



PROTECTION CONTRE LA CORROSION

par métallisation au zinc-aluminium

TABLE DES MATIÈRES

Préface	5
Introduction	6
1. Organigramme de la protection contre la corrosion par le zinc	10
1.1. Qu'est-ce que la corrosion ?	10
1.2. Pourquoi utiliser le zinc & ses alliages ?	11
1.3. Organigramme des méthodes disponibles	13
1.3.1. La galvanisation à chaud	14
1.3.1.1 La galvanisation continue ou le procédé de Sendzimir	14
1.3.1.2 La galvanisation à façon	15
1.3.2. L'électrozingage	19
1.3.2.1 Le procédé continu	19
1.3.2.2 La galvanoplastie	20
1.3.3. La métallisation (schoopage)	23
1.3.4. La shérardisation (zingage par diffusion)	24
1.3.5. La méthode mécanique & adhésive ou le zingage mécanique	25
1.3.6. La peinture	26
1.3.7. La méthode sacrificielle (anodes)	26
1.3.8. La comparaison des épaisseurs caractéristiques des couches des différentes méthodes de protection.	27
2. La métallisation, le procédé	30
2.1. Histoire	30
2.2. La classification de la métallisation [45]	30
2.2.1. La projection à l'arc (AS)	31
2.2.2. Le plasma (APS, VPS, APSS)	31
2.2.3. La projection au gaz froid (CGS)	31
2.2.4. La projection de fil à la flamme (WFS)	32
2.2.5. La projection de poudre à la flamme (PFS)	32
2.2.6. La métallisation par détonation (DGS)	32
2.2.7. La projection de poudre à la flamme à haute vitesse (HVOF/HVAF)	33
2.2.8. La métallisation au laser (LC)	33
2.3. La préparation de la surface	33
2.3.1. La rugosité	34
2.3.2. La propreté et le sablage	37
2.4. La métallisation	38
2.4.1. Le prétraitement de la surface	38
2.4.2. Le procédé	39
2.4.3. Les paramètres	41

2.5. Le suivi de la qualité	42
2.5.1. <i>Contrôle de la qualité</i>	42
2.5.2. <i>Le mesurage</i>	43
2.5.3. <i>La mesure de l'épaisseur</i>	49
2.5.4. <i>La porosité de la couche de protection</i>	51
2.6. L'adhérence	57
2.6.1. <i>Le mécanisme d'adhérence</i>	57
2.6.2. <i>L'adhérence vis-à-vis des couches de peinture</i>	58
2.6.3. <i>Le stockage et le transport</i>	59
2.7. La sécurité	59
2.7.1. <i>Les moyens de protection personnelle pour le métalliseur</i>	59
2.7.2. <i>L'inflammabilité de la poussière de métallisation</i>	60
2.7.3. <i>L'explosivité</i>	60
2.7.4. <i>Reach</i>	60
3. Zinc-aluminium	64
3.1. Évolution	64
3.2. Étude comparative de la projection thermique de zinc et de zinc-aluminium	64
3.2.1. <i>L'étude Cefracor</i>	64
3.2.2. <i>L'étude Vieille Montagne [65,66]</i>	65
3.2.3. <i>Études récentes avec un arc électrique</i>	72
3.2.4. <i>Etude comparative des couches de protection par métallisation dans un environnement offshore & maritime [40]</i>	74
3.3. Coûts du cycle de vie	78
4. Systèmes duplex et multicouches	86
4.1. Construction	89
4.1.1. <i>Composition et conception du matériau de base</i>	89
4.1.2. <i>Construction et soudure</i>	89
4.1.3. <i>Constructions intégrées dans la maçonnerie</i>	90
4.1.4. <i>Système de peinture</i>	92
4.2. Les différentes classes de corrosion	96
4.2.1. <i>Classe de corrosion C1</i>	96
4.2.2. <i>Classe de corrosion C2</i>	96
4.2.3. <i>Classe de corrosion C3</i>	97
4.2.4. <i>Classe de corrosion C4</i>	98
4.2.5. <i>Classes de corrosion lourde</i>	99
4.2.5.1. <i>Classe de corrosion C5</i>	99
4.2.5.2. <i>Classe de corrosion Cx</i>	100
4.2.6. <i>Classes de corrosion immergées ou enfouies</i>	101
4.2.6.1. <i>Im1 – immersion dans eau douce</i>	101
4.2.6.2. <i>Im2 – immersion dans eau de mer ou eau saumâtre sans protection cathodique</i>	103
4.2.6.3. <i>Im3 – emplacements souterrains</i>	104
4.2.6.4. <i>Im4 – immersion dans eau de mer ou eau saumâtre avec protection cathodique</i>	105
4.2.7. <i>Durée de vie</i>	106
5. Références	107





PRÉFACE

A l'occasion du 40e anniversaire de la Fédération des métalliseurs de Belgique (FMB) et en collaboration avec son membre de soutien Zinacor, nous avons décidé de prendre le temps de rédiger une vue d'ensemble approfondie de la métallisation.

Le présent ouvrage détaillé a pu être réalisé grâce à l'engagement et aux travaux de recherche des Dr.-Ing. Didier Rollez et Johan Dumoulin, en collaboration avec Stefan Hof. Il peut être considéré comme un ouvrage de référence sur la protection contre la corrosion de l'acier par une métallisation au zinc ou au zinc-aluminium.

INTRODUCTION

Ce travail a été réalisé pour procurer une vue d'ensemble succincte de l'évolution de la métallisation en tant que protection contre la corrosion de l'acier par le zinc et un alliage zinc-aluminium. Il présente l'état des lieux du XXI^e siècle.

Le chapitre sur l'action de la corrosion et ses conséquences aborde plus en profondeur les raisons de l'utilisation du zinc et surtout de l'alliage zinc-aluminium comme matériau contre cette corrosion. Un récapitulatif décrit brièvement les méthodes les plus usuelles pour la protection de l'acier par le zinc et ses alliages.

Le deuxième chapitre développe le procédé de métallisation. Il présente les procédés de métallisation les plus usuels et leur action dans la protection contre la corrosion. Les prétraitements nécessaires de la surface de l'acier, la métallisation et le contrôle qualité sont décrits en détail.

L'histoire de la puissance de l'alliage zinc-aluminium est explicitée dans le troisième chapitre. Les études les plus récentes concernant la protection contre la corrosion par l'alliage zinc-aluminium, ainsi que les coûts d'exploitation ("cost of ownership") y sont exposés.

Enfin, un chapitre est dédié aux systèmes duplex normalement utilisés pour offrir une solution aux différentes conditions environnementales dans les différentes classes de corrosion.



WHITE
SALTS
8128
SIZE 10
NorWear
MADE IN USA
CE
N120C-1130

NorWear



CHAPITRE 1

ORGANIGRAMME DE LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION PAR LE ZINC

1. Organigramme de la protection contre la corrosion par le zinc

1.1. Qu'est-ce que la corrosion ?

La norme ISO 8044 [1] définit la corrosion comme une interaction physicochimique entre un métal et l'environnement, interaction qui provoque des modifications des propriétés du métal et qui entraîne souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de l'environnement ou du système technique formé par ces deux facteurs. La corrosion est un processus totalement naturel, mais les coûts qui en découlent sont considérables, avec une perte annuelle estimée de 2,5% du PNB.

Quatre éléments doivent converger pour provoquer la corrosion :

- / Une anode ;
- / Une cathode ;
- / Un électrolyte, souvent de l'eau ;
- / Un transfert d'électrons.

La corrosion est un processus progressif qui se déroule en plusieurs étapes. La corrosion ne peut survenir que si des électrons sont transmis par un électrolyte, généralement de l'eau.

Ce phénomène peut être empêché si le processus est interrompu par une barrière intercalée entre l'acier et l'eau ou l'humidité.

On dispose ici de différentes possibilités :

- / La peinture ;
- / La galvanisation à chaud ;
- / La métallisation au zinc (TSZ) ;
- / La métallisation par un alliage zinc-aluminium (TSZA) ;
- / Le système duplex ;
- / Le courant forcé (imposé/induit).

Le zinc ou les alliages de zinc sont généralement utilisés à cette fin, déjà depuis plus de 100 ans. Il s'ensuit qu'à l'heure actuelle, plus de 50% de la consommation mondiale est utilisée pour la protection contre la corrosion.

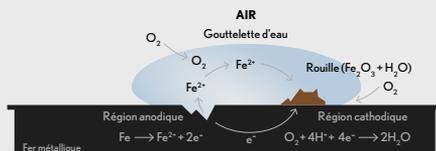


Fig.1.1 Principe de l'action de la corrosion

Consommation primaire de zinc

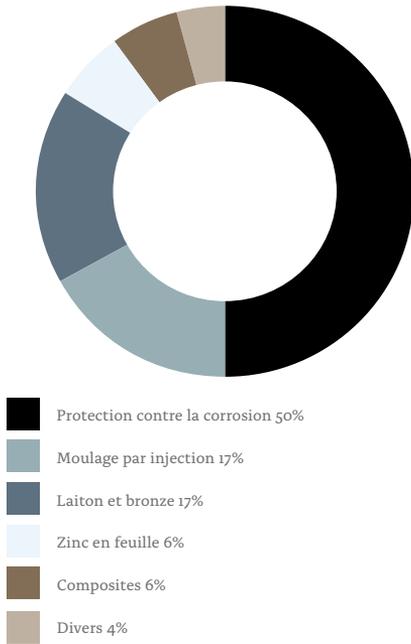


Fig. 1.2 Domaines d'application du zinc [63]

1.2. Pourquoi utiliser le zinc & ses alliages ?

Chaque métal dispose de son propre potentiel électrique et, en combinaison avec un autre métal, un courant électrique s'établit si un milieu conducteur les relie. Le métal le plus électro-négatif se sacrifiera alors pour le plus électro-positif.

Électrode	Potentiel (V)
Mg	-2,37
Be	-1,83
Al	-1,66
Ti	-1,63
V	-1,5
Mn	-1,18
Nb	-1,1
ZP3	-0,806
ZP5	-0,796
ZP-GDSL	-0,795
ZP2	-0,789
Zn	-0,76
Cr	-0,74
Acier inoxydable actif	-0,55
Fe	-0,44
Cd	-0,44
Co	-0,4
Ni	-0,28
Mo	-0,25
Acier inoxydable passif	-0,15
Sn	-0,14
Pb	-0,12
Laiton (60/40)	-0,1
H	0
W	0,05
Sb	0,1
Bi	0,2
Cu	0,34
Ag	0,8
Pd	0,99
Pt	1,2
Au	1,5

Tableau 1.1 Vue d'ensemble des potentiels électriques d'une série de métaux

Le magnésium apporterait la meilleure protection, ce qui est physiquement et chimiquement effectivement le cas. Le sacrifice du magnésium est toutefois tellement élevé que la consommation des atomes de magnésium est trop rapide et il est donc impossible de garantir une longue période de protection par kilo de Mg. Le magnésium est également tellement léger que de très grandes quantités sont nécessaires pour la durée de protection voulue.

L'aluminium se place en deuxième position. Celui-ci s'autoprotège toutefois par sa propriété de passivation, il s'auto oxyde et n'apporte donc plus de protection à l'acier. Pour pouvoir travailler avec l'aluminium, un inhibiteur doit être ajouté à l'aluminium pour limiter l'autoprotection (oxydation) de l'aluminium dans le temps.

D'un point de vue économique, le zinc occupe la troisième place. Sa différence de potentiel avec le fer est encore suffisante et il peut donc offrir une protection durable sur la base d'un triple mécanisme :

- / La protection physique de l'acier par rapport à l'environnement ;
- / La création d'une patine d'oxydes et de carbures chimiquement semi-stable. Étant donné que la surface du zinc réagit avec l'oxygène dans l'air ou dans l'eau, une couche d'oxyde se forme qui, au fil du temps, protège complètement le zinc contre l'oxygène, appelée 'couche de patine'. Les molécules d'oxygène ne peuvent alors plus atteindre le fer ni provoquer de formation de rouille ou d'oxyde. En cas de réaction avec l'oxygène, des oxydes de zinc se forment avec une augmentation de volume et la

couche de protection reste donc bien étanche ;

- / Enfin, la protection cathodique de l'acier en cas de détérioration.

L'action cathodique signifie que le zinc se sacrifie pour le fer. Cette protection cathodique fonctionne uniquement dans les milieux aqueux et repose sur le fait que le zinc présente un potentiel électrique inférieur à celui du fer selon la série galvanique. Ainsi, les endroits abîmés et les alésages pour les boulons et les vis continuent à être protégés contre la rouille. Si du fer (ou un autre métal) est exposé à l'eau, un certain nombre d'ions passent en solution. Ils laissent un surplus d'électrons derrière eux et une charge négative reste en cet emplacement, appelé anode. Étant donné que d'autres endroits présentent un potentiel plus élevé, ils forment les cathodes. Ceux-ci ne subissent pas de corrosion grâce à l'apport constant d'électrons. Dans l'eau, les ions dissous forment des sels avec les oxydants, par exemple l'oxygène. Étant donné que les sels sont souvent peu solubles, un dépôt se forme sur le métal et, dans ce cas, de la rouille se forme sur le fer. Lorsque le zinc est mis en contact électrique avec le fer, il apporte une protection contre ce phénomène, car il possède un potentiel inférieur à celui du fer. Le zinc passe en solution et devient l'anode, de telle sorte que le fer est pourvu en électrons et que les ions de fer ne passent pas en solution. Un revêtement est d'autant plus efficace que sa teneur en particules de zinc est élevée.

L'utilisation d'un alliage de zinc-aluminium vise à combiner les avantages des deux métaux et à obtenir une protection encore plus durable contre la corrosion (cf. chapitre 3).

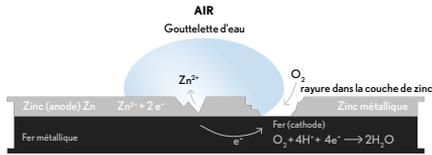


Fig. 1.3 Principe de protection de l'acier par le zinc

Alors que le zinc pur apporte une meilleure résistance contre les milieux hautement alcalins, l'alliage zinc-aluminium convient plutôt aux environnements présentant un pH de 4 à 10.

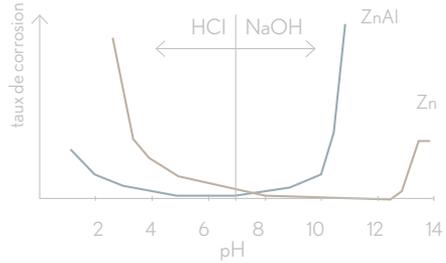


Fig. 1.4 Influence du pH sur la protection par le zinc et l'alliage zinc-aluminium

1.3. Organigramme des méthodes disponibles

La mise en œuvre du zinc est relativement aisée et de nombreuses possibilités ont donc été développées dans le passé pour protéger l'acier par le zinc et ses alliages. La figure 1.5 présente un aperçu schématisé des différents processus pour protéger l'acier par le zinc et les alliages de zinc.

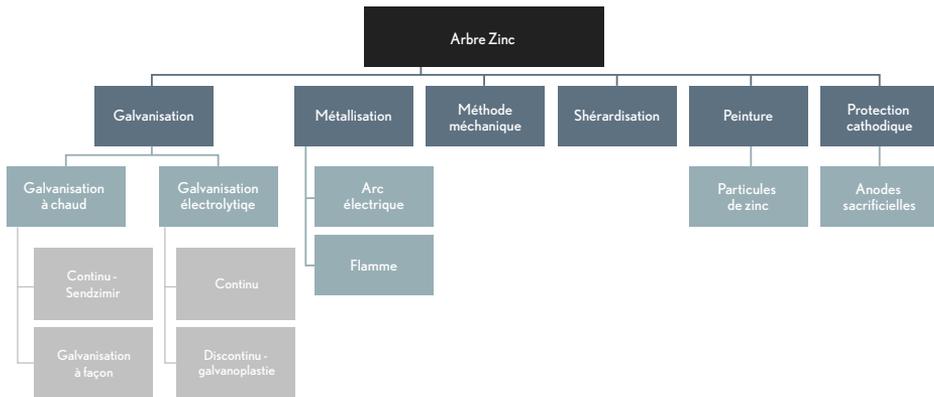


Fig. 1.5 Présentation schématisée des différentes méthodes de protection par le zinc

1.3.1 La galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud est le terme générique couvrant plusieurs méthodes de protection contre la corrosion. Il s'agit également de la forme de protection contre la corrosion la plus répandue.

1.3.1.1 La galvanisation continue ou le procédé de Sendzimir

Le procédé de Sendzimir [4], nommé d'après son concepteur Tadeusz Sendzimir, est un procédé de revêtement en continu de l'acier. Au cours de ce procédé, une tôle d'acier est traitée rapidement à travers un bain de zinc afin que le zinc puisse adhérer à la tôle. Grâce à un petit ajout d'aluminium au zinc, la couche est mince et plus régulière. La couche de zinc est cependant plus mince que lorsque le produit est galvanisé à chaud, mais elle est toujours parfaitement résistante à la rouille.



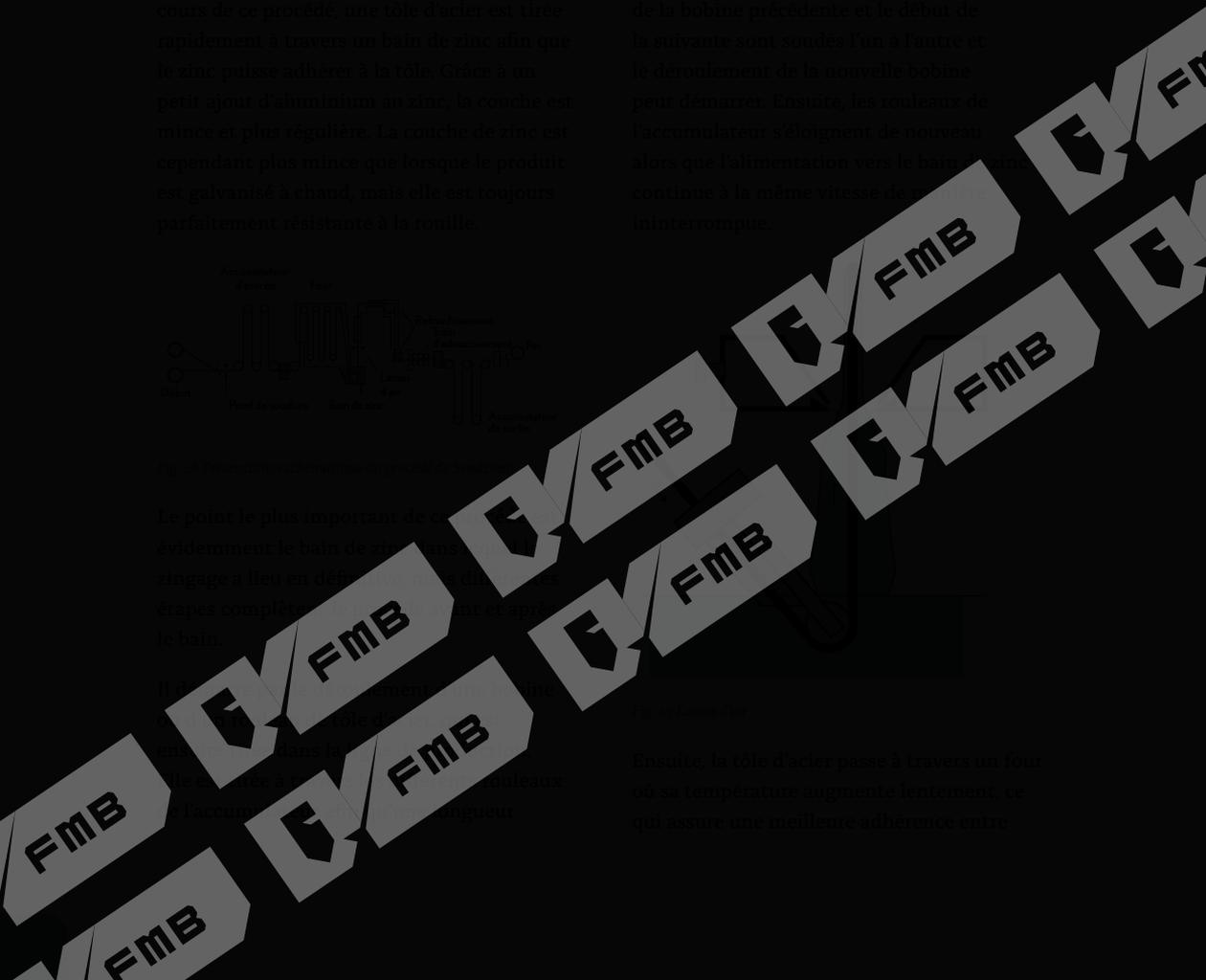
Le point le plus important de Sendzimir est le bain de zinc avec un ajout d'aluminium, qui permet d'obtenir une couche de zinc plus mince et plus régulière.

Le zinc est le plus important de Sendzimir est le bain de zinc avec un ajout d'aluminium, qui permet d'obtenir une couche de zinc plus mince et plus régulière.

considérable se trouve dans l'accumulateur avant de passer à travers le procédé.

La galvanisation continue est certes la caractéristique la plus typique du procédé de Sendzimir, mais chaque bobine présente bien entendu un début et une fin lors du déroulement. Lorsque le rouleau arrive à sa fin, l'alimentation dans le bain de zinc ne peut pas être interrompue. À cet instant, les rouleaux dans l'accumulateur sont rapprochés les uns des autres, ce qui raccourcit la ligne et permet au bain de zinc de rester en fonctionnement. Ensuite, une deuxième bobine est avancée. L'extrémité de la bobine précédente et le début de la suivante sont soudés l'un à l'autre et le déroulement de la nouvelle bobine peut commencer. Ensuite, les rouleaux d'accumulateur s'éloignent de nouveau dès que l'alimentation vers le bain de zinc continue à la même vitesse que précédemment.

Ensuite, la tôle d'acier passe à travers un bain où sa température augmente lentement, ce qui assure une meilleure adhérence entre





Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

Le rôle du bobineur est de contrôler et de régler le déroulement du bobinage.

13.12 La galvanisation à façon

Le procédé de galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud est un procédé relevant de la science des matériaux. Pendant le procédé de plongée, on cherche à former un alliage entre l'acier et le fer. Le zinc se trouve entouré d'une couche de zinc par l'obtention de l'alliage après un certain nombre d'étapes de préparation. Tout d'abord, l'acier est dégraissé, puis il est décapé (pour éliminer toutes les impuretés de surface).

L'acier est généralement dégraissé à l'aide d'une solution chaude fortement alcaline; le décapage sert à éliminer les résidus d'oxyde de fer (Fe_2O_3 et $FeCO_3$) et la rouille ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$). L'acide chlorhydrique est utilisé à cette fin. Dans cette étape, ce n'est pas tant la teneur en acide qui est importante, mais bel et bien la température et surtout la concentration en chlorure et la présence d'un inhibiteur. Du chlorure de fer se forme dans le bain par la dissolution de l'oxyde de fer et de la rouille dans l'acide chlorhydrique. Le chlorure est un inhibiteur par nature; il empêche l'attaque du fer par l'acide chlorhydrique. Ensuite, l'acier est immergé dans un flux qui assure un meilleur contact entre le zinc liquide et le fer. Deux méthodes peuvent être utilisées: soit la méthode "humide" dans laquelle une couche de liquide flotte sur une partie fermée du bain de zinc à travers laquelle l'objet passe d'abord, ou la méthode "sèche" dans laquelle l'objet entre d'abord en contact avec le flux, soit par immersion, soit par aspersion, puis il est séché dans un four et arrive enfin dans le bain.

Le flux est un mélange de sels fondus et d'eau et possède trois fonctions. Premièrement, il élimine les résidus éventuels d'oxyde de fer; il empêche également la formation de couches d'oxyde de zinc à la surface du bain; il améliore le mouillage du fer par le zinc liquide. Généralement, il est composé de zinc et d'antimoine. L'acier est immergé dans le zinc fondu à une température de 450°C. Le zinc est à l'état de vapeur et les résidus de la température précédente sont évacués.

Après l'immersion, le flux est évacué et le zinc est évaporé. Le flux est remplacé par un flux frais. Le zinc est évaporé et le flux est évacué. Le flux est remplacé par un flux frais. Le zinc est évaporé et le flux est évacué.

On atteint une épaisseur de couche entre 30 µm (acier de 2 mm) et 180 µm (acier de 30 mm) après la galvanisation. Il s'agit d'épaisseurs nomelles qui peuvent varier en fonction des circonstances.

La norme de galvanisation ISO 1461 [4] prescrit une épaisseur minimale de 30 µm pour les installations internes. Pour les structures externes telles que les charmes ou les mâts pour les câbles haute tension, une épaisseur de couche minimale de 50 µm est exigée.

Pour éviter les conflits lors de l'inspection pour voir si la couche de zinc appliquée satisfait aux exigences, les cahiers des charges et les commandes doivent se référer à la norme ISO 1461 et indiquer l'épaisseur de couche exigée.

Différents appareils de mesure sont disponibles dans le commerce pour la mesure de l'épaisseur de la couche de zinc. Ils sont tous basés sur le principe de la mesure de la perte de poids.

Il existe deux types de mesure: la mesure par immersion et la mesure par contact. La mesure par immersion est la plus précise, mais elle nécessite une force nécessaire sera appliquée à la surface de l'acier. La mesure par contact est plus simple, mais elle nécessite une force nécessaire sera appliquée à la surface de l'acier. La mesure par contact est plus simple, mais elle nécessite une force nécessaire sera appliquée à la surface de l'acier.

Les couches d'alliage
Pendant l'immersion, des couches d'alliage des deux métaux se forment dans différents rapports; la concentration en fer dominant



progressivement vers l'extérieur, l'épaisseur et la présence de ces couches dépend non seulement de la durée de l'immersion, mais surtout de la température du bain d'immersion.

L'épaisseur des couches augmente avec la température et la durée de l'immersion. Des bains de galvanisation à température ambiante sont utilisés pour galvaniser les objets en acier.

Après l'immersion, l'objet est retiré du bain à vitesse constante et refroidi.

Après le retrait de l'objet du bain, une couche d'alliage peut donc être obtenue d'une épaisseur comprise entre une minute à environ un centimètre.

Après l'immersion, l'objet est retiré du bain à vitesse constante et refroidi. Les couches d'alliage sont recouvertes par une fine couche de zinc pur.

Cette couche s'épaissit proportionnellement à la vitesse de retrait de l'objet du bain, car le zinc encore liquide dispose de moins de temps pour revenir en arrière.

Si la couche est plus mince et refroidit lentement, par exemple parce que l'objet en fer ou en acier est épais, la couche d'alliage peut continuer à croître dans le zinc pur, de telle sorte qu'il ne restera qu'une couche d'alliage extra épaisse.

Par ailleurs, la vitesse de retrait est influencée par la forme des objets : les objets creux sont retirés plus lentement afin qu'ils puissent se vider.

Enfin, l'objet peut encore être refroidi par son immersion dans de l'eau distillée ou son introduction dans un flux d'air.

Généralement, on laissera refroidir les objets galvanisés à l'air. Le refroidissement forcé va de pair avec un risque de déformation, surtout lorsque les objets sont en acier mince.

Après le retrait de l'objet du bain, une couche d'alliage peut donc être obtenue d'une épaisseur comprise entre une minute à environ un centimètre.

Après l'immersion, l'objet est retiré du bain à vitesse constante et refroidi. Les couches d'alliage sont recouvertes par une fine couche de zinc pur.

Cette couche s'épaissit proportionnellement à la vitesse de retrait de l'objet du bain, car le zinc encore liquide dispose de moins de temps pour revenir en arrière.

Si la couche est plus mince et refroidit lentement, par exemple parce que l'objet en fer ou en acier est épais, la couche d'alliage peut continuer à croître dans le zinc pur, de telle sorte qu'il ne restera qu'une couche d'alliage extra épaisse.

Par ailleurs, la vitesse de retrait est influencée par la forme des objets : les objets creux sont retirés plus lentement afin qu'ils puissent se vider.

Enfin, l'objet peut encore être refroidi par son immersion dans de l'eau distillée ou son introduction dans un flux d'air.

Généralement, on laissera refroidir les objets galvanisés à l'air. Le refroidissement forcé va de pair avec un risque de déformation, surtout lorsque les objets sont en acier mince.

Généralement, aucun post-traitement n'est nécessaire. Une protection cathodique. Aucune formation de rouille ne se produit en cas de rayures et de petites détériorations car le zinc est électro-négatif par rapport au fer.

L'intérieur des produits creux est également revêtu par une couche de zinc. Une résistance durable à la corrosion. Généralement, aucun post-traitement n'est nécessaire.

Une protection cathodique. Aucune formation de rouille ne se produit en cas de rayures et de petites détériorations car le zinc est électro-négatif par rapport au fer. L'intérieur des produits creux est également revêtu par une couche de zinc.

Une résistance durable à la corrosion. Généralement, aucun post-traitement n'est nécessaire. Une protection cathodique. Aucune formation de rouille ne se produit en cas de rayures et de petites détériorations car le zinc est électro-négatif par rapport au fer.

Inconvénients

Un risque de déformation du matériau mince (< 3 mm).

La couche d'alliage est dure et cassante et son usinage est donc difficile.

L'épaisseur de couche dépend de l'épaisseur du matériau (plus le matériau est épais, plus la couche est épaisse).

La formation de gouttes de zinc au niveau des bords (qui doivent être éliminées à la main après le refroidissement).

Des différences de couleur sur des

Launched in 1997, the program is the largest in the world. It has been a tremendous success story, and it is a testament to the power of public-private partnerships.



Launched in 1997

The program is the largest in the world. It has been a tremendous success story, and it is a testament to the power of public-private partnerships.

The program is the largest in the world. It has been a tremendous success story, and it is a testament to the power of public-private partnerships.

The program is the largest in the world. It has been a tremendous success story, and it is a testament to the power of public-private partnerships.

The program is the largest in the world. It has been a tremendous success story, and it is a testament to the power of public-private partnerships.



L'augmentation de la teneur en silicium n'augmente pas seulement les effets positifs. Elle diminue également l'ordon du zinc fondue, le fer et la couche d'alliage qui se forme est donc plus mince. En outre, elle diminue l'apparition de fines particules cristallines qui se déposent sur les escaliers de section.

Le chrome agit de la même manière que le fer, tellement que la couche d'alliage continuant à croître dans la solution de zinc pur. Ceci n'est pas tellement important pour la protection du fer mais on obtient une surface mate, gris foncé, qui n'est généralement pas belle.

L'influence du silicium est encore plus grande et s'exprime déjà à partir d'une teneur de 0,04%. À partir de celle-ci, un effet appelé de Sandelin démarre, la vitesse de croissance des couches d'alliage augmentant de manière explosive puis diminuant tout aussi rapidement de telle sorte qu'à 0,12%, l'effet est à peine supérieur à celui à 0,04%. À partir de 0,25%, l'effet réaugmente, mais dans les proportions attendues.

L'effet d'aluminium dans le bain de zinc est opposé à celui du silicium dans l'acier, surtout dans la plage de l'effet de Sandelin. Du nickel peut encore être ajouté au bain de zinc pour lutter contre ce phénomène.

Procédé continu

Le rinçage (c) est mis en œuvre sur des bandes d'acier et correspond à une électrodeposition d'atomes de zinc. Au cours de ce procédé continu, la tôle d'acier doit traverser une série d'étapes telles que le lavage, le dégraissage et le rinçage avant d'arriver dans le bain de dépôt de zinc.

L'anode électrolytique la plus fréquente est une anode en alliage de plomb-argent ou d'autres anodes insolubles et des électrolytes à base de sulfate de zinc. On travaille également encore avec des anodes solubles en zinc pur. Dans ce procédé, la tôle d'acier est la cathode. La couche de recouvrement se forme par l'augmentation du nombre d'ions de zinc électriquement réduits dans la solution et par le dépôt d'atomes de zinc sur la cathode. Des anneaux de structure sont parfois ajoutés pour obtenir une surface plus lisse et plus dense.

Les épaisseurs de couche sont minimales et peuvent être réglées de manière très précise.

L'application typique de ce mode de rinçage réside dans les tôles d'acier pour les automobiles et les électroménagers. Souvent, cette méthode est également appliquée dans un système duplex, où la structure très fine de la surface de l'électrorinçage.

Propriétés de la couche d'électrozincage.

La couche de recouvrement est une couche de zinc très compacte, contiguë à l'acier. Elle

est très ductile et admet des déformations ultérieures sans formation de fissures.

L'épaisseur peut aller jusqu'à 60 g/m² ou 6 μm par face. L'épaisseur est plus mince que dans le zingage continu. La couche est liée mécaniquement à la surface et ne présente pas de couches d'acier mais une surface plus lisse. Le procédé a été développé afin qu'une couche de revêtement sur une face ou double face soit possible.



13.2.2 La galvanoplastie

Le revêtement électrolytique ou galvanoplastie [6] est un procédé de traitement de surface par électrolyse. L'électrolyse favorise les réactions par un courant électrique.

La pièce d'acier à revêtir est immergée dans un bain de solution électrolytique de 10 à 200 mm de profondeur. Le courant électrique est appliqué à la pièce et à une électrode.

Le revêtement est plus épais que dans le zingage continu. Le courant ne peut pas pénétrer à l'intérieur d'un objet et celui-ci doit être entièrement immergé dans le bain. Le dépôt de zinc ne peut donc y être appliqué (cas de l'acier).

Le revêtement est plus épais que dans le zingage continu. Le courant dissout le zinc et le dépose sur la pièce d'acier.

Le revêtement électrolytique ou galvanoplastie peut être réalisé de manière discontinue, c'est-à-dire par lots (petites pièces telles que des boulons, des vis, etc.). Le procédé discontinu a lieu sur des pièces en suspension dans un bain ou dans un tambour perforé rotatif.

L'épaisseur de la couche de protection obtenue lors du revêtement électrolytique discontinu varie de 5 à 25 μm.

La protection contre la corrosion de la couche d'acier peut être améliorée par passivation (normes ISO 3002 [7] et NF EN 1022 [8]).

Les avantages sont :

- Une bonne adhérence.
- Une épaisseur de couche plus élevée que dans le zingage continu.
- Le revêtement est plus lisse.
- Le revêtement est plus épais.

Les inconvénients sont :

- Le revêtement est plus épais que dans le zingage continu.
- Le courant ne peut pas pénétrer à l'intérieur d'un objet et celui-ci doit être entièrement immergé dans le bain.

Le revêtement est plus épais que dans le zingage continu. Le courant ne peut pas pénétrer à l'intérieur d'un objet et celui-ci doit être entièrement immergé dans le bain. Le dépôt de zinc ne peut donc y être appliqué (cas de l'acier).

Le procédé est limité à des pièces de petites dimensions.



Si aucun produit brillanteur n'est utilisé, on obtient une couche de zinc présentant un aspect poudreux. La résistance à la corrosion peut ainsi être compromise.

Les termes galvanotechnique ou galvané sont utilisés dans le domaine. Ces termes désignent toutes les techniques électrochimiques de recouvrement, y compris les procédés autocatalytiques.

La répartition de la densité de courant sur le produit n'est cependant pas uniforme. L'épaisseur de couche sera donc plus élevée en certains endroits (face externe/parties saillantes) et plus basse ailleurs (angles internes/faces internes). Le courant cherche toujours le chemin de la moindre résistance.

Si aucun produit brillanteur n'est utilisé, on obtient une couche de zinc présentant un aspect poudreux. La résistance à la corrosion peut ainsi être compromise.

La galvanisation est moins résistante à la corrosion qu'un revêtement obtenu par la galvanoplastie. La galvanisation d'un objet par exemple en nickel ou en chrome massif permettrait bien entendu d'obtenir le même bel effet ou la même résistance à la corrosion. Le produit serait tout de plus coûteux car la plupart des métaux utilisés pour les couches de protection sont nettement plus chers que le fer. De plus, les métaux risquent de ne pas posséder la résistance de matériau souhaitée.

L'histoire de la galvanisation (Electrozingage) (9)

Les concepts galvanisation et galvanotechnique se réfèrent au physicien italien Luigi Galvani. Galvani a décrit, au XVIIIème siècle, les phénomènes électriques qui forment la base pour tous les processus électriques, donc également pour la galvanisation.

Alessandro Volta a également effectué d'importantes études. Il a inventé la pile grâce à laquelle la galvanotechnique peut être réalisée en pratique. Le fondateur de la galvanotechnique est l'Allemand Moritz Hermann Jacobi (1801-1874). Il s'est d'abord principalement intéressé à la galvanoplastie, la formation entre autres de pièces de monnaie par galvanotechnique. Il a écrit le premier manuel sur la galvano en 1838, *Der Galvanoplastik*.

La société WMF actuellement toujours connue (machines à café et converti) a commencé en 1838 à appliquer la galvanoplastie à l'échelle industrielle. Des portes entières en cuivre ont même été produites de cette manière. En 1854, Robert Wilhelm Bunsen parvient pour la première fois à déposer du chrome. Siemens développe en 1867 la dynamo, grâce à laquelle la galvanotechnique se développe à une vitesse supérieure.

Le nickel est déposé pour la première fois en 1900. L'modification (électrolyse électrochimique d'aluminium et donc non pas le dépôt d'un autre métal) est réalisée à partir de 1910. Le chromage galvanique est appliqué commercialement à grand échelle à partir de 1922. Le développement de produits brillantours a lieu entre les deux guerres mondiales et ils remplacent petit à petit le polissage beaucoup plus laborieux. Le nickel chimique arrive sur le marché peu après la deuxième guerre mondiale.

Les bains utilisés lors de la galvanisation peuvent être synonymes d'une haute charge environnementale et sont pour cette raison actuellement associés à des régions très arrières. Un grand nombre de stations de galvanisation utilisent actuellement des produits de plus en plus toxiques. L'utilisation de cyanures de nickel hexavalent (VI) et de chromates hexavalents en agents de dépôt est interdite. Le chrome est réduit dans un bain de chromage à un motif de chrome trivalent.

La galvanisation à l'aide d'un agent de réduction présent dans l'électrolyte.

La galvanisation à l'aide d'une source de courant externe

Dans cette forme de galvanisation, l'objet est immergé dans une solution de sel (avec le métal en tant qu'ion dans le sel) et un courant provenant d'une source externe est guidé à travers la solution. L'objet est utilisé en tant que cathode. Une réaction redox se produit.

La procédure suivante est mise en œuvre:

Un sel du métal qui doit former la couche, par exemple du chlorure de zinc, est dissous dans un bac d'eau. Ceci signifie que le sel se décompose en ions Zn^{2+} et forme ainsi des cations de zinc et des anions de Cl^- .

L'objet qui doit être peint en métal est connecté à une source de courant externe et est appelé cathode.

Le courant est dirigé vers l'objet immergé dans le bain de sel. Le courant peut établir un pont électrolytique.

En tant que cathode, les ions métalliques sont réduits en métal. En fonction de leur valence, ces ions métalliques absorbent chacun un ou plusieurs des électrons fournis par la source de courant et se déposent sous forme de métal sur l'objet.



immédiatement et formant ainsi une couche de protection présentant une bonne adhérence. Ensuite, la surface gris/gris clair et d'une certaine rugosité peut être peignée d'un revêtement d'apprêt ou coloré. Le procédé est entre autres mis en œuvre pour la pérennisation-conservation de constructions en acier et lors de travaux de maintenance. De très grands objets qui n'entrent pas dans un bain de zinc peuvent ainsi être conservés de manière durable.

Dans le procédé de projection thermique, la matière à appliquer est fondue et projetée à haute vitesse sur le substrat. Elle peut être fondue de différentes manières, par exemple à la flamme ou dans un arc de soudage ou dans un plasma.

Le procédé



Tous les procédés possèdent leurs propres caractéristiques, telles que la température de la flamme et le vitesse des particules. De manière générale, lors d'un procédé thermique, de l'énergie est utilisée pour amener le matériau

indépendamment de la source de chaleur dans laquelle le métal est fondu et projeté, la température de la pièce n'est que faiblement augmentée. À la température habituelle de substrat de 20 à 200°C, aucune déformation, aucune modification de structure ou aucun mélange ne peut avoir lieu.

L'adhérence

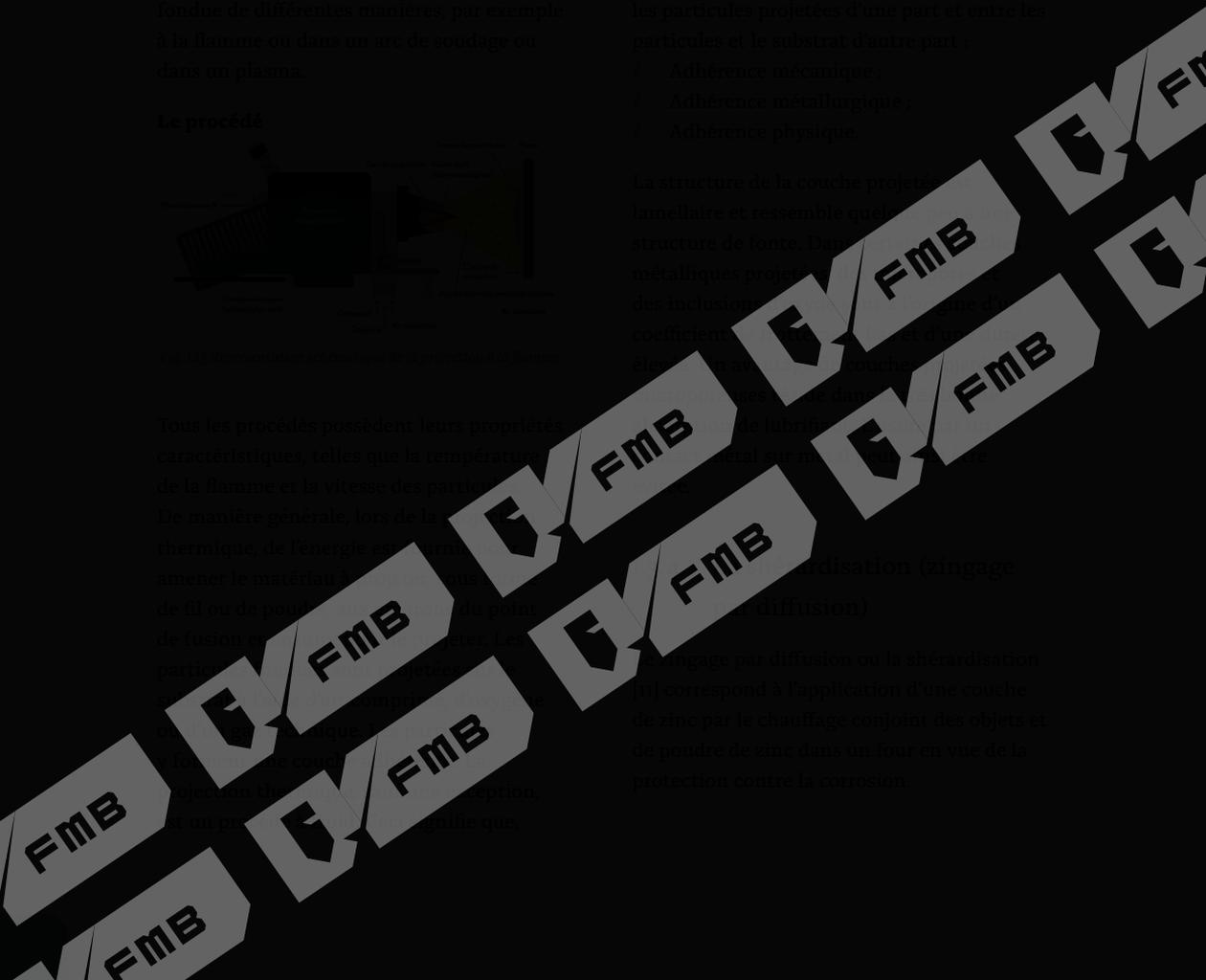
Pour obtenir une adhérence optimale entre le revêtement et le substrat, il est important que le substrat soit bien nettoyé. Les pièces sont dégraissées et souvent granulées pour augmenter l'adhérence. Les principes d'adhérence suivants peuvent exister entre les particules projetées d'une part et entre les particules et le substrat d'autre part :

- adhérence mécanique
- adhérence métallurgique
- adhérence physique

La structure de la couche projetée est fine et ressemble à une structure de fonte. La structure métallurgique peut être obtenue par les méthodes de projection thermique suivantes :

- revêtement par diffusion (zincage électrolytique)
- revêtement par diffusion (zincage thermique)
- revêtement par diffusion (zincage par diffusion)
- revêtement par diffusion (zincage par diffusion)

Le revêtement par diffusion ou la sherardisation (1) correspond à l'application d'une couche de zinc par le chauffage conjoint des objets et de poudre de zinc dans un four en vue de la protection contre la corrosion.



La méthode

Le zinc peut être utilisé pour protéger un objet métallique contre la corrosion.

L'application d'une couche de zinc peut être effectuée de différentes manières :

Lors de la fabrication, le zinc est recuit dans un bain de zinc liquide.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Les objets en zinc ou en zinc revêtu de zinc sont disponibles sans traitement.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Le zinc est appliqué par diffusion, le zinc est appliqué par électrolyse.

Caractéristiques

Les produits zincardés présentent les caractéristiques suivantes :

Ils sont protégés contre la corrosion.

Ils sont pourvus d'une couche de recouvrement réglable et régulière.

Ils sont pourvus d'une couche de recouvrement réglable et régulière.

Ils sont pourvus d'une couche de recouvrement réglable et régulière.

Ils sont pourvus d'une couche de recouvrement réglable et régulière.

Ils sont pourvus d'une couche de recouvrement réglable et régulière.

Applications

Les produits zincardés par diffusion trouvent une application dans de nombreux domaines.

Les matériaux composites peuvent être utilisés dans des circonstances climatiques extrêmes.

Les objets en fonte peuvent être pourvus sans autre prétraitement d'une couche de finition (système duplex).

Les pièces revêtues de caoutchouc ou collées peuvent être utilisées dans la construction de remorques, de chemins de fer et de trains.

Les produits de construction (échafaudage) qui sont fréquemment montés et démontés.

Les produits de construction (échafaudage) qui sont fréquemment montés et démontés.

Les produits de construction (échafaudage) qui sont fréquemment montés et démontés.

Les produits de construction (échafaudage) qui sont fréquemment montés et démontés.

Les produits de construction (échafaudage) qui sont fréquemment montés et démontés.

13.5 La méthode mécanique & adhésive ou le zingage mécanique

Le zingage mécanique [12] est un processus de zingage dans lequel du zinc est appliqué de manière mécanique sur de petites pièces métalliques.

Après un prétraitement chimique, les pièces sont introduites avec des grains de verre, de l'eau et des produits chimiques dans

La peinture est un revêtement protecteur et décoratif particulier et qui se caractérise par un aspect et une couleur de surface définies par l'application de la couche de peinture. L'ensemble des éléments et de la couche de peinture sont appelés les films de peinture. Le maintien de la couche de peinture sur la surface soustraite d'un objet est un processus appelé adhérence. Une couche de peinture adhère si elle est appliquée sur la surface d'un objet et qu'elle ne peut être enlevée sans détérioration de l'objet. La peinture est appliquée sur des pièces d'une longueur maximale de 200 mm et de 27 mm, par exemple des boutons des vis, des ferrures (forme EN 10204 3.1). Le procédé permet également le dépôt d'un mélange de peinture adhésive. Le principe mécanique est appliqué sur des articles d'assemblage tels que des vis, des écrous, des arêtes, des ferrures, etc.

1.30 La peinture

Une peinture est un revêtement de surface qui protège et décore. Elle est constituée de pigments, de liants, de solvants et d'additifs. Elle est appliquée sur une surface et sèche pour former une couche protectrice et décorative.

La peinture peut être appliquée par différents moyens, tels que le pinceau, le rouleau, la bombe aérosol, etc. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la construction, l'industrie, l'agriculture, etc.

1.31 La méthode sacrificielle (anodes)

La méthode sacrificielle est un processus électrochimique qui permet de protéger un métal contre la corrosion en utilisant un métal plus réactif comme anode sacrificielle. Ce processus est basé sur le principe de la pile galvanique et est utilisé pour protéger les structures métalliques.

La méthode sacrificielle est un processus électrochimique qui permet de protéger un métal contre la corrosion en utilisant un métal plus réactif comme anode sacrificielle.

Cette méthode est basée sur le principe de la pile galvanique et est utilisée pour protéger les structures métalliques.

Le principe de la méthode sacrificielle est basé sur le fait que le métal plus réactif se corrode à la place du métal à protéger.

Cela permet de prolonger la durée de vie des structures métalliques et de réduire les coûts de maintenance.

Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie maritime et dans les applications où la corrosion est un problème majeur.

Il est important de choisir le métal sacrificiel approprié en fonction des conditions environnementales et du type de structure à protéger.

La méthode sacrificielle est une solution efficace et économique pour protéger les structures métalliques contre la corrosion.

Cette méthode est basée sur le principe de la pile galvanique et est utilisée pour protéger les structures métalliques.

Le principe de la méthode sacrificielle est basé sur le fait que le métal plus réactif se corrode à la place du métal à protéger.

Cela permet de prolonger la durée de vie des structures métalliques et de réduire les coûts de maintenance.

Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie maritime et dans les applications où la corrosion est un problème majeur.

Il est important de choisir le métal sacrificiel approprié en fonction des conditions environnementales et du type de structure à protéger.

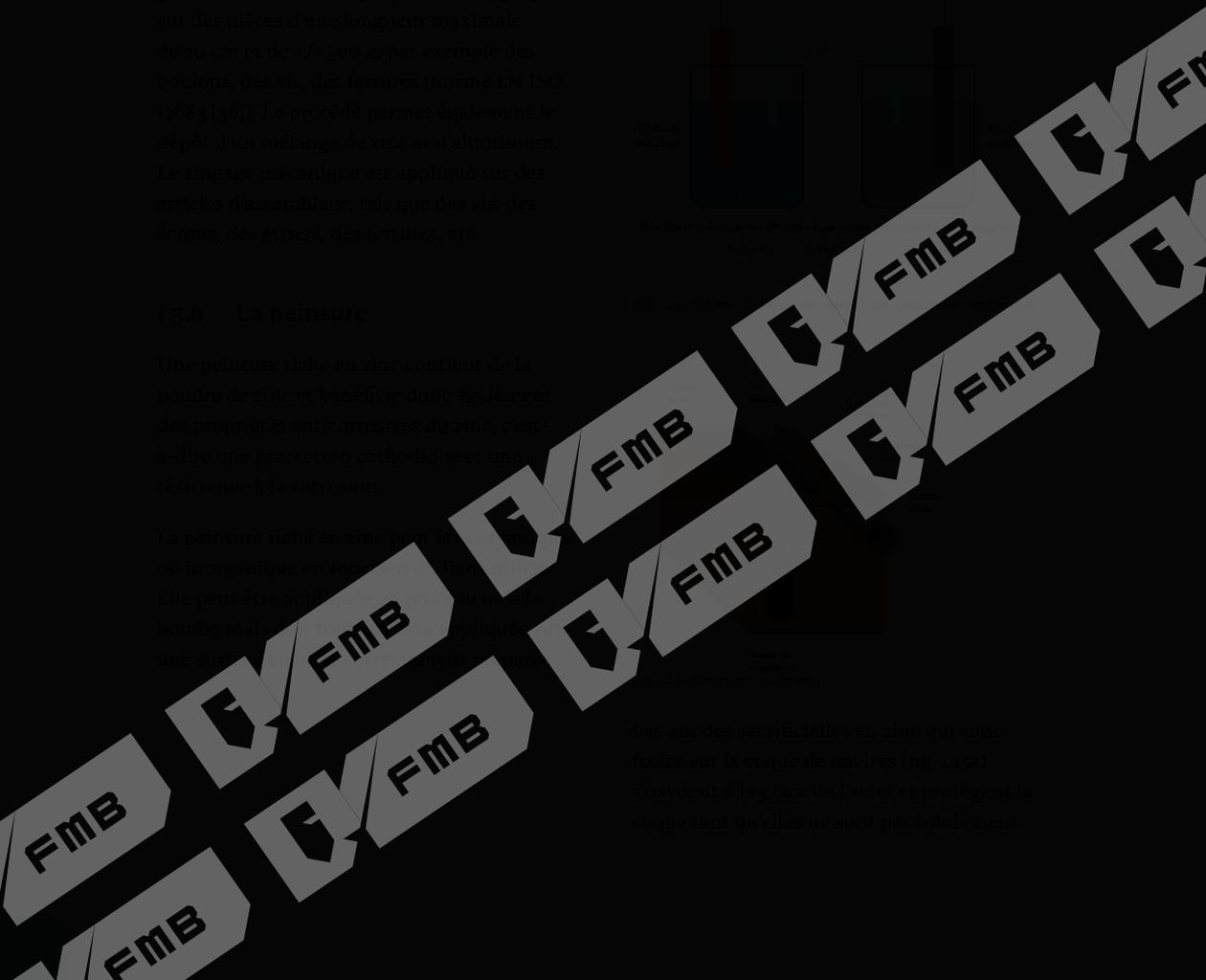
La méthode sacrificielle est une solution efficace et économique pour protéger les structures métalliques contre la corrosion.

Cette méthode est basée sur le principe de la pile galvanique et est utilisée pour protéger les structures métalliques.

Le principe de la méthode sacrificielle est basé sur le fait que le métal plus réactif se corrode à la place du métal à protéger.

Cela permet de prolonger la durée de vie des structures métalliques et de réduire les coûts de maintenance.

Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie maritime et dans les applications où la corrosion est un problème majeur.



oxydés. Les constructions immergées en mer sont également protégées par des anodes sacrificielles, comme montré dans la figure 12b).



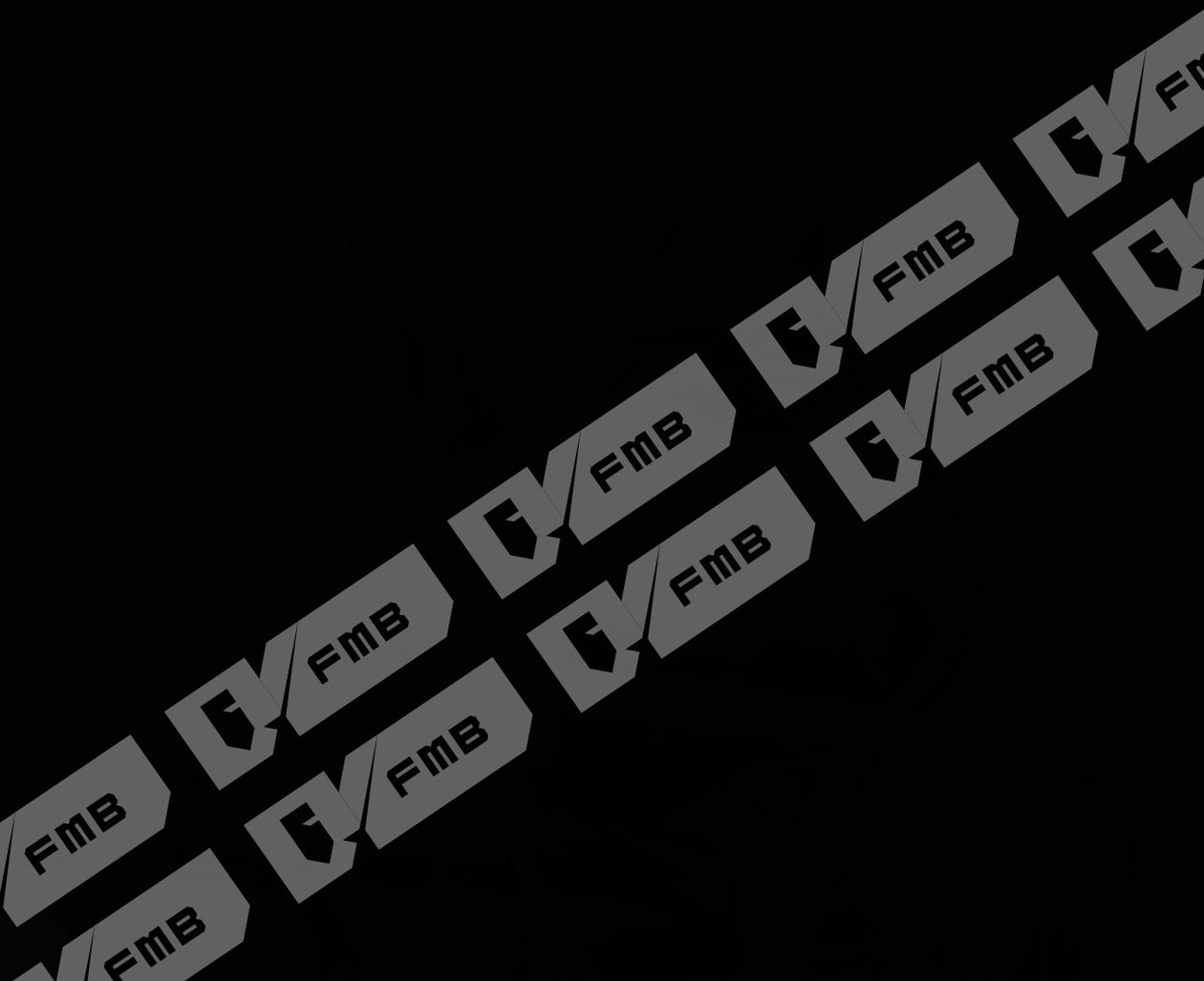
Contrairement aux autres systèmes de protection contre la corrosion à base de zinc qui forment une barrière entre l'acier et l'électrolyte/l'eau, l'anode modifie le potentiel électrochimique. La cathode devient une anode et sera consommée au fil du temps.

La figure 12b illustre la protection cathodique par anodes sacrificielles. Les anodes sont connectées à la structure à protéger et se sacrifient pour protéger la structure.

La figure 12c illustre la protection cathodique par anodes sacrificielles. Les anodes sont connectées à la structure à protéger et se sacrifient pour protéger la structure.



L'épaisseur la plus fine est obtenue lors de l'électrozingage continu (de droite à gauche) tout en présentant la microstructure la plus uniforme, suivi du zingage continu. La structure la plus amorphe est généralement la peinture riche en zinc car celle-ci est constituée par des particules de zinc enrobées dans un solvant séché ou dans une solution de dispersion séchée. On trouve ensuite la couche galvanisée qui montre clairement la croissance de ses couches métallurgiques et enfin la couche de métallisation qui montre clairement la structure lamellaire formée des différentes couches.





LA MÉTALLISATION, LE PROCÉDÉ

2. La métallisation, le procédé

2.1. Histoire

En 1817, le chimiste Max Michael Schöpp réalisait des expériences à l'aide de cathodes desquelles il projetait du plomb et du zinc sur des objets pour produire une couche de protection.

En 1906 Schöpp obtenait un brevet pour la façon d'imprimer une lampe de gaz et d'appliquer cette projection sur un objet.

Le deuxième brevet de Schöpp date de 1911 et concerne la métallisation à l'aide d'un arc électrique. C'est ainsi que le procédé de métallisation par arc électrique ou dépôt de métallisation est principalement utilisé pour le protection contre la corrosion. L'utilisation de métallisation est que la peinture de plastique les revêtements de nombreux autres matériaux de construction après la deuxième guerre mondiale.

2.2. La classification de la métallisation [45]

Les différents procédés de métallisation sont classés en fonction de l'énergie de l'arc électrique utilisé.

La norme ISO 14647 [45] décrit les différents systèmes

Classification des procédés de métallisation



2.2.1. La projection à l'arc (AS)

Dans ce procédé, deux fils de zinc ou d'aluminium-zinc sont introduits dans un pistolet de métallisation électrique. Les deux fils entrent en contact et un arc électrique qui fait fondre le matériau. La chaleur est ensuite transférée au matériau métallique à protéger. Le pistolet est tenu à distance du substrat et la poudre est projetée sur le substrat.

Matériaux utilisés, sous forme de poudre :
Zinc, aluminium-zinc.

Domaines d'application :
- Protection contre la corrosion au ponts, solennes.
- Comme protection contre l'usure : centrales électriques.
- Comme protection contre l'usure et réparation des éléments de machine : construction des machines.

2.2.2. Le plasma (APS, VPS, APSS)

Les torches à plasma sont des appareils dans lesquels un gaz est comprimé à travers un arc électrique confiné. L'arc électrique s'établit entre une anode et une cathode refroidies à l'eau. L'anode est un cylindre pourvu d'un creux à travers lequel sont guidés la cathode et le gaz. Le gaz injecté autour de la cathode passe à travers l'arc électrique et y est ionisé ; ensuite, il progresse en tant que plasma. Ce plasma présente une température très élevée (pouvant aller jusqu'à 20 000 K) et une vitesse très élevée. Le matériau de revêtement injecté dans le plasma est projeté à haute vitesse sur le substrat.

2.2.3. La projection au gaz froid (CS)

Le principe de base de la projection à froid repose sur l'accélération supersonique d'un gaz dans un chalumeau. La poudre est introduite dans la partie haute pression du chalumeau et est projetée dans un état "non fondu" (température du gaz : 600 °C) sur le substrat. Vu que les particules sont projetées à l'état non fondu, les effets négatifs des autres systèmes sont éliminés ou réduits au minimum : oxydation à haute température, évaporation, moins d'oxyde dans la couche de métallisation.

Matériaux utilisés, sous forme de poudre :
Zinc, aluminium-zinc, aluminium.

Domaines d'application :
- Le secteur automobile.
- La protection contre la corrosion : l'électronique.

Matériaux utilisés, sous forme de poudre :
Cuivre, zinc, aluminium.

Domaines d'application :
- Le secteur automobile.
- La protection contre la corrosion : l'électronique.

Matériaux utilisés, sous forme de poudre :
Cuivre, zinc, aluminium.

Domaines d'application :
- Le secteur automobile.
- La protection contre la corrosion : l'électronique.

2.2.4 La projection de fil à la flamme (WFS)

Dans ce procédé, un fil de zinc ou d'un alliage zinc-aluminium est introduit dans un pistolet de métallisation alimenté en gaz (propane ou acétylène et oxygène). Le fil fond par la combustion du gaz. Il est ensuite projeté sur la surface à métalliser à l'aide d'un comprimé.

Ce type de pistolet utilise des fils d'un diamètre plus grand, généralement à partir de 3 mm.

Matériaux utilisés :

Fils, baguettes, câbles.

Domaines d'application :

- Constructions en acier, comme protection contre la corrosion.
- Boîtes de vitesse.
- Segments de synchronisation.
- Segments de piston.

2.2.5 La projection de poudre à la flamme (PFS)

La projection de poudre à la flamme est une forme simple de la projection thermique dans laquelle l'énergie d'une réaction chimique est utilisée. Un matériau en forme de poudre est introduit dans une chambre d'une flamme d'oxygène-acétylène par un brûleur. La poudre est projetée à haute vitesse sur la surface à protéger par le choc et les particules de métal.

Matériaux utilisés, sous forme de poudre :
Métaux, plastique.

Domaines d'application :

- Cylindres de laminage.
- Segments de rouleaux.
- Rotors.
- Vis d'extrusion.
- Structures métalliques pour la protection contre la corrosion.

2.2.6 La métallisation par détonation (DCS)

Le pistolet de combustion est constitué d'un tuyau d'un diamètre de 25 mm et d'une longueur d'un mètre, terminé par une chambre de combustion. La poudre est introduite en même temps que le mélange gazeux de combustion (acétylène-oxygène) qui est enflammé par une étincelle de choc ainsi créée. Les particules de poudre, les particules de métal et la flamme y sont projetés à très haute vitesse. Ce procédé est utilisé pour :

- Matériaux de revêtement :
 - Industrie chimique.
 - Industrie aéronautique.
 - Industrie des turbines à gaz.
 - Industrie médicale : implants.
 - Industrie du pétrole et du gaz.
 - Compresseurs à gaz.
 - Industrie du papier : cylindres de calendrage.

2.2.7 La projection de poudre à la flamme à haute vitesse (HVOF/HVAF)

Un mélange oxygène-inflammable brûle en continu dans une chambre de combustion. Les oxydes de carbone, l'hydrogène, le méthane, le propane, le butane, le gaz naturel, le gaz de synthèse, le gaz de pétrole sont utilisés.

Le flux de poudre est accéléré dans une buse par le gaz de combustion. La poudre est projetée à une vitesse de 1000 à 2000 m/s.

Les matériaux utilisés sont :
- les carbures (carbure de tungstène, carbure de titane, carbure de chrome, carbure de vanadium, carbure de niobium, carbure de zirconium, carbure de hafnium, carbure de cobalt, carbure de nickel)
- les céramiques
- les métaux à base de cobalt
- les matériaux à base nickel

Domaines d'application :

- Aéronautique : moteurs d'avion, trains d'atterrissage, clapets d'atterrissage
- Industrie du pétrole et du gaz : clapets
- Machines de construction : pistons, cylindres hydrauliques
- Centrales électriques : turbines

2.2.8 La métallisation au laser (LC)

La métallisation au laser est un procédé permettant d'appliquer une couche de protection très dense liée de manière métallurgique et quasiment totalement pure.

Ce procédé est utilisé pour améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion et aux chocs.

Un rayon laser très puissant est orienté de

manière à chauffer le long d'une buse. La poudre est projetée dans la buse et se lie de manière métallurgique avec une très grande densité.

Matériaux utilisés :

- cobalt, NiCrMo, FeCr

Domaines d'application :

- Cylindres de laminage à haute température, résistances à la corrosion et durables, clapets (cobalt 0)
- Billes/sièges de clapet, cylindres de laminage, parties de chaudière pour la combustion de déchets, raffineries de pétrole (NiCrMo)
- Broyeurs à charbon et à minéraux/plaques d'usure/clapets (WC/Ni)
- Rampe hydrauliques, stabilisateurs (FeCr)

2.3 La préparation de la surface

La construction doit être inspectée avant la métallisation. Elle doit satisfaire à toutes les règles. En d'autres termes, elle doit être totalement accessible au pistolet de projection ou de métallisation.

234 La rigole

Le nettoyage par grenillage

Le sablage est le terme courant pour le grenillage, un traitement de surface de matériaux dans lequel un composé abrasif des granulés agit de haut en bas, produisant un effet de polissage des surfaces de grenillage.

- nettoyage de surface par abrasion
- réalisation de surfaces de surface par exemple en les égrainant
- réalisation de surface par exemple en les égrainant
- nettoyage de surface par abrasion

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression. Les zones de gain de puissance sont réalisées à l'aide de grandes règles, les zones de perte de puissance sont réalisées à l'aide de petites règles. Les zones de gain de puissance sont réalisées à l'aide de grandes règles, les zones de perte de puissance sont réalisées à l'aide de petites règles.

Le nombre de zones de grenillage est variable pour le grenillage, il est possible de réaliser un grenillage à l'aide de grandes règles, les zones de gain de puissance sont réalisées à l'aide de grandes règles, les zones de perte de puissance sont réalisées à l'aide de petites règles.

La mesure de la rigole

Par exemple un exemple de rigole, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression. Les zones de gain de puissance sont réalisées à l'aide de grandes règles, les zones de perte de puissance sont réalisées à l'aide de petites règles.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.

Le grenillage est souvent mis en œuvre dans des cas particuliers pour récupérer la puissance et les granulés, l'opérateur doit protéger par une combinaison des zones de gain et un aspect de suppression des zones de perte d'un objet de suppression.



Le fonctionnement du rugosimètre



Les paramètres de rugosité selon ISO 3202



L_t = longueur de test (seuil)

L_n = en standard, λ longueur de mesure

L_{pe} = longueur d'amorçage

L_{pf} = longueur de fin de test

L_t = longueur totale évaluée

R_a = hauteur du triangle rectangle dont la surface est identique à la surface située entre le profil de rugosité et le profil moyen

R_z = hauteur moyenne de sommet à creux des λ longueurs de mesure

R_{max} = sommet à creux maximal des λ longueurs de mesure

R_t = distance entre sommet et creux sur toutes les longueurs de mesure

R_{pk} = moyenne des pics

L'ondulation : les différences

Les différentes valeurs de R_a et de $R_{a,eq}$ donnent pas toutes la proportion exacte d'un profil de rugosité. Une même valeur de R_a peut découler d'une autre ondulation d'une rugosité. Cette ondulation est également indiquée avec des données supplémentaires telles que R_t (valeur maximale de sommet) et R_{pk} (valeur du rapport du sommet au creux).

Le tableau 2.4 indique clairement qu'une même valeur de R_a peut provenir de différents profils.

Tableau 2.4 : Profil de rugosité

Profil de rugosité	R_a	R_t	R_{pk}
1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0,2	0,2
3	0,1	0,3	0,3
4	0,1	0,4	0,4
5	0,1	0,5	0,5
6	0,1	0,6	0,6
7	0,1	0,7	0,7
8	0,1	0,8	0,8
9	0,1	0,9	0,9
10	0,1	1,0	1,0
11	0,1	1,1	1,1
12	0,1	1,2	1,2
13	0,1	1,3	1,3
14	0,1	1,4	1,4
15	0,1	1,5	1,5
16	0,1	1,6	1,6
17	0,1	1,7	1,7
18	0,1	1,8	1,8
19	0,1	1,9	1,9
20	0,1	2,0	2,0
21	0,1	2,1	2,1
22	0,1	2,2	2,2
23	0,1	2,3	2,3
24	0,1	2,4	2,4
25	0,1	2,5	2,5
26	0,1	2,6	2,6
27	0,1	2,7	2,7
28	0,1	2,8	2,8
29	0,1	2,9	2,9
30	0,1	3,0	3,0
31	0,1	3,1	3,1
32	0,1	3,2	3,2
33	0,1	3,3	3,3
34	0,1	3,4	3,4
35	0,1	3,5	3,5
36	0,1	3,6	3,6
37	0,1	3,7	3,7
38	0,1	3,8	3,8
39	0,1	3,9	3,9
40	0,1	4,0	4,0
41	0,1	4,1	4,1
42	0,1	4,2	4,2
43	0,1	4,3	4,3
44	0,1	4,4	4,4
45	0,1	4,5	4,5
46	0,1	4,6	4,6
47	0,1	4,7	4,7
48	0,1	4,8	4,8
49	0,1	4,9	4,9
50	0,1	5,0	5,0



La rugosité et le traitement

Différents types de traitement entraînent une rugosité caractéristique, mais différente.

Le tableau 2.5 indique les plus usuelles pour différents types de traitement.

La rugosité avant & après

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

Le type de rugosité et les différents types de traitement indiqués dans le tableau 2.5 sont les plus usuelles pour différents types de traitement.

2.3.2 La propreté et le sablage

Une propreté de minimum Sa 2,5 selon la norme ISO 8501 (2) est demandée pour la métallisation.

La surface de l'acier doit être exempte d'huile, de graisse et de saillies visibles ainsi que de calamine, de rouille, de peinture friable et de matériaux étrangers. La peinture qui reste doit être suffisamment adhérente pour permettre un sablage jusqu'au métal brillant à nu.

La surface de l'acier doit être exempte d'huile, de graisse et de saillies visibles ainsi que de la calamine, de la rouille, de la peinture et de matériaux étrangers. La surface doit présenter une rugosité régulière par le sablage.

Ces classes de propreté peuvent être obtenues par l'utilisation des différents agents de sablage, tels que l'acier, le corindon, le sable, l'inox, le verre ou des obtusés et garantissent différents types de valeur de Sa qui ont à leur tour un effet sur les valeurs de rugosité Ra et Rz et sur l'obtention du type de profil de rugosité. La fig. 2.6 donne un aperçu de Ra en fonction de l'agent/des paramètres de sablage.

La fig. 2.7 donne un aperçu de Rz en fonction de l'agent/des paramètres de sablage.

La norme utilise les définitions suivantes:

Sa 1 : Nettoyage par sablage léger.

La surface de l'acier doit être exempte d'huile, de graisse et de saillies visibles ainsi que de calamine friable, de rouille, de peinture friable et de matériaux étrangers.

Sa 2 : Nettoyage par sablage en profondeur.

La surface de l'acier doit être exempte d'huile, de graisse et de saillies visibles ainsi que de la plus grande partie de la calamine, de la rouille, de la peinture et de matériaux étrangers. La peinture qui reste doit être suffisamment adhérente.

Ces classes de propreté peuvent être obtenues par l'utilisation des différents agents de sablage, tels que l'acier, le corindon, le sable, l'inox, le verre ou des obtusés et garantissent différents types de valeur de Sa qui ont à leur tour un effet sur les valeurs de rugosité Ra et Rz et sur l'obtention du type de profil de rugosité. La fig. 2.6 donne un aperçu de Ra en fonction de l'agent/des paramètres de sablage.

La fig. 2.7 donne un aperçu de Rz en fonction de l'agent/des paramètres de sablage.

La fig. 2.8 donne un aperçu de Rz en fonction de l'agent/des paramètres de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

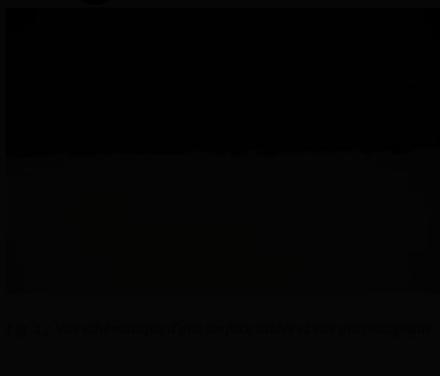
Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.

Rapport Ra à Rz pour différents agents de sablage.



Pour assurer une bonne adhérence, un Ra de 50 à 100 µm selon la norme ISO 8503-1 avec une propreté selon la norme ISO 9001-1 est demandé.

2.4 La métallisation

2.4.1 Le prétraitement de la surface

Le prétraitement de la surface a une grande influence sur la qualité du revêtement, notamment sur l'adhérence. Différents éléments doivent être pris en considération :

Le dégraissage :

L'huile, la graisse, les oxydes et d'autres saletés doivent être éliminés.

Le granillage :

La surface qui doit être granulée doit être librement accessible.

Toute la surface à préparer doit être sable à l'aide d'un composé à base de silice, les éventuels joints de soudure.

Il y a lieu de tenir compte des conditions de travail.

Nettoyage :

Après le granillage, la surface doit être nettoyée avec un produit détergent selon la norme ISO 8503-2. Sa composition doit être à base de zinc-aluminium et d'acide phosphorique pour l'aluminium.

Rugosité de surface :

Un Ra de 50 µm à 100 µm selon la norme ISO 8503-1 doit être respecté.



2.4.2 Le procédé

Le fil de zinc ou le fil d'alliage zinc-aluminium est fondu dans une flamme (à schéma de son pistolet à flamme) ou par l'intermédiaire d'un arc électrique (à son pistolet électrique).

Le métal fondu ainsi obtenu est ensuite projeté à l'aide d'air comprimé et se solidifie immédiatement lors du contact avec le

La métallisation par projection à la flamme

Les métaux principalement utilisés sont le zinc ou le zinc-aluminium, polymérisation thermique, aluminium, zinc, zinc-aluminium et schéma de son de la métallisation le fil de zinc-aluminium est fondu dans la flamme à la sortie du pistolet à gaz. La flamme est obtenue par la combustion de propane ou de l'acétylène. Les gazes fondus sont ensuite projetés sur le substrat au moyen de gaz d'appoint comprimés. Ce type de procédé de projection permet également d'allier des différents types de fil. Bien entendu, le fil ou le substrat doit présenter la rugosité

adaptés. C'est pour cette raison que les pièces sont traitées par des granulés angulaires. La métallisation adhère ainsi correctement à l'acier. L'épaisseur du revêtement dépend du nombre de passages sur la pièce, généralement effectués sous forme croisée.



Les matériaux à projeter pour ce procédé sont les métaux et les alliages qui peuvent être obtenus sous forme de fil et qui présentent un point de fusion nettement inférieur à la température de la source de chaleur utilisée. Le terme «schoopage», selon le nom de l'inventeur, est utilisé lorsque des fils de zinc ou d'aluminium sont utilisés.

Les propriétés du procédé

- Forme du matériau: fil (ex. de manière limitée, une forme de cordon ou de baguette).
- Source d'énergie thermique: la combustion d'un combustible et d'oxygène.
- Combustible: propane, butane, acétylène.
- Température de la source de chaleur: 2000°C.
- Vitesse de projection: 100 à 300 m/min.

Le revêtement obtenu est poreux et adhérent. Le revêtement est généralement appliqué sur des surfaces planes ou légèrement courbées. Le revêtement est généralement appliqué sur des surfaces planes ou légèrement courbées.

Bonne résistance à la compression.
Faibles propriétés d'adhésion.
Procédé de projection thermique peu coûteux.
Procédé transportable, une projection sur site est possible.

Quelques applications

- Protection contre la corrosion d'édifices de ponts, etc., par de l'aluminium, du zinc et leurs alliages.
- Protection électrique (blindage) l'air, le zinc, etc.



sur le substrat, ou il forme une couche de protection.

Le procédé de métallisation par pulvérisation thermique est le plus répandu. Il consiste à pulvériser un métal ou un alliage métallique sous la forme d'une poudre à l'aide d'un canon à poudre. La bonne adhérence de la couche métallique est obtenue en fonctionnant à de faibles vitesses de pulvérisation. Cependant, il est possible alors que la mobilité de l'atome en grande, le travail sur site est le plus possible.

Les propriétés du procédé

- Forme du matériau : fils électriquement conducteurs ou fils chargés.
- Source d'énergie thermique : par décharge électrique (arc).
- Température du procédé : $> 2000^{\circ}\text{C}$.
- Vitesse des particules : $> 100\text{ m/s}$.

Quelques caractéristiques

- Structure lamellaire interponctuelle.
- Degré d'oxydation élevé dans le revêtement.
- Bonne adhérence et bonne densité de la couche.
- Procédé simple à mettre en œuvre.
- Polyvalent et fiable.
- Capacité de production élevée.
- Procédé de pulvérisation thermique peu coûteux.
- Procédé transportable, une projection sur site est possible.



Quelques applications

- Protection contre la corrosion d'éléments de ponts, etc., par de l'aluminium, du zinc et leurs alliages.
- Protection électrique (blindage) par l'étain, le zinc, etc.
- Revêtements antidérapants et de traction.



2.4.3 Les paramètres

Un certain nombre de paramètres influencent le procédé de métallisation :

L'intensité de courant : il détermine le degré d'ionisation de l'air. Le degré de ionisation dépend de l'intensité du courant, la tension, la tension est un paramètre indépendant qui peut être réglé séparément. Le courant détermine l'énergie thermique. Plus le courant est élevé, plus la température de la flamme est élevée. Les particules sont donc plus chauffées et ont entraîné une meilleure adhérence. La tension détermine le degré de ionisation de l'air, plus la tension est élevée, plus la température de la flamme est élevée.

Le courant détermine l'énergie thermique. Plus le courant est élevé, plus la température de la flamme est élevée. Les particules sont donc plus chauffées et ont entraîné une meilleure adhérence. La tension détermine le degré de ionisation de l'air, plus la tension est élevée, plus la température de la flamme est élevée. Les particules sont donc plus chauffées et ont entraîné une meilleure adhérence.

La pression du gaz de pulvérisation : la pression influence la structure de la couche de peinture. Plus la pression est élevée, plus les particules projetées sont petites et plus la structure de la couche est fine. L'air comprimé influence également la porosité et l'adhérence de la couche en raison de la présence des bulles de peinture.

La distance de métallisation : en fonction du procédé, plus grande est la distance, plus les particules sont petites, mais une distance importante a également pour conséquence une augmentation de la porosité. Une distance importante a également pour conséquence une augmentation de la porosité.

La distance de métallisation : en fonction du procédé, plus grande est la distance, plus les particules sont petites, mais une distance importante a également pour conséquence une augmentation de la porosité.

La distance de métallisation : en fonction du procédé, plus grande est la distance, plus les particules sont petites, mais une distance importante a également pour conséquence une augmentation de la porosité.

Les conditions atmosphériques : l'humidité du substrat, l'air sec, le degré d'humidité relative.

Le degré d'humidité relative : le degré d'humidité relative.

La température ambiante : la température ambiante.

2.5. Le suivi de la qualité

2.5.1. Contrôle de la qualité

Le contrôle de qualité est un processus continu qui se déroule pendant toute la réalisation.

Contrôle visuel : le contrôle visuel est la méthode la plus courante pour contrôler la qualité. Elle consiste à inspecter visuellement les pièces et à détecter les défauts.

Contrôle de l'épaisseur de revêtement : le contrôle de l'épaisseur de revêtement est une méthode courante pour contrôler la qualité. Elle consiste à mesurer l'épaisseur de la couche de peinture.

Contrôle de la porosité : le contrôle de la porosité est une méthode courante pour contrôler la qualité. Elle consiste à mesurer la porosité de la couche de peinture.

Contrôle de l'adhérence : le contrôle de l'adhérence est une méthode courante pour contrôler la qualité. Elle consiste à mesurer l'adhérence de la couche de peinture.

Contrôle de la dureté : le contrôle de la dureté est une méthode courante pour contrôler la qualité. Elle consiste à mesurer la dureté de la couche de peinture.

Analyse microscopique d'une section d'un échantillon : il s'agit d'un contrôle de qualité qui est utilisé pour détecter les défauts sur une plaque de test.

252 Le mesurage

Le mesurage est l'expression d'une grandeur observée par un nombre d'une unité pertinente qui peut être comparée à des valeurs de la même unité. Le mot de mesure peut être employé de deux manières. Le mesurage peut être une mesure de grandeurs physiques ou de grandeurs descriptives.

Les mesures quantitatives sont effectuées à l'aide d'instruments de mesure et sont généralement des observations indirectes (effectuées avec un instrument) avec une interprétation par l'observateur. Des mesures qualitatives sont effectuées lorsqu'une quantification n'est pas possible ou lorsque la quantification est trop coûteuse ou trop chronophage et que la précision est moins importante.

Les observations qualitatives sont indicatives et sont effectuées sur une variable. Les observations quantitatives sont généralement des observations directes (effectuées sans instrument) avec une interprétation par l'observateur. Des mesures qualitatives sont effectuées lorsqu'une quantification n'est pas possible ou lorsque la quantification est trop coûteuse ou trop chronophage et que la précision est moins importante.

Le mesurage est la mesure de la performance d'un processus ou d'un produit. Le mesurage est le processus de collecte de données de qualité ou de mesure de la satisfaction des clients.

Le mesurage est la mesure de la satisfaction des clients, de la détermination des KPI (Key Performance Indicators) ou des indicateurs de performances lors d'une évaluation de la stratégie ou du déploiement d'un projet sur la culture de qualité. Le concept de mesure y est toujours lié. Mais la mesure n'est pas un objectif en soi, on perd de vue ce qu'on mesure. Mesurer n'est synonyme de savoir que lorsqu'on sait ce qu'on mesure.

*"To measure is to know.
If you can not measure it,
you can not improve it."*

Mesurer, contrôler, rectifier. Nous ne faisons pas que mesurer, nous en connaissons la raison !

Pour surveiller

Pour prévenir les problèmes

Univoque

Prévention de défaillance

Précision jusqu'à 1 µm

L'utilisation d'un appareillage de mesure adéquat et la connaissance des méthodes de mesure sont nécessaires pour la mesure de grandeurs. Un aspect essentiel concerne l'estimation de l'erreur de mesure. En effet, une valeur mesurée n'est jamais exactement égale à la valeur réelle de la grandeur.

Précision
Exactitude
Fiabilité
Rapidité
Sécurité
Facilité d'utilisation
Précision
Exactitude
Fiabilité

mesurée.

Pour pouvoir comparer des mesures, les unités à utiliser ont été définies dans un consensus international : le système SI.

Les facteurs qui jouent un rôle dans l'apparition d'écarts (erreurs de mesure) sont :

- l'objet de mesure ;
- l'instrument de mesure ;
- l'erreur humaine ;
- les conditions de mesure ;
- lors de la mesure de très petites particules, l'incertitude de mécanique quantique.

La technique va de plus en plus loin et les exigences sont de plus en plus élevées.

Le client et le concepteur d'un produit déterminent la forme et la précision.

Le fabricant devra satisfaire à ces exigences. Il est donc important de savoir comment mesurer les dimensions et la forme.

Lorsqu'on regarde à travers une loupe d'un agrandissement de 1000x

Comment mesurer ?

On dispose actuellement de différentes possibilités. Comme indiqué dans le schéma de la figure 2.10, on dispose de moyens analogiques à numériques, de complètement manuel à totalement automatique.

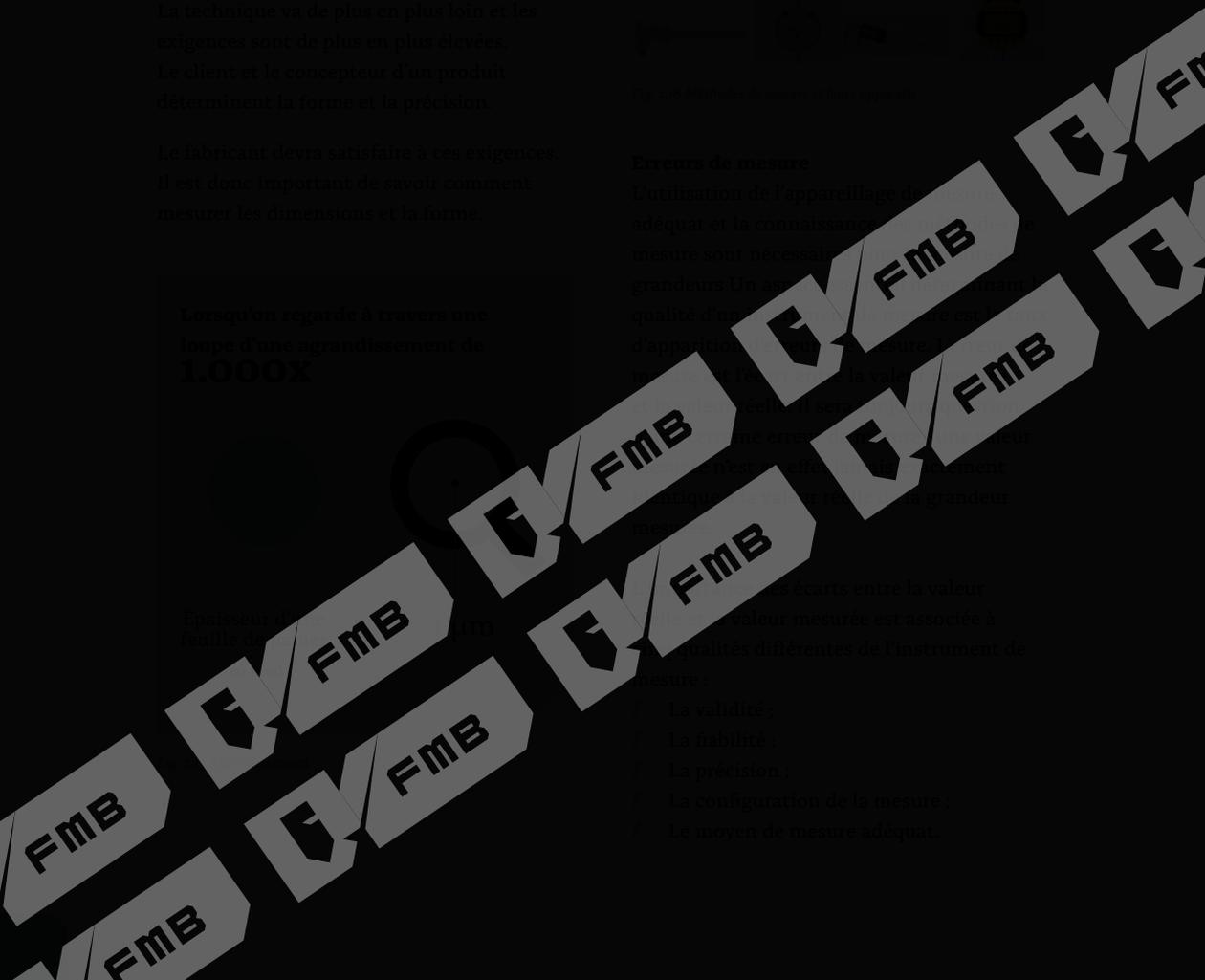
Erreurs de mesure

L'utilisation de l'appareillage doit être adéquat et le concepteur des mesures doit être conscient des erreurs possibles. Il est donc important de connaître les différents types d'erreurs de mesure.

- l'erreur de lecture ;
- l'erreur de positionnement ;
- l'erreur de mesure ;
- l'erreur de mesure de la longueur ;
- l'erreur de mesure de la forme ;
- l'erreur de mesure de la position.

Les écarts entre la valeur mesurée et la valeur réelle sont appelés erreurs de mesure. Les causes les plus différentes de l'instrument de mesure sont :

- La validité ;
- La stabilité ;
- La précision ;
- La configuration de la mesure ;
- Le moyen de mesure adéquat ;





Le concept de fiabilité est lié au concept de non-fiabilité. Une mesure non fiable est quelque chose qui dit n'importe quoi ou qui essaie de vous faire croire n'importe quoi. Une personne fiable est par contre quelqu'un qui dit toujours la vérité. L'information que vous recevez peut être placée sur une échelle de 0 à 100 %, 0 % signifie alors une absurdité totale alors que 100 % signifie totalement cohérent avec la réalité. Tout comme chez les hommes, les instruments de mesure peuvent différer dans leur manière de fournir des informations fiables.

Quels que soit vos efforts, une mesure n'est jamais à 100 % fiable. C'est peut être dû à l'instrument de mesure, à la procédure de mesure ou à l'objet à mesurer. La taille d'un être humain est une caractéristique relativement constante mais si vous le mesurez avec une petite règle en plastique de 30 cm, la mesure ne sera pas très fiable. Vous pouvez également envisager d'utiliser une règle en métal ou un mètre ruban, mais les résultats ne seront pas tous égaux. D'une

manière ou d'une autre, les résultats seront toujours légèrement différents, ne serait-ce que d'un millième de millimètre. Chaque instrument de mesure manque donc un peu de fiabilité, mais un instrument semble donner une information plus fiable qu'un autre.

Un changement d'instrument de mesure peut donc influencer le score. Mais la caractéristique à mesurer elle-même peut également l'influencer. Par exemple, on pense souvent que la taille d'une personne est une constante. Ce n'est pas le cas. Si on mesure la taille d'une personne tôt le matin, elle sera un peu plus élevée que lorsque la même personne est mesurée avec le même instrument en fin de journée. Cette diminution est provoquée par le travail effectué pendant la journée, la fatigue et donc un certain affaissement se produit naturellement. Certains aspects, tels que la motivation et la concentration, sont même soumis à de grandes fluctuations. Leur mesure fiable est difficile.

Un score attribué par l'instrument de mesure à une caractéristique d'une unité d'étude peut être considéré comme une somme d'un certain nombre de facteurs. On peut donc dire que le score mesuré est déterminé par une somme de facteurs, constituée par le score réel de la caractéristique, l'écart entre l'état de cette caractéristique au moment de la mesure et l'écart dans l'état de l'instrument de mesure au moment de la mesure.

Un instrument de mesure est plus fiable lorsqu'il attribue ces scores à des caractéristiques dont l'écart de mesure est le moins attribuable possible à l'instrument de mesure lui-même.

Comment se déroule une étude de fiabilité en pratique ? On dispose de deux manières : la réalisation en même temps de deux mesures identiques ou plus ou la réalisation de deux mesures, mais à des instants différents. Cette dernière méthode, deux instants de mesure, peut être mise en œuvre avec le même instrument de mesure, ou alors justement pas avec le même instrument mais avec un instrument de mesure quasiment identique. Par le calcul d'une corrélation (produit instantané) entre les scores, on peut établir la fiabilité de l'instrument.

Chaque méthode fournit un coefficient de fiabilité qui possède sa propre interprétation. Un instant de mesure :

- Deux mesures avec le même instrument de mesure (fiabilité interne)
- Deux mesures avec deux instruments de mesure

Deux instants de mesure :

- Le même instrument de mesure (fiabilité de test-retest)
- Instruments de mesure identiques (fiabilité)

L'homogénéité est également souvent appelée cohérence interne et la spécificité et la stabilité pourraient être considérées comme deux formes de la fiabilité test-retest. Cronbach a mis au point une mesure pour l'homogénéité qui est à présent utilisée de manière générale : le Cronbach's alpha. Lui-même le désigne toujours par cohérence interne. Il existe alors plus que deux formes de fiabilité.

Une dernière précision. Si la corrélation entre les mesures est élevée, l'instrument est fiable. Si la corrélation est faible, votre instrument de mesure n'est probablement pas fiable.

Choix du moyen de mesure :

- Il existe actuellement de nombreux bons appareils de mesure et de nombreux logiciels de calcul.



Si je mesure 10,50, le client obtient-il le même résultat ?



Calibrage et étalonnage

Le calibrage est la comparaison d'un système ou d'un appareil à un standard pour déterminer les propriétés. Le réglage pour que le calibrage corresponde à la spécification est appelé ajustement. Un étalonnage consiste à effectuer d'abord un calibrage, puis un ajustement.

Calibrage/étalonnage

Le calibrage est la comparaison d'un système ou d'un appareil à un standard pour déterminer les propriétés. Le réglage pour que le calibrage corresponde à la spécification est appelé ajustement. Un étalonnage consiste à effectuer d'abord un calibrage, puis un ajustement.

Prenons l'exemple d'une comparaison entre les valeurs de modèle et les valeurs pratiques. Si le modèle était parfait, tous les points se situeraient sur une ligne droite. L'adaptation des paramètres de modèle pourrait fournir un meilleur résultat.

Le terme de **calibrage** trouve ses racines dans l'industrie de l'armement, où le diamètre interne du canon d'une arme ou son rayon sont toujours appelés **calibre**. Le calibrage d'une machine à coudre les dents d'une arme pour pouvoir toucher la cible à l'aide de la munition utilisée se dans les conditions climatiques données.

Calibrage de modèles

Le calibrage est entre autres réalisé lors de la mise au point, par exemple, d'un modèle de simulation.

Dans ce cas, le calibrage est un procédé statique qui a lieu pendant le développement du modèle (pour le réglage des paramètres internes de modèle) mais également après (pour les paramètres externes à définir par l'utilisateur). Sur base de données empiriques, les paramètres de modèle (variables) sont mesurés ou estimés et réglés. Cette démarche est appelée **calibrage du modèle**. La validation du modèle peut avoir lieu après cette phase.

Calibrage d'appareils de mesure

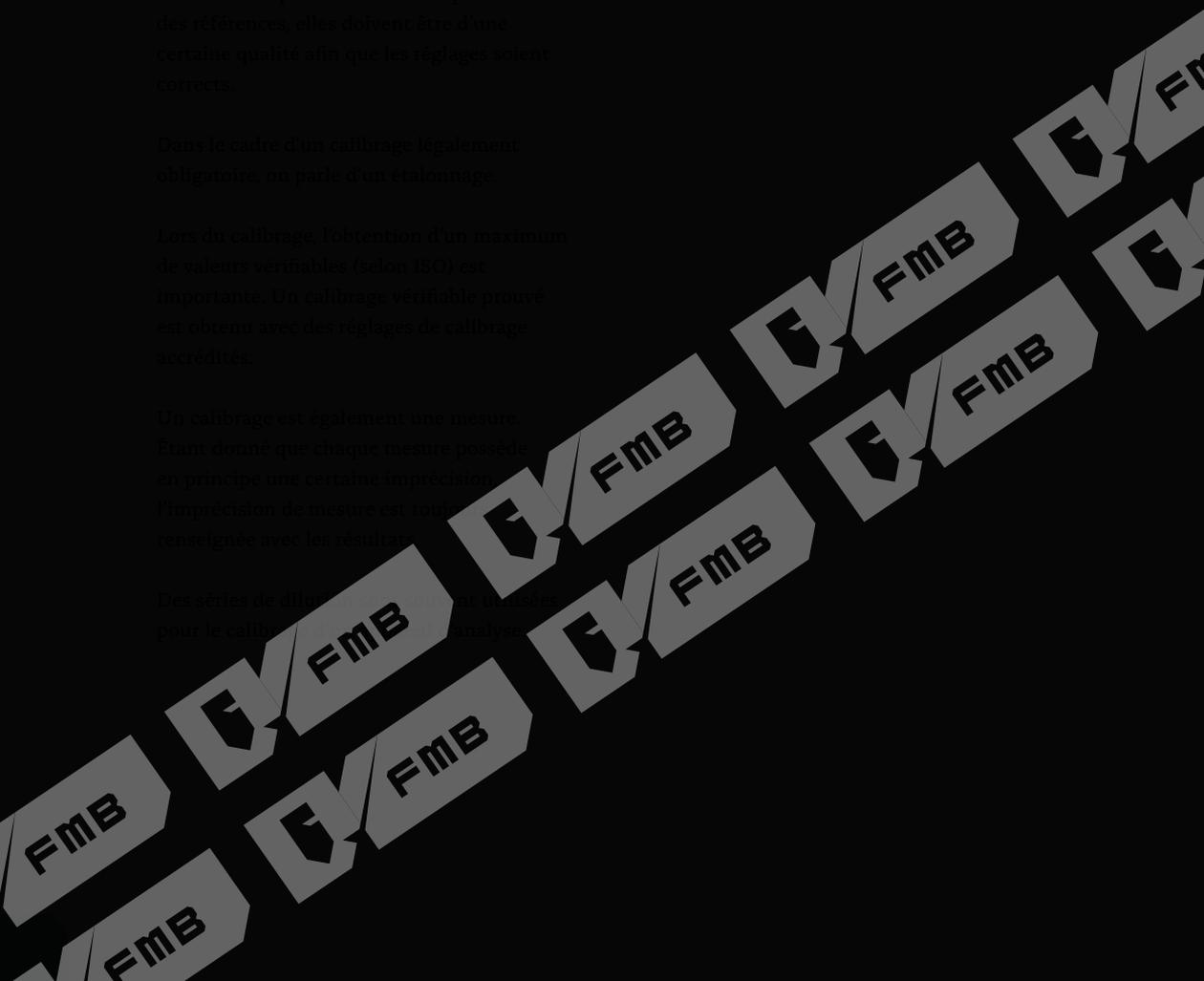
Lors du calibrage d'appareils de mesure, on constate l'écart (biais) de l'appareil de mesure. Ceci peut être réalisé par la comparaison avec une référence ou un modèle calculé. Les écarts sont inscrits dans un tableau de correction. Lors du traitement numérique de valeurs de mesure, les valeurs de correction peuvent être appliquées aux valeurs mesurées afin d'obtenir un résultat précis. Si l'instrument de mesure est adapté, c'est-à-dire si l'écart de mesure est corrigé, on parle d'un ajustement. Le calibrage permet de déterminer si l'appareil de mesure satisfait encore à ses spécifications. Lorsqu'on utilise des références, elles doivent être d'une certaine qualité afin que les réglages soient corrects.

Dans le cadre d'un calibrage légalement obligatoire, on parle d'un étalonnage.

Lors du calibrage, l'obtention d'un maximum de valeurs vérifiables (selon ISO) est importante. Un calibrage vérifiable prouvé est obtenu avec des réglages de calibrage accrédités.

Un calibrage est réellement une mesure. Étant donné que chaque mesure possède en principe une certaine imprécision, l'imprécision de mesure est toujours renseignée avec les résultats.

Des séries de données sont nécessaires pour le calibrage, par exemple :





de mesure de l'épaisseur des revêtements connus. Elle est utilisée pour mesurer l'épaisseur d'un revêtement ou d'un film sur un substrat non ferromagnétique. Le principe est basé sur la mesure de la force d'attraction d'un aimant permanent. Le revêtement est retiré de manière purement mécanique. Une force graduelle du lecteur est opposée à la force d'adhérence ou de collage de l'aimant de manière telle que l'aimant permanent baille par se détacher de la surface. L'indication obtenue est la mesure de l'épaisseur.



Induction magnétique (Fe)

Cette méthode utilise deux bobines magnétiques. Le champ magnétique variant lors de l'approche de la surface ferromagnétique, le changement du champ magnétique est associé à la distance entre le palpeur et la surface – donc à l'épaisseur de couche. La deuxième bobine enregistre le courant magnétique. Ce couplage magnétique entre les deux pôles magnétiques est la mesure pour l'épaisseur de couche.

Technique par courant de Foucault ou «Eddy currents» (NF)

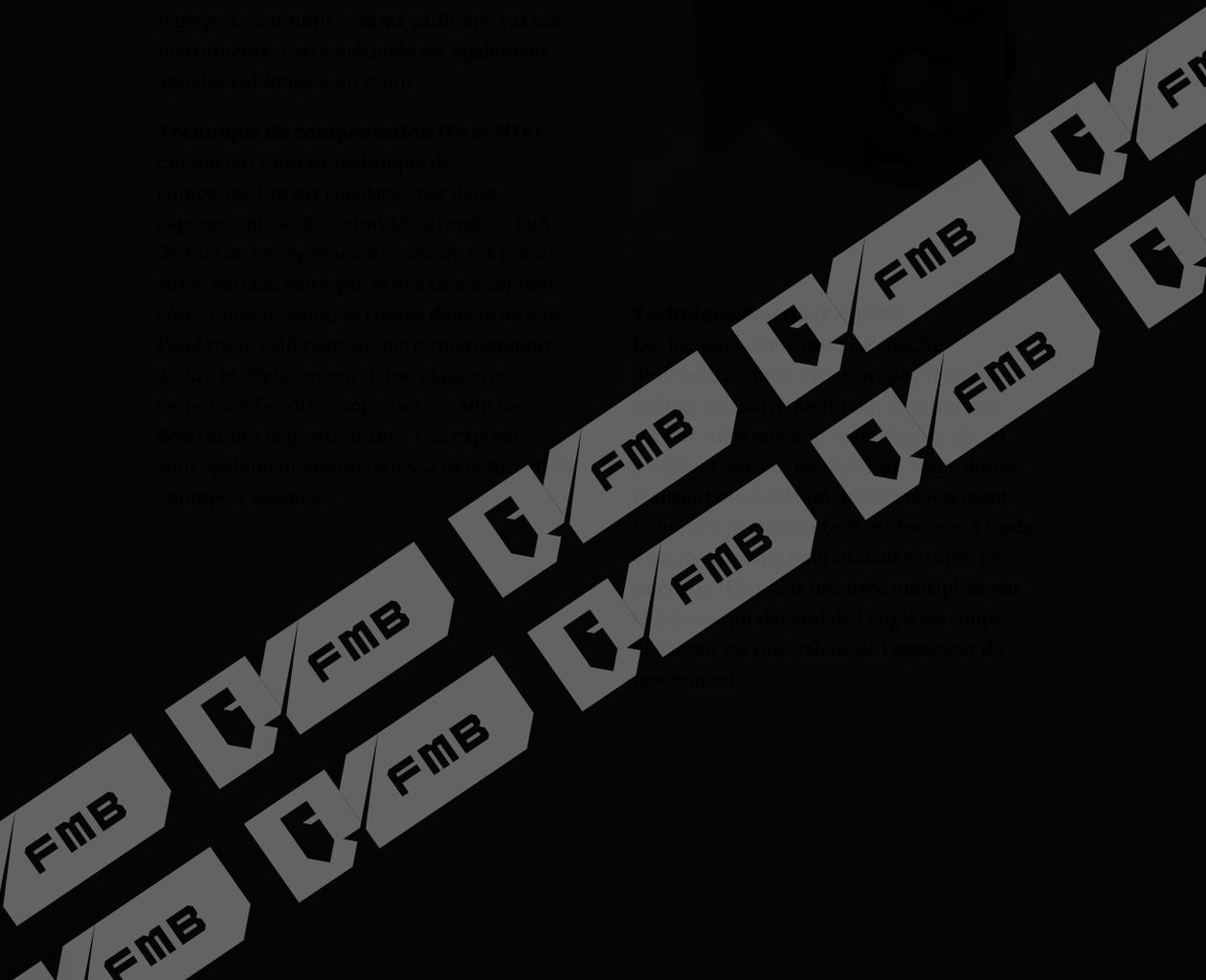
Cette méthode est utilisée pour mesurer des revêtements non conducteurs sur des substrats non ferromagnétiques tels que l'aluminium. Les techniques par courant de Foucault sont basées sur le principe de l'induction électromagnétique. Une bobine génère une tension alternative haute fréquence qui crée un champ magnétique dont le sens varie en fonction de la tension alternative proposée. Lorsque le palpeur NF est approché de la surface, un courant de Foucault est généré, qui influence le champ magnétique de la bobine. L'effet dépend de la caractéristique de la surface et de la distance entre le palpeur et la surface, par exemple l'épaisseur de couche.

Capteurs combinés (C et NTC)

Ces capteurs combinent les systèmes de mesure de la température ambiante et de la puissance, avec les résultats combinés présentés de façon continue sur un écran numérique spécifique de l'ECU. Ce type de capteur est généralement utilisé dans un capteur sans conducteur de haute puissance appelé capteur de Hall. Il est utilisé pour mesurer la température ambiante et la puissance dans les moteurs à combustion interne. Les capteurs combinés sont généralement utilisés dans les moteurs à combustion interne pour mesurer la température ambiante et la puissance dans les moteurs à combustion interne. Les capteurs combinés sont généralement utilisés dans les moteurs à combustion interne pour mesurer la température ambiante et la puissance dans les moteurs à combustion interne.

Technique de compensation (C et NTC)

Ce système capteur technique de compensation est constitué de deux capteurs qui sont combinés. Le premier est un capteur de température sans conducteur de haute puissance appelé capteur de Hall. Le second est un capteur de température ambiante. Les capteurs combinés sont généralement utilisés dans les moteurs à combustion interne pour mesurer la température ambiante et la puissance dans les moteurs à combustion interne.



Technique non destructive (ultrasons)

Cette technique de mesure non destructive possède un grand domaine d'application grâce à la technologie avancée des ultrasons et est utilisée pour la mesure de revêtements et des épaisseurs.

Le bois, le plastique, les métaux, les composites, les revêtements, les peintures peuvent être mesurés.

La mesure de la porosité est effectuée par effet de réfraction de la lumière. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un peigne à dents de différentes longueurs dans la peinture.

La mesure de la porosité est effectuée à l'aide d'un peigne présentant des dents de différentes longueurs dans la peinture. Les dents les plus externes sont les supports, entre lesquels se trouvent les dents de mesure. La détermination de l'épaisseur de couche humide est effectuée par la lecture de la dernière dent humide et de la première dent sèche. Les roulette de mesure sont des disques ronds pourvus d'un arête concentrique gravée au centre. Une partie de la roulette s'humidifie lorsqu'elle se place dans la peinture humide. La lecture est effectuée par l'enregistrement de la position de la transition humide-sèche sur l'échelle gravée.

2.5.4 La porosité de la couche de protection

Porosité

La porosité est la présence de petites ouvertures (pores) dans un matériau. On retrouve le mot "pore" (petite ouverture)

pour les matériaux poreux par effet de réfraction de la lumière.

Les revêtements des enduits poreux, les revêtements des métaux et du métal

peuvent être mesurés par effet de réfraction de la lumière. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un peigne à dents de différentes longueurs dans la peinture. Les dents les plus externes sont les supports, entre lesquels se trouvent les dents de mesure. La détermination de l'épaisseur de couche humide est effectuée par la lecture de la dernière dent humide et de la première dent sèche. Les roulette de mesure sont des disques ronds pourvus d'un arête concentrique gravée au centre. Une partie de la roulette s'humidifie lorsqu'elle se place dans la peinture humide. La lecture est effectuée par l'enregistrement de la position de la transition humide-sèche sur l'échelle gravée.

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad [-]$$

avec V_p = volume des pores

V_t = volume total

Perméabilité

La perméabilité est une propriété de matériau qui décrit la mesure dans laquelle un solide laisse passer une autre substance.

La perméabilité d'un matériau varie en fonction de la substance qui passe. Si un matériau ne laisse pas passer une autre substance, il est imperméable à cette substance.

L'unité de la perméabilité est le Darcy, généralement mesuré en milli-Darcy ou mD (1 Darcy vaut environ $10^{-12}m^2$). La loi de Darcy décrit l'écoulement de substances dont on déduit la perméabilité.

D'un point de vue clinique, la perméabilité peut être utilisée pour séparer un mélange sur une membrane. La membrane laisse passer la substance pour laquelle elle présente une perméabilité élevée alors que la substance de basse perméabilité est retenue.

$$k = \frac{q\mu}{A(\Delta P/L)} \quad [m^2]$$

avec q = débit de liquide (m^3/s)

μ = viscosité du liquide (N/s/m²)

ΔP = différence de pression (N/m²)

L = épaisseur de la membrane (m)

La porosité est la fraction de volume d'un matériau qui est occupée par des pores.

relation entre la porosité et la perméabilité, les matériaux poreux ne sont pas tous hautement perméables et vice versa. Un matériau poreux dans lequel les pores sont à peine reliés les uns aux autres dans l'espace présente une perméabilité relativement basse, alors qu'un matériau dont le volume poreux est petit mais dans lequel les pores sont bien interconnectés est relativement perméable.

Surface spécifique

La surface spécifique est une propriété d'un solide qui représente la surface totale par unité de masse ou de volume de ce matériau. Il s'agit d'une valeur de base qui peut être utilisée pour déterminer le type et d'autres propriétés du matériau (par exemple le sable).

Les deux définitions possibles sont :

Le rapport de la surface totale et du volume du matériau (exprimé en m^2/m^3).

Le rapport de la surface totale et de la masse du matériau (exprimé en m^2/kg). Cette propriété est importante pour les matériaux poreux.

Tortuosité

La tortuosité est une propriété d'une route courbée. Différents test ont été développés pour quantifier cette propriété. La

l'ordinateur est souvent utilisé pour décrire le diagramme de phase de matériaux supports poreux, telles que le sol et la neige (par exemple).



La porosité peut être calculée comme suit :

$$V_p = V - V_m$$
$$\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_m}{V} = 1 - \frac{V_m}{V}$$

- V_p = volume total des pores
- V_m = volume mathématique de la pièce
- V = volume de la matrice comprimée

Méthodes de mesure de la porosité

Méthode directe

(6) On détermine tout d'abord le volume de l'éprouvette totale (V). Ensuite, l'éprouvette est déformée de manière telle que tous les pores disparaissent. Ensuite, on détermine de nouveau le volume (volume de matrice V_m). La porosité est ensuite calculée par $\phi = (V - V_m) / V$. Étant donné que cette méthode ne compte pas des pores continus ainsi que des pores discontinus, elle mesure la porosité totale. Le grand inconvénient de cette méthode est associé à la force qui est nécessaire pour fermer tous les pores et qui est souvent tellement élevée que des déformations inacceptables surviennent dans le matériau de matrice.

Méthode optique

(6) Dans cette méthode de mesure, on admet que les pores sont répartis de manière équilibrée dans le matériau. La porosité peut alors être déterminée à partir de la porosité de surface. Une surface polie est observée sous le microscope et le volume des pores est déterminé. On détermine ainsi la porosité totale. Par l'impregnation de l'éprouvette depuis l'extérieur avec de la cire et l'observation consécutive d'une surface polie, on détermine la porosité effective, car la cire ne peut atteindre que les pores continus.

Le % de pores dans un carré est déterminé par microscope et des méthodes d'analyse d'image.



Données

Si de très petits pores sont présents, les grands pores le sont également, et le résultat est le même. Les autres données sont les mêmes.

Méthode d'aspiration

(7) L'éprouvette est plongée sous vide dans un liquide mouillant de manière parfaite. Le liquide se déplace dans les pores. On détermine le poids de l'éprouvette avant et après l'immersion. Cette méthode permet de déterminer la porosité effective de manière relativement précise. Le liquide doit toutefois bien mouiller les pores. Si cette méthode n'est pas réalisée sous vide, il faut veiller à l'absence d'air dans les pores. Une autre manière pour déterminer la porosité par immersion utilise la force osmomotrice. L'éprouvette est pesée au dessus et sous l'eau. La diminution du poids sera une mesure du volume déplacé (le volume des pores). Seule la porosité ouverte (effective) est mesurée.



Données

Les données sont les mêmes que pour la méthode optique.

Méthode par dilatation d'un gaz (pneumatique)

On dilate dans un récipient le volume de l'échantillon dans un volume connu. On mesure la variation de volume et de pression.

On applique la loi de Boyle-Mariotte :

$$V_1 P_1 = V_2 P_2$$

V_1 = volume total [m³]

V_2 = volume du récipient qui contient l'éprouvette [m³]

V_0 = volume du deuxième récipient sous vide [m³]

P_1 = pression de départ [Pa]

P_2 = pression finale [Pa]

On trouve la quantité de gaz adsorbé :

La mesure de la quantité de gaz adsorbé est la plus précise. Elle est basée sur la mesure de la variation de volume et de pression. Les quantités de gaz adsorbé sont très faibles. On utilise des récipients de volume connu. On dilate le volume de l'échantillon dans un volume connu. On mesure la variation de volume et de pression. On applique la loi de Boyle-Mariotte. On trouve la quantité de gaz adsorbé.

Les inconvénients

La mesure doit avoir lieu à des températures très basses qui peuvent modifier la structure des pores.

Les mesures prennent beaucoup de temps.

La détermination de la quantité de gaz adsorbé est très compliquée.

Méthodes de densité

Dans ces méthodes, on détermine la densité de l'éprouvette ainsi que la densité de la matrice de l'éprouvette. La masse de substance poreuse est déterminée quasi exclusivement par la masse de l'éprouvette car la masse de l'air dans les pores est négligeable par rapport à la masse de la matrice.

$$m = \rho_{\text{mat}} \cdot V_{\text{mat}} = \rho_{\text{mat}} \cdot V_{\text{p}}$$

$$\phi = 1 - \frac{V_{\text{mat}}}{V_{\text{p}}} = 1 - \frac{m}{\rho_{\text{mat}} \cdot V_{\text{p}}}$$

ρ_{mat} = ρ matrice [kg/m³]

ρ_{p} = ρ masse [kg/m³]

Inconvénient

Cette méthode ne convient pas pour les mousses très poreuses car la masse de l'air dans les pores n'est alors plus négligeable par rapport à la matrice.

Méthode statistique

[62] Lorsque les pores sont de formes géométriques régulières, on peut utiliser la méthode statistique.

Les inconvénients

Pour déterminer la porosité effective, la pression sur le mercure doit être très grande. Comme dans la première méthode, ceci pourrait entraîner une modification dans la structure de matrice et la mesure peut donc devenir non fiable. La méthode n'est pas très écologique en raison des quantités de mercure qui sont utilisées. Généralement, le mercure ne peut pas être complètement enlevé de l'éprouvette et celle-ci reste donc contaminée par le mercure.

Porosité et métallisation





La réalisation de revêtements métalliques par projection thermique est possible sur différents types de substrats. La métallisation par divers procédés est utilisée pour la protection contre la corrosion que pour des couches de protection mécanique. Pour la métallisation caractéristique par du zinc ou un alliage zinc-aluminium, on obtient des valeurs de 10-12 % pour les surfaces métalliques de manière électrique et de 17-18 % pour la métallisation à flamme.

Porosité %



■ Flamme ■ Zn ■ Zn-Al

2.6 Adhérence

Selon la norme ISO 2063-2 une adhérence de minimum 4 MPa est demandée pour le zinc et le zinc-aluminium.

2.6.1 Le mécanisme d'adhérence

Le concept adhérence désigne la force de liaison entre la couche de protection et l'interface du substrat et les particules projetées individuelles. Lors de la projection thermique, trois mécanismes de liaison importants existent entre les particules projetées d'une part et les particules et le substrat d'autre part :

L'adhérence mécanique

Il s'agit de l'ancrage mécanique sur une surface sablee rendue rugueuse. Les particules projetées se déposent et s'accrochent aux sommets du substrat sable.

L'adhérence physique

Si la surface est propre d'un point de vue métallique, les atomes se rapprochent tellement qu'ils s'attirent.

L'adhérence métallurgique

Une diffusion se produit localement entre les particules projetées et le substrat. Des

microsoudures se forment au niveau des sommets de la surface sablée et entre les particules.

L'adhérence dépend fortement de la vitesse et de la température des particules projetées. Elle est directement influencée par la longueur et la température de l'arc, par la chaleur spécifique et la dimension et la forme des particules. Si la vitesse de la particule est trop basse, l'impact est trop bas. Si la température est trop basse, la diffusion est trop faible. Si toutefois la température est trop élevée, la particule explose. En résumé, l'énergie cinétique élevée des particules projetées assure justement une couche particulièrement dense et adhésive.

Combinaisons possibles de la vitesse et de la température des particules projetées en relation avec la réaction de la particule avec le substrat.

Vitesse élevée & température élevée
Explosion de la particule, décoloration et soufflure du substrat, pas de couche de protection utilisable.

Vitesse élevée & température basse
Pour des particules projetées fortement déformées par elles-mêmes (par exemple le duréol du tungstène tungstène) combinaison entraîne de nombreuses couches de protection.

Vitesse basse & température basse
Cette combinaison entraîne de nombreuses couches de protection.

Vitesse basse & température élevée
Celle-ci entraîne de nombreuses couches de protection.

comparable au grenailage.

Adhérence & rigidité



L'adhérence en fonction de la valeur Ra suit un schéma comparable, ce qui montre de nouveau qu'un degré de propreté n'est pas une garantie pour une adhérence. Cf. fig. 2 et 3.

Les combinaisons possibles de la vitesse et de la température des particules projetées en relation avec la réaction de la particule avec le substrat.

Vitesse élevée & température élevée
Explosion de la particule, décoloration et soufflure du substrat, pas de couche de protection utilisable.

Vitesse élevée & température basse
Pour des particules projetées fortement déformées par elles-mêmes (par exemple le duréol du tungstène tungstène) combinaison entraîne de nombreuses couches de protection.

Vitesse basse & température basse
Celle-ci entraîne de nombreuses couches de protection.

Vitesse basse & température élevée
Celle-ci entraîne de nombreuses couches de protection.

Une mauvaise préparation de la surface – propreté, rigidité – ouvre la norme ISO 8503-1 pour le prétraitement de la surface.

Les distances de projection sont grande. La distance optimale pour la métallisation à la flamme est comprise entre 20 et 30 millimètres. La température est comprise entre 1000 et 1200 millimètres. La température est comprise entre 1000 et 1200 millimètres.

Le processus de métallisation est

Le stockage et le transport

Les pièces métallisées doivent être stockées et transportées avec une préférence pour un carton fermé vers l'atelier de peinture. Si malade avec les pièces métallisées qui se trouvent dans les boîtes de peinture, les boîtes de peinture peuvent poser des problèmes. Par exemple, l'ouverture du couvercle peut entraîner des dommages. Il faut éviter la métallisation et le revêtement dans une salle et même entreprise.

En outre, une pollution entre les couches doit être évitée. Il faut donc éviter que de la graisse, des sautes et de l'humidité s'ajoutent sur la métallisation. De même, il est conseillé d'éviter d'utiliser de vieux échantillons de peinture, de vieux échantillons de peinture ou d'échantillons de peinture pour éviter une mauvaise adhérence de revêtement.

Le processus de métallisation est

2.72 L'inflammabilité de la poussière de métallisation

La poussière de zinc réagit avec l'eau et forme de l'hydrogène. Cette réaction est exothermique et l'augmentation de la température dans certaines circonstances peut être suffisante pour que la poussière de zinc s'enflamme.

Mesures de prévention :

- Veiller à ce que de l'eau ne puisse pas entrer dans la cabine de métallisation pour prévenir l'inflammation de la poussière de zinc.
- Stocker les résidus de métallisation dans des fûts métalliques fermés en un endroit protégé.
- Ne pas effectuer de travaux de meulage et de ponçage dans la cabine de métallisation pour éviter les étincelles.
- Les travaux de soudage doivent être effectués sous argon.

2.73 L'explosivité

Pour autant que nous le sachions (expérience de plus de 40 ans dans les entreprises de métallisation), aucune explosion ne s'est produite dans une cabine de métallisation avec du zinc ou un alliage zinc-aluminium.

Le risque d'explosion dépend de la taille des particules de poussière. Les métallisations de zinc et zinc-aluminium ont un caractère explosif limité.

Quelques données à titre informatif :

Les valeurs paramétriques généralement connues pour les explosifs et rapportées généralement à des poudres relativement grossières :

Température d'auto-inflammation (TAI) dans une couche : 540°C, dans un nuage : 690°C

Energie minimale d'inflammation (EMI) : 640 - 960 mJ

Concentration minimale d'explosion : 450 g/m³

Pression maximale d'explosion : 2,5 bars

Augmentation maximale de la pression (MMP) : 1,0 bars/sec

Indice d'explosion : 0,1. Cet indice d'explosion de 0,1 est considéré comme faible pour de telles poudres mais dépend fortement de la dimension de particules.

2.74 REACH

Zincor 5-A de chez FMB est mentionné dans l'annexe 17 de l'article 17 de REACH.

Il est classé comme explosif limité (O₂) et est mentionné dans l'annexe 17 de REACH.

Il est classé comme explosif limité (O₂) et est mentionné dans l'annexe 17 de REACH. Les informations relatives à la classification de Zincor 5-A sont disponibles dans la fiche de données de sécurité (FDS) sous le numéro de sécurité 001. Les renseignements sur la liste de substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (SVHC) selon l'article 30 de REACH en une concentration supérieure à 0,1 % masse/masse

Ardores de zinc
Feuilles de zinc
Fils de zinc-aluminium
Alliages de zinc pour fonderie
Poudre de zinc
Bandes de zinc
Fils de zinc
Fils d'acier-zinc
Fils d'acier-zinc
Fils d'acier-zinc
Fils d'acier-zinc



pour plus d'informations
visitez le site de l'agence
des services chimiques via le
www.eurapa.eu/candidate-list





ZINC- ALUMINIUM

3. Zinc-aluminium

3.1. Evolution

Suite à la pollution croissante de l'air et de l'eau, les concentrations croissantes de SO₂ dans l'air et de chlorures d'ammonium dans l'eau ont entraîné une progression importante de la corrosion des métaux exposés. Les métaux les plus sensibles sont ceux qui possèdent une couche d'oxyde protectrice peu adhérente et peu résistante à l'attaque chimique. Cette couche de zinc, formée par l'oxydation de l'acier au zinc, est donc le plus rapidement érodée, entraînant une déperdition importante de matière et une détérioration accélérée de la structure. L'usage de l'aluminium qui possède naturellement une couche d'oxyde plus adhérente et plus résistante, ainsi que la possibilité d'allier ces deux métaux, ont permis de développer des alliages zinc-aluminium qui offrent un meilleur compromis entre résistance à la corrosion et résistance mécanique. L'usage de ces alliages est en constante augmentation, et leur utilisation est encouragée par les normes européennes relatives aux alliages d'aluminium. Les alliages zinc-aluminium sont classés en deux groupes : les alliages à base d'aluminium et les alliages à base de zinc.

3.2. Étude comparative de la projection thermique de zinc et de zinc-aluminium

3.2.1. L'étude Fémcor

Les premiers essais ont été effectués sur du zinc et de l'aluminium en forme de billes, par le Centre de Recherche Français de Remontement et de Maintenance des Matériaux, afin de déterminer de quel côté les particules de zinc

étaient le plus abîmées par rapport au zinc dans un environnement marin et dans un milieu industriel qui serait plus agressif que l'eau de mer. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Le but de l'étude consistait à tester les systèmes d'application de peinture par projection thermique. Les résultats ont été très satisfaisants, et ont permis de constater que les alliages zinc-aluminium offrent une meilleure résistance à la corrosion que le zinc pur.



Pour les plaques de test métalliques sans couches de peinture.

Il a été démontré clairement que le zinc agit comme à une action sacrificielle, offrant ainsi donc une protection cathodique.

L'aluminium offre un effet cathodique comparable à celui du zinc, formant une couche d'oxyde protectrice.

Les alliages zinc-aluminium offrent une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 60/40 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 55/45 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 50/50 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 45/55 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 40/60 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 35/65 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

Le revêtement zinc-aluminium 30/70 offre une protection cathodique comparable à celle de l'aluminium.

3.2.2. L'étude Vieille Montagne

[65,66]

Au cours des années 70 du siècle dernier, une étude approfondie a été réalisée pour comparer les différences de la projection thermique entre un fil de zinc pur et un fil de zinc-aluminium 15%. Le but consistait à déterminer, en première instance, l'efficacité

de revêtement des plaques de test métalliques.

Les plaques de test métalliques ont une épaisseur de 20 mm sur les

faces opposées. Elles sont peintes à l'aide de peinture

épaisseur moyenne de 0,2 mm selon norme ISO 9001 en quatre étapes.

La mesure de l'épaisseur de la peinture est effectuée à l'aide d'un

compteur de rugosité et donne une valeur de 0,2 mm qui est comparable à un 1/2 de mm.

L'épaisseur des revêtements des plaques métalliques est mesurée par le point de mesure (fig. 3.7).



10 plaquettes étaient utilisées pour chaque essai. Un système robotique effectuait la projection, comme indiqué dans la fig. 3.2. Les 10 plaquettes centrales étaient utilisées pour les déterminations de poids.

L'adhérence était mesurée par la méthode du quadrillage. Les microduretés indiquaient une valeur double pour l'alliage ZnAl par rapport à la valeur du zinc pur. La densité apparente (comme mesure de la porosité) était déterminée par le rapport augmentation du poids à épaisseur de couche.

La métallisation était réalisée à l'aide du système robotique à une distance de 15 cm du substrat et à une onde de déplacement de 24 cm. La vitesse de métallisation était de 2,5 et de 3,75 m/min. Les épaisseurs de couche étaient mesurées par un péromètre à 3 points.

Résultats avec une flamme acétylène-oxygène ou propane-oxygène

Les figures 3.3 et 3.4 donnent la croissance de l'épaisseur du revêtement à chaque passage du pistolet de projection. L'efficacité pour ZnAl est de 10,2 m²/h alors que celle pour le zinc est que de 12,5 m²/h.

Augm. de Zn par passage Augm. de ZnAl₅ par passage Augm. du ZnAl₅ par passage



L'augmentation est parallèle pour les deux alliages. L'adhérence est d'environ 200 MPa, soit une efficacité intérieure de 20 % en raison de la porosité.

Épaisseur de la métallisation

Les figures 3.3 et 3.6 représentent l'épaisseur de revêtement en fonction du temps pour une vitesse de 5,3 mm/min et de 15,53 mm/min. Pour le zinc pur, on obtient une épaisseur de revêtement de 1,25 µm après 1 heure et 3,75 µm après 3 heures. Pour le ZnAl, on obtient une épaisseur de revêtement de 1,25 µm après 1 heure et 3,75 µm après 3 heures.

Épaisseur du revêtement

de Zn en fonction du

Épaisseur du revêtement

de ZnAl en fonction du passage

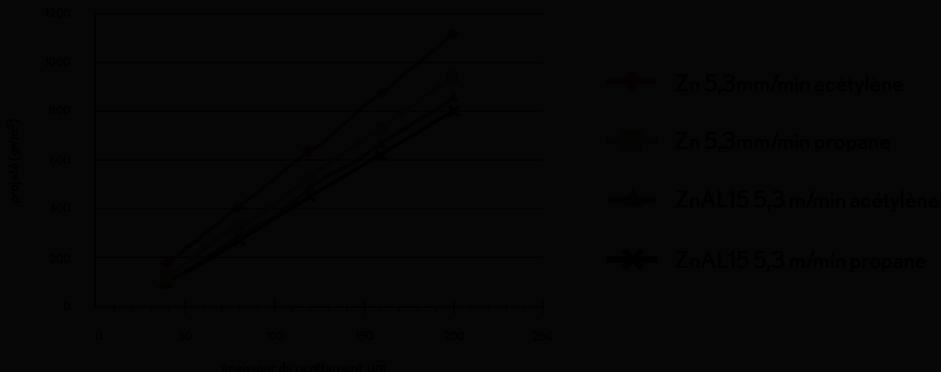


Corrélation entre l'augmentation du poids et l'épaisseur du revêtement

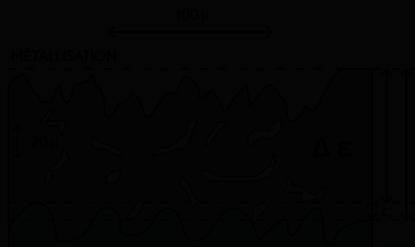
Les figures 3.3 et 3.4 et les figures 3.5 et 3.6 concernant l'épaisseur de revêtement permettent de déterminer la densité apparente de la couche projetée. Cette corrélation montre également que cette densité apparente change lors de chaque passage. Il s'en suit que la porosité diminue avec l'épaisseur du revêtement.

La densité apparente d'une couche de métallisation en Zn pur est en moyenne de 5,01 (par rapport à 100 % Zn = 7,1) et celle d'une couche de métallisation en ZnAl est de 4,77 (par rapport à 100 % ZnAl = 5,73). On obtient une porosité moyenne de 12 %.

Corrélation entre l'épaisseur et le poids



Lequel travaille avec un taux de remplissage de 70% et est le moins cher par litre d'huile pressée de première pression de froid ?



SURFACE SABLEE

de remplissage et le taux de remplissage du contenant. Cela est dû au fait que l'huile pressée de première pression de froid est plus chère que l'huile pressée de deuxième pression de froid. Les données de coût sont basées sur un volume de 100 litres d'huile pressée de première pression de froid et de 100 litres d'huile pressée de deuxième pression de froid.

Taux de remplissage

Le taux de remplissage est le pourcentage d'huile pressée de première pression de froid contenue dans l'huile pressée de première pression de froid. Le taux de remplissage est de 70% pour l'huile pressée de première pression de froid et de 80% pour l'huile pressée de première pression de froid.

Coût minimal du litre

Le coût minimal du litre est le coût le plus bas pour un litre d'huile pressée de première pression de froid. Le coût minimal du litre est de 0,15 € pour l'huile pressée de première pression de froid et de 0,14 € pour l'huile pressée de première pression de froid.

Coût de revient et consommation de lit

Le coût de revient est le coût le plus bas pour un litre d'huile pressée de première pression de froid. Le coût de revient est de 0,15 € pour l'huile pressée de première pression de froid et de 0,14 € pour l'huile pressée de première pression de froid. La consommation de lit est le volume d'huile pressée de première pression de froid consommé par litre d'huile pressée de première pression de froid. La consommation de lit est de 1,00 litre pour l'huile pressée de première pression de froid et de 1,00 litre pour l'huile pressée de première pression de froid.

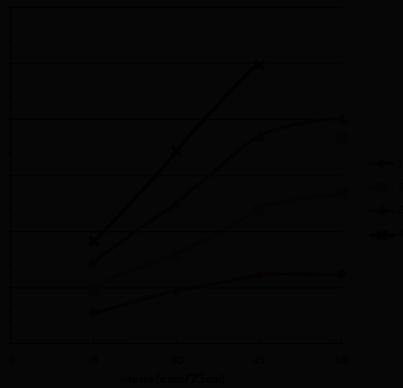


de 35 % obtenu avec le pistolet à une distance de 60 mm, comme représenté dans la figure 3.10.



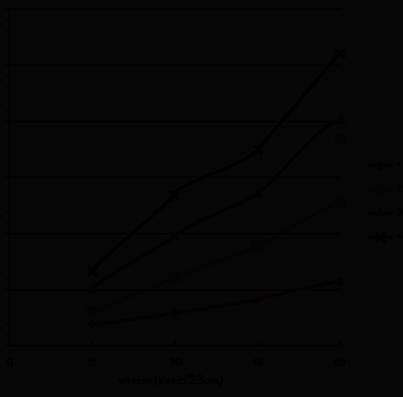
Une telle étude a été effectuée pour une distance de 60 mm au propane et les résultats de l'étude effectuée au acétylène ont été confirmés. On arrive à un rendement de 50 % pour le zinc et de 70 % pour ZnAl, toutefois à une vitesse de projection intérieure 13,75 m/min par rapport à 5,53 m/min pour le Zn.

Poids de Zn en fct. du passage



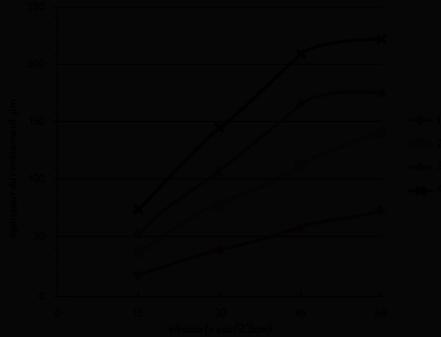
Poids de ZnAl₃ en fct. du passage

Poids de ZnAl₃ en fct. du passage

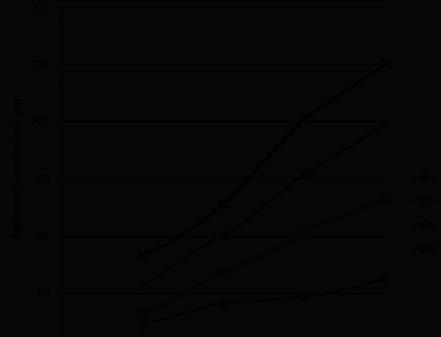


Il est à remarquer qu'à une épaisseur de revêtement de seulement 40 µm, le risque éventuel de manque d'épaisseur de revêtement au niveau des sommets de la rugosité de la surface grenillée existe encore (et ce d'autant plus lors d'une projection manuelle).

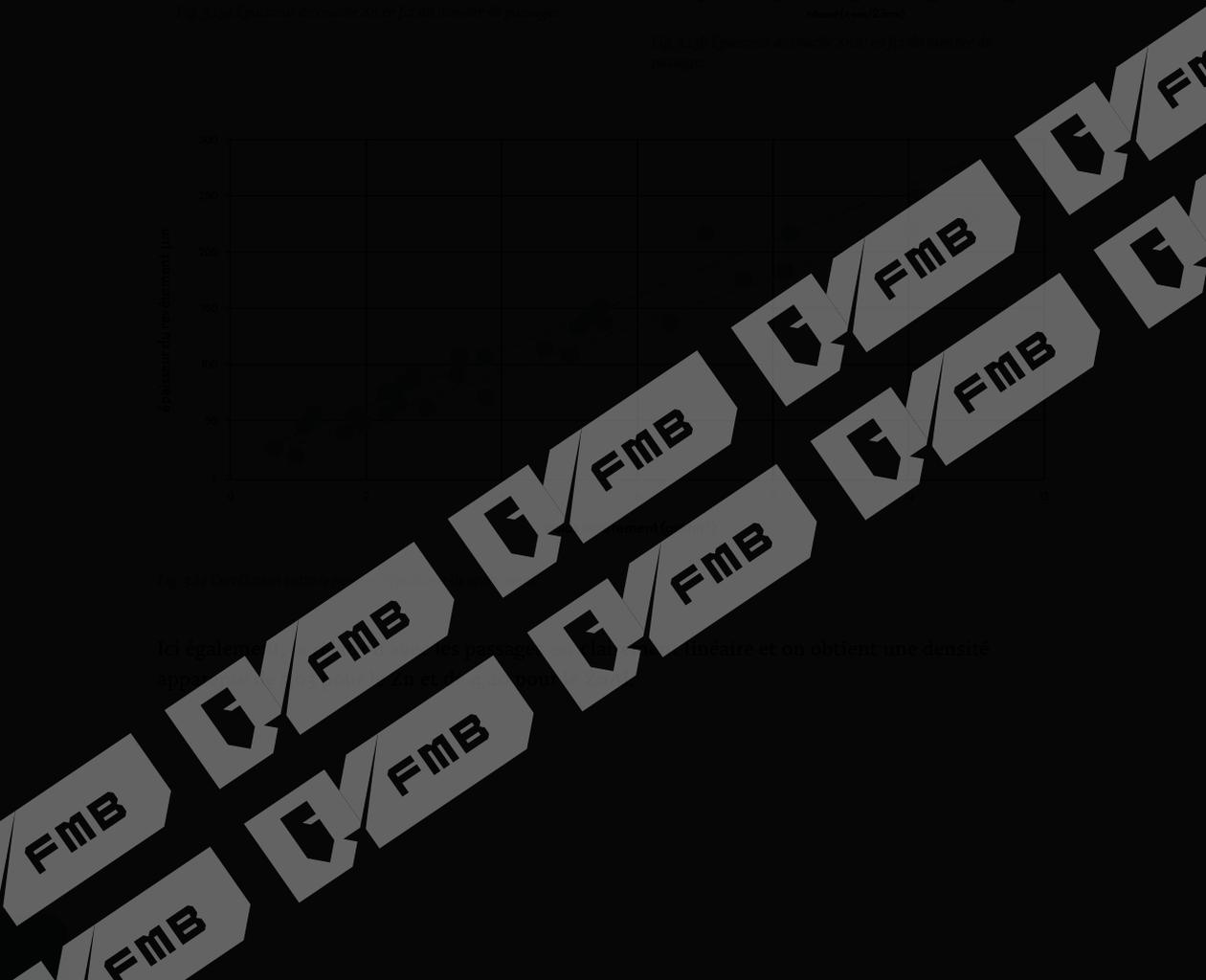
Épaisseur de revêtement
de Zn en μm , du passage

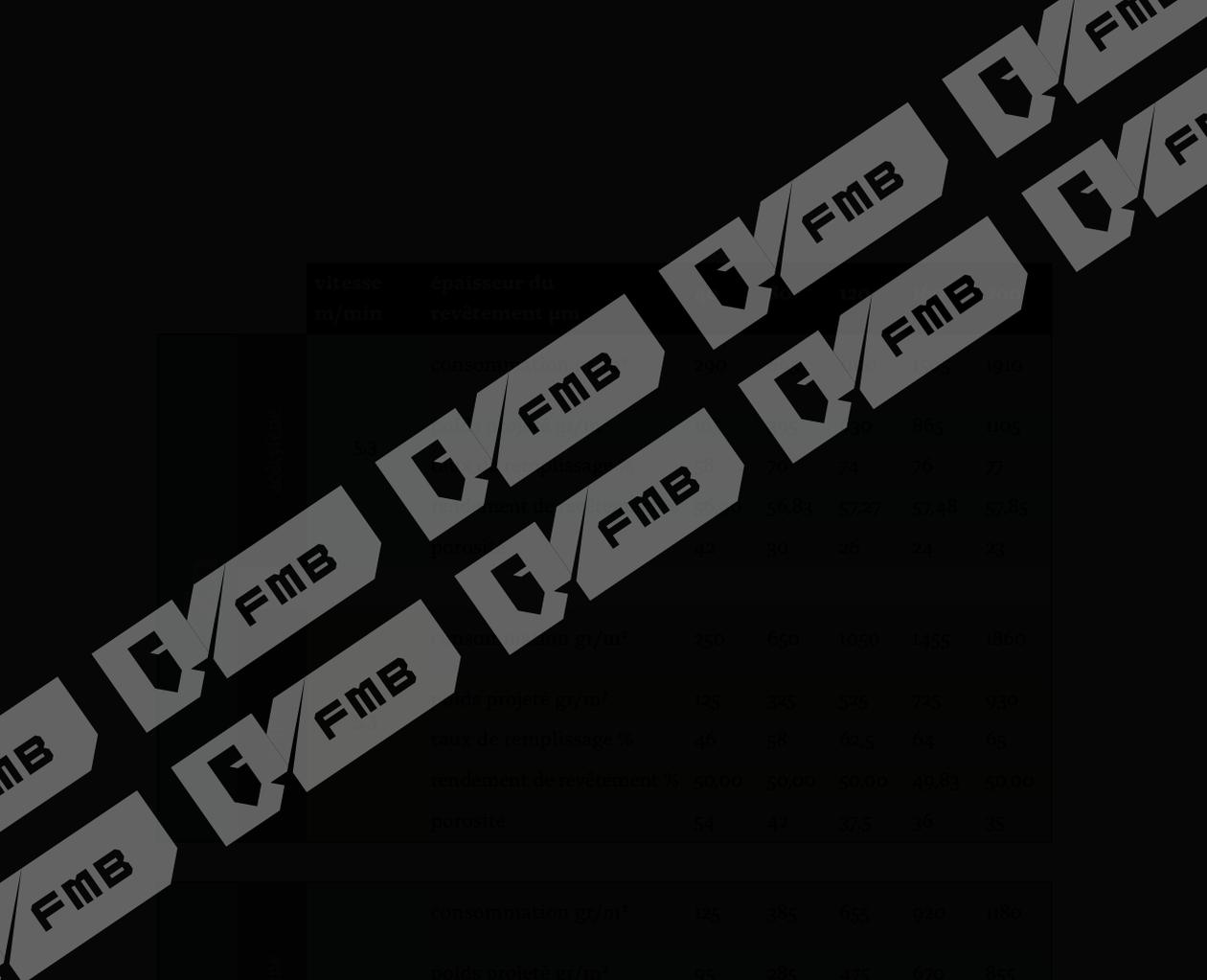


Épaisseur de revêtement
de ZnAl15 en μm , du passage



La seule solution pour garantir une épaisseur de revêtement constante et homogène est d'obtenir une densité de flux constante et homogène.





vitesse
m/min

épaisseur du
revêtement µm

	100	150	200	250	300	350	400	450	500
consommation en m ³ /h	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
puissance propre en kW	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
taux de remplissage	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
rendement de revêtement	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
parité	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
consommation en m ³ /h	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
puissance propre en kW	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
taux de remplissage	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
rendement de revêtement	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
parité	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

© 2014 FMB - Tous droits réservés. Toute réimpression est interdite.

3.2.3 Études récentes avec un arc électrique

À l'heure actuelle, les installations électriques sont de plus en plus fréquemment utilisées pour la métallisation. Il était donc temps de recommencer l'étude des années 70 avec les pistolets de projection à l'arc électrique actuels. L'étude a été réalisée au centre d'application de trials Werke AG (Duisburg, Allemagne) au cours de la période 2019-2020 et comprenait entre autres l'influence de la plupart des paramètres du procédé sur l'efficacité de recouvrement de la métallisation et les avantages de l'utilisation d'un fil de Zn/Al dans la lutte contre la corrosion.

Plusieurs paramètres peuvent être réglés sur les pistolets de projection à arc électrique ; leur influence sur la qualité du revêtement de métallisation était également testée. Certains chaînons manquants ont ainsi été trouvés et les résultats des séries de test antérieures [6, 66] ont été complétés. Pour éviter l'influence de paramètres humains, un KUKA robot a été utilisé et l'échantillon prélevé était suffisamment grand pour obtenir de bons résultats et de bonnes données pour les différents réglages paramétriques. Une plaque d'acier de 1/4 m² était découpée et grenillée selon la norme ISO 10000 à un degré de propreté Sa 2,5. La surface de surface finale de la plaque d'acier représente le traitement de surface d'essai.



Différents paramètres étaient testés, tels que le diamètre du fil, la densité de courant, la tension, la distance par rapport à la surface, la pression de l'air, la vitesse, le rythme de fusion et également différents types de pistolets.

Résultats de l'étude

Le but de l'étude était l'analyse de l'efficacité de revêtement de Zn/Al en fonction de différents paramètres de métallisation.

Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier. Le poids moyen de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.

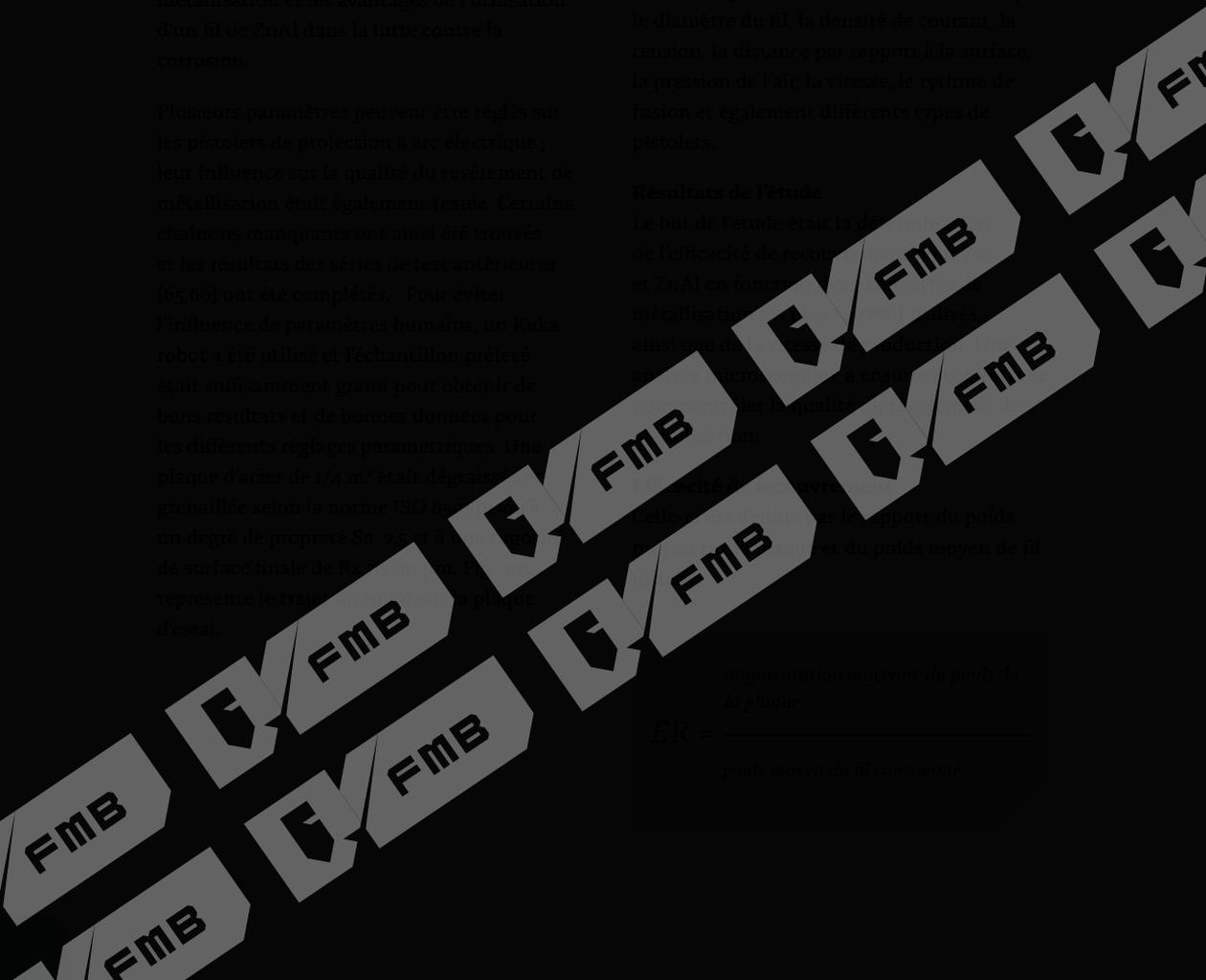
Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.

Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.

Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.

Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.

Le revêtement de Zn/Al est mesuré par rapport au poids de la surface de la plaque d'acier.



Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 20% pour le fil en 20Al et de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Le rapport de réduction du diamètre de la couche de métal est de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

La vitesse de réduction du diamètre de la couche de métal est de 20% pour le fil en 20Al et de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

Vitesse de réduction

La vitesse de réduction du diamètre de la couche de métal est de 20% pour le fil en 20Al et de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu. La vitesse de réduction du diamètre de la couche de métal est de 20% pour le fil en 20Al et de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu. La vitesse de réduction du diamètre de la couche de métal est de 20% pour le fil en 20Al et de 30% pour le fil en 20Al et 20Cu.

La vitesse de fusion

Φ	20Al	20Al et 20Cu
1,0	1,0	1,0
1,5	1,5	1,5
2,0	2,0	2,0
2,5	2,5	2,5
3,0	3,0	3,0
3,5	3,5	3,5
4,0	4,0	4,0
4,5	4,5	4,5
5,0	5,0	5,0
5,5	5,5	5,5
6,0	6,0	6,0
6,5	6,5	6,5
7,0	7,0	7,0
7,5	7,5	7,5
8,0	8,0	8,0
8,5	8,5	8,5
9,0	9,0	9,0
9,5	9,5	9,5
10,0	10,0	10,0

La vitesse de fusion dépend fortement du type de poudre utilisée mais, de manière générale, on peut dire que la vitesse augmente avec l'augmentation du diamètre et de l'intensité du courant. Il existe une petite différence de vitesse entre le fil en 20Al et le fil en 20Al et 20Cu.

La vitesse de recouvrement augmente avec l'augmentation du diamètre et on obtient un avantage d'environ 10 % pour le fil en ZnAl par rapport au fil en Zn.

Vitesse de recouvrement pour une épaisseur de revêtement moyennée de 100 µm

Ø	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
14	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
16	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
18	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
22	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
24	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
26	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
28	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
30	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Qualité de la métallisation

L'effet de la pression de l'air est le plus important sur la qualité de la métallisation. Plus le fil est épais, plus la couche de protection est poreuse. Ceci est indiqué dans la figure 2.10.

2.2.4 Étude comparative des couches de protection par métallisation dans un environnement offshore & maritime [40]

Dans le cadre du test de systèmes anticorrosion pour des installations offshore, un projet a démarré en 1999 pour comparer la composition optimale des différents systèmes de métallisation. Il s'agissait d'une pré-étude pour le test de plusieurs systèmes duplex présentant une métallisation ZnAl comme sous-couche. Tous les systèmes étaient testés à l'aide d'échantillons particuliers sur une plate-forme destinée à cette fin. Trois systèmes de plate-forme étaient étudiés simultanément pour l'action de la métallisation à long terme rapport à la corrosion dans les zones de classe C2, B2, A2 et A1 dans une atmosphère d'écoulement de vent dans une zone de classe C2, B2, A2 et A1 du Nord-Ouest de l'océan Atlantique.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Les résultats de l'étude ont été publiés dans [40]. Les conclusions de l'étude ont été les suivantes : les systèmes de métallisation duplex ZnAl ont été trouvés être les plus performants dans un environnement offshore & maritime.

Étant donné que l'agressivité de la mer du Nord est au moins 1,5 fois de celle comprise du collier, la protection contre la corrosion (comme les dimensions et les influences des matériaux) doit provoquer également une fois et demi plus de corrosion. On constate une existence d'une corrosion supplémentaire de 50 % et également une

Pour obtenir une vue globale de la protection contre la corrosion d'une couche de laque abîmée (par exemple par une rayure/fissure), une série de tests complète a été mise au point en 1999 pour tester la protection finale contre la corrosion apportée par la métallisation à nu dans les quatre zones de sollicitation (atmosphère maritime, zone sans eau, zone soumise aux marées et zone d'éclaboussure) et ce pour des revêtements de métallisation présentant différentes concentrations en aluminium (0 %, 2 %, 4 %, 10 %, 15 % et 22 %). Le but était de déterminer laquelle de ces compositions se comportait le mieux dans une zone donnée (cf. tableau 2.2).

	Temps en h	Épaisseur de revêtement
Zone 1	2000	20 µm
Zone 2	2000	20 µm
Zone 3	2000	20 µm
Zone 4	2000	20 µm
Zone 1	2000	20 µm
Zone 2	2000	20 µm
Zone 3	2000	20 µm
Zone 4	2000	20 µm

Après leur prélèvement, les échantillons ont dû être nettoyés soigneusement pour obtenir une vue de l'état des surfaces. Ils étaient en effet fortement recouverts d'algues, un des trois éléments de sollicitation (fig. 3.2) dans la mer du Nord. Les tests comparatifs ont été réalisés selon la norme EN 10269.

La fig. 3.22 montre les zones de test telles qu'installées dans le port de Helgoland pour la zone sous eau, la zone scumle aux marées et la zone d'éclaboussure. La fig. 3.23 représente les panneaux de test sur terre.

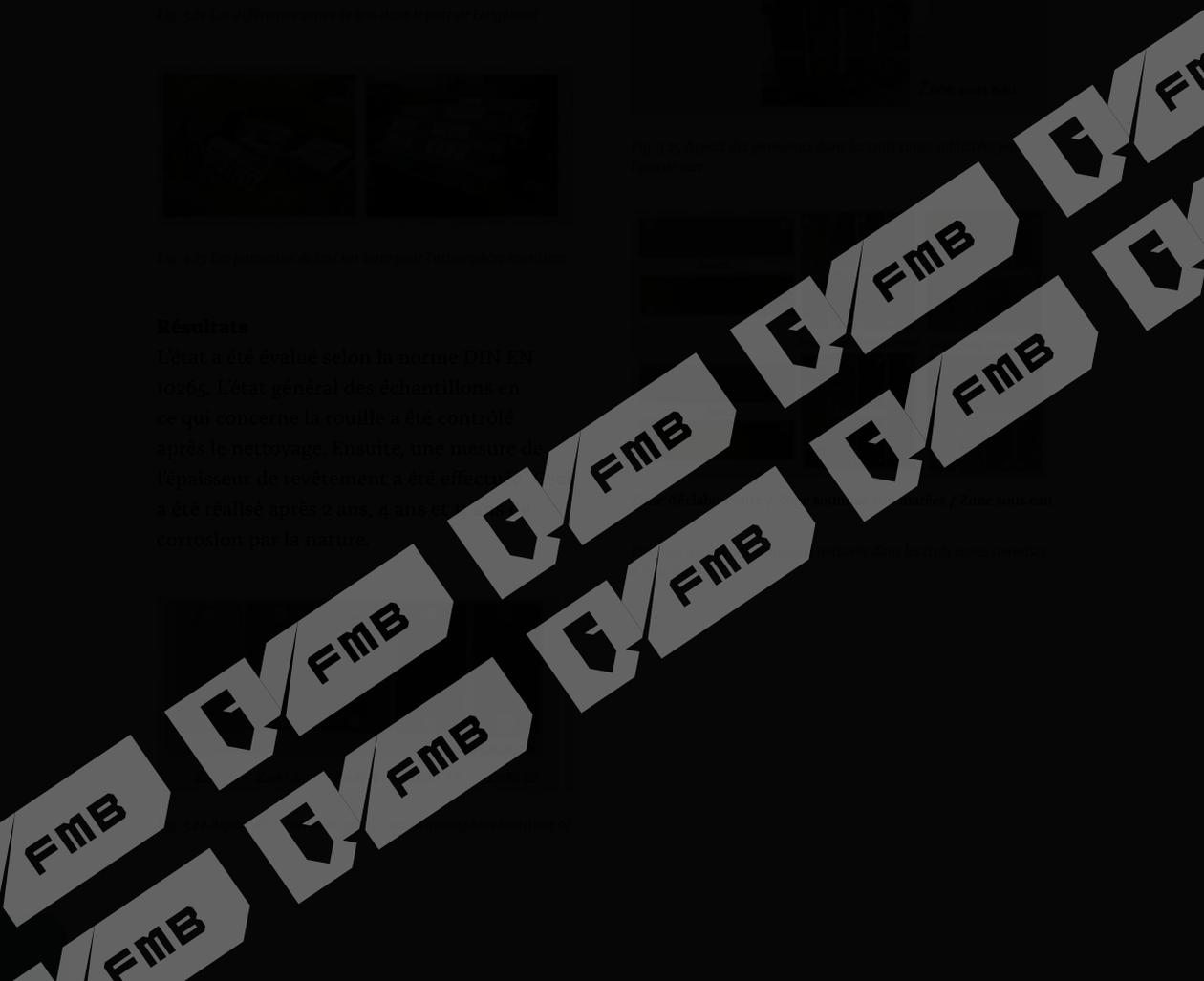


Les panneaux dans la zone de l'atmosphère maritime (sur terre fig. 3.24) donnent une image uniforme. On ne constate aucune corrosion directe ni une exposition à l'air de la mer du Nord sur terre. La mesure de l'épaisseur de revêtement montre toutefois une perte d'épaisseur pour la métallisation en zinc pur.



Résultats

L'état a été évalué selon la norme DIN EN 12065. L'état général des échantillons en ce qui concerne la rouille a été contrôlé après le nettoyage. Ensuite, une mesure de l'épaisseur de revêtement a été effectuée. Elle a été réalisée après 2 ans, 4 ans et 6 ans de corrosion par la mer.





De manière générale, on peut dire que le choix de vos équipements de site est la bonne solution si peut complètement répondre vos besoins pour le bon usage de vos sites d'été.

Résumé

Suite à un choix de système minimal suivant vos impératifs, comme population, pour les caractéristiques de base, vous allez définir en fonction de votre système de traitement de minimum de 100 personnes, un agent de dosage des piles, surmonté d'un système de dosage double à base de perles, avec un traitement supplémentaire contre les dépôts, ainsi qu'il est nécessaire, une couche de protection à base de polyuréthane.

Vous pouvez également consulter nos autres produits : [Système de traitement de l'eau](#), [Système de traitement de l'air](#), [Système de traitement de l'air](#), [Système de traitement de l'air](#).

Vous pouvez également
nous contacter par
téléphone au
02 99 60 00 00

Vous pouvez également nous contacter par email à info@fmb.fr

Une forte croissance d'algues est constatée dans la zone sous eau et la zone soumise aux marées, mais celle-ci ne semble pas avoir eu d'influence sur la corrosion des systèmes sur la durée du test. Les différents types de sollicitation n'ont pas d'influence sur le comportement de corrosion, sauf dans la zone d'éclaboussure, où l'acier à nu est très critique.

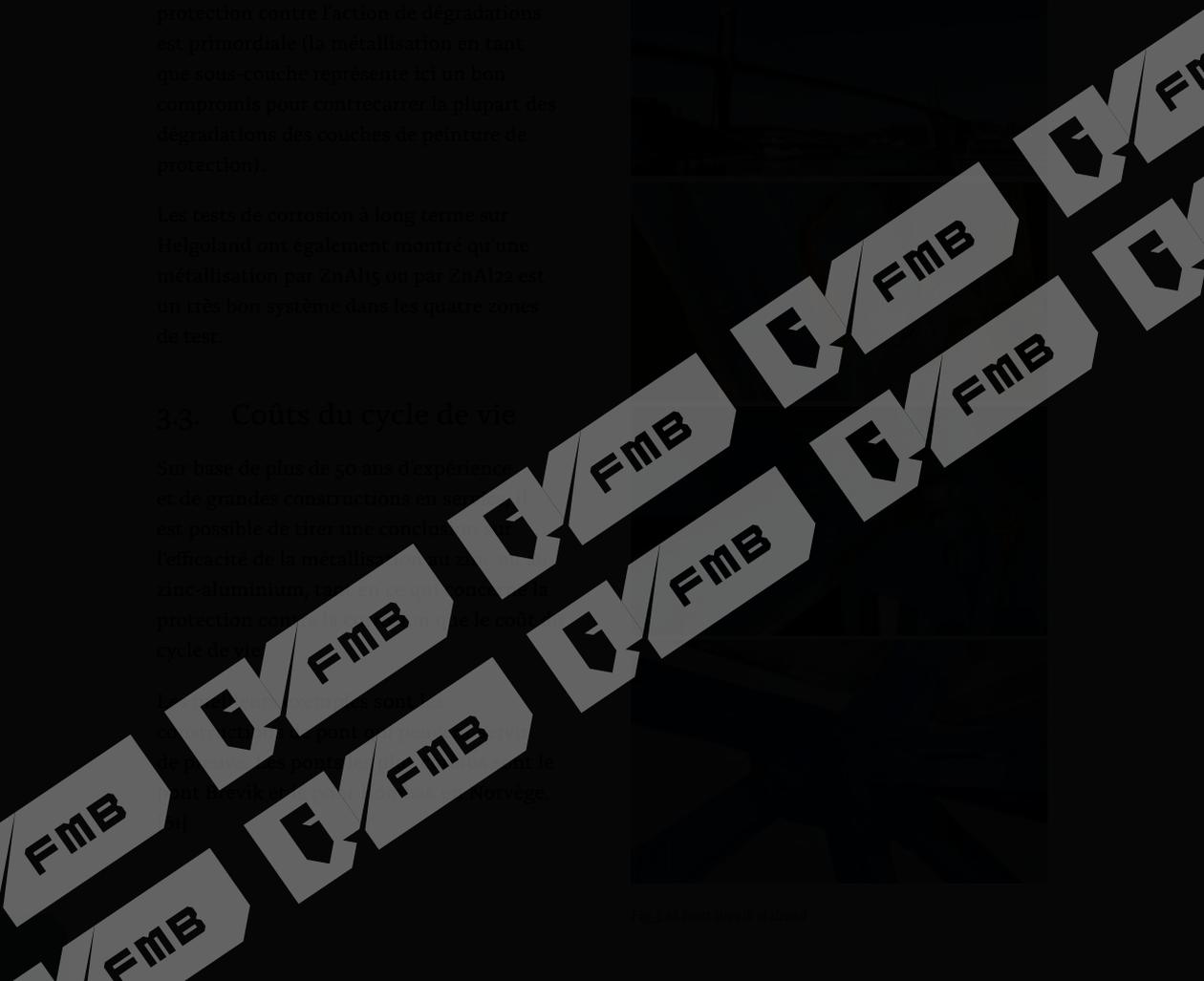
Une dégradation du revêtement de protection (action d'une entaille) est très agressive et provoque une corrosion de l'acier. Par conséquent, le très bon adhérence mécanique des revêtements de protection contre l'action de dégradations est primordiale (la métallisation en tant que sous-couche représente ici un bon compromis pour compenser la plupart des dégradations des couches de peinture de protection).

Les tests de corrosion à long terme sur Helgoland ont également montré qu'une métallisation par Zn-Alu ou par Zn-Al-Cd est un très bon système dans les quatre zones de test.

3.3 Coûts du cycle de vie

Sur base de plus de 30 ans d'expérience et de grandes constructions en acier, il est possible de tirer une conclusion favorable de la durabilité d'un revêtement aluminium + protection cathodique. Le coût du cycle de

Le pont Breilk (cf. fig. 2.20) a été construit en 1972 avec un revêtement classique par des systèmes de peinture. Au cours de la période 1972-1990, le pont a été renoué plusieurs fois par des systèmes de peinture et, en 1991, une rénovation complète par un sablage et des systèmes de peinture les plus modernes a été effectuée : peinture riche en zinc-peinture époxy et une couche de friction en polyuréthane. En 2001, une nouvelle corrosion au niveau des transitions et des brides était constatée, ce qui a conduit à une rénovation complète en 2003.



Le pont Bombal (cf. fig. 2.20) à Narvik a été construit avec un système duplex à base de métallisation au zinc et une couche intermédiaire en peinture de protection. Une peinture de renouvellement de la couche de zinc a été observée après 40 ans de service.



Figure 2.20. Comparatif du coût de protection (coût initial + coûts d'entretien) sur une période de 20 ans.

Coût (millions de NOK)	Année
Investement initial (duplex)	200
Investement initial (TSZ)	200
Coût d'entretien	0
Total	200

Coût (millions de NOK)	Année
Investement initial	200
Coût d'entretien (100)	100
Coût d'entretien (200)	200
Reconstruction totale (500)	500
Total	500

Par conséquent, une prescription d'un système duplex TSZ à peinture a été décidée pour tous les ponts en Norvège.

En 2003, une étude de suivi a été réalisée aux États-Unis [62] par la National Corporate Highway, se rapportant aux constructions en acier et leurs coûts d'entretien. Étant donné qu'au fil du temps, plusieurs systèmes de protection avaient été utilisés, cette étude donne un bon aperçu de la résistance des différents systèmes de protection utilisés contre la corrosion.

aux États-Unis, jusqu'à 90% de mobilisation ne représentant que 2% des constructions (cf. fig. 20).

À quelle fréquence utilise-t-on chacune des technologies de protection contre la corrosion de nouvelles constructions dans une nouvelle conception d'un pont en acier ?



Il est intéressant de noter que la mobilisation pondérée des technologies de protection contre la corrosion de nouvelles constructions est de 2% (cf. fig. 20).

Coût relatif pour un pont



Sur le plan de l'entretien, on a tout d'abord constaté que les revêtements moins durs ont subi moins de dommages, voire aucun, ce qui a permis de constater que les coûts de entretien sont plus faibles pour les constructions pourvues d'un bas-couche.

Enfin,

on a constaté que les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en béton. Ceci est dû à la plus grande durée de cycle de vie des revêtements destinés à des ponts en acier, qui est de 60 ans, et à la plus grande durée de cycle de vie des revêtements destinés à des ponts en béton, qui est de 30 ans.

En conclusion, on a constaté que :

- 1. Les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en béton.
- 2. Les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en acier.
- 3. Les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en acier.
- 4. Les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en acier.
- 5. Les revêtements destinés à des ponts en acier ont des coûts de cycle de vie plus élevés que ceux destinés à des ponts en acier.

Coût initial et coût de cycle de vie pour 6 revêtements destinés à des ponts en acier pour une durée de service de 60 ans dans un environnement corrosif



1. Revêtement à base de ciment

2. Revêtement à base de ciment avec un additif

3. Revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment

4. Revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment avec un additif

5. Revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment

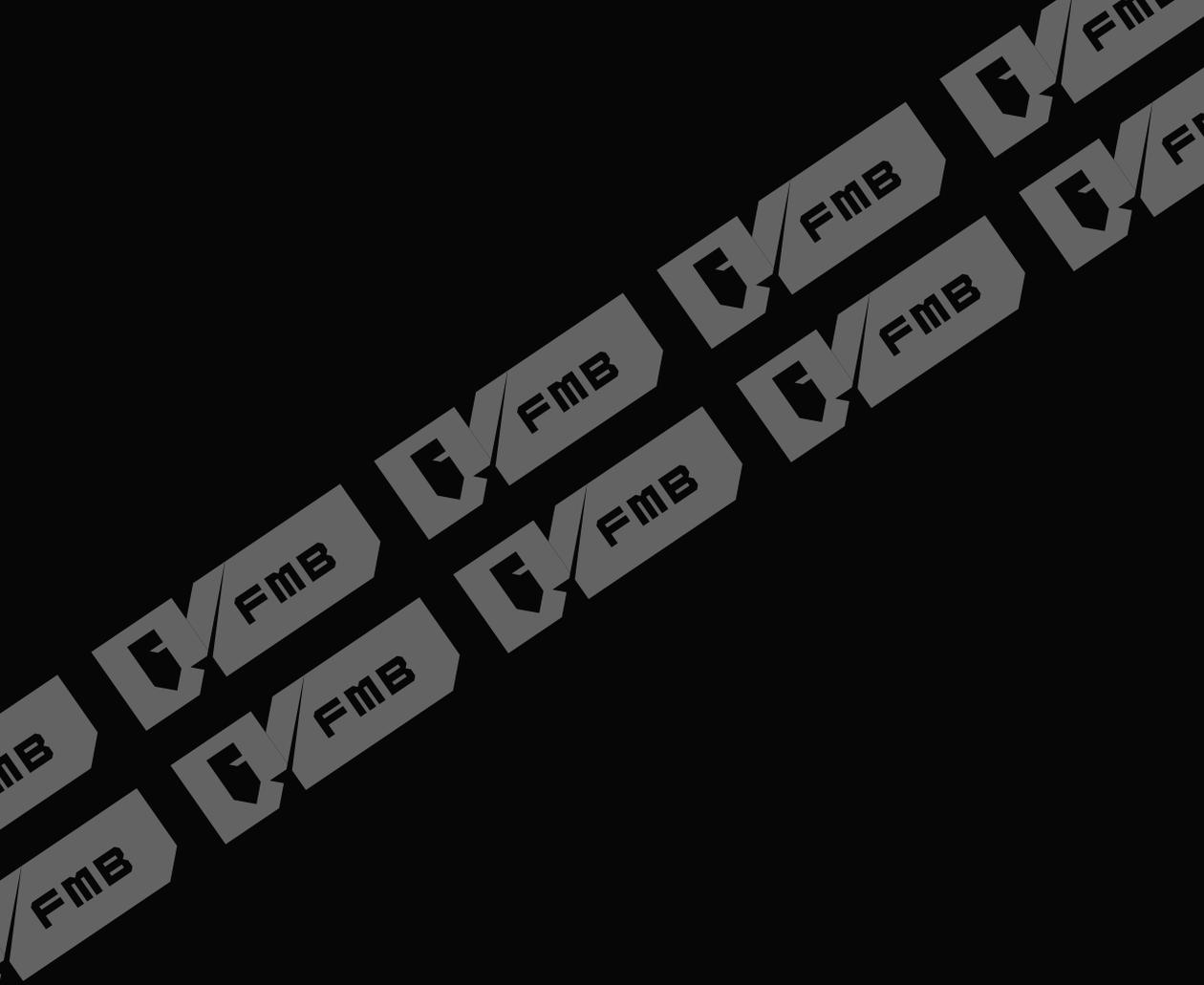
6. Revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment avec un additif et un revêtement à base de ciment avec un additif

Toutes ces études montrent que la protection contre la corrosion par des systèmes duplex à base d'une métallisation par Zn et ZnAl présente le meilleur rapport coût/efficacité pour une protection à long terme contre la corrosion. Les systèmes de peinture sont initialement moins coûteux, mais présentent une évolution graduelle au fil du temps et se révèlent en fin de vie plus coûteux que les systèmes plus performants à base de métallisation par Zn et ZnAl (fig. 3-3).

Évolution des coûts



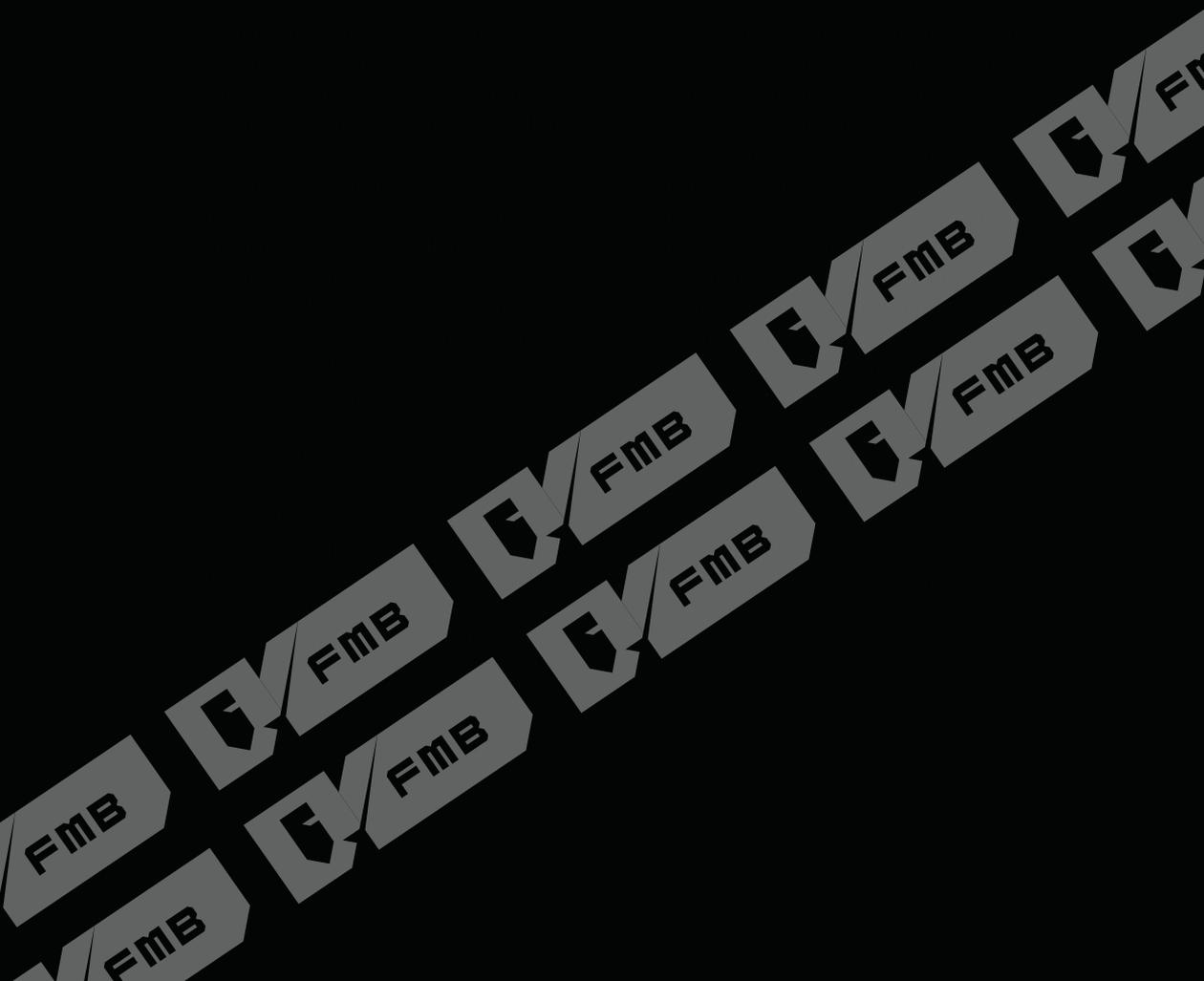
Source: www.fmb.com, www.fmb.com, www.fmb.com







SYSTÈMES DUPLEX ET MULTICOUCHES



En fonction des circonstances et de l'application, nous distinguons trois groupes de produits: la protection de surface d'aluminium ou d'un alliage Zn/Al (pour bien que l'alliage Zn/Al (82/18) est souvent utilisé en Europe), les revêtements métalliques et les revêtements organiques. Les produits métalliques sont

utilisés principalement sur la base de leur résistance à la corrosion. Les revêtements organiques sont utilisés pour leur adhérence et leur adaptation aux conditions d'application. Les opérations de maintenance et d'application de couches de protection organiques sont soumises à une réglementation stricte en matière d'environnement et de sécurité de travail. Dans la présente directive pratique, nous partons de l'hypothèse que les opérations effectuées répondent à la réglementation et aux prescriptions en vigueur.

Les informations dans ce chapitre ont été mises à jour compte tenu du développement des normes et de l'état de la technique actuellement d'application sur le marché belge.

Des solutions sont décrites pour protéger les constructions en acier contre la corrosion, indépendamment du fait que ces constructions se situent à l'intérieur de bâtiments ou à l'extérieur.

Le but de ce chapitre est de fournir un fil conducteur à tous les acteurs dans la construction (maîtres d'ouvrage, architectes,

ingénieurs, etc.). Les solutions décrites dans une liste limitée des produits anticorrosion qui existent. Seules les solutions les plus courantes et les mieux adaptées sont proposées. L'existence d'autres solutions acceptables pour un projet spécifique, qui ne sont pas décrites ici, est possible.

Systèmes innovateurs

De nouveaux systèmes anticorrosion sont développés et mis sur le marché en continu. Ils ne sont pas abordés ici et aucun avis sur leurs performances n'est donc émis ici. Simplement, ces systèmes sont encore en développement ou des directives pratiques n'existent pas encore.

Prescriptions environnementales

Nous soulignons que les prescriptions environnementales qui sont d'application sur les produits anticorrosion deviennent de plus en plus strictes et qu'elles dépendent de l'endroit où ils sont mis en œuvre. La vérification de la conformité des systèmes appliqués aux prescriptions environnementales relève de la responsabilité des différents acteurs.

Conditions spécifiques

Pour choisir un système de protection optimal, chaque étude de projet doit tenir compte des conditions spécifiques qui sont d'application pour les constructions (intérieur ou extérieur, structure visible ou cachée, accessibilité, ...).

Corrosion atmosphérique

La corrosion atmosphérique joue un rôle pour les constructions qui ne sont ni enfouies, ni immergées dans un liquide (généralement de l'eau). La corrosion de constructions enterrées ou immergées est traitée dans le § 2.2.6.

Le risque d'une corrosion atmosphérique et sa vitesse d'apparition dépendent principalement des paramètres suivants :

- l'humidité relative (de l'air interne ou externe) dans laquelle la construction en acier se trouve ;
- le risque de condensation (en fonction de l'humidité relative, de la température de l'acier et de la vitesse de déplacement de l'air) ;
- la concentration en substances polluantes corrosives (gaz, particules solides ou liquides), telles que le dioxyde de soufre, les NO_x, les acides, les alcalis ou le sel.

© FMB - 2022, 2023

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.
Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

Les solutions pour la corrosion atmosphérique sont disponibles en français sur www.fmb.be/fr/corrosion-atmospherique et en anglais sur www.fmb.be/en/corrosion-atmospheric.

4.1 Construction

4.1.1 Composition et composition du matériau de base

Le composite du revêtement doit être conforme aux prescriptions relatives aux matériaux de base de la norme EN 12566-2. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

4.1.2 Construction et soudure

Pour obtenir le meilleur résultat possible, les règles suivantes relatives à la construction doivent être observées :

- lors de la conception technique de la construction, en plus de certaines règles de base de construction doivent être prises en considération, ainsi qu'une limitation pour la projection thermique n'apparaît ultérieurement, comme il conviendrait lors de la conception technique, nous renvoyons aux normes EN 12566-2 et EN 12566-3, ainsi qu'aux parties 1 et 2 de la norme EN 12566-4.

Les transmissions mécaniques pour le dialogue thermique sont interdites lors de la installation et ne doivent donc pas être réalisées.

Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion. Les revêtements doivent être conçus de manière à garantir une adhérence adéquate au substrat et à résister à la corrosion.

4.1.3 Constructions intégrées dans la maçonnerie

Lorsque des éléments de structure en acier se situent dans la paroi externe d'un bâtiment et qu'ils ne sont pas totalement visibles ou accessibles, le choix du système anticorrosion ne peut pas toujours être basé sur la classe de corrosivité de l'atmosphère interne du bâtiment.

Lorsque la structure en acier est protégée contre l'eau depuis l'extérieur, le choix du système anticorrosion est basé sur la classe de corrosivité qui correspond à l'atmosphère interne du bâtiment.

Cette situation se présente dans les cas suivants :

- lorsque le mur de parement extérieur du bâtiment est étanche (fig. 4.2a)
- lorsque la structure en acier est protégée contre l'eau d'infiltration :
 - soit par une couche d'air d'au minimum 40 mm (fig. 4.2b)
 - soit par une couche de matériau ininterrompu et imperméable d'une épaisseur minimale de 25 mm (fig. 4.2c).



1. Mur de parement imperméable
2. Mur de parement non imperméable (présence d'une couche d'air)
3. Mur de parement non imperméable (présence d'une couche imperméable)



1. Mur de parement imperméable (en contact avec le mur de parement)

2. Mur de parement non imperméable (présence d'une couche imperméable)

Conditions locales

Dans certains cas, les conditions locales de l'écoulement sont plus contraignantes et la base de données de la figure 20 est insuffisante. On pense par exemple au stockage de gaz comprimés, l'insertion de gaz comprimés...

Les applications

Les résultats de la simulation sont présentés en figure 21 et 22. Les données de la figure 21 sont les suivantes :

Le débit est de 1000 kg/h, la température est de 20°C, la pression est de 10 bar, la viscosité est de 0,01 Pa.s, la conductivité thermique est de 0,1 W/m.K, la capacité thermique est de 1000 J/kg.K, la densité est de 1000 kg/m³.

Figure 20 : Présentation de la géométrie d'un gaz comprimé dans un tuyau.

Figure 21 : Présentation des résultats de la simulation sur les conditions de température.

Figure 22 : Présentation des résultats de la simulation sur les conditions de pression.

Figure 23 : Présentation des résultats de la simulation sur les conditions de débit.

4.1.4 Système de peinture

Généralités

Des types de couches de protection organiques peuvent être appliqués sur l'acier inoxydable. Leur application de façon homogène est de grande importance. Les systèmes peuvent être mono-couches ou multicouches. Le choix du système dépend principalement des exigences imposées par le milieu d'usage et du type d'acier inoxydable appliqué. Il faut tenir compte également des conditions de réalisation.

- Application à l'aide d'un rouleau
- Peinture électrolytique
- Peinture chimique
- Méthode d'application
- Couleur et brillance souhaitées

Le système adhésif doit également être bien adapté.

- Structure de la pièce (dimension et forme)
- Dimension des pièces
- Poids des pièces
- Type de réalisation

Quelle que soit la méthode choisie, il faut toujours respecter les conditions de réalisation indiquées par le fabricant. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5.

La qualité de la surface d'application et la qualité d'application influencent la durée de protection obtenue.

La réalisation et le séchage de pièces sont de préférence réalisés dans un atelier spécialement équipé pour cela. Les conditions de peinture sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5.

Réalisation – Jauge humaine



La réalisation et le séchage de pièces sont de préférence réalisés dans un atelier spécialement équipé pour cela. Les conditions de peinture sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5. Les conditions de réalisation sont indiquées dans le chapitre 5.

La couche de base est le nombre de climats développés pour la métallisation (cf. les instructions du fournisseur de peinture) et doit être appliquée au plus tard dans les 24 heures (en fonction du fournisseur de peinture) après le revêtement de la couche de base.

Les peintures à base d'alkyde et/ou la couche de finition doivent être appliquées dans les 24 heures après la métallisation.

Il faut utiliser des peintures contenant des liants qui sont compatibles avec les différents revêtements de métallisation (zinc, zinc-aluminium). La compatibilité entre les peintures contenant des liants alkyde et un revêtement de métallisation n'est cependant pas toujours assurée, car le risque de sapinification existe. Dans ce cas, le fournisseur doit confirmer par écrit que la peinture est compatible avec la métallisation.

En fonction du niveau d'agressivité de l'environnement dans lequel les pièces sont placées, les différents types de laques humides, leurs épaisseurs de couche et le nombre de couches sont prescrits par le maître d'ouvrage en concertation avec le fournisseur et l'applicateur. Si cette information fait défaut, la norme NBN EN ISO 12944-5:1998 peut être utilisée comme fil conducteur.



Le revêtement en poudre est appliqué sans traitement chimique sur la couche de métallisation. Le choix du système de laque en poudre dépend des attentes du client final en termes d'aspect de la couche de laque en poudre et de durée de vie souhaitée. La connaissance des conditions auxquelles la construction sera soumise est un point essentiel (cf. EN ISO 12944-3:2010).

L'application d'une laque en poudre dégraissante est fortement recommandée en raison de la porosité du revêtement de métallisation. On obtient ainsi les meilleurs résultats de durée de vie et d'aspect. Les systèmes suivants sont fréquemment utilisés :

système monocouche

Produit : laque en poudre de polyester dégraissante, durable à l'extérieur

Épaisseur de couche recommandée du système de peinture : 80-100 µm et aucune mesure inférieure à 50 µm

Remarque : dans de très rares cas, une laque en poudre thermoplastique est appliquée sur un revêtement de

métallisation. Des épaisseurs de couche supérieures à 200 µm sont alors obtenues en un seul traitement. Un dégrasage préalable est fortement recommandé ici.

Système à deux couches

Produit

- Couche de base : apprêt epoxy ou epoxy/polyester dégraissant.
- Couche supérieure : poudre de polyester résistante aux UV, durable à l'extérieur, dégraissant en noir.

L'épaisseur de couche totale

recommandées du système de peinture dépend de la classe de corrosion dans laquelle on se situe et de la durée de vie souhaitée.

Pour une durabilité optimale, il faut que la laque en poudre fine forme une barrière entre le revêtement de métallisation et l'environnement. La laque en poudre doit donc être blanche (l'utilisation d'une poudre dégraissante est indiquée à cette fin) et suffisamment épaisse selon le nombre de couches présente par le fournisseur de poudre. Le revêtement ne présentera les propriétés souhaitées que si la ventilation est optimale.

En fonction du niveau d'agressivité de l'environnement dans lequel les pièces sont placées, les différents types de poudre, épaisseurs de couche et le nombre de couches sont prescrits par le fabricant de poudre en concertation avec le fabricant de pièces et l'applicateur.

Contrôle de la qualité du revêtement

Le revêtement doit être homogène et sans défauts.

Le revêtement doit être adhérent et

entre ces différentes parties est d'une grande importance lors de l'évaluation des revêtements. Ci-dessous nous présentons les tests les plus courants. Si toutefois des tests supplémentaires devaient être effectués ou d'autres valeurs fixes, des records réalisables entre toutes les parties concernées sont recommandés, en vue de fixer les responsabilités et les dispositions de garantie.

Éprouvettes

Les éprouvettes sont de préférence réalisées au niveau de la production, après l'application du revêtement. Elles doivent être représentatives de la série.

Tests

Les tests suivants doivent être réalisés lors du prélevement des pièces, sans dépasser les contraintes convenues entre le maître d'ouvrage et l'applicateur.

Adhérence

L'éprouvette est soumise à un choc

pendant lequel elle est soumise à une

pression de 10 N/cm² pendant 10 secondes.

Après le choc, la surface de revêtement

doit être exempte de tout revêtement (sauf

pour les revêtements contenant

des pigments de couleur qui peut être

inférieurs à 10 % de l'épaisseur de couche

origins. Au maximum 20 % des surfaces

peuvent se soulever sous l'épaisseur origi-



Adhérence

L'adhérence de la couche de laque doit être déterminée après durcissement complet selon la norme EN ISO 4624 [30] (test de quadrillage) ou selon une collaboration par un laboratoire selon la norme ASTM D 4541 [31] (précédent). Les valeurs minimales jusqu'à 200 µm de laque sont de 10 MPa. Au-delà de 200 µm, la surface de laque doit résister à des sollicitations extérieures. À cette distance, la couche de protection ne peut pas présenter de rides, de coutures, d'inclusions, de piqûres ni d'autres irrégularités qui peuvent être considérées comme gênantes. Si l'application du produit exige d'autres distances de contrôle et/ou critères d'évaluation, ceux-ci doivent être fixés au préalable entre le maître d'ouvrage, l'applicateur et le métalliseur.

Lors de l'application de revêtements métalliques, vu les différences de teintes, une concertation préalable entre l'applicateur et le maître d'ouvrage est souhaitable.

Couleur

La couleur peut être évaluée par une comparaison visuelle selon la norme EN ISO 3668:2001 [32] ou mesurée selon

la norme EN ISO 11630 [33]. La différence de couleur dans un même lot ne peut pas être supérieure à 0,2 par rapport aux valeurs prescrites par le fournisseur du revêtement pour le produit durci.

Aucun pore ne peut être visible lors de l'inspection visuelle.

Pour des épaisseurs de couche jusqu'à 300 µm qui sont complètement étanches, la présence de pores dans le revêtement peut être contrôlée à l'aide d'un appareil basse tension pourvu d'une sponge. On se référera ici à la norme ASTM D463-01 [35].

Contrôle du procédé de durcissement lors du revêtement de poudre

Les laques en poudre thermodurcissables doivent être cuites selon le cycle prescrit par le fabricant. La température de l'air doit donc être contrôlée en continu en différents endroits du four à convection. La mesure de la température des pièces à des intervalles réguliers est également importante. L'élaboration d'un système de qualité propre à l'applicateur du revêtement, tenant compte de la géométrie des pièces à traiter, pour ainsi surveiller la qualité du travail de laqueage, est recommandée.

Outre la mesure dans le four, le test de polymérisation (test MEL) d'un revêtement en poudre est une méthode

importantes pour vérifier que les poudres de polyester dégrasantes sont suffisamment durcies. Dans ce test, les indications du fabricant de poudres doivent être suivies scrupuleusement pour exclure les évaluations subjectives.

4.2 Les différentes classes de corrosion

4.2.1 Classe de corrosion C1

La classe de corrosion C1 correspond à une atmosphère intérieure neutre d'un bâtiment sec et chauffé. Dans cette classe, les éléments non visibles (plafonds abaissés, greniers, ...) ne nécessitent pas de traitement anticorrosion, sauf certaines constructions intégrées dans la machinerie. Lorsque les éléments dans une atmosphère intérieure de classe C1 sont visibles, une protection minimale peut être souhaitée pour des raisons esthétiques et en vue d'un nettoyage aisé.

On notera ici qu'un bâtiment sec et chauffé dans lequel l'atmosphère n'est pas neutre (présence de gaz corrosifs ou de chlorures) relève d'une classe de corrosivité supérieure.

4.2.2 Classe de corrosion C2

Exposition dans une région non urbaine (à l'intérieur des terres). Atmosphère avec un faible taux de pollution : région rurale, sèche avec peu de pollution de l'air.

Exemple : environnements ruraux.

Bâtiments non chauffés, condensation éventuelle.

Exemples : entrepôts, halls sportifs.



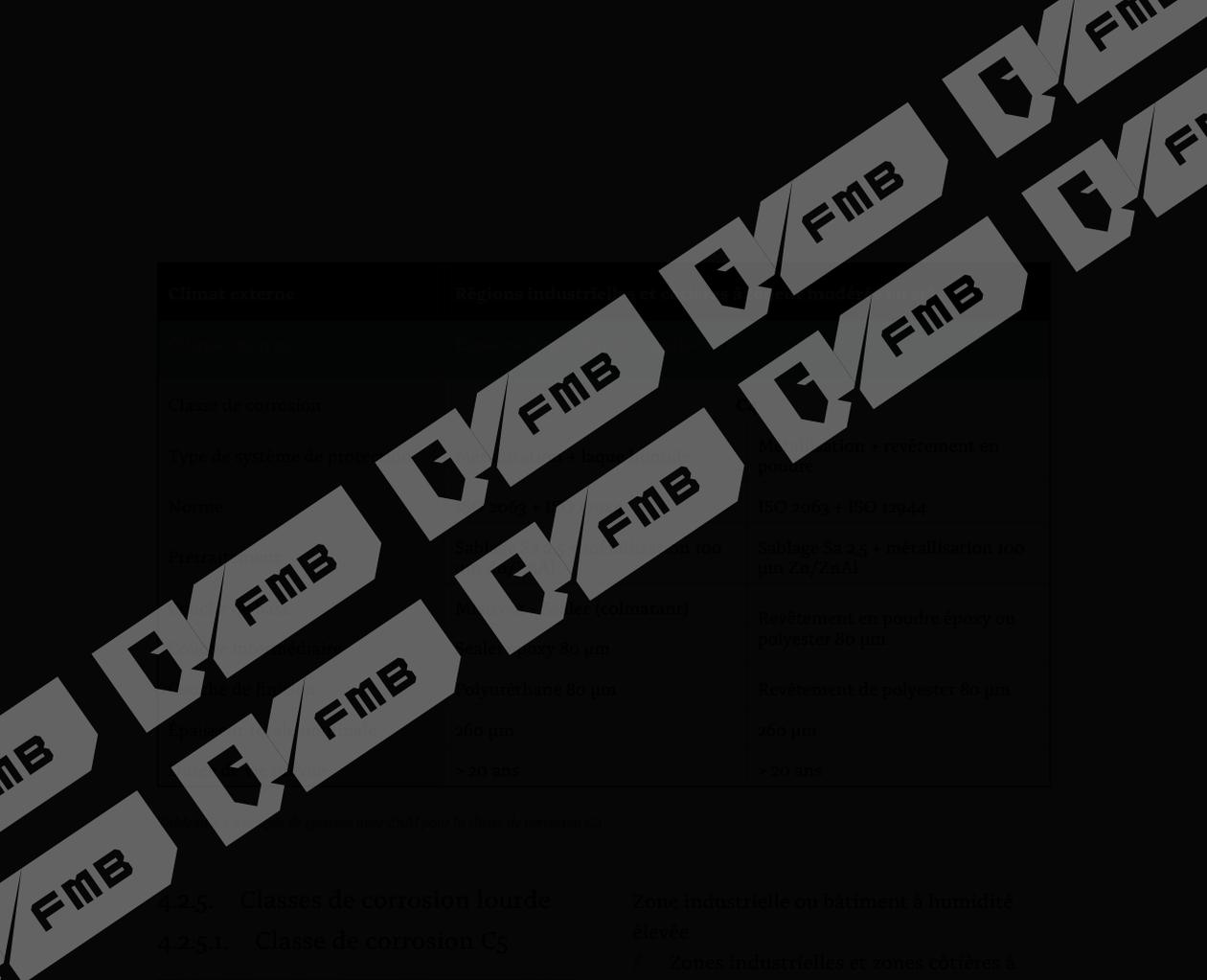
Climat externe	Atmosphère urbaine et industrielle légèrement polluée	
Classe de corrosion	C4	
Type de régime de pollution	Métallisation + liquide humide	Métallisation + rouillement en poudre
Niveau	150 mg/m ³ - 100 mg/m ³	100 mg/m ³ - 150 mg/m ³
Précipitation	Sécher 20-25 °C - métallisation 20-30 °C/20-30 °C	Sécher 20-25 °C - métallisation 20-30 °C/20-30 °C
Épaisseur de rouille	Métallisation : Sable (rouille) 200 µm	Rouillement en poudre épaisse ou polystyrène 50 µm
Couche intermédiaire	Sable épais 40-60 µm	
Couche de finition	Polystyrène 40 µm	Rouillement de polystyrène 20 µm
Épaisseur totale nominale	100 µm	60 µm
Durée de vie prévue	~20 ans	~20 ans

4.2.4 Classe de corrosion C4

Climat industriel et régions côtières à faible teneur en sel

Exemples : industrie chimique, piscines





Climat extrême

Régions industrielles

FMB

FMB

FMB

FMB

FMB

FMB

FMB

42.5 Classes de corrosion lourde

42.5.1 Classe de corrosion C5



Zone industrielle ou bâtiment à humidité élevée

Zones industrielles et zones côtières à degré élevé d'humidité et atmosphère agressive, zones côtières à degré élevé de salinité

Bâtiments et régions à condensation permanente et à degré élevé de pollution

Clima exterior	Región industrial y oficinas a temperatura ambiente	
Clase de corrosión	C2	
Tipo de sistema de protección	Metálico + capa húmeda	Metálico + revestimiento en polvo
Norma	ISO 9001 + ISO 14001	ISO 9001 + ISO 14001
Tratamiento	Sulfato de zinc + metalización por ánodo	Sulfato de zinc + metalización por ánodo
Capa de base	Mineral + sales (color negro)	Revestimiento en polvo epoxi o poliéster (color negro)
Capa intermedia	Sales epoxi (20 µm)	
Capa de acabado	Polvo de zinc (20 µm)	Revestimiento de poliéster (20 µm)
Resistencia a la corrosión	200 µm	200 µm
Durabilidad prevista	10 años	10 años

4.2.3.2 Clase de corrosión C2

Región climática industrial y oficinas a temperatura ambiente



Régions offshore à degré élevé de salinité et atmosphère agressive ainsi que les
 Régions industrielles à degré élevé de pollution chimique

Climat marin	Climat industriel	Climat maritime en sel
<p>Préparation à haute température</p> <p>150 000µm → 150 000µm</p>	<p>Métallisation + revêtement en poudre</p> <p>150 000µm → 150 000µm</p>	<p>Métallisation + revêtement en poudre</p> <p>150 000µm → 150 000µm</p>
<p>Soufflage Sa 2,5 + métallisation 100µm Zn/Al</p>	<p>Soufflage Sa 2,5 + métallisation 100µm Zn/Al</p>	<p>Soufflage Sa 2,5 + métallisation 100µm Zn/Al</p>
<p>Métallisation + Sels (résistant)</p>	<p>Revêtement en poudre époxy ou polyester 100µm</p>	<p>Revêtement en poudre époxy ou polyester 100µm</p>
<p>Sceller epoxy 100µm</p>	<p>Revêtement de polyurethane 50µm</p>	<p>Revêtement de polyurethane 50µm</p>
<p>Polyuréthane 50µm</p>	<p>Revêtement de polyurethane 50µm</p>	<p>Revêtement de polyurethane 50µm</p>
<p>Épaisseur totale requise</p> <p>200µm</p>	<p>200µm</p>	<p>200µm</p>
<p>Durée de vie prévue</p> <p>20 ans</p>	<p>20 ans</p>	<p>20 ans</p>

4.2.6 – Classes de corrosion immergées ou enfouies

Le choix d'un système anticorrosion pour les constructions enfouies ou immergées dépend d'un grand nombre de paramètres. Il s'agit d'un choix complexe dans lequel un spécialiste doit être consulté.

Pour les constructions enfouies, les paramètres suivants doivent être pris en considération : composition chimique, teneur en eau, degré de pollution du sol et sollicitation mécanique.

4.2.6.1 – Im1 – Immersion dans eau douce

Pour les constructions immergées, il faut tenir compte de la teneur en sel et de la composition chimique de l'eau et des éventuels cycles d'immersion et de séchage (qui sont déterminants pour la zone immergée, la zone de transition et la zone d'éclaboussure).

Exemples : Barrages, centrales hydroélectriques.



Client's extreme

Transmission data and device

Device's location

Topographical information

Weather conditions

Height

RF signal strength

Transmission time

Device's battery

Device's status

Device's speed

Device's orientation

Device's temperature

Device's signal quality

Device's signal frequency

Device's signal power

Device's signal modulation

Device's signal bandwidth

Device's signal delay

Device's signal jitter

Device's signal loss

Device's signal error rate

Device's signal throughput

Device's signal latency

Device's signal reliability

Device's signal availability

Device's signal security

Device's signal integrity

Device's signal confidentiality

Device's signal quality

Device's signal frequency

Device's signal power

Device's signal modulation

Device's signal bandwidth

Device's signal delay

Device's signal jitter

Device's signal loss

Device's signal error rate

Device's signal throughput

4.2.6.2 Im2 – Immersion dans eau de mer cathodique

Structures sous eau sans protection cathodique

Exemples structures sous

Climat externe	Immersion dans eau de mer sans protection cathodique	
Classe climatique	Im1	
Type de système de protection	Métallisation + laque humide	Métallisation + revêtement en poudre
Surface	ISO 2002 + ISO 2002 G	ISO 2002 + ISO 2002 G
Épaisseur	Sablage Sa 2,5 + métallisation 100 µm ZnAl	Sablage Sa 2,5 + métallisation 100 µm ZnAl
Couche de base	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Couche intermédiaire	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Couche de finition	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Épaisseur totale nominale	≥ 200 µm	≥ 200 µm
Durée de vie prévue	≥ 30 ans	≥ 30 ans

4.2.6.4 Img – immersion dans eau de mer avec protection cathodique

Structures sous sol avec protection cathodique
Exemples structures anodes



Climat externe	Immersion dans eau de mer avec protection cathodique	
Dans de combien	Img	
Type de système de protection	Métallisation + boje humide	Métallisation + revêtement en poudre
Noms	ISO 2003 + ISO 2044-5	ISO 2003 + ISO 2044-5
Préparations	Sablage Sa 2,5 + métallisation 100 µm ZnAl	Sablage Sa 2,5 + métallisation 100 µm ZnAl
Couche de base	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Couche intermédiaire	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Couche de finition	Selon les prescriptions du cahier des charges	Selon les prescriptions du cahier des charges
Épaisseur totale nominale	2000 µm	2000 µm
Durée de vie prévue	20 ans	20 ans

4.2.7 Durée de vie

On trouvera de plus amples informations sur l'action des différents systèmes anticorrosion sur base de zinc dans la norme EN ISO 14713:2009 [14] pour les matériaux d'ingénierie et ISO 20631 [14] pour les matériaux métalliques.

L'action varie en fonction du système utilisé, de l'épaisseur de la couche de protection et de la classe de corrosion.



5. Références

- [1] ISO 9004:2004 Corrosion of metals and alloys – basic terms and definitions
- [2] <https://industriemuseum-niederrhein.de/industriemuseum/niederrhein/sonstige-sammlung/sonstige-sammlung-projekte>
- [3] <https://www.iso.org/standard/54547.html> Preparation grades of welds, edges and corners of metal parts with surface imperfections
- [4] <https://www.iso.org/standard/54548.html> Part 1: initial surface conditions, preparation grades and finish rust grades in connection with water jetting
- [5] <https://www.iso.org/standard/54549.html> Part 2: execution of corrosion protection systems
- [6] ISO 2002:2008 Thermal spraying – Metallic and other inorganic coatings – Zinc, aluminium and their alloys
 - Part 1 – design considerations and quality requirements for corrosion protection systems
 - Part 2 – execution of corrosion protection systems
- [7] ISO 14017:2012 Thermal spraying – terminology classification
- [8] ISO 3274:1996 geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- [9] Kokon Study- Influence of surface preparation; IOT RWTH Aachen (2018)
- [10] ASTM D 692: 2012 standard test method for nondestructive Measurements of dry film thickness of applied organic coatings using an ultrasonic coating thickness gage
- [11] ISO 2808:2007 Paint and varnishes- determination of film thickness
- [12] EN 10323:2009 electrolytically zinc coated cold rolled flat products for cold forming
- [13] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Galvaniseren>
- [14] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Schopeten>
- [15] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Sherardiseren>
- [16] https://www.wink.de/themen/korrosionsschutz/mechanisches_verzinken/
- [17] ISO 8501:2007 preparation of steel substrates before application of paints and related products – visual assessment of surfaces

[20] SS PC-Pap, 2015, measurement of dry coating thickness using ultrasonic gages

[21] E. Bullitt, G. Geng, S. M. Pizer, Wei Li, S. R. Ayward, Measuring tortuosity of the intracerebral vasculature from MRA images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Volume 23, Issue 9, Sept. 2004, p. 1163–1171

[22] Gostovic, D. et al., Three-dimensional reconstruction of porous LSCF cathodes. *Electrochemical and Solid State Letters* 2007, 10(12), p. 1374–1375

[23] ISO 4628-3: 2009, Paint and varnishes – evaluation of degradation of coatings – designation of quantity and size of defects and of intensity of uniform changes in appearance

Part 3: Assessment of degree of rusting

[24] ISO 10713: 2009, Zinc coatings – guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures

Part 1: general principles of design and corrosion resistance

Deal 2: hot dip galvanizing

[25] ISO 15544: 2010, paint and varnishes – corrosion protection of steel structures – protective paint system

Part 1: General information

Part 2: Classification of paint systems

Part 3: Design and construction

Part 4: Application and maintenance

Part 5: Laboratory performance test methods

Part 6: Execution and supervision of paint work

Part 8: development of specifications for new work and maintenance

Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures

[26] EN 12526: Thermal spraying – Recommendations for constructional design of components with thermal sprayed coatings

[27] EN 12527: 2003, Thermal spraying – Surface preparation of metallic constructions for thermal spraying

[28] ISO 14910: 2015, thermal spraying – rods and cords for flame and arc classification – chemical supply

[29] ISO 2028: 2007, Thermal spraying – arc on magnetic particles – specification and coating thickness

[30] ISO 2029: 2007, Thermal spraying – arc

on magnetic particles – specification

[31] ISO 2030: 2007, Thermal spraying – arc

on magnetic particles – specification

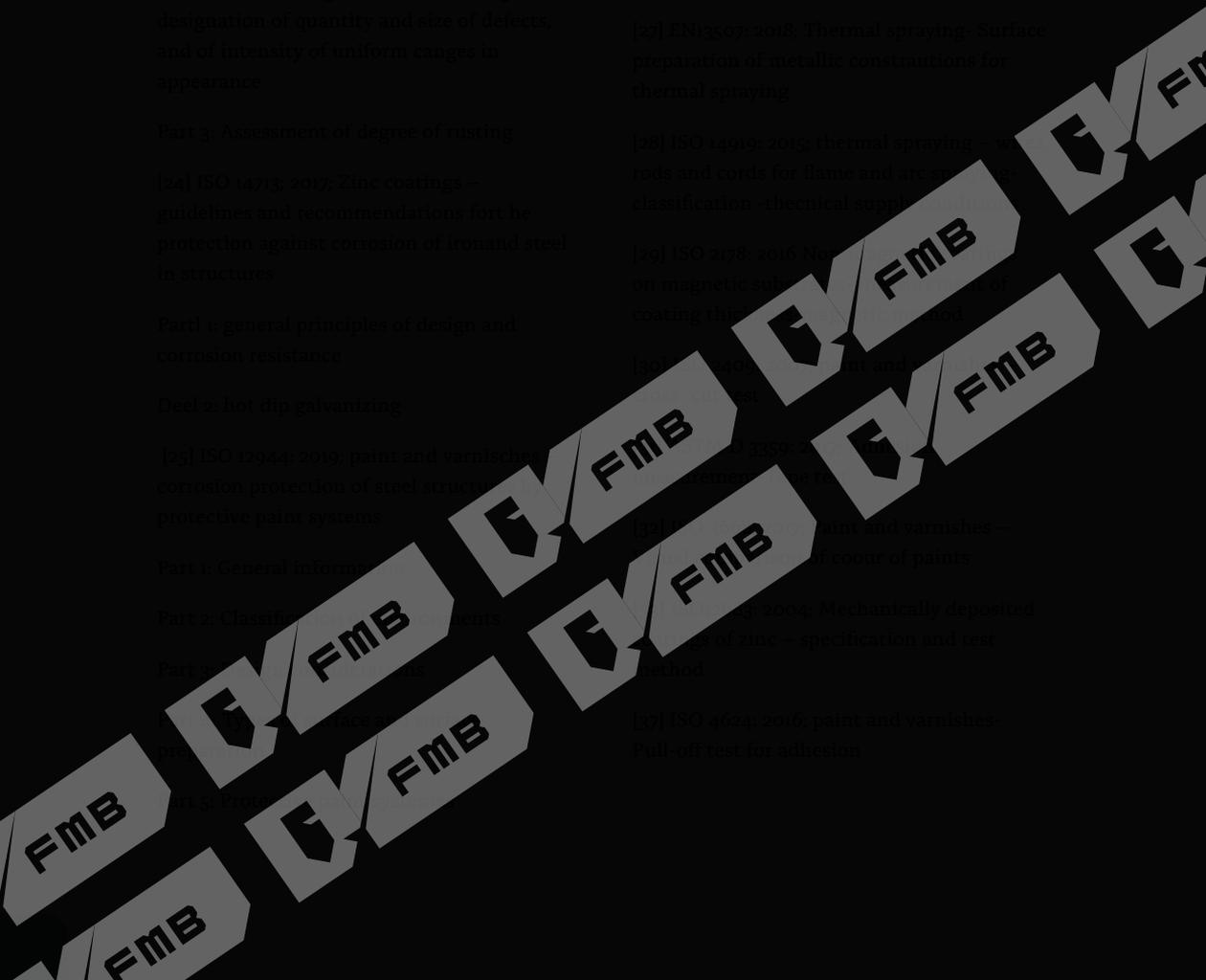
[32] ISO 2031: 2007, Thermal spraying – arc

on magnetic particles – specification

[33] ISO 2032: 2007, Thermal spraying – arc

on magnetic particles – specification

[34] ISO 4624: 2016, paint and varnishes – pull-off test for adhesion



[28] ISO 277:2005 Non-magnetic coatings on magnetic substrates – determination of coating thickness – magnetic method

[29] ISO 8503:2006 Preparation of steel substrates before application of paints and related products – test 3 – method for surface cleanliness

[30] EN 12954:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[31] EN 12955:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[32] EN 12956:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[33] EN 12957:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[34] EN 12958:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[35] EN 12959:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[36] EN 12960:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[37] EN 12961:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[38] EN 12962:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[39] EN 12963:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[40] EN 12964:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[41] EN 12965:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[42] EN 12966:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[43] EN 12967:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[44] EN 12968:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[45] EN 12969:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[46] EN 12970:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[47] EN 12971:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[48] EN 12972:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[49] EN 12973:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[50] EN 12974:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[51] EN 12975:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

[52] EN 12976:2006 Beschleunigte Prüfung des Anbringens von Zink- und Zink-Nickel-Lackierungen

determination of surface profile – foraging microscope procedure

Part 4: method for the calibration of ISO surface profile comparators and for the determination of surface profile – Stylus instrument methods

Part 5: replica tape methods for the determination of surface profile

[45]–[48] ISO 1499: 2001 Thermisch spuiten – Draden, staven en pijpen voor vlame- en hoogspuiten – Indeling – Technische leveringsvoorwaarden (ISO 1499: 2001)

[49] ISO 9223: 2012 Corrosie van metalen en legeringen – Corrosiebestendigheid van de atmosfeer – Classificatie

[50] experiences with TiZ duplex coatings, Sintel 2014

[51] arc ITSC 1037 / flame: Grillo Werke AG

[52] www.zinc.org

[53] https://www.media.de/fileadmin/user_upload_attachment/downloads/Kataloge/Allgemeines_Verzinkungsverfahren.pdf

[54] O. Knudsen, Coating systems for long lifetime thermal sprayed duplex coatings, final report, Sintel materials research, Sintel Al 0869, 2010

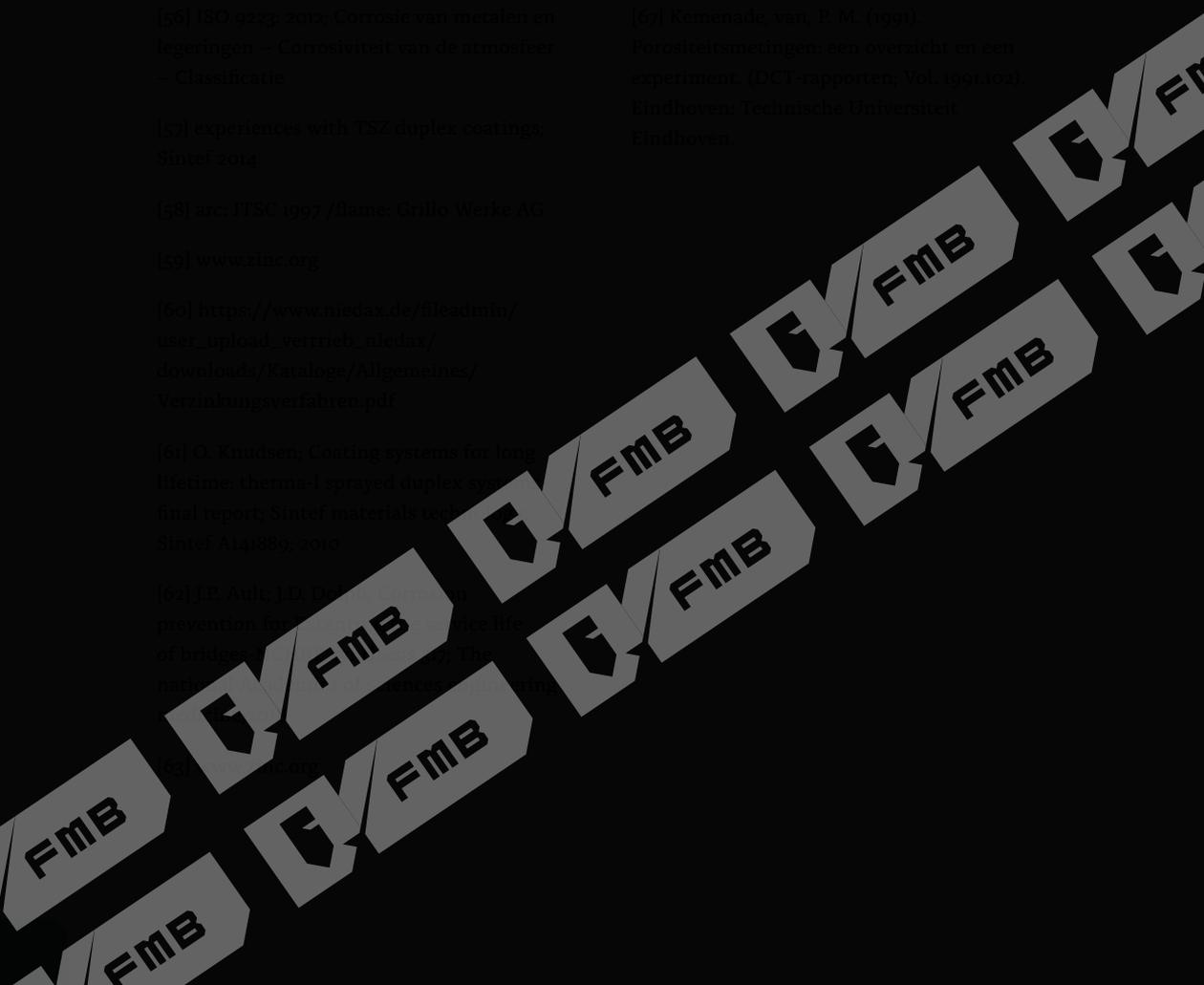
[55] J.P. Aulsebrook, The prevention of corrosion of bridge steelwork, National Institute of Research in Ductile Cast Iron

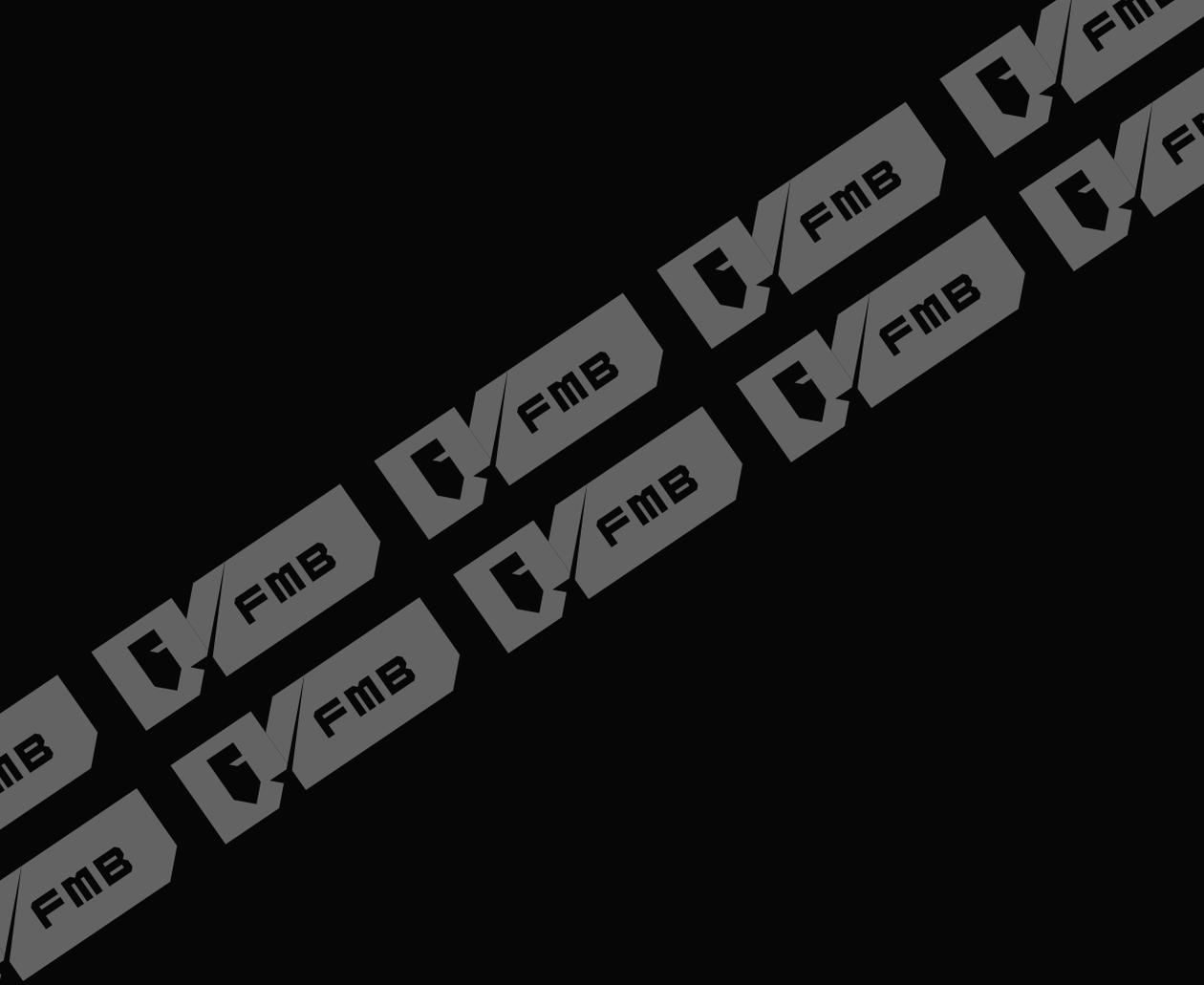
[56] EN 1981: 2003 Sherardising and diffusion coatings on ferrous products – specification

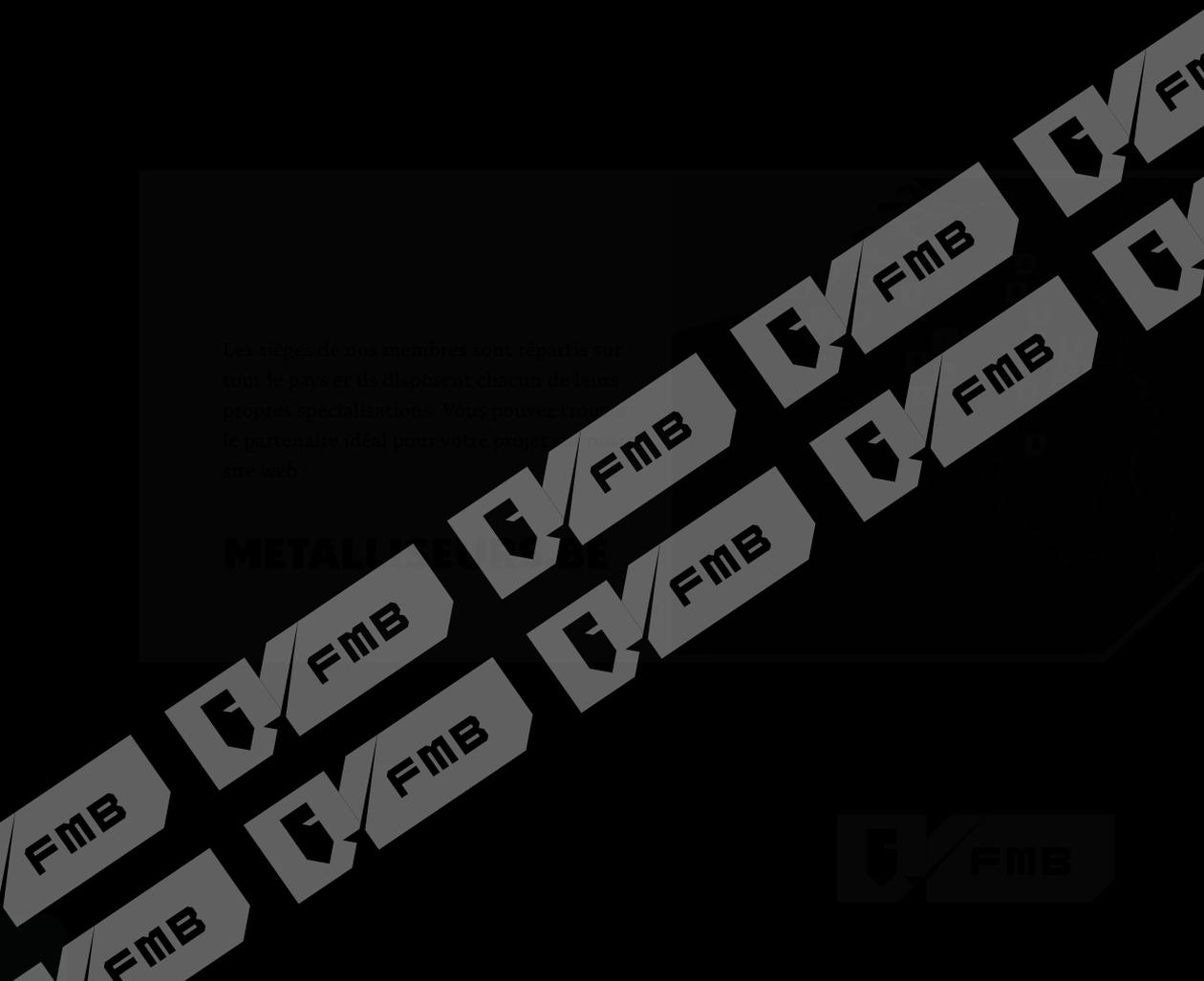
[57] M. Leclercq, Het metalliseren met zink door thermisch spuiten, deel 1: parameters bij het opspuiten met zuiver zink of met een legering met 15% aluminium, Laserschrift 4-1977

[58] M. Leclercq, Het metalliseren met zink door thermisch spuiten, deel 2: parameters bij het opspuiten met zuiver zink of met een legering met 15% aluminium, Laserschrift 4-1977

[59] Kennede van P.M. (1990) Faculteitmetingen, een overzicht en een experiment, OET rapporten, Vol. 100, 1000, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven







METALL

