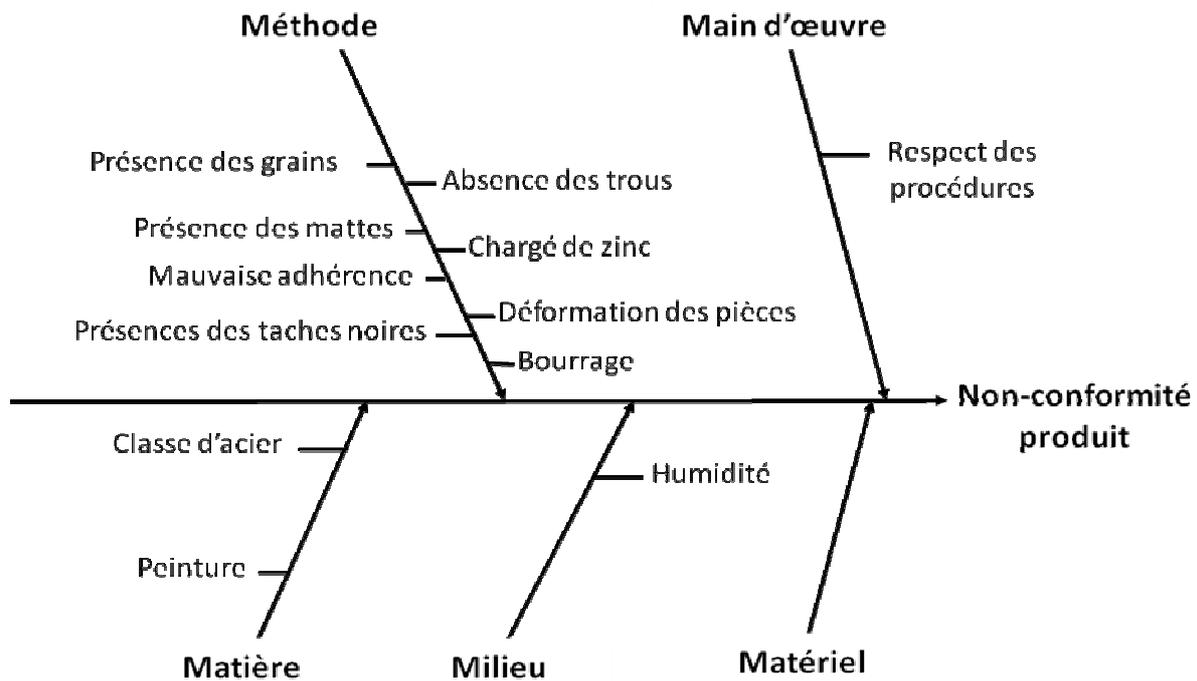


Figure 3.9 : Facteurs affectant la conformité du revêtement de zinc

Les principales causes sont enregistrées au niveau de la méthode de travail, le **tableau 3.11** regroupe les différentes anomalies enregistrées et les actions correctives à mener.

VII- Plan d'actions et d'améliorations

Anomalie	Causes	Entité	Action corrective
Pièces chargées de zinc	Détérioration du fil	Accrochage	S'assurer toujours de la qualité d'accrochage.
	Mauvais retrait	Bain de zinc	Retirer les pièces inclinées du bain de zinc avec la vitesse adéquate et une centrifugation des pièces qui sont plongées en vrac pour éliminer l'excès du zinc.



	Manque de perçage	Accrochage	Prévoir des perçages qui permettront au zinc et à l'air de circuler librement dans la pièce et de s'écouler correctement. Vérifier en permanence que tous les articles sont perçus avant de les immerger dans le bain de zinc fondu.
Mauvaise adhérence	Articles brûlés	Séchoir	Revoir la conception du séchoir pour ne pas brûler les pièces qui sont proche des sorties de l'air sèche. Procéder à une purification de sel.
	Contact des articles	Accrochage	Respecter les distances entre les pièces lors de l'accrochage dans les gabarits,
Présence des grains	Agitation et raclement	Bain de zinc	Retirer les pièces inclinées du bain de zinc avec raclement rapide et une centrifugation continu. Garder la température de bain à 450 °C.
Présence des mattes	Manque de dématage, de perçage et d'agitation	Bain de zinc	Démater le bain d'une façon régulière. Procéder à une galvanisation séquentielle lorsqu'il s'agit des pièces de grande dimension qui peuvent atteindre la surface des mattes.
Présence des tâches noires	Mauvaise décapage	Décapage	Estimer le temps de décapage à partir de l'aspect visuel de l'acier.
Tâches d'acide	Mauvaise gestion du terrain	Finition	Revoir la gestion du terrain (5S).
Déformation	Mauvaise gestion des gabarits	Avant décapage	Ne pas mettre les gabarits l'un sur les autres.
		Après revêtement Finition	Toutes les gabarits contenant des articles risquent de déformation doivent décrocher directement au zone de finition.



Tableau 3.11 : Action d'amélioration du processus de galvanisation

Conclusion

Dans le cadre de projet de fin d'études, avec l'équipe de MAFERI, nous nous sommes intéressés à la réduction de la consommation du zinc dans le procédé de galvanisation à chaud.

Nous avons ensemble répertorié les différents paramètres susceptibles influencés l'épaisseur de revêtement et par la même occasion la consommation du zinc.



Notre choix s'est porté sur les plans d'expériences et en particulier le plan de criblage (matrice d'Hadamard) pour organiser les essais.

Les résultats de ce plan nous a permis d'évaluer les effets des paramètres sur l'épaisseur de revêtement et de les hiérarchiser sur leur poids.

Ceci nous a permis de proposer et d'essayer un réglage qui a donné des résultats très encourageant.

L'analyse des causes de non-conformités a montré que les principaux problèmes sont enregistrés au niveau de la méthode de travail. Pour assurer une bonne galvanisation il faut assurer un bon traitement de surface, bon étuvage, garder la température du bain à 450 °C et éviter un temps d'immersion long dans le bain de zinc. (max. 4 min.).

Les projections du zinc au niveau du bain de zinc fondu sont dues au choc thermique lors de l'immersion des pièces froides (20 °C) dans le bain de zinc fondu à 450 °C. Pour minimiser ces projections, il faut revoir le système de préchauffage.

Liste des figures

Figure 1.1 : Organigramme de MAFERI

Figure 2.1 : Etapes de galvanisation à MAFERI

Figure 2.2 : Méthode d'accrochage des articles

Figure 3.1 : Les prix du zinc dans le marché mondiale en USD/ Tonne

Figure 3.2 : Causes probables de la consommation élevée du zinc

Figure 3.3 : Consommation du zinc de chaque profil

Figure 3.4 : Diagramme d'Ishikawa – Criblage des facteurs

Figure 3.5 : Lignes génératrices d'une matrice d'Hadamard

Figure 3.6 : Boîte à moustache de la réponse de criblage

Figure 3.7 : Diagramme en bâtons des effets moyens



Figure 3.8 : Diagramme de Pareto

Figure 3.9 : Facteurs affectant la conformité du revêtement de zinc

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Epaisseur locale et moyenne de revêtements selon NM ISO 1461 : 2004.

Tableau 3.2 : Niveaux des facteurs de l'étude de criblage

Tableau 3.3 : Matrice d'expériences de l'étude de criblage

Tableau 3.4 : Plan d'expérimentation de l'étude de criblage

Tableau 3.5 : Statistiques de la réponse

Tableau 3.6 : Estimations des coefficients de l'étude de criblage

Tableau 3.7 : Contributions des facteurs

Tableau 3.8 : Conditions expérimentales

Tableau 3.9 : Résultats des essais

Tableau 3.10 : Statistiques de la réponse des essais de validation

Tableau 3.11 : Action d'amélioration du processus de galvanisation

Bibliographie

Introduction aux plans d'expériences - 3ème édition - Jacques Goupy, Lee Creighton

François RABIER : Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire.

Introduction aux plans d'expériences, Jacques Goupy, Lee Creighton, 3^o édition.

Matrices d'expériences de criblage, Matrices d'expériences d'Hadamard, LARAI – Méthodologie de la recherche expérimentale.

Les Plans d'expériences par les méthodes de TAGUCHI, Maurice PILLET; Edition d'organisation ; 3^o édition 2001.

Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques, Walter Tinsson.

Plans d'expérience factoriels: Construction et propriétés des fractions de plans, Dominique Collombier.



Principes d'expérimentation: planification des expériences et analyse de données, Pierre Dagnelie.

Traitements de surface des métaux Galvanisation à chaud / Danièle QUANTIN/
Technique de L'ingénieur.

Norme NM ISO 1461 : 2004.

Manuel qualité de MAFERI, MQ.DG.01.8 ,02Janvier 2007.

Documents des cours.

Webographie

<http://www.Maferi.ma/>

<http://www.corbec.net/index.php>

http://gwenaelm.free.fr/Physique/Cadre/index_tab.html

<http://www.cprac.org/en/static/DAOM/fra/html/exe4f.htm>

<http://www.verzinkereien.ch/bild4f.htm>

<http://www.galvazinc.com>

<http://www.francegalva.fr/>

<http://www.galvaunion.com/>

Annexe 1 : Norme NM ISO 1461

Surcharge des différents profils

Pour bien décrire le problème, on a mené une mesure de l'épaisseur de la couche du zinc des différentes profils par la méthode magnétique, les résultats obtenus ont montré que la plupart des pièces sont surchargées du zinc.

Profil	Epaisseur de la pièce	Epaisseur de revêtement de zinc (μm)	Couche du zinc selon NM ISO 1461 (μm)	Surcharge (%)
Corner	4	133	70	90
IPE	5	132	70	89
UPN	4	130	70	86
Fer plat	5	130	70	86
Tube	7	155	85	82
Consoles	3	106	70	51
Cadres	2	76	55	38
Poteaux	4	95	70	36
Montât	6	109	85	28

Tableau A.1 : Consommation de zinc des différents profils



Méthode de mesure de l'épaisseur par la méthode magnétique

Sur chaque surface de référence d'au moins 1 000 mm², nous avons effectué au minimum cinq relevés magnétiques. Comme seule la valeur moyenne correspondant à l'ensemble de chaque surface de référence doit être égale ou supérieure aux valeurs d'épaisseur locale données dans le tableau A.2, il importe peu que l'un de ces relevés soit inférieur aux valeurs données dans le tableau A.2.

Les mesurages d'épaisseurs ne doivent pas être réalisés sur les surfaces coupées, ni sur les surfaces situées à moins de 10 mm de bords, ni sur les surfaces découpées au chalumeau ni dans les coins.

Epaisseur de la pièce (mm)	Epaisseur locale de revêtement (µm)	Epaisseur moyenne de revêtement (µm)
$e \geq 6$	70	85
$3 \leq e \leq 6$	55	70
$1.5 \leq e < 3$	45	55
< 1.5	35	45
Pièces moulées ≥ 6	70	80
pièces moulées < 6	60	70

Tableau A.2 : Epaisseur locale et moyenne de revêtements selon NM ISO 1461 : 2004.

Annexe 2 : Plans d'expériences

Méthodologie des plans d'expériences

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats (Norme ISO 3534-3).

Intérêts des plans d'expériences

Les plans d'expériences va nous aider à structurer notre démarche expérimentale de manière différente, à confronter et à valider nos propres hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à résoudre les problèmes.

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche et développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels.

On peut notamment citer :

- industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- industries mécaniques et automobiles



- industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure
- prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité. Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation de résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier.

Il faut néanmoins comprendre que les plans d'expériences ne sont pas un outil destiné a priori à la recherche fondamentale car ils ne permettront jamais une explication du phénomène physico-chimique étudié.

Annexe 3 : Outils de formulation du problème

Pour formaliser le problème, nous avons fait appel à plusieurs outils de formalisation des problèmes à savoir :

- [Le diagramme de Pareto](#)
- [Le QOOQCP](#)
- [Les 5 pourquoi](#)
- [Le diagramme causes-effet](#)

Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto permet de hiérarchiser les problèmes en fonction du nombre d'occurrences et ainsi de définir des priorités dans le traitement des problèmes.

Cet outil est basé sur la loi des 80/20. Autrement dit cet outil met en évidence les 20% de causes sur lesquelles il faut agir pour résoudre 80 % du problème. Il sera utile pour déterminer sur quels leviers on doit agir en priorité pour améliorer de façon significative la situation.

QOOQCP

L'objectif de cet outil est de se poser toutes les questions relatives à un problème afin d'en fixer le périmètre en vue d'une future démarche de résolution de problème.

Il est utilisé dès lors que l'on cherche à avoir une vision complète d'une situation. La réponse à ces questions permet de fournir un consensus quand à la nature et à effet du problème.



C'est un outil qui cherche à rendre factuel et exhaustive la description d'un problème.

Les 5 pourquoi

Cet outil consiste à se poser la question "Pourquoi ?" 5 fois de suite. L'objectif de cet outil est de chercher en profondeur les causes qui expliquent l'apparition d'un problème.

C'est sans doute l'outil le plus simple mais il est d'une efficacité redoutable et peut être employé dans de multiples occasions. Alors pourquoi s'en priver ?

Il est souvent utilisé dans le cadre d'une résolution de problème après avoir réalisé un diagramme de cause à effet. Il sera utile pour déterminer quelles sont les causes racines des problèmes.

Diagramme causes-effet

Ce diagramme permet de déterminer l'ensemble des causes qui produisent un effet étudié.

Souvent, l'étape de recherche des causes est négligé ce qui engendre des erreurs de diagnostic. Si le mauvais levier est choisi. Cela a un impact directs sur le délai, la qualité, et sur les coûts engagés pour résoudre le problème.

Il est souvent utilisé dans le cadre d'une résolution de problème. Il sera utile pour déterminer de façon pertinente sur quels leviers on doit agir pour améliorer la situation.

Ce diagramme, sous l'aspect d'une arête de poisson, est composé d'un tronc principal au bout duquel est indiqué l'effet étudié et de 5 branches correspondant à 5 familles de causes :

- Main d'œuvre : connaissances, compétences, comportement...
- Milieu : température, luminosité, humidité, pression, ambiance...
- Matière : matière première ou matière utilisée...
- Méthode : systématique de travail, marche à suivre, description de la tâche...
- Moyens : Machines, outils...

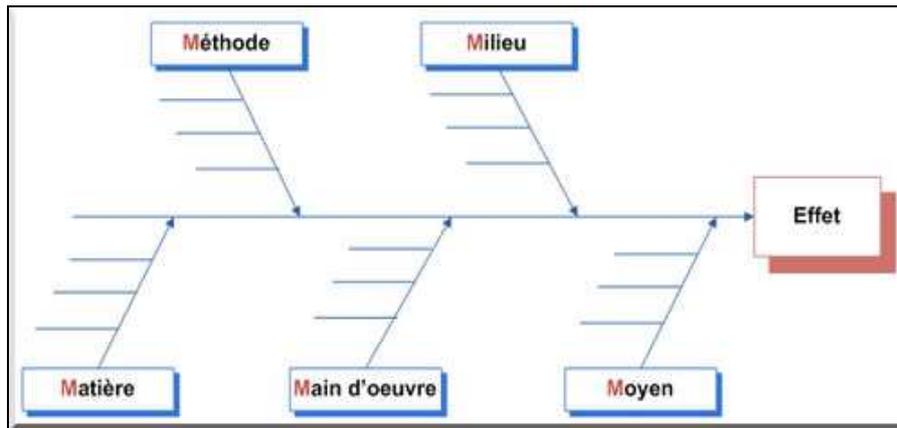


Figure A.3 : Diagramme causes-effet