

Données complémentaires
pour une meilleure approche
du chapitre

**0. APPROCHE TECHNICO
ÉCONOMIQUE**

0.5 Notions élémentaires
sur les revêtements de surface

BIBLIOTHÈQUE ET OUTILS

24 Vocabulaire du métier
de la fixation

27 Environnement et législation

7

Lutte contre la corrosion

7.0 Les processus de corrosion

Définitions

- La quasi-totalité des métaux n'existe pas à l'état pur dans la nature mais sous forme d'oxyde, sulfures, carbonates... il est donc logique, que dans les environnements agressifs, ils tendent à donner à nouveau des oxydes, des sulfures et autres composés chimiques.
- La corrosion est une attaque destructive plus ou moins rapide du matériau sous l'action physique chimique ou électrochimique des milieux qui l'environnent. Les métaux et alliages sont particulièrement exposés en surface, principalement, mais aussi dans la masse par cavitation ou par corrosion intergranulaire.
- Pour les alliages ferreux, il ne faut pas confondre «rouille» qui est un oxyde hydraté se formant à froid et calamine formée à haute température (forge).

Trois types de corrosion

- **Chimique** : réaction hétérogène entre un métal et une phase gazeuse ou liquide non électrolyte.
- **Biochimique ou bactérienne** : les bactéries absorbent et transforment les sels et minéraux, provoquant l'apparition de produits agressifs (acides).
- **Electrochimique** : de loin la plus fréquente, la plus dangereuse pour les métaux.

Elle nécessite la présence d'un électrolyte et d'un milieu hétérogène entraînant une formation de «**piles**». Un courant électrique circule entre les zones cathodes et les zones anodes qui sont attaquées.

Ces piles sont microscopiques. L'eau sous ses différentes formes sera l'électrolyte, la présence de sels dissous (NaCl) augmente les risques de corrosion par une plus grande différence de potentiel électrochimique.

Chaque métal ou constituant d'une structure possède une valeur de potentiel différente par rapport à la solution. La résultante des potentiels d'électrodes respectifs au cours du phénomène de pile (donc de corrosion) va tendre vers un équilibre représentant la force électromotrice de la pile.

Chaque métal possède un potentiel d'équilibre qui lui est propre.

Les métaux qui possèdent des potentiels négatifs se corrodent facilement, inversement ils résistent à la corrosion (métaux nobles).

Entre deux métaux associés, le métal le plus électropositif par rapport à l'autre constitue le pôle positif de la pile. Les potentiels sont aussi variables selon le milieu ambiant, l'attaque n'est sensible que pour une différence de potentiel (ddp) supérieure à 300 mV.

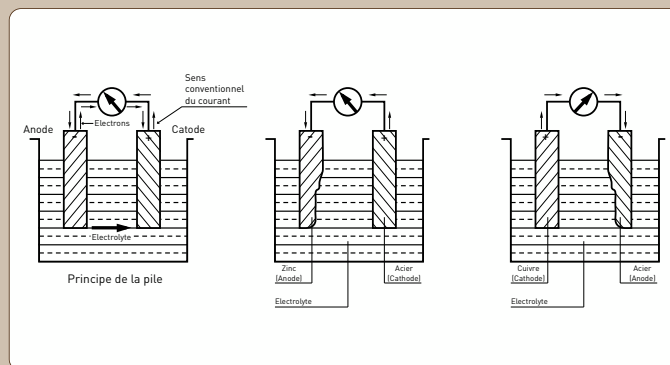
Modes de destruction par corrosion

La corrosion se traduit par :

- une diminution de poids,
- une altération de la surface attaquée,
- un affaiblissement des propriétés mécaniques.

Suivant la forme géométrique et le type de destruction, on distingue quatre principaux schémas de corrosion.

- **La corrosion uniforme** ou généralisée, avec une vitesse de dégradation uniforme, en tous les points du métal exposé qui se dissout régulièrement. La résistance mécanique décroît avec l'épaisseur et la perte de poids. Les caractéristiques mécaniques rapportées à l'unité ne varient pas.
- **La corrosion localisée** ou corrosion par piqûres ou sillons, avec formation de trous profonds et de petits diamètres (piqûres) là où existent des impuretés, des hétérogénéités chimiques, des entailles, des rugosités en surface. Cette corrosion affecte surtout la capacité de déformation de l'alliage.
- **La corrosion intergranulaire** ou corrosion intercrystalline. A l'inverse des précédentes, cette corrosion se propage en profondeur le long des joints de grains ou de cristaux. Ses effets sont particulièrement graves, car peu visibles de l'extérieur. Le métal peut se rompre sous une faible charge, il devient fragile. On n'observe pas de perte de poids.



7.0-1 Principe de la pile

- La **corrosion galvanique ou bimétallique** qui fait intervenir deux métaux électrochimiquement très différents dans un milieu conducteur. Quand la différence de potentiel est importante entre les métaux ou constituants voisins, le métal le moins résistant devient anodique, il est attaqué. L'autre, cathodique, est protégé. C'est une corrosion localisée (exemple : l'acier galvanisé attaqué par le cuivre dans les circuits de chauffage central).

Il existe d'autres formes de corrosions, citons :

- la corrosion cavernueuse,
- la corrosion à la ligne d'eau (aération différentielle),
- la corrosion par érosion,
- la corrosion transgranulaire.

La corrosion, importance économique

Cet aspect est loin d'être négligeable : les coûts directs globaux dus à la corrosion (protection et remplacement) sont estimés à 3,5% du produit national brut dans les pays occidentaux.

Trois facteurs de corrosion

Les facteurs de corrosion sont très nombreux et de natures très diverses :

Facteurs liés au milieu :

- nature du milieu, composition chimique, impuretés,
- PH, température, pression, mouvement, viscosité,
- résistivité, éclairage, présence de micro-organismes.

Facteurs liés à la pièce, au matériau :

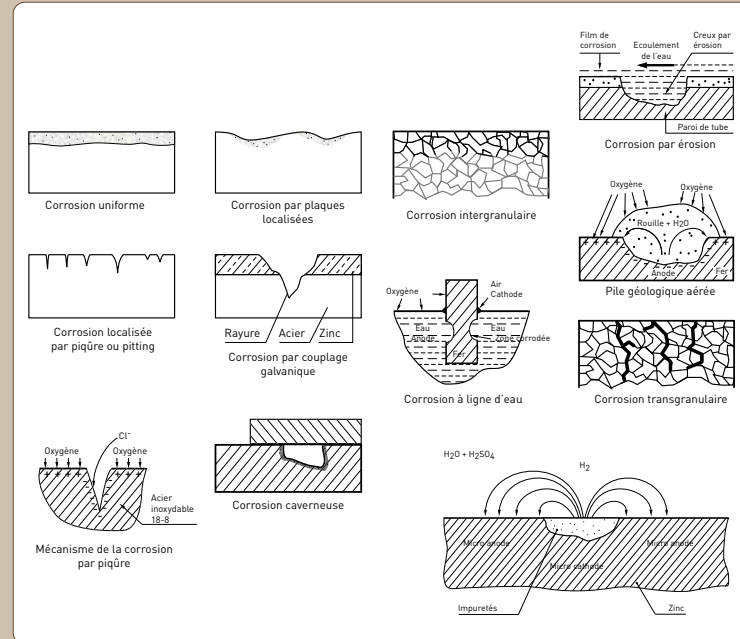
- analyse chimique, degré de pureté, structure cristalline,
- nature et morphologie des constituants,
- contraintes mécaniques, tensions internes,
- résistivité, état de surface (microgéométrie),
- tracé, formes, mode d'obtention (assemblage),
- présence de gaz inclus dans l'alliage.

Facteurs liés aux conditions d'emploi :

- contraintes mécaniques appliquées (fatigue, corrosion),
- orientation de la pièce par rapport aux courants liquides,
- mouvement de la pièce dans le milieu,
- voisinage d'autres pièces, leur nature métallique,
- potentiel de la pièce par rapport au milieu, aux autres pièces,
- rapport des volumes, pièce/milieu, température.

Métal	Réaction d'équilibre	Potentiel en volts
Or	$Au = Au^{+++} + 3e^{-}$	+ 1,42
Platine	$Pt = Pt^{+++} + 2e^{-}$	+ 1,20
Argent	$Ag = Ag^{+} + e^{-}$	+ 0,80
Cuivre	$Cu = Cu^{++} + 2e^{-}$	+ 0,34
Hydrogène	$H = 2H^{+} + 2e^{-}$	0,00 par convention
Plomb	$Pb = Pb^{++} + 2e^{-}$	- 0,13
Fer	$Fe = Fe^{++} + 2e^{-}$	- 0,44
Zinc	$Zn = Zn^{++} + 2e^{-}$	- 0,76
Aluminium	$Al = Al^{+++} + 3e^{-}$	- 1,67
Magnésium	$Mg = Mg^{++} + 2e^{-}$	- 2,34

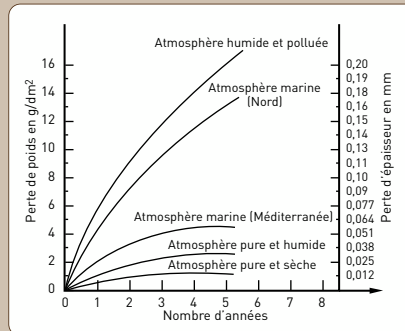
7.0-2 Potentiels d'équilibre de quelques métaux



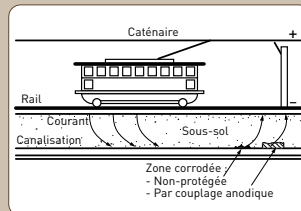
7.0-3 Modes de dégradation des métaux et alliages

Milieux corrosifs courants

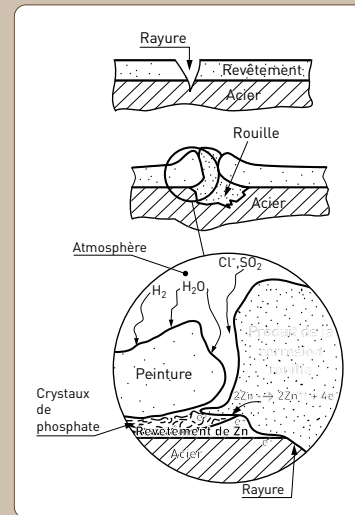
- Corrosion atmosphérique
Facteurs climatologiques : température, ensoleillement, vents, précipitations, humidité relative.
Facteurs d'agressivité : pollution, gaz sulfureux (SO₂), gaz carbonique (CO₂), chlorures (bord de mer).
- Corrosion par l'eau
L'eau de mer et l'eau douce sont chargées en sels solubles actifs dans les piles de corrosion sur métaux.
L'eau de pluie et l'eau de condensation sont très peu chargées et leur conductivité électrique est faible (sauf les pluies acides).
Le mouvement des pièces et de l'eau accentue la détérioration par corrosion-érosion par abrasion (hélices) : il y a renouvellement d'oxygène.
Dans les circuits, le couplage acier avec cuivre, bronze, acier inoxydable entraîne des corrosions rapides.
- Corrosions par les sols
Le sol humide est un électrolyte. La nature du sol, acide ou alcalin, sa perméabilité à l'air, la présence de bactéries, influencent la vitesse de corrosion des métaux et alliages enterrés. Les sols acides ou très perméables sont agressifs. Les courants électriques vagabonds (courants de fuite) circulent dans les circuits de moindre résistance (canalisations) et entraînent des risques supplémentaires de corrosion.



7.0-4 Evolution de la corrosion en fonction des milieux



7.0-5 Courants de fuite dans le sol



7.0-6 Schéma d'une corrosion initiée par une rayure sur une carrosserie automobile

7.1 Corrosion galvanique

Définition

Risque de corrosion du fait du couple électrochimique entre les matériaux et/ou les revêtements en contact lors d'un assemblage hétérogène.

Des métaux différents, juxtaposés et mis dans un milieu donné même légèrement conducteur (une ambiance non sèche par exemple), ont tendance à créer un courant électrique proportionnel à leur différence de potentiel. Ce couplage (effet de pile) se traduit par la destruction plus ou moins rapide de l'élément ayant le plus petit potentiel (anode).

Moyen de prévention

On peut préventivement vérifier les risques de corrosion électrochimique d'un assemblage hétérogène en choisissant des couples de matériaux métalliques dont les potentiels électrochimiques sont les plus proches possibles : le tableau 7.1-1 propose ce choix parmi les principaux matériaux utilisés en mécanique générale.

Certains métaux (aluminium, cuivre, plomb), certains alliages (acier inoxydable, cupronickel) ou certains revêtements (cadmiage, chromage, nickelage, zingage) mettent en œuvre des composants ayant des aptitudes électrochimiques élevées, au point d'être utilisés pour la réalisation de piles et accumulateurs, et peuvent poser de réels problèmes lors d'associations hasardeuses.

Mode d'emploi du tableau

1. Reporter les deux matériaux choisis, l'un en abscisse, l'autre en ordonné, de manière à croiser les indications (si le croisement ne se réalise pas dans la zone chiffrée, inverser les entrées).
2. En cas de revêtement de surface, utiliser le même procédé en choisissant le métal du revêtement et non celui du support qui est protégé tant que la couche superficielle existe et empêche toute pénétration. Par exemple, pour vis acier zingué, prendre zinc.
3. En cas de croisement en dessous du trait en pointillé (valeurs supérieures à 300), le métal en ordonnée est attaqué, et cela d'une manière d'autant plus rapide et forte que le chiffre (ddp) est élevé.
4. La rapidité du démarrage et la vitesse de destruction par corrosion sont proportionnelles à la différence de potentiel (ddp) entre les matériaux mis en œuvre.

5. L'effet galvanique est influencé par le rapport de surface des deux éléments. Si la surface du métal considéré (anode) est la plus petite, sa vitesse de corrosion croît. Dans le cas inverse, elle diminue.

6. Le métal couplé (en abscisse) ne subit pas de corrosion galvanique et bénéficie au contraire, d'un effet de protection proportionnel lui aussi à la différence de potentiel.

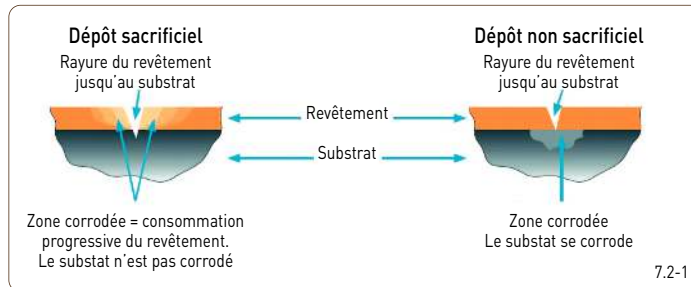
En conséquence, pour éviter cette corrosion, la différence de potentiel doit être la plus faible possible (elle est idéalement nulle en cas de montage homogène). A défaut l'élément de fixation devra être réalisé dans le matériau le plus noble (cathode), et les pièces à assembler dans le matériau le moins noble (anode), et/ou si possible la surface du métal considéré la plus grande vis-à-vis du métal couplé. En cas d'impossibilité d'obtenir une différence de potentiel en dessous de 300, l'emploi d'un isolant (bakélite, caoutchouc, néoprène, nylon, PVC, téflon®...) peut être une solution alternative intéressante.

7.2 Méthodes de lutte contre la corrosion

Généralités

Il n'existe pas de solution universelle de par la complexité du problème, il n'existe aucun métal inaltérable. Pour chaque milieu, il existe un alliage moins exposé. Quatre types de solutions peuvent être retenus, avec différents principes de mise en œuvre :

- **Protection par effet barrière** : non métalliques ou métalliques. Cette barrière empêche les agressions du support par les éléments extérieurs (exemple : la peinture sur l'acier),
- **Protection par revêtement sacrificiel** : on choisit un métal moins noble qui se sacrifie en corrosion pour protéger la fixation (exemple le zinc sur l'acier),
- **Autoprotection par passivité du métal** (exemple : oxyde de chrome sur les aciers inox),
- **Protection cathodique ou électrochimique.**



Ces solutions sont classées ci-après par nature de revêtement.

Protection par revêtements non métalliques

Peinture, laque, vernis

Solution relativement simple qui permet une décoration de la pièce à protéger. C'est une faible protection car une détérioration locale du revêtement accélère la progression de la corrosion (aération différentielle).

Applications : automobile, électroménager, cycles... Esthétique, décoration.

Oxydation chimique

Méthode essentiellement appliquée à l'aluminium et ses alliages. L'épaisseur du film d'oxyde qui se forme naturellement à la surface ne dépasse pas 1/10^e de micron. C'est une protection insuffisante contre une attaque chimique ou l'abrasion. Le traitement d'oxydation permet de former à la surface du métal, par électrolyse, une pellicule d'alumine épaisse, dure et protectrice.

Applications : pièces exposées en atmosphère extérieure.

Phosphatation

Méthode consistant à réaliser une sous-couche permettant une meilleure adhésion des peintures à la surface d'une pièce à protéger. La pièce est plongée dans une solution de phosphate de manganèse, de zinc ou de sodium, portée à une température de 80°C à 100°C. L'immersion dure de quelques minutes à une heure. Il y a formation de cristaux de phosphates de fer insolubles à la surface du métal qui permettront ensuite une meilleure adhésion mécanique de la peinture ou une protection naturelle.

Applications : métaux ferreux, aciers, fontes. Epaisseur du revêtement : 10 à 20 µm. Bonne résistance au frottement. Déformation à froid des aciers et alliages d'aluminium.

Protection par revêtements métalliques

Immersion

Les pièces à protéger sont plongées dans un bain de métal en fusion. Les revêtements possibles sont surtout des métaux à bas point de fusion :

- étain : étamage,
- zinc : zingage, galvanisation.

Applications : protection contre la corrosion atmosphérique. Pièces de machines à laver, corps de vannes, bacs...

Thermo-diffusion

Les pièces à protéger sont soumises à un traitement thermique au contact d'un élément chimique. Celui-ci diffuse depuis la surface. La pièce est recouverte de métal pur en surface avec une sous-couche d'alliage par en dessous :

- shérardisation : cémentation à 350°C de sable et de gris de zinc,
- chromisation : cémentation au fluorure de chrome à 1050°C,
- calorisation : cémentation Al + Al₂O₃ à 850°C.

Applications : pièces mécaniques. Esthétique, décoration.

Métallisation

Le métal protecteur (Zn, Al) est fondu à l'aide d'un pistolet métalliseur à gaz. Un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu. Les gouttelettes sont ainsi projetées sur la pièce avec une grande vitesse (100 m/s environ), permettant leur soudure en donnant un dépôt très adhérent.

Applications : canalisations souterraines en fonte ou acier, automobile. Très bonne protection.

Placage

Méthode s'effectuant sur les tôles au cours d'un laminage à chaud. La pression et la diffusion thermique assurent la liaison entre le métal à protéger et le métal protecteur. Le cuivre, le nickel, le laiton sont utilisés comme métaux protecteurs sur les métaux ferreux ainsi que l'acier inoxydable.

Applications : construction mécanique, chaudronnerie, cuves.

Electrolyse

On fait passer un courant électrique dans un bain électrolytique par l'intermédiaire d'une cathode constituée de la pièce à protéger (pôle -) et l'anode (pôle +) du métal à déposer. Le métal d'apport se dissout dans l'électrolyte et vient se déposer sur la cathode. Principaux métaux d'apport utilisés : cuivre, nickel, chrome, zinc, étain. Plusieurs étapes peuvent se succéder : par exemple, le chromage d'une pièce en acier nécessite un cuivrage suivi d'un nickelage.

Applications :

- dépôts épais : dépôts pour gravure électronique, vilebrequins, matrices, moules...
- dépôts minces : décoration, sous-couche avant dépôt final, pistons et segments Industrie électrique.

Métaux et alliages résistant à la corrosion

Autoprotection par la nature de la structure (cubique à faces centrées) **ou par passivation naturelle selon les éléments associés.** Ce sont souvent des métaux à phase unique qui sont utilisés, soit des métaux purs, soit des alliages à solution unique :

- métaux purs (nickel, plomb, titane, aluminium), qui résistent bien à la corrosion mais qui offrent de faibles caractéristiques mécaniques ;
- aciers alliés au chrome : à partir d'une teneur de 12% de chrome, il se forme une couche d'oxyde compacte et adhérente ; c'est le cas des aciers inoxydables ;
- aciers inoxydables : avec 18% de chrome et au moins 8% de nickel, on obtient une structure austénitique. D'autres éléments, en faible quantité, peuvent être rajoutés pour encore augmenter la résistance à la corrosion (Mo, Ti, Nb, Cu...).

Applications : toutes situations agressives chimiquement. Agroalimentaire, médical, industries chimiques.

Méthode d'application au tonneau ou à l'attache

En fonction de la typologie du produit, et le besoin final selon exigences clients, deux types d'applications existent.

L'application au tonneau qui est la façon la plus économique pour appliquer un revêtement sur de la fixation. Cette technique permet de traiter un volume important de pièce en un temps réduit par le biais de chaînes entièrement automatisées.

Néanmoins cette technique a ses limites. Pour des pièces trop grandes, trop lourdes ou avec des géométries particulières, l'entrechocage des pièces peut entraîner des chocs sur filets importants amenant à une montabilité défailante.

Les vis au pas fin y sont particulièrement sujettes.

Tableaux indiquant le passage du traitement par tonneaux au traitement vrac pour éviter tout risque de détérioration de la fixation notamment des filets :

7.2-2 Choix tonneau (vrac) ou attache pour le pas gros

Diamètre M	Longueur										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	+
3	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
4	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
5	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
6	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
7	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
8	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
10	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
12	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
14	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
16	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A	A
18	T	T	T	T	T	A	A	A	A	A	A
20	T	T	T	T	A	A	A	A	A	A	A
22	T	T	T	T	A	A	A	A	A	A	A
24	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
27	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
+	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

7.2-3 Choix tonneau (vrac) ou attache pour le pas fin

Diamètre M	Longueur										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	+
3	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
4	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
5	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
6	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
7	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
8	T	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A
10	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A	A
12	T	T	T	T	T	T	A	A	A	A	A
14	T	T	T	T	T	A	A	A	A	A	A
16	T	T	T	A	A	A	A	A	A	A	A
18	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
20	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
22	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
24	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
27	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
+	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

A titre indicatif

Dans certains cas, la méthode à l'attache est nécessaire.

Cette méthode est une méthode manuelle avec un coût de revient plus élevé. Il faut attacher les pièces 1 par 1 dans le but de les traiter sans entrecrochage qui pourrait apparaître durant le processus.

Par la suite un filet [dit également chaussette] de protection peut être posé. Par exemple sur le filetage pour protéger lors de la mise en conditionnement et dans l'emballage pendant le transport.



7.2-4 Procédé au tonneau (vrac)



7.2-5 Procédé à l'attache



7.2-6 Filet de protection

7.3 Les revêtements électrolytiques NF EN ISO 4042

Ce sont des revêtements qui sont déposés sur des pièces métalliques par électrolyse soit en vrac (au tonneau) ou à l'attache. Le zinc est le métal le plus communément utilisé car peu polluant, économique, il a un bon pouvoir « sacrificiel » et a de faible épaisseur, il est appelé zingage ou électrozingage.

Le zingage électrolytique ou électrozingage

Le zingage électrolytique est un procédé simple d'utilisation et économiquement compétitif.

Il est réalisé par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des sels métalliques et non métalliques dont la nature dépend de l'application envisagée et des propriétés souhaitées du revêtement. La grande variété des dépôts obtenus suivant la formulation et les conditions de dépôt rendent ce revêtement incontournable dans de nombreuses applications.

Les anodes pour le zingage électrolytique sont du zinc, le métal consommé est de haute pureté car sa qualité conditionne la marche du bain d'électrolyse.

Le revêtement par voie électrolytique ajoute à la régularité du dépôt obtenu, qui est la caractéristique majeure du procédé, le pouvoir dans le cas du zinc, d'être anodique vis-à-vis du fer (acier) et de présenter ainsi les conditions d'une bonne protection contre la corrosion.

Cette régularité de l'épaisseur de dépôt présente un avantage important pour les pièces délicates et précises, les tolérances restent acquises sans nécessité d'opérations complémentaires de reprise de finition.

Le zinc électrolytique est quasi systématiquement passivé (Chrome III trivalent) juste après son dépôt afin de stabiliser l'aspect du zinc, tout en renforçant la tenue à la corrosion par un effet barrière très superficiel (quelques μm). Le zingage électrolytique s'effectue dans des installations classiques d'électrolyse mais évidemment spécialement affectées au traitement par le zinc ou zinc nickel. On utilise le plus souvent des bains pour zinc alcalin et parfois pour zinc acide, la densité de courant étant de l'ordre de $3\text{A}/\text{dm}^2$.

Pour les petites pièces, il est avantageux de traiter au tonneau. Les pièces importantes (gros diamètres, longueurs inhabituelles) seront traitées à l'attache mais avec un coût nettement plus important, afin d'éviter les phénomènes de chocs sur filets.

Importance de la séquence d'électrozingage

Satisfaire les critères de qualité exigés par les donneurs d'ordre impose à l'exploitant la maîtrise du procédé, en l'occurrence la maîtrise de la stabilisation de l'électrolyte pour une conduite optimale de fonctionnement du réacteur. Ainsi, et s'agissant d'un réacteur fermé de type batch (cas du traitement à l'attache ou en vrac), la composition du bain évolue tout au long des campagnes suite aux réactions susceptibles de se dérouler au sein du réacteur mais également en raison des entraînements des postes amont vers les postes aval. De nombreux travaux ont permis d'établir que les propriétés structurales d'un revêtement électrolytique dépendent de la densité de courant imposée, de la composition de l'électrolyte (c'est-à-dire de la forme chimique sous laquelle se trouve la phase mère dans l'électrolyte ainsi que de la nature des additifs), du substrat et du procédé d'application. Une approche globale basée sur l'établissement d'un bilan matière pour chaque constituant minéral de l'électrolyte permet à l'exploitant une meilleure compréhension du fonctionnement du réacteur. Ce faisant, il sera en situation de définir les consignes de concentration, et par là-même, les actions correctives à mener pour maintenir l'équilibre de fonctionnement du système.

La passivation

La passivation est un traitement de conversion chimique, appliqué par immersion à partir d'une solution contenant du chrome trivalent comme constituant principal. Elle permet de former des couches complexes d'oxydes et de sels de chrome sur des revêtements électrolytiques de métaux communs comme le zinc. Ce procédé confère au matériau des propriétés particulières telles que :

- une amélioration de la résistance à la corrosion des systèmes de protection cathodique de revêtements de zinc sur substrat acier due à l'effet inhibiteur de corrosion du chrome trivalent,
- une excellente base d'accroche pour les finitions organiques (top coat, lubrifiant, etc.).

Matériaux susceptibles d'être passivés

Le procédé de passivation peut être réalisé sur un certain nombre de métaux et leurs alliages, tels que le zinc électrolytique ou galvanisé, l'aluminium, l'argent, le magnésium et le cuivre.

Cette partie est consacrée uniquement à la passivation sur zinc, utilisée dans le domaine des fixations.

Méthodes d'application

La surface de la pièce à passer doit être exempte de graisses pour permettre une bonne adhérence et une homogénéité de la couche de conversion.

Pour cette raison, on réalise généralement le traitement de passivation directement après le rinçage de l'étape de zingage, ou après le dégazage.

Le traitement consiste à immerger le produit à passer (durée d'immersion variant de quelques secondes à plusieurs minutes) dans une solution acide constituée majoritairement :

- de sels de chrome hexavalent ou d'un mélange de sels de chromes hexavalent et trivalent,
- d'anions activateurs tels que fluorures, chlorures, sulfates, phosphates... Ils déterminent les caractéristiques, la vitesse de formation et les propriétés du film passivé, d'anions réducteurs (acétates, formiates, oxalates...) qui activent la cinétique de réduction du chrome hexavalent en chrome trivalent,
- d'un acide qui permet d'activer le substrat métallique.

Rôle de la couche

La couche de passivation réalisée sur un matériau revêtu peut avoir un triple rôle :

- améliorer la résistance à la corrosion du matériau en retardant notamment le phénomène de rouille blanche du zinc effet barrière,

- donner à la pièce un aspect esthétique sans autre traitement,
- assurer l'adhérence d'un revêtement organique en conditionnant la surface pour qu'elle soit apte à recevoir une finition organique.

Tenue à la corrosion

La couche de passivation agit, dans un premier temps, comme couche passive et barrière, diminuant la vitesse de dissolution du zinc, même lorsqu'il est couplé à l'acier. La « durée de vie » de la couche de zinc est ainsi augmentée, sans diminuer significativement l'efficacité de la protection galvanique.

C'est aussi un inhibiteur cathodique efficace diminuant ainsi la réduction de l'oxygène à la surface du métal. Enfin, la présence d'ions solubles dans la couche de passivation apporte un effet cicatrisant. Le tableau 7.3-1 représente les solutions que propose un formulateur majeur dans le métier de la fixation et les courbes YY et ZZ des tableaux 7.3-2 et 7.3-3 montrent l'influence de la température sur les tenues à la corrosion. Les tenues au brouillard salin varient avec l'épaisseur du revêtement et le processus de réalisation (au tonneau ou à l'attache). Elles sont constatées en sortie de traitement.

Les opérations postérieures (notamment le conditionnement, le transport, outils de montage, etc.) peuvent dégrader les performances.

7.3-1 Classe de corrosion des passivations sur zinc & zinc allié
Tenues BS (NSST)

Classe de corrosion	Exemple de recommandations
A < 24 h	→ Zinc alcalin PRIMION ou acide ZETAPLUS avec passivation TRIAZUR
B 24 h - 72 h	→ Zinc acide ZETAPLUS avec passivation FINIDIP renforcée ou non par un FINIGARD
C 72 h - 144 h	→ Zinc alcalin PRIMION avec passivation FINIDIP renforcée ou non par un FINIGARD
D 144 h - 192 h	→ Zinc alcalin PRIMION avec passivation LANTHANE renforcée ou non par un FINIGARD
E > 192 h	→ Zinc alcalin PRIMION avec passivation LANTHANE renforcée FINIGARD Zinc Nickel alcalin et acide PERFORMA avec passivation FINIDIP renforcée ou non par un FINIGARD

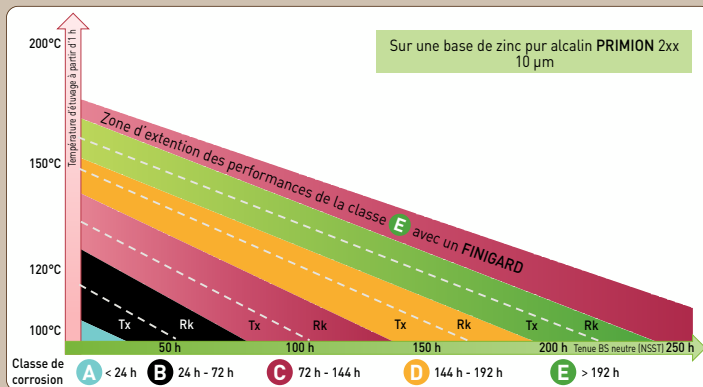
Les classes sont données pour 10 microns de zinc pur ou zinc-fer ou 8 microns zinc-nickel alcalin 12-15% Selon les normes ISO 9227 ou NF A 05 109.

Estimations des performances corrosion en oxydation blanche après étuvage pour les passivations

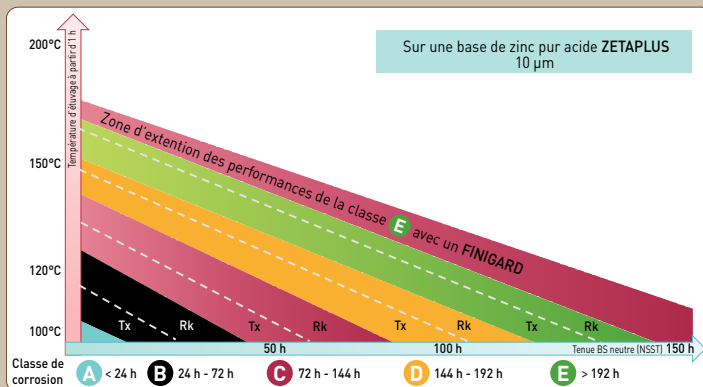
De manière générale, l'usage d'un POSTDIP ou d'un FINIGARD fait monter le traitement de finition d'une classe de corrosion.

Les classes sont données pour 10 microns de zinc pur selon les normes ISO 9227 ou NF A 05 109.

7.3-2 Courbe YY



7.3-3 Courbe ZZ



Rk : Rack / Attache / Bain mort Tx : Tonneau / Barrel

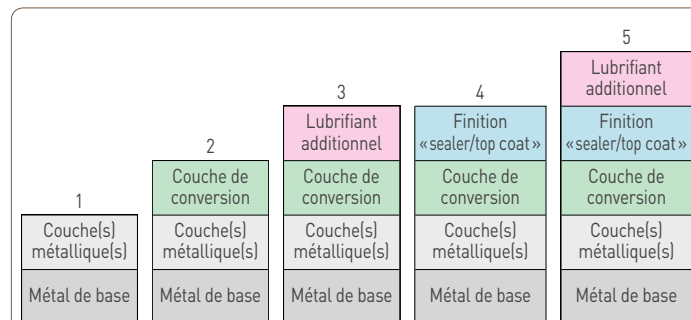


Les finitions

Les finitions peuvent être de diverses natures en fonction du but recherché :

- Filmogène ou top coat : pour augmenter la tenue corrosion par une couche barrière supplémentaire,
- Lubrifiant : pour maîtriser des plages de coefficient de frottement (0,12-0,18 par exemple),
- Colorant : pour colorer dans un but esthétique ou de détournage,
- ...

7.3-4 Les types de revêtements possibles



Légende

- 1 Uniquement couche(s) métallique(s)
- 2 Couche(s) métallique(s) + couche de conversion
- 3 Couche(s) métallique(s) + couche de conversion + lubrifiant additionnel
- 4 Couche(s) métallique(s) + couche de conversion + finition «sealer/top coat»
- 5 Couche(s) métallique(s) + couche de conversion + finition «sealer/top coat» + lubrifiant additionnel

7.3-5 Schéma d'un revêtement zingué + passivation + top coat



Selon la norme ISO 4042, il est possible d'évaluer la tenue corrosion au moment du choix du type de revêtement à base de zinc, avec la tenue en brouillard salin, grâce au tableau 7.3-6 :

7.3-6 Résistance à la corrosion des systèmes de revêtement de zinc ou d'alliage de zinc couramment utilisés

Système de revêtement à base de zinc	Code (voir tableau 7.3-7)	Durée minimale de l'essai au brouillard salin neutre pour les revêtements au tonneau ^a (heures)			
		Sans corrosion du revêtement (oxydation blanche)	Sans corrosion du métal de base (rouille rouge)		
			Épaisseur de revêtement		
			5 µm	8 µm	12 µm
Zn, avec passivation transparente ^b	Zn//An/T0	8	48	72	96
Zn, avec passivation irisée ^b	Zn//Cn/T0	72	120	192	240
Zn, avec passivation irisée et finition sealer ^b	Zn//Cn/T2	120	168	240	288
Zn, avec passivation noire et finition sealer	Zn//Fn/T2	24 ^c	72	144	192
ZnFe, avec passivation irisée ^b	ZnFe//Cn/T0	96	144	216	264
ZnFe, avec passivation irisée et finition sealer ^b	ZnFe//Cn/T2	120	216	288	360
ZnFe, avec passivation noire et finition sealer	ZnFe//Fn/T2	96 ^c	192	240	312
ZnNi, avec passivation gris argent	ZnNi//Cn/T0	120	480	720	720 ^d
ZnNi, avec passivation gris argent et finition sealer	ZnNi//Cn/T2	168	600	720	720 ^d
ZnNi, avec passivation noire	ZnNi//Fn/T0	48 ^c	360	600	720 ^d
ZnNi, avec passivation noire et finition sealer	ZnNi//Fn/T2	120 ^c	480	720	720 ^d

7.3-7 Codification utilisée pour la désignation des systèmes de revêtement électrolytiques

Élément	Description	Symbole	Désignation
Métal de base	Acier		
Couche(s) métallique(s)	Zinc Zinc-nickel Zinc-fer (pour les autres couches métalliques, voir Tableau 7.3-9)	Zn ZnNi ZnFe	Tableau 7.3-11
Couche de conversion (passivation)	Transparente Irisée Noire Jaune Sans couche de conversion	An Cn Fn Gn U	Tableau 7.3-13 ^a
Finition « sealer/top coat »	Finition « sealer » (voir aussi A.1.3) Finition « top coat » (voir aussi A.1.3) Sans finition « sealer » ni « top coat » Sans lubrifiant	T2 T7 T0 nL	Tableau 7.3-15
Lubrifiant additionnel	Lubrifiant ajouté postérieurement	T4	Tableau 7.3-15

^a Pour les chromatations, voir le Tableau 7.3-14

La durée minimale de l'essai au brouillard salin neutre ne doit pas être considérée comme un guide direct pour la résistance à la corrosion des fixations revêtues dans tous les environnements où elles peuvent être utilisées. Voir ISO 9227.

^a Avec un procédé de revêtement à l'attaque, le possible effet d'endommagement du revêtement est réduit et, par conséquent, il est possible d'obtenir une résistance accrue à la corrosion.

^b Des points noirs ne doivent pas entraîner de rejet, car ils n'affectent pas la résistance à la corrosion.

^c Un voile blanc n'est pas considéré comme de l'oxydation blanche.

^d De façon générale, la résistance à la corrosion est supérieure mais, les essais de corrosion sont arrêtés après 720 heures dans le cadre du présent document.

Ces informations restent indicatives, ce qui fait foi, ce sont les données des formulateurs/applicateurs comme par exemple le tableau ci-dessous d'un applicateur :

7.3-8 Caractéristiques des traitements sans chrome 6+

Traitement	Aspect	Epaisseur	Tenue BS rouille blanche	Tenue BS rouille rouge	Divers
Zingage Blanc	Blanc bleuté	5 µm	24 H	48 H	
		10 µm	24 H	72 H	
Zingage LANTHANE 315 sans finition renforcée	Argent irisé	5 µm	96 H	96 H	
		10 µm	96 H	240 H	
Zinc Noir sans chrome 6+ avec Top Coat	Noir	10 µm	200 H	600 H	
Zingage LANTHANE 315 FINIGARD 105	Argent	10 µm	200 H	400 H	Possibilité de coeff de frottement maîtrisé $\mu = 0,12$ à $0,18$
Zingage LANTHANE 315 LANTHANE 321 FINIGARD 105	Argent	10 µm	200 H	600 H	Possibilité de coeff de frottement maîtrisé $\mu = 0,12$ à $0,18$
Zinc Nickel 12-15% finition bleue	bleu	8 µm mini	240 H	720 H	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium
Zinc Nickel 12-15% finition noire	Noir	8 µm mini	200 H	720 H	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium

Tous les revêtements électrolytiques

Même si le zinc est le revêtement le plus commun dans la fixation, il n'est pas le seul. Il existe de nombreux autres revêtements électrolytiques qui peuvent avoir des fonctions telles que :

- Protection contre la corrosion : Zinc, Zinc-Nickel, Nickel, Chrome.
- Contact ou conduction électrique : Etain, Cuivre, Or, Argent.
- Esthétique : Zinc, Zinc-Nickel, Nickel, Chrome, Or, Argent.

7.3-9 Revêtements électrolytiques en fonction de leurs objectifs principaux et normes ISO associées

Métal / métaux de revêtement		Nature	Objectif principal du revêtement pour fixations	Norme ISO
Symbole	Élément			
Zn	Zinc	Métal	P/D/F	ISO 2081, ISO 19598
ZnNi	Zinc-nickel	Alliage	P/D/F	ISO 15726, ISO 19598
ZnFe	Zinc-fer	Alliage	P/D/F	ISO 15726, ISO 19598
Cd	Cadmium ^a	Métal	P/F	ISO 2082
Ni	Nickel	Métal	D	ISO 1456
Ni+Cr	Nickel-chrome	Multicouche	D	ISO 1456
Cu+Ni	Cuivre-nickel	Multicouche	D	ISO 1456
Cu+Ni+Cr	Cuivre-nickel-chrome	Multicouche	D	ISO 1456
CuZn	Laiton	Alliage	D	—
CuSn	Cuivre-étain (bronze)	Alliage	F	—
Cu	Cuivre	Métal	F/D	—
Ag	Argent	Métal	F/D	ISO 4521
CuAg	Cuivre-argent	Alliage	F	—
Sn	Étain	Métal	F	ISO 2093
SnZn	Étain-zinc	Métal	F/P	—

P Protection contre la corrosion

F Caractéristiques fonctionnelles

D Propriétés décoratives (couleur, aspect)

^a L'usage du cadmium est restreint ou interdit pour de nombreuses applications (les derniers utilisateurs du cadmium sont principalement les industries militaires et aérospatiales).

Limites dimensionnelles des revêtements

Les revêtements sont limités en épaisseurs par le jeu fonctionnel nécessaire dans les filets. Ainsi l'épaisseur de revêtement qui peut être appliquée sur les filetages extérieurs et intérieurs métriques ISO conformes à l'ISO 965-1, l'ISO 965-2 ou l'ISO 965-3 dépend de l'écart de base (jeu) au niveau du diamètre sur flancs, comme indiqué dans le tableau 7.3-10 ; cet écart de base dépend lui-même du filetage et des positions de tolérance g, f ou e pour les filetages extérieurs et H et G pour les filetages intérieurs.

Le 7.3-10 indique l'écart de base (jeu) en fonction du pas du filetage et de la position de tolérance du filetage extérieur et intérieur non revêtu. Les jeux minimal et maximal sont des valeurs théoriques qui limitent la plage d'espace disponible pour le revêtement.

Lors de la sélection d'une combinaison de positions de tolérance pour les filetages extérieurs et intérieurs, il convient de s'assurer que la résistance à l'arrachement des filets de l'assemblage est supérieure à la charge minimale de rupture de la fixation à filetage extérieur, F_m. Une augmentation du jeu dans le filetage peut également affecter d'autres aspects fonctionnels, tels que l'autofreinage, la résistance à la fatigue, etc.

7.3-10 Limites supérieures des épaisseurs nominales de revêtement NF EN ISO 4042 (2018)

Pas du filetage P (mm)	Diamètre nominal de filetage D (filetage à pas gros) [a] (mm)	Position de tolérance G		Position de tolérance H	Position de tolérance g		Position de tolérance f		Position de tolérance e	
		Ecart de base (μm)	Épaisseur de revêtement nominale max. (μm)		Ecart de base (μm)	Épaisseur de revêtement max. (μm)	Ecart de base (μm)	Épaisseur de revêtement max. (μm)	Ecart de base (μm)	Épaisseur de revêtement max. (μm)
0,35	1,6 [1,8]	+19	4	Possible si le filetage non revêtu de l'écrou n'est pas fabriqué jusqu'à la ligne zéro	-19	4	-34	8		
0,4	2	+19	4		-19	4	-34	8		
0,45	2,5 [2,2]	+20	5		-20	5	-35	8		
0,5	3	+20	5		-20	5	-36	9	-50	12
0,6	3,5	+21	5		-21	5	-36	9	-53	13
0,7	4	+22	5		-22	5	-38	9	-56	14
0,8	5	+24	6		-24	6	-38	9	-60	15
1	6 [7]	+26	6		-26	6	-40	10	-60	15
1,25	8	+28	7		-28	7	-42	10	-63	15
1,5	10	+32	8		-32	8	-45	11	-67	16
1,75	12	+34	8		-34	8	-48	12	-71	17
2	16 [14]	+38	8		-38	9	-52	13	-71	17
2,5	20 [18 ; 22]	+42	10		-42	10	-58	14	-80	20
3	24 [27]	+48	12		-48	12	-63	15	-85	21
3,5	30 [33]	+53	13		-53	13	-70	17	-90	22
4	36 [39]	+60	15		-60	15	-75	18	-95	23
4,5	42 [45]	+63	15		-63	15	-80	20	-100	25
5	48 [52]	+71	15		-71	17	-85	21	-106	26
5,5	56 [60]	+75	16	-75	18	-90	22	-112	28	
6	64	+80	20	-80	20	-95	23	-118	29	

NOTE : la limite supérieure théorique de l'épaisseur de revêtement est calculée sur la base de la dimension du filetage lorsqu'il est à la limite supérieure de la tolérance de filetage considérée (filetage extérieur).
 [a] Le diamètre nominal correspondant au filetage à pas gros est donné uniquement à titre informatif pour des raisons pratiques : la dimension déterminante est le pas du filetage P.

Désignation du revêtement électrolytique selon l'ISO 4042

Communément les revêtements sont décrits soit par l'épaisseur soit par la tenue en heures de brouillard salin (HBS). Ces éléments seuls, ne peuvent suffire pour décrire précisément un revêtement et ses performances, c'est pourquoi il a été défini selon des règles internationales une façon de faire. Malgré cette norme il est encore rare de trouver ce type de désignation :

7.3-11 Désignation des systèmes de revêtement électrolytiques pour la commande des fixations

Système de revêtement électrolytique				Durée d'essai au brouillard salin neutre (rouille rouge) ^c	Spécification couple/ tension, le cas échéant
Couche(s) métallique(s)		Couche de conversion	Finition « sealer », « top coat » et/ou lubrifiant		
Matériau de revêtement	Épaisseur ^c				
Zn	Conforme au tableau 7.3-12	Conforme aux tableaux 7.3-13 ou 7.3-14	Conforme au tableau 7.3-15	par exemple 480 h	C ^d
ZnNi ^a					
ZnFe ^b					

^a Les revêtements électrolytiques de zinc-nickel pour les fixations ont habituellement une teneur en nickel de 12 % à 16 % en masse et sont désignés par ZnNi(12) dans l'ISO 15726. Si d'autres teneurs en nickel sont souhaitées, voir l'ISO 15726.

^b Les alliages zinc-fer sont spécifiés comme contenant de 0,3 % à 1 % de fer en masse.

^c L'épaisseur peut être remplacée par la durée minimale de l'essai au brouillard salin neutre conformément au tableau 7.3-6 : dans ce cas, l'épaisseur doit être omise dans la désignation du système de revêtement et la résistance à la corrosion doit être ajoutée à la fin de la désignation, voir exemple 1, page 240.

^d Plage des valeurs de μ_{10t} ou K à spécifier à la commande.

7.3-12 Épaisseur de revêtement de la ou des couche(s) métallique(s)

Désignation de l'épaisseur de revêtement	Épaisseur locale minimale sur les zones de référence μm
3	3
5	5
8	8
10	10
12	12
15	15
20	20
25	25
30	30

7.3-13 Désignation des couches de conversion sans chrome hexavalent (uniquement pour les revêtements électrolytiques de zinc et d'alliages de zinc)

Passivation ^a		Aspect caractéristique
Code ^b	Nom	
An	Transparent	Transparent, clair à bleuté ^c
Cn	Irisé ^d	Transparent, clair à irisé
Fn	Noir	Noir, irisé sombre autorisé
Gn	Jaune	Jaune à jaune irisé
U	—	Sans couche de conversion

^a Des nanoparticules peuvent être incorporées à tous les types de passivation afin d'améliorer l'aspect et/ou les caractéristiques fonctionnelles.

^b La première lettre correspond aux revêtements de conversion, tels que spécifiés dans l'ISO 2081; la deuxième lettre, « n » pour non, indique l'absence de chrome hexavalent dans la couche de conversion, conformément à l'ISO 19598.

^c La nuance « bleuté » peut varier d'un bleu clair à un bleu foncé irisé, en fonction du système de revêtement.

^d Également appelée « passivation épaisse ».

7.3-14 Désignation des couches de conversion au chrome hexavalent (uniquement pour les revêtements de zinc et d'alliages de zinc)

Chromatation		Aspect caractéristique
Code ^a	Nom	
A	Clair	Transparent, clair à bleuté
C	Irisé	Jaune irisé
D	Opaque	Vert olive
F	Noir	Noir, irisé sombre autorisé
U	—	Sans couche de conversion

^a La lettre correspond aux revêtements de conversion, tels que spécifiés dans l'ISO 2081.

7.3-15 Désignation des finitions « sealer », « top coat » et/ou lubrifiants

Code ^a	Nom	Exigence
—	Lorsqu'aucun code T n'est spécifié, il peut y avoir une finition « sealer » ou « top coat » au choix de l'applicateur.	
T0	Sans finition « sealer » et sans finition « top coat »	Les finitions « sealer » et « top coat » ne doivent pas être appliquées pour certaines applications (par exemple, pour l'adhérence, la conductivité, le contact électrique, le soudage).
T2	Finition « sealer » ^b	Une finition « sealer » doit être appliquée elle peut inclure (ou non) un lubrifiant intégré ^c
T4	Lubrifiant ajouté postérieurement ^d	Un lubrifiant ou une cire doit être appliqué. Le lubrifiant peut être appliqué directement sur la couche métallique ou sur la passivation ou sur une finition « sealer » ou sur une finition « top coat » ^c
T7	Finition « top coat » ^b	Une finition « top coat » doit être appliquée. La finition « top coat » est souvent utilisée pour obtenir des caractéristiques particulières, par exemple une résistance chimique, une couleur. Une finition « top coat » peut inclure (ou non) un lubrifiant intégré ^c
nL	Sans lubrifiant	Il ne doit pas y avoir de lubrifiant intégré (ce code doit être ajouté à T2 ou T7, selon le cas).

- a La codification des fixations a été élaborée pour être compatible avec les normes ISO 2081 et ISO 19598.
- b Les finitions « sealer » et « top coat » peuvent être organiques ou inorganiques, ou une combinaison des deux.
- c Lorsqu'une relation couple/tension est spécifiée (par exemple, plage de coefficient de frottement), un lubrifiant intégré ou un lubrifiant ajouté postérieurement doit être appliqué, selon le cas.
- d Lorsqu'un lubrifiant ajouté postérieurement est spécifié, le code T4 doit être placé après une barre oblique et directement après la désignation de la finition « sealer » ou « top coat »; voir ci-contre exemple 4.

Lorsqu'une résistance minimale à la corrosion est spécifiée dans la désignation, la compatibilité de l'exigence avec le système de revêtement inclus dans la désignation doit être vérifiée conformément au tableau 7.3-6.

EXEMPLE 1 : Une fixation avec un revêtement électrolytique (ISO 4042) d'alliage de zinc-nickel (ZnNi) de teneur habituelle en nickel de 12 % à 16 %, sans épaisseur de revêtement exigée, mais avec une résistance minimale à la corrosion à l'essai au brouillard salin neutre de 720 h sans apparition de corrosion du métal de base (rouille rouge), avec une couche de conversion transparente sans chrome hexavalent (An), sans finition « sealer », « top coat » ou lubrifiant spécifique, est désignée comme suit :

[désignation de la fixation] – ISO 4042/ZnNi/An/720h

EXEMPLE 2 : Une fixation avec un revêtement électrolytique (ISO 4042) de zinc (Zn), avec une épaisseur de revêtement exigée de 8 µm et une passivation transparente sans chrome hexavalent (An), est désignée comme suit :

[désignation de la fixation] – ISO 4042/Zn8/An

EXEMPLE 3 : Une fixation avec un revêtement électrolytique (ISO 4042) de zinc (Zn) et une épaisseur de revêtement exigée de 12 µm, avec une couche de conversion irisée sans chrome hexavalent (Cn) et une finition « sealer » additionnelle avec ou sans lubrifiant intégré (T2), est désignée comme suit :

[désignation de la fixation] – ISO 4042/Zn12/Cn/T2

EXEMPLE 4 : Une fixation avec un revêtement électrolytique (ISO 4042) de zinc (Zn) et une épaisseur de revêtement exigée de 12 µm, avec une couche de conversion noire sans chrome hexavalent (Fn) et une finition « top coat » additionnelle (T7), avec un lubrifiant ajouté postérieurement (T4) et un coefficient de frottement μ_{tot} dans la plage de [0,10 à 0,20], est désignée comme suit :

[désignation de la fixation] – ISO 4042/Zn12/Fn/T7/T4[$\mu_{0,10-0,20}$]

7.4 Fragilisation par l'hydrogène

Généralités

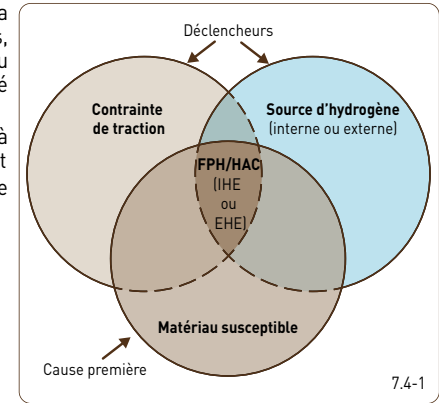
La définition typique de la fragilisation par l'hydrogène (FPH) dans la littérature et les normes est la suivante :

Perte irréversible de ductilité d'un métal ou d'un alliage, provoquée par l'hydrogène et l'effet combiné de contraintes de traction, dues à l'application d'une charge externe et/ou à des contraintes de traction résiduelles internes.

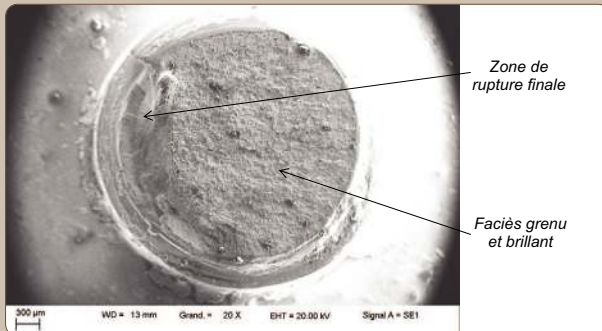
La fragilisation par l'hydrogène (FPH), souvent appelée Fissuration assistée par l'hydrogène (HAC - Hydrogen Assisted Cracking), est classifiée en deux catégories en fonction de la source d'hydrogène : la fragilisation par l'hydrogène interne (IHE - Internal Hydrogen Embrittlement) et la fragilisation par l'hydrogène externe (EHE - Environmental Hydrogen Embrittlement). L'IHE est déclenchée par de l'hydrogène résiduel provenant de la fabrication de l'acier ou d'étapes de fabrication, telles que le décapage chimique ou le revêtement électrolytique. L'EHE est déclenchée par de l'hydrogène s'introduisant dans le métal à partir de sources externes alors qu'il est sous contrainte de traction, ce qui est le cas, par exemple, pour des fixations en service. Le terme Corrosion fissurante sous contrainte (SCC - Stress Corrosion Cracking) est couramment utilisé par rapport à l'EHE qui survient lorsque l'hydrogène est un sous-produit résultant de la corrosion de surface, qui est absorbé par la fixation en acier. Les mesures visant à éviter l'IHE n'éliminent pas le risque d'EHE lorsqu'une fixation susceptible est exposée à l'hydrogène généré par la corrosion. Pour de plus amples informations sur la fragilisation des fixations par l'hydrogène, voir l'ISO/TR 20491.

Avec les dépôts électrolytiques à partir d'une solution aqueuse (zincage, cuivrage, nickelage, cadmiage, chromage...) ou à l'occasion du décapage ou du dégraissage chimique, ou de phosphatation, il est engendré un risque de rupture différé due à la fragilisation des aciers par l'hydrogène en particulier, si les trois conditions suivantes sont réunies :

- fixations de résistance à la traction ou de dureté élevées, ou cémentées et revenues, ou écrouies jusqu'à une dureté élevée,
- fixations qui sont soumises à des contraintes de traction, et
- fixations qui ont absorbé de l'hydrogène.



Il y a un risque de fragilisation par l'hydrogène interne (Internal Hydrogen Embrittlement, IHE).



7.4-2 Exemple de vis avec rupture différée



7.4-3 Décohésion intergranulaire en périphérie



7.4-4 Détail- observation de microporosités et de vermicules en surface des grains

La susceptibilité à l'IHE augmente avec l'augmentation de la dureté du matériau de la fixation. Des mesures appropriées de prévention de l'IHE pour les fixations trempées et revenues sont spécifiées, en fonction de la dureté, voir Tableau ci-dessous. Pour les fixations conformes aux ISO 898-1, ISO 898-2 et ISO 898-3, les classes de résistance mécanique courantes sont spécifiées.

	360 HV		390 HV
	A	B	C
	Aucune vérification du procédé ou essai de produit supplémentaire par rapport à l'IHE ET Aucun dégazage nécessaire	Vérification du procédé et/ou essais de produit supplémentaire(s) par rapport à l'IHE OU Dégazage (au choix du fabricant de fixations)	Vérification du procédé et/ou essais de produit supplémentaire(s) par rapport à l'IHE ET Dégazage (la température et la durée de dégazage doivent être spécifiées)
	Voir A	Voir B	Voir C
	Classe de qualité		
Vis goujons, tiges filetées conformes à l'ISO 898-1	≤ 9.8	10.9	12.9 et 12.9
Écrous conformes à l'ISO 898-2	≤ 12		
	Dureté maximale spécifiée < 360 HV	Dureté maximale spécifiée ≥ 360 HV	
Rondelles planes conformes à l'ISO 898-3	≤ 200 HV	300 HV	380 HV
	A	B	C

7.4-5 Mesures par rapport à l'IHE pour les fixations trempées et revenues, en fonction de la dureté

A Fixations de dureté < 360 HV

Lors de l'application d'un revêtement électrolytique sur des fixations de dureté maximale spécifiée inférieure à 360 HV (A dans le Tableau), aucune vérification supplémentaire du procédé n'est nécessaire par rapport à l'IHE et aucun dégazage n'est nécessaire.

B Fixations de dureté ≥ 360 HV et ≤ 390 HV

Lors de l'application d'un revêtement électrolytique sur des fixations de dureté maximale spécifiée supérieure ou égale à 360 HV et inférieure ou égale à 390 HV

(B dans le Tableau) et à condition qu'une vérification supplémentaire du procédé et/ou des essais supplémentaires des produits aient été effectués par rapport à l'IHE, le dégazage n'est pas exigé. Cependant, le client est libre de demander un dégazage de façon générale.

Pour les fixations dans cette gamme de dureté spécifiée, le revêtement électrolytique n'implique pas de risque d'IHE. En cas de rupture lors de l'essai des pièces, on ne peut pas présumer que leur dégazage aurait empêché cette rupture : il convient de réaliser des investigations sur la conformité ou non des conditions métallurgiques et physiques du matériau de la fixation. Pour plus d'informations, voir § dégazage.

C Fixations de dureté > 390 HV

Lors de l'application d'un revêtement électrolytique sur des fixations de dureté maximale spécifiée supérieure à 390 HV (C dans le Tableau), le dégazage est exigé; voir § dégazage pour la température et la durée de dégazage minimales recommandées. Les exemptions suivantes s'appliquent :

- pour les fixations qui ne sont pas soumises à des contraintes de traction du fait de leur conception ou de la norme qui s'applique (par exemple, vis sans tête conformes à l'ISO 898-5), le dégazage n'est pas exigé),
- les extrémités durcies par induction (par exemple pour les vis formant leur propre filetage) ne doivent pas être prises en compte pour déterminer les mesures de prévention relatives à l'IHE, car elles ne sont normalement pas soumises à des contraintes de traction, à condition que l'extrémité dépasse du taraudage formé.

Pour les revêtements électrolytiques de zinc-nickel alcalin (et de teneur en nickel de 12 % à 16 %), il est possible de ne pas effectuer le dégazage en raison du faible risque d'IHE. La décision de ne pas procéder au dégazage doit être basée sur des essais (voir § Méthodes d'essai pour la détection de la fragilisation par l'hydrogène) et doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fournisseur.

NOTE : pour les revêtements électrolytiques de zinc-nickel acide, des études ont montré des avantages similaires à ceux des revêtements électrolytiques de zinc-nickel alcalin, cependant des données supplémentaires sont nécessaires pour s'affranchir du dégazage.

Dégazage

Les facteurs clés qui influencent l'efficacité du dégazage sont :

- la température,
- la durée,
- la perméabilité du revêtement,
- l'épaisseur du revêtement.

Pour les fixations susceptibles (par exemple, de dureté/dureté à cœur supérieure à 390 HV) qui ont fait l'objet d'un revêtement électrolytique de zinc, une durée de dégazage minimale de 8 h à 10 h et de 190 °C à 220 °C, est recommandée. Toutefois :

- selon le type, les dimensions, le niveau de résistance/dureté des fixations, et en fonction du système de revêtement et du procédé d'application, des durées plus courtes sont appliquées avec succès;
- selon le type, les dimensions, le niveau de résistance/dureté des fixations, des durées de dégazage allant jusqu'à 24 h peuvent être nécessaires pour réduire suffisamment l'hydrogène mobile.

La pratique courante consistant à dégazer des fixations avec revêtement électrolytique de zinc pendant 4 heures à environ 190 °C est inadéquate pour extraire l'hydrogène, car le zinc constitue une barrière effective à l'effusion de l'hydrogène. Il a été démontré qu'une durée de dégazage de 4 h peut même être préjudiciable, et peut provoquer des ruptures occasionnelles. Des durées de dégazage plus longues sont recommandées pour que le dégazage soit efficace et bénéfique.

Pour les fixations de classe de qualité 10.9 qui sont correctement fabriquées en respectant les matériaux et les propriétés métallurgiques prévus, comme spécifiés dans l'ISO 898-1, l'IHE n'est pas susceptible de provoquer une rupture et de ce fait les fixations ne nécessitent pas de dégazage. Compte tenu des connaissances actuelles sur l'efficacité du dégazage et la susceptibilité des matériaux, ce n'est pas le dégazage qui empêche la rupture de ces fixations. Les fixations de classe de qualité 10.9 sont parfois dégazées à titre de précaution contre des erreurs de fabrication ou un procédé de fabrication non maîtrisé qui pourraient rendre le matériau susceptible.

En cas de rupture différée lors de l'application ou en service, toutes les conditions, y compris les conditions d'assemblage et les conditions d'environnement doivent être examinées, en plus des fixations elles-mêmes, de leurs procédés de fabrication, ainsi que les procédés mis en œuvre pour le revêtement électrolytique.

Les critères de dégazage tels que spécifiés dans l'ISO 2081, l'ISO 9588 et l'ISO 19598 sont trop vagues et ne sont pas applicables aux fixations. La température et la durée maximales utilisées dans un processus de dégazage sont limitées par les considérations suivantes. Il convient que la température ne dépasse pas la température effective de revenu des fixations, et il convient qu'elles n'altèrent pas les caractéristiques fonctionnelles du revêtement. Une température et/ou une durée excessive(s) peut (peuvent) altérer l'effet bénéfique du roulage après traitement thermique.

Les pièces avec revêtement électrolytique de zinc sont généralement dégazées à une température maximale de 220 °C. Les pièces avec revêtement électrolytique de cadmium sont généralement dégazées à une température maximale de 200 °C.

Le processus de dégazage est généralement effectué après le revêtement électrolytique, et le cas échéant avant l'application d'une couche de conversion, et/ou d'une finition «sealer» et/ou «top coat». Toutefois, l'ordre des processus peut varier en fonction des propriétés spécifiques des finitions.

Il convient que le délai entre le revêtement électrolytique et le dégazage soit aussi court que possible, à titre de bonne pratique. La finalité d'une telle pratique est de maximiser l'extraction de l'hydrogène mobile, sinon une partie de cet hydrogène mobile peut être piégée de façon réversible et devient alors plus difficile à dégazer. Ce phénomène s'est révélé critique pour des pièces en acier revêtues électrolytiquement, de dureté de 500 HV et au-delà. L'approche souvent utilisée, qui consiste à spécifier un délai exact (par exemple, 4 h), est purement subjective et a été prévue comme un délai opérationnel pratique et, utilisée également en assurance qualité pour s'assurer du respect des bonnes pratiques.

Il convient de ne pas utiliser le délai entre le revêtement et le dégazage comme un critère rigide d'acceptabilité d'un lot de fixations et il convient de ne surtout pas l'utiliser comme base de la cause première de rupture d'une fixation.

Il convient que les conditions dans le four de dégazage, y compris les méthodes de chargement, la durée du dégazage et l'uniformité de la température, soient contrôlées. Il convient que la mise en place d'une stratégie de dégazage bien fondée et efficace, incluant la décision d'effectuer ou non un dégazage, soit validée par des données empiriques résultant d'essais sous charge de longue durée et/ou d'essais de qualification des processus, tel que spécifié dans la DIN 50969-2 et l'ASTM F1940.

Méthodes d'essai pour la détection de la fragilisation par l'hydrogène

Les méthodes d'essai conçues pour détecter ou mesurer toute réduction mécanique de résistance résultant de l'effet de l'hydrogène intègrent systématiquement une composante Temps.

En général, les essais pour détecter la fragilisation par l'hydrogène sont effectués au moyen d'essais sous charge de longue durée. Les essais sous charge de longue durée sont prévus comme une étape d'assurance qualité post-production (par exemple, après revêtement électrolytique) pour les essais des fixations à haute résistance, qui présentent une susceptibilité à l'IHE. Les essais sous charge de longue durée consistent à appliquer une charge statique spécifique, durant une durée définie dans la plage de 24 h à 200 h, en fonction de la spécification. La nature qualitative de l'essai sous charge de longue durée est telle que la fixation présentera ou non une rupture à la fin du temps imparti. Il existe plusieurs méthodes pour les essais sous charge de longue durée. Les essais les plus souvent utilisés pour les fixations sont spécifiés dans l'ISO 15330, DIN 50969-2, NASM 1312-2, ASTM F606/F606M.

7.5 Les revêtements lamellaires NF EN ISO 10683

Il n'y a pas de désignation générique, de nombreux revêtements lamellaires existent, liés au formulateur du produit. Chaque formulateur peut produire des variantes des produits présentés ci-dessous, offrant des couleurs différentes (noir par exemple), d'autres plages d'épaisseur et/ou de coefficient de frottement...

GEOMET®

Formulateur : NOF METAL COATINGS GROUP.

Le GEOMET® est un revêtement mince, non électrolytique, dont la chimie brevetée est à base aqueuse. De couleur gris aluminium, il est constitué de lamelles de zinc et d'aluminium dans une matrice inorganique. Il a été développé comme une alternative 100% sans chrome.

Le GEOMET® assure la protection des surfaces métalliques grâce l'action combinée de plusieurs phénomènes :

- Effet barrière : la superposition de lamelles de zinc et d'aluminium confère une excellente barrière entre le substrat en acier et le milieu corrosif.
- Protection sacrificielle (ou protection cathodique) : le zinc s'oxyde préférentiellement à la place de l'acier.
- Passivation : le zinc et l'aluminium sont passivés dans toute l'épaisseur du revêtement, ce qui permet un ralentissement de la consommation naturelle du zinc.

Le GEOMET® 321 est un basecoat non lubrifié dans la masse. La maîtrise des coefficients de frottements s'obtient par ajout d'une finition. Elle sera choisie dans la gamme de NOF METAL COATINGS selon la gamme de valeur visée.

Le GEOMET® 500 est la version lubrifiée dans la masse ne nécessitant aucune finition additionnelle pour la gamme de valeur de COF 0,12 - 0,18 (suivant ISO 16047).

Le GEOMET® ne contient pas de métaux lourds tels que cadmium ou plomb, pas de chromates ou de chrome (Cr3 ou Cr6), pas de CFC et s'inscrit dans une démarche de protection de l'environnement, en réponse aux Directives Européennes (voir en fin d'ouvrage).

Méthodes d'application

Après une phase de préparation : dégraissage chimique puis généralement décapage par action mécanique (grenailage)

Le GEOMET® s'applique par trempé ou pulvérisation, en vrac ou à l'attache.

Principales propriétés

La résistance à la corrosion n'est pas modifiée par une exposition préalable des pièces de 100 heures à 180°C.

Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.

Excellente résistance aux solvants, carburants, huiles moteur, liquides de refroidissement, liquides de frein, solvants organiques (test VDA 621-412).

Conductivité suffisante pour la dépose d'une cataphorèse

Peut être complété par une peinture. Cependant le test d'adhérence par quadrillage n'est pas adapté en raison de la structure lamellaire du revêtement.

Résistance excellente à la corrosion bimétallique avec l'aluminium et le zinc.

Maintien des performances anticorrosion du revêtement pour des expositions jusqu'à 300°C.

Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

Dans le cas de fortes variations de taux d'humidité lors des opérations de serrage, un système avec finition sera préféré à un système lubrifié dans la masse, répondant toutefois parfaitement à la quasi-majorité des cas.

Revêtement	Poids de couche	Essai Brouillard Salin (ISO 9227)*
GEOMET®321/500 Grade A	> 24 g/m ²	> 240 heures sans rouille blanche > 720 heures sans rouille rouge
GEOMET®321/500 Grade A + finition	> 24 g/m ² + finition (1 couche)	> 240 heures sans rouille blanche > 720 heures sans rouille rouge
GEOMET®321/500 Grade B	> 36 g/m ²	> 240 heures sans rouille blanche > 1 000 heures sans rouille rouge
GEOLBLACK®	> 24 g/m ² + finition noire (2 couche)	> 1 000 heures sans rouille rouge

* Les résultats peuvent varier selon le substrat, la géométrie des pièces et le type de procédés d'application.

Nota : hors Europe il existe d'autres références dont les caractéristiques peuvent être légèrement différentes.

DELTA PROTEKT®

Formulateur : DÖRKEN MKS Système.

La gamme de produits Delta Protekt® se compose de procédés non électrolytiques de zinc lamellaire avec finition de couleur argentée.

Le système est constitué d'une sous-couche inorganique à haute teneur en lamelles de zinc et aluminium (DELTA-PROTEKT® KL100) et de couches de finition de type vernis inorganique aqueux à base silicium de la série VH 300 qui permettent d'obtenir les différents coefficients de frottement requis par l'industrie automobile (VH301.1GZ, VH315, VH302GZ)

Le procédé est totalement exempt de chrome, plomb ou cadmium, ni de produits CMR.

Le DELTA-PROTEKT® KL105 est une version de zinc lamellaire auto lubrifiée de dernière génération qui permet d'augmenter la résistance à la corrosion pour des épaisseurs équivalentes avec un coefficient de frottement de 0,12- 0,18.

Méthodes d'application

- En vrac par immersion (au trempé), puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage.
- A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique, HVLP ou électrostatique.
- Préparation par lavage, grenaillage ou phosphatation.
- Condition de cuisson : 200 à 240°C pour le zinc lamellaire, 180 à 220°C pour les finitions.

Principales propriétés

- Film sec de 5 à 15 microns.
- Tenue au brouillard salin : 200 heures rouille blanche, 600 à 1000 heures rouille rouge, voir plus avec le DELTA-PROTEKT® KL105.
- Protection cathodique par effet sacrificiel de zinc.
- Effet barrière par superposition de lamelles de zinc et d'aluminium.
- Résiste aux solvants organiques.
- Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.
- Diminution de la corrosion galvanique avec l'aluminium.
- Maîtrise du coefficient de frottement.
- Protection contre les acides, les bases, les détergents, les huiles, l'essence...
Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

DELTATONE®

Formulateur : DÖRKEN MKS Systeme.

Le Delta®-Tone est un revêtement de zinc lamellaire réalisé en couches minces de couleur gris argent.

Il est composé d'un liant inorganique contenant zinc et aluminium.

Il ne contient pas de métaux lourds comme plomb ou cadmium, pas de chromates, pas de chrome hexavalent, pas de PCB ni CFC.

La polymérisation effectuée après le dépôt lui confère une couleur gris argent.

La bonne résistance à la corrosion résulte notamment de la protection cathodique et de l'effet barrière du aux paillettes de zinc et d'aluminium.

Les températures de polymérisation excluent toute modification métallurgique.

Son pouvoir de pénétration, associé à une bonne mouillabilité du substrat, permet de revêtir des pièces de formes complexes.

Il peut être suivi d'une finition organique Delta®-Seal GZ (argent ou noire) qui permet d'ajuster le coefficient de frottement (0,10 à 0,14) et apporte une coloration utile pour les opérations de repérage.

Méthodes d'application

- En vrac par immersion (au trempé), puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage.
- A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique, HVLP ou électrostatique.
- Préparation par lavage, grenaillage ou phosphatation.
- Température de polymérisation inférieure à 220°C.

Principales propriétés

- Tenue au brouillard salin 400 heures rouille rouge pour un poids de couche de 20/26 g/m² soit une épaisseur de 6 à 10 microns.
- Tenue au brouillard salin 800 heures rouille rouge pour un poids de couche de 32/38 g/m² soit une épaisseur de 10 à 15 microns.
- Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.
- Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

Magni 565®

Formulateur : MAGNI COATINGS®

Système anticorrosion duplex à faible épaisseur, non électrolytique, combinant une sous-couche inorganique riche en lamelles de zinc et aluminium (Magni B46) et une couche de finition organique riche en aluminium (Série Magni B18 – différents coefficients de frottement de 0,06 à 0,24 suivant ISO 16047).

Nomenclature selon ISO 10683 : fIZn/nc/TL.

Variantes

Magni 502 : système anticorrosion monoproduit, riche en lamelles de zinc, couleur argent, autolubrifié - μ 0,15 +/- 0,03.

Nomenclature selon ISO 10683 : fIZnL/nc.

Magni 554E/556E : systèmes anticorrosion duplex argent – μ 0,12 +/- 0,03.

Nomenclature selon ISO 10683 : flZn/nc/TL.

Magni 575 : système anticorrosion duplex noir – Coefficients de frottement 0,12 +/- 0,03 et 0,15 +/- 0,03.

Nomenclature selon ISO 10683 : flZn/nc/TL.

Méthodes d'application

En vrac/vrac positionné par immersion (au trempé) puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage.

A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique ou électrostatique.

Préparation par dégraissage puis grenailage ou phosphatation.

Conditions de cuisson : 230-250°C selon les revêtements riches en zinc et 175-200°C selon les finitions.

Principales propriétés

- Les systèmes Magni sont exempts de métaux lourds, chrome et chromate, PCB, CFC, CMR. Conformés à la réglementation REACH et à la directive RoHS.
- Absence de fragilisation par l'hydrogène du fait des procédés d'application.

- Tenue au brouillard salin (ISO 9227) : 720 -1000 heures selon les épaisseurs de films secs, la géométrie des pièces et le procédé d'application.
- Excellente résistance chimique (solvants organiques, liquides automobiles...).
- Excellents systèmes contre la corrosion bimétallique.
- Maîtrise du coefficient de frottement.
- Les finitions Magni sont applicables sur les dépôts électrolytiques de zinc pur et de zinc allié.

Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

Nota : La norme NF EN 10683 "Éléments de fixation - revêtements non électrolytiques de zinc lamellaire" a fait l'objet d'une révision parue en 2018.

Les principales modifications sont les suivantes :

- Mise à jour des références normatives.
- Suppression de la restriction du contrôle aux filetages extérieurs revêtus
- Suppression d'une colonne relative au jeu maximal pour la position de la tolérance e.

7.6 Galvanisation à chaud

Définition

La galvanisation à chaud consiste à recouvrir de zinc un métal ferreux, principalement l'acier, par l'immersion dans un bain de zinc en fusion. Le revêtement ainsi obtenu doit avoir les meilleures qualités de continuité, de régularité d'épaisseur et d'adhérence au métal de base. C'est la recherche de ces qualités qui conditionne les techniques d'exécution du procédé.

Caractéristiques du revêtement

La température de fusion du zinc est de 419°C ; la galvanisation à chaud s'effectue normalement de 440 à 460°C.

A l'immersion du fer (acier) dans le zinc fondu, il se produit une réaction entre les deux métaux qui amène une diffusion entre le fer et le zinc entraînant la formation de couches d'alliages.

L'examen micrographique de coupes des revêtements permet de différencier les phases qui se succèdent du fer vers la surface extérieure :

	Alliage de	Dureté (Mpa)
- phase gamma ou couche d'adhérence	21 à 28% de fer	4500-5500
- phase delta :	7 à 12% de fer	2500-4500
- phase dzêta :	5 à 6% de fer	1800-2700
- phase éta ou couche de zinc pur	≤ 0,03% de fer	300-500

La galvanisation apporte aux pièces en acier une double protection contre la corrosion :

- protection physique par la barrière / écran que forme le revêtement de zinc et sa tenue à la corrosion.
- protection électrochimique par effet cathodique, due au pouvoir sacrificiel en vas de blessure du revêtement.

La très faible vitesse de corrosion du zinc permet d'obtenir des pièces avec une longévité remarquable.

Annuel	Milieu	Temps moyen de longévité du zinc (*)
0,5 à 1,5 microns	Extérieur en milieu rural	50 ans et +
1 à 3 microns	Extérieur en milieu urbain, selon le taux de pollution	25 à 30 ans et +
1,5 à 4 microns	Milieu marin	20 à 30 ans et +
3 à 8 microns	Milieu industriel	15 à 20 ans et +

* Epaisseur de revêtement conforme à la norme NF EN ISO 1461 (Ces données n'ont aucune valeur contractuelle)

Les différences d'épaisseur de ces couches dépendent, comme d'ailleurs l'épaisseur totale du revêtement, d'un certain nombre de facteurs influencés par l'intensité et la durée de la réaction par l'opération d'immersion dans le bain de zinc.

L'importance des opérations de préparation

La galvanisation à chaud nécessite un traitement de préparation de surface particulier de façon à ce que le contact fer-zinc, dont il vient d'être question, se réalise intimement en tous points des pièces traitées.

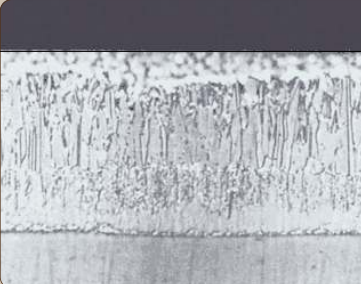
Les opérations préliminaires sont, dans l'ordre : dégraissage, rinçage, décapage, rinçage, fluxage*, préchauffage et couvert (pour la galvanisation humide).

* **Le fluxage** consiste à déposer sur la surface des pièces un mélange de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium. L'opération a trois objectifs :

- parfaire la préparation de surface (dissolution des oxydes de fer réformés à la surface au cours de l'opération de rinçage),
- protéger la surface de toute oxydation avant immersion dans le bain de zinc,
- assurer une bonne mouillabilité de la surface des pièces par le zinc fondu.

La qualité finale du revêtement dépend en grande partie de la maîtrise du processus de préparation, puis de la maîtrise du cycle de température pendant l'opération de revêtement proprement dite.

7.6-1 Coupe micrographique d'un revêtement par galvanisation

	Couche	Microdureté Vickers
	éta	70
	dzêta	179
	delta	244
	gamma	450
	acier	159

Galvanisation proprement dite

La qualité d'une galvanisation dépend des opérations préliminaires de préparation de surface que nous venons de voir, et dont le rôle est extrêmement important sur ce qu'on appelle la « prise de zinc » résultant du contact Fe-Zn. Elle dépend aussi d'un nombre appréciable de facteurs dont les principaux sont :

- la température du bain de zinc,
 - la durée d'immersion,
 - la vitesse de retrait des pièces,
 - la composition du zinc dans le bain,
 - le refroidissement suivant le retrait,
- et évidemment l'influence de la nature des aciers, constituant les objets ou structures à galvaniser.

Applications

Les profilés galvanisés ont trouvé des applications particulièrement intéressantes dans la construction métallique : structures de bâtiments, charpentes, pylônes de grande hauteur, etc.

Au contact de la galvanisation avec le béton, il se crée une couche d'hydroxy zincate de calcium qui se comporte comme une couche de passivation et améliore l'adhérence au béton, évitant ainsi l'éclatement du béton provoqué par l'oxyde de fer.

Industrie du tréfilage de l'acier

La galvanisation à chaud est pratiquée systématiquement dans toutes les usines de tréfilage de l'acier. L'opération se fait en continu.

Industrie du tube d'acier

Toutes les usines de fabrication de tubes d'acier (tubes soudés et tubes étirés sans soudure) possèdent des installations de galvanisation très importantes et fortement mécanisées dans toutes les différentes opérations de traitement car le tube galvanisé a de très nombreuses applications, aussi bien comme conducteur de fluides (canalisations d'eau, de gaz, d'air comprimé, d'air de conditionnement thermique), que comme élément de construction : pylônes, échafaudages métalliques, structures et charpentes tubulaires, etc.

Industrie de la tôle d'acier

La galvanisation à chaud des tôles, qui s'effectuait, il y a encore quelques années, suivant le procédé classique sur des tôles en dimensions finies sous le nom de galvanisation feuille-à-feuille, est actuellement presque entièrement supplanté par la galvanisation des tôles en bandes continues.

Tôles prélaquées

Depuis les années 1960, les bandes d'acier galvanisées jouissent d'une présentation complémentaire qui, depuis lors, connaît une très forte progression de ses applications : il s'agit de la tôle prélaquée sur tôle d'acier galvanisée.

Les traitements de préparation de surface et d'application des laques sont réalisés sur des lignes de prélaquage importantes exploitant des procédés technologiques très perfectionnés qui concourent à l'obtention de produits de hautes performances en qualité, adhérence, ductilité... et en aspect : homogénéité, fixité des couleurs avec de nombreuses teintes de présentation des produits.

La tôle prélaquée est fournie commercialement en bandes de 0,60 à 1,50 m de largeur, en feuilles de mêmes largeurs et en bandes refendues toutes largeurs.

Ses principales applications se situent en construction métallique et bâtiment (couvertures, bardages, murs, rideaux...), en climatisation, en électroménager, en agriculture (équipements agricoles), en construction automobile, en emballage...

Application aux fixations

La norme NF EN ISO 10684 spécifie les matériaux, les étapes du procédé, les dimensions et caractéristiques fonctionnelles des revêtements de galvanisation à chaud s'appliquant aux fixations à pas gros de M8 à M64, de classes de qualité jusqu'à 10.9 pour les vis et goujons et jusqu'à la classe 12 pour les écrous.

La galvanisation à chaud n'est pas recommandée pour les fixations à pas fin et/ou de diamètre inférieur à M8.

Une des caractéristiques d'un revêtement par galvanisation est son épaisseur, au minimum de 40 µm localement et en moyenne au minimum de 50 µm. Les filetages doivent donc être adaptés afin de conserver les écarts fondamentaux [jeux fonctionnels] nécessaires. Deux méthodes le permettent :

- des vis dont le filetage est de position de tolérance g ou h avant revêtement, avec des écrous à filetage majoré, de classe de tolérance 6AZ ou 6AX après revêtement. L'écrou sera alors marqué Z ou X immédiatement après le marquage de sa classe de qualité.
- Des vis à filetage minoré, de classe de tolérance 6az avant revêtement, avec des écrous à filetage de position de tolérance H ou G après revêtement. La vis sera alors marquée U immédiatement après le marquage de sa classe de qualité.

Attention : Les écrous à filetage minoré ne doivent JAMAIS être montés sur des vis à filetage minoré il existe un risque majeur de ruine de l'assemblage par arrachement du filet.

- Les marquages Z, X ou U ci-dessus indiqués doivent être repris sur l'emballage.
- Cependant, si vis et écrous sont emballés ensemble, et livrés dans l'emballage scellé du fabricant, le marquage complémentaire des produits n'est pas obligatoire : le marquage obligatoire de l'emballage est considéré comme suffisant.
- Le marquage complémentaire des produits et de l'emballage n'est pas non plus obligatoire dans le cas d'un produit défini dans une norme de produit qui spécifie la tolérance de filetage des vis (ou goujons) et écrous, impliquant de ce fait que le fabricant n'a pas le choix de la tolérance de filetage.

Avertissement : Pour les filetages M8 et M10, les charges d'épreuve et les contraintes sous charge d'épreuve des écrous ainsi que les charges ultimes en traction et les charges d'épreuve des vis et goujons sont spécifiées dans l'annexe A de la norme NF EN ISO 10684.



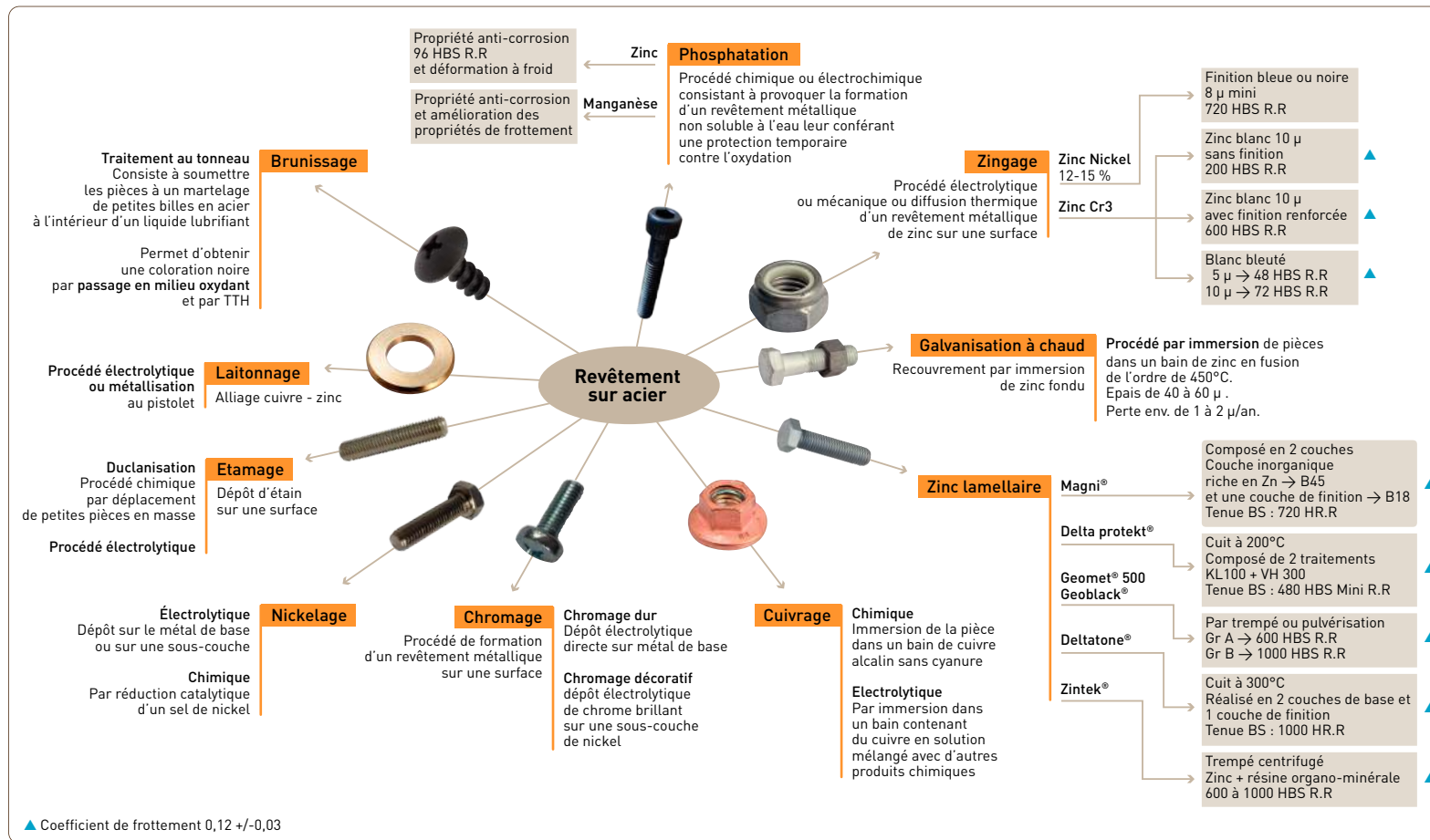
7.6-2 Application de produits galvanisés : pylônes



7.6-3 Application de produits galvanisés : antennes

7.7 Les autres traitements ou revêtements

7.7-1 Synoptique des différents revêtements communs pour les fixations



Généralités

Pour la fixation, il existe une multitude de revêtements qui ont des fonctions différentes, comme :

- la résistance à la corrosion,
- le contact électrique,
- l'esthétique.

Et qui peuvent être la résultante de contraintes particulières :

- contraintes mécaniques,
- contraintes dimensionnelles,
- contraintes physiques,
- contraintes esthétiques,
- Etc.

Ainsi on peut trouver un grand nombre de revêtements et de procédés d'application, qui répond à des besoins tous différents et spécifiques.

Chromage

Principe

Ce procédé de revêtement électrolytique est un des plus connus, bien que cette appellation désigne aussi improprement des protections multicouches, comme nickel + chrome.

Son importance industrielle se justifie tant par sa fonction décorative (non-ternissement), avec des épaisseurs inférieures ou égales au micromètre, que protectrice et mécanique (chromage dur) où le même dépôt de chrome est réalisé sur le métal de base, avec des épaisseurs d'une dizaine à quelques centaines de micromètres.

Les performances du chrome électrolytique, pour de telles applications, tiennent à sa dureté, à sa résistance à l'abrasion, à la passivité de la surface et aux qualités de frottement de pièces antagonistes, en glissement ou en rotation.

Mécanismes réactionnels lors du chromage

Pour que l'électrolyse donne lieu à un dépôt de chrome, une certaine proportion d'un anion catalyseur (SO_4^{--}) est nécessaire ($\approx 1/100^e$ en masse de l'anhydride chromique).

Les phénomènes sont schématisés par la figure 7.7-2 et correspondent aux réactions électrochimiques à la cathode et à l'anode.

Chromage décor

Cette appellation recouvre, en fait, un système de protection anticorrosion multicouches : Ni + Cr ou même Cu + Ni + Cr, le chrome apportant passivité,

dureté superficielle et résistance au ternissement, mais une structure généralement fissurée ; le nickel, plus épais, ductile et non poreux, isole le métal de base du milieu ambiant. Anodique par rapport au chrome, le nickel se corrodera au niveau des fissures ou porosités du dépôt de chrome.

Il existe une grande variété de systèmes nickel + chrome dont les principaux sont, dans un ordre croissant de protection, les suivants :

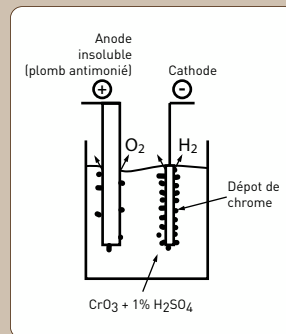
- nickelage brillant + chrome standard (par exemple, objets d'intérieur),
- nickelage brillant + chrome micro-fissuré,
- nickelage brillant + chrome duplex (non fissuré + micro-fissuré),
- nickelage duplex + chrome non fissuré,
- nickelage duplex + chrome micro-fissuré.

Ces systèmes de dépôt ont largement été utilisés dans l'industrie automobile, où les épaisseurs requises vont de 10 à 50 μm de nickel et de 0,1 à 1 μm de chrome.

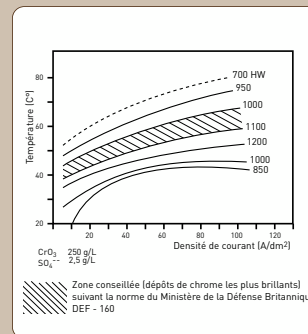
Les applications du chrome décoratif se rencontrent dans beaucoup d'industries, particulièrement :

- industrie automobile et équipements,
- instruments d'optique, de précision, et médicaux,
- matériels téléphoniques et électriques,
- mobiliers métalliques,
- articles de sports et appareillage domestique...

Les contrôles de qualité concernent l'adhérence, la porosité, l'épaisseur, la corrodabilité. C'est pourquoi les normes déjà citées pour le nickelage électrolytique, ainsi que la norme NF A 91-119, pourraient être consultées.



7.7-2 Schéma de principe de l'électrolyse d'un bain de chromage



7.7-3 Courbes d'isodureté en fonction de la température et du courant cathodique

Chromage dur et épais

Cette technique de chromage pour usages industriels concerne des dépôts plus épais que pour les usages décoratifs, et permet de tirer parti d'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- faible cohérence de frottement,
- propriétés anti-adhérentes,
- résistance à l'usure et haute dureté,
- résistance à la corrosion,
- qualités de résistance aux charges.

Caractéristiques du chromage dur

Les revêtements de chrome dur ont habituellement une épaisseur de 8 à 250 µm. Les bains utilisés sont tout à fait semblables à ceux utilisés en chromage décoratif, hormis la concentration en Cr3 plus faible (150 à 300 g/l) et la température à 50°C, ce qui permet des densités de courant jusqu'à 80 A/dm².

Pour obtenir les duretés les plus élevées (≈ 1000 HV), il faut considérer ensemble température et densité de courant cathodique (figure 7.7-3).

Le chromage épais mettant en jeu d'importantes densités de courant cathodique, et donc une grande intensité par unité de volume, il sera souvent utile de prévoir un système de refroidissement du bain adapté à la puissance dissipée par effet Joule.

Techniques d'application

Forme et état de surface

La qualité finale du dépôt de chrome épais est lié à l'état de surface et à la forme de la pièce à revêtir.

7.7-4

Etat de surface et forme	Défauts	Remèdes
Effet d'angles	Surépaisseurs sur arêtes, manque de dépôt dans les creux	Rayonner ou ne pas chromer l'angle
Rayures ou fissures	Absence ou réduction du dépôt	Adoucir par meulage
Filetage	Modification du diamètre et de l'angle de filetage	Compenser par usinage ou polissage électrolytique
Alésage	Irrégularité d'épaisseur	Utiliser une anode de forme ou prévoir un dégagement à la meule
Limite de dépôt	Surépaisseur	Reporter la limite en zone non fonctionnelle ou utiliser une cathode auxiliaire

Le chrome épais amplifie les défauts du métal de base et ce d'autant plus que son épaisseur est importante. La surface devra donc être exempte de piqûres, occlusions, zones écrouies, arrachements de métal, stries d'étirage, tapures de trempe, soufflures, etc.

Il faudra aussi tenir compte de l'amplification de la rugosité superficielle en prévoyant les opérations préalables de rodage, polissage ou rectification (rugosité totale $R_t \leq 1 \mu\text{m}$ et $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$).

Usinable à la meule ou par pierrage, le chrome électrolytique permet d'obtenir par super finition des rugosités très faibles : R_a de 0,1 à 0,02 µm.

Choix du dépôt

Pour une pièce cylindrique tolérancée, il est possible d'obtenir par chromage une surface utilisable sans retouche en considérant toutefois que la tolérance sur le diamètre chromé est la somme algébrique des tolérances d'usinage du support et de la tolérance d'épaisseur du chromage.

Chromage à la cote

- Epaisseur du chrome $\leq 12 \mu\text{m}$: frottement à sec, outils de coupe, par exemple.
- Epaisseur du chrome 10 à 25 µm : moules.
- Epaisseur du chrome 20 à 60 µm : frottement de glissement, prévention légère de l'usure ou de la corrosion.

Chromage épais

Epaisseur > 50 µm, parfois jusqu'à 500 µm, pour assurer une cote précise après rectification sur des pièces :

- neuves : protection, importante contre l'usure (abrasion et corrosion),
- défectueuses en usinage ou usées : apport > 50 µm et tolérance diamétrale $\leq 40 \mu\text{m}$ après rectification.

Pré et post-traitements

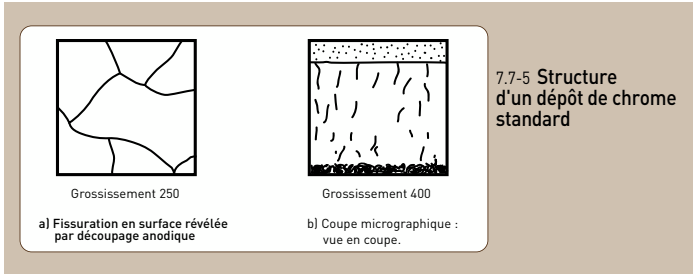
Les traitements préalables au chromage élimineront les souillures, les oxydes mais aussi la couche superficielle écrouie, et éventuellement abaisseront la rugosité. En vue d'améliorer l'endurance à la fatigue, un grenailage de précontrainte peut être spécifié :

- intensité de grenailage 0,3 mm d'arc, acier $R_m < 1100 \text{ MPa}$,
- intensité de grenailage 0,4 mm d'arc, acier $R_m \geq 1100 \text{ MPa}$.

Après chromage électrolytique, les aciers à haute résistance, du fait de l'intense dégagement d'hydrogène, subissent une fragilisation.

Les propriétés de telles pièces sont restaurées par un traitement thermique dit de dégazage qui favorise la diffusion de l'hydrogène vers l'extérieur, aussitôt après chromage (moins de 4h) et avant toute finition mécanique.

Les pièces devant résister à la fatigue et non précontraintes subiront le traitement thermique suivant : 400 à 480°C pendant 1h minimum ; mais cela peut entraîner une diminution de la dureté du chrome et de l'acier.



Il peut être prescrit une détente à une température de 135 à 150°C durant 2 à 5h, après rectification du dépôt de chrome.

Dans tous les cas, les contrôles magnétoscopiques ou par ressuage sont recommandés avant et après rectification du chrome, car une rectification mal conduite provoque une fissuration accrue du dépôt.

Structure et propriétés du chrome dur

Même à faible épaisseur 0,5 à 1 μm , le dépôt de chrome électrolytique se fissure car les tensions internes du dépôt ($\approx 100 \text{ MPa}$) sont supérieures à la ténacité du chrome ($\approx 15 \text{ MPa}$).

L'examen au microscope montre ainsi des réseaux de fissures caractéristiques, réseaux qui se superposent sans continuité au fur et à mesure de l'accroissement du dépôt (figure 7.7-5).

Une relative étanchéité du dépôt ne s'obtient qu'à partir de 30 à 50 μm d'épaisseur.

Au contraire, des autres dépôts électrolytiques, la taille des grains est excessivement fine, 0,008 à 0,12 μm ; elle est révélée seulement aux rayons X et n'est modifiée que par des traitements thermiques excédant 400°C et durant plus d'une heure, modification qui coïncide alors avec une baisse de dureté.

La dureté et la résistance à l'usure sont deux propriétés essentielles du chrome électrolytique. Les paramètres vus au paragraphe « *Caractéristiques du chromage dur* » permettront de fixer le plus souvent cette valeur, au mieux, entre 800 et 1000 HV.

Il est à noter que cette valeur correspond à des mesure effectuées sur dépôts épais (épaisseur supérieure à 50 μm), sans rupture du dépôt, ni fissuration aggravée.

Cependant, les dépôts de dureté intermédiaire 750 à 800 HV donneraient la meilleure résistance à l'usure (essai Taber).

Le faible coefficient de frottement du chrome électrolytique permet de très nombreux usages mécaniques : pistons, vérins, coulisseaux, soupapes, arbres, etc.

Parmi les nombreux procédés de revêtements, sont présentés ci-après, les revêtements non électrolytiques ou lamellaires les plus courants en matière de fixations.

Shéardisation (diffusion thermique)

La shéardisation est un procédé thermochimique de diffusion superficielle de zinc dans l'acier afin de protéger les articles contre la corrosion.

La pénétration mutuelle des métaux par combinaison ou par diffusion est un phénomène d'ordre très général. A température ordinaire, la réaction est extrêmement lente et ne serait réalisable que sous forte pression mais en élevant la température, la migration atomique est très sensiblement favorisée par l'agitation thermique des atomes.

La diffusion du carbone dans le fer est bien connue : c'est la cémentation classique, dite cémentation carburante. Mais la plupart des métaux et certains métalloïdes peuvent être utilisés comme céments et ils forment un revêtement d'un alliage riche du métal incorporé dans le ciment.

Parmi les cémentations métalliques, la plus ancienne appliquée industriellement est celle de zinc, connue sous le nom de shéardisation, du nom de l'ingénieur anglais Sherard Cowper-Cowles.

Le ciment est constitué par de la poudre de zinc auquel on ajoute une charge inerte dont l'objet est d'éviter d'endommager les pièces durant l'opération de chauffe et d'assurer une égale répartition de la poudre de zinc.

Le traitement s'effectue dans des récipients métalliques appelés caissons, soigneusement fermés afin d'opérer dans une atmosphère inerte non oxydante. Les pièces à traiter sont préalablement décapées puis noyées dans le ciment à l'intérieur des caissons.

Ces caissons sont placés dans un four chauffant. Ils sont mis en rotation lente sur un axe horizontal, pour un brassage permettant une température homogène à l'intérieur du caisson.

La température de traitement est de l'ordre de 400°C, avec montée en température et retour à la température ambiante très lente afin d'éviter déformations et modifications des caractéristiques mécaniques.

La shéardisation confère aux pièces une excellente tenue à la corrosion, le revêtement est très régulier avec d'excellentes propriétés d'adhésion et d'un aspect gris mat.

Cataphorèse

La peinture par cataphorèse permet une bonne uniformité de revêtement, de couleur noire.

Pour les pièces soumises à des agressions mécaniques, une sous-couche de zinc de 5 à 6 μm améliore la tenue à la corrosion et la résistance aux agressions mécaniques.

Le procédé consiste en l'application d'une peinture qui est un primaire cationique. Celle-ci est une dispersion de molécules organiques et de pigments minéraux en milieu aqueux. En appliquant une tension de 200 à 350V en courant continu entre les pièces immergées à la cathode et les cellules d'électrodialyse faisant office d'anode, les molécules chargées (+) se déplacent à la cathode, entraînant les pigments minéraux et se déposent sur les pièces chargées (-). Après application, on procède à un rinçage puis à une polymérisation.

La couche obtenue peut être laissée en l'état ou servir de couche d'accrochage à une peinture d'aspect (peinture poudre ou liquide).

Méthodes d'application

S'applique sur tous matériaux conducteurs : aciers, alliages cuivreux, alliages d'aluminium, fonte, zinc et alliages, magnésium, aciers inoxydables...

Principales propriétés

- Couleur noire, aspect brillant.
- Epaisseur de 12 à 24 µm d'épaisseur uniforme, intervalle de tolérance de l'ordre de 5 µm.
- Adhérence excellente sur tout support, y compris sur tôle galvanisée ou pièces électrozinguées.
- Tenue à la corrosion : 500 heures au brouillard salin sur acier phosphaté, sans dégradation mécanique de la couche.
- Bonne tenue aux U.V.
- Bonne pénétration dans les corps creux.

Nickelage électrolytique

Le procédé consiste à assurer un dépôt de nickel par procédé électrolytique. Ce dépôt améliore les caractéristiques de frottement du métal sur lequel il est déposé et offre une bonne protection à la corrosion.

Le nickel électrolytique peut s'effectuer sur l'acier, l'inox, le cuivre/Laiton et l'aluminium.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau

Il sera préféré au nickel chimique en cas de pièces ayant des cotes serrées pour des raisons d'inhomogénéité d'épaisseur du dépôt, caractéristiques propres aux dépôts électrolytiques.

Principales propriétés

- Aspect : Uniforme
- Epaisseur : 5 à 70 µm
- Résistance à la corrosion
- Dureté : 150 à 350 Hv

Nickelage chimique

Le procédé de nickelage chimique se distingue principalement du procédé par voie électrolytique par le fait que sa réaction se produit à vitesse constante en tout point de la surface de la pièce en contact avec la solution.

En nickelage électrolytique, la vitesse de dépôt est en général variable, puisque le flux du courant dépend de la géométrie de la pièce.

Cette propriété se traduit par un "effet de pointe" sur les arrêtes vives et par un dépôt pratiquement nul dans les cavités.

Cet avantage du nickelage chimique assure au revêtement deux qualités essentielles :

- Respect rigoureux des cotes, ce qui évite un usinage ultérieur.
- Pratiquement, l'épaisseur d'un dépôt peut être garantie à 2 microns près.**
- Uniformité de la protection, quelle que soit la complexité de la pièce.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau ou à l'attache

En règle générale, grâce aux qualités de l'alliage nickel-phosphore, à la régularité et à la précision de son dépôt, à l'épaisseur de la couche pouvant varier de 0 à 200 µ et plus, le champ d'application du nickelage chimique ne connaît pratiquement pas de limites.

Principales propriétés

- Dureté importante
- Brillant ou satiné
- Bonne conductibilité électrique
- Epaisseur de 3 à 100 µ
- Adhérence Très bonne : comparable en tous points un dépôt électrolytique
- Tous types de métaux : acier carbone et inoxydable, aluminium et ses alliages, cuivre et ses alliages, fontes.

Cuivrage électrolytique

Le cuivre est très employé en sous-couche sur un grand nombre de substrats, non seulement pour la protection qu'il peut apporter si son épaisseur est convenable, mais aussi pour la liaison qu'il procure entre le métal de base et les dépôts terminaux.

Le cuivrage électrolytique peut s'effectuer sur l'acier, l'inox et l'aluminium.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau

Principales propriétés

- Epaisseur : jusqu'à 20 µm
- Ductilité
- Propriétés mécaniques médiocres

Etamage

Le revêtement d'étain est souvent utilisé pour sa bonne résistance chimique, sa basse température de fusion facilitant la soudabilité, son comportement alimentaire (résistance et absence de toxicité), sa conductivité électrique, ainsi que son aspect gris-blanc décoratif.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau ou à l'attache
Substrats cuivreux, acier ou fonte, aluminium

Principales propriétés

- Bonne tenue à la corrosion
- Bonne résistance chimique à l'oxydation
- Bonne conductibilité électrique
- Bonne soudabilité
- Bonne résistance au frottement
- Température limite d'emploi 150°C

Brunissage

Le brunissage est une oxydation superficielle des aciers obtenue par voie chimique, permettant l'obtention d'un aspect noir.

Ce traitement peut être effectué sur acier ou acier inoxydable.

La couleur obtenue sera fonction de la nature du métal.

Méthodes d'application

Dégraissage, décapage et conversion chimique.

Principales propriétés

- Protection temporaire.
- Finition sèche et grasse.
- Possibilité de ne pas huiler.
- Pas de surépaisseur.
- Résistance aux U.V.

7.8 Choix d'un revêtement anti-corrosion

Les directives européennes

Les directives européennes 2000/53/EC et 2002/95/EC (voir extraits en fin d'ouvrage) ont, dans le cadre de la protection de l'environnement et de la recyclabilité des produits, introduit la limitation de l'emploi de métaux lourds et/ou polluants, notamment le chrome hexavalent.

Par exemple, les véhicules automobiles mis sur le marché depuis le 1^{er} juillet 2003 doivent contenir moins de 2 grammes de chrome hexavalent.

Les solutions consistent en la substitution du chrome 6 présent dans la chromatisation par du chrome 3 dans les passivations. La résistance à la corrosion sera obtenue par l'ajout d'une couche organo-minérale complémentaire.

Eléments de choix

Du fait de l'ajout d'une couche complémentaire, le choix devient un compromis entre trois caractéristiques majeures induites par le revêtement, choix dépendant de l'application envisagée :

- épaisseur,
- tenue au brouillard salin,
- coefficient de frottement.

Par ailleurs, on remplace souvent un revêtement «générique» (par exemple le zingué jaune bichromaté) par un revêtement ayant fait l'objet de développements techniques par un formulateur et protégé.

Il convient donc de prendre en compte les préconisations du donneur d'ordre amont, souvent exprimées dans un cahier des charges qui peut spécifier une formulation particulière et la diffusion de la formulation dans le réseau de sous-traitants disponibles.

Le tableau 7.8-1 présente quelques éléments de choix de revêtements sans chrome 6 ; vos interlocuteurs Emile Maurin sont à votre disposition pour vous proposer une solution en fonction de vos critères particuliers.

7.8-1

Traitement	Aspect	Épaisseur	Tenue brouillard salin	Coefficient de frottement et remarques
Zingage blanc	Blanc bleuté	5 µm	48 h rouille rouge	
		10 µm	72 h rouille rouge	
Zingage Lanthane® sans finition renforcée	Argent	10 µm	200 h rouille rouge	
Zingage Lanthane® avec finition rapportée	Argent	10 µm	600 h rouille rouge	Possibilité de coefficient de frottement maîtrisé $\mu = 0,12$ à $0,18$
Zinc nickel 12-15% finition bleue	Bleuté	8 µm mini.	720 h rouille rouge	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium
Zinc nickel 12-15% finition noire	Noir	8 µm mini.	720 h rouille rouge	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium
Geomet 500® grade A	Gris	5 à 7 µm	600 h rouille rouge	Coefficient de frottement $\mu = 0,12$ à $0,18$
Geomet 500® grade B	Gris	8 à 10 µm	1000 h rouille rouge	Coefficient de frottement $\mu = 0,12$ à $0,18$
Delta Protékt®	Gris argenté	5 à 10 µm	600 à 1000 h rouille rouge	
Deltatone®	Gris argenté	6 à 10 µm	400 h rouille rouge	Avec finition Deltaseal GZ® coefficient de frottement $\mu = 0,10$ à $0,14$
		10 à 15 µm	800 h rouille rouge	

Guide d'aide au choix des traitements de surface pour les fixations

Ce guide a été rédigé avec la profession des fabricants de fixations pour fournir les principaux éléments d'aide au choix d'un traitement de surface d'une fixation en fonction de différents critères, qu'ils soient dimensionnels, fonctionnels ou autres. Il permet de préparer le dialogue entre client et fournisseur de solution de traitement, et contribue à n'oublier aucun critère important dans le choix qui sera fait.

Ci-dessous sont regroupées les principales questions à se poser pour choisir un traitement de surface. Le tableau 7.8-3 regroupe des informations couramment appliquées pour les procédés de traitement de surface dans le domaine des fixations métalliques. Le tableau 7.8-4 précise quelques considérations à prendre en compte.

Généralement, les choix de revêtement sont déterminés par retour d'expérience ou par une politique de standardisation de l'entreprise.

7.8-2 Principales questions à se poser

		Réponse
Q1	QUEL EST LE TYPE DE FIXATION ? Vis et produits longs, écrous et produits creux, rondelles et produits plats, clips, fixations élastiques, ...	
Q2	QUEL EST LE MATERIAU DE LA FIXATION ? C'est le matériau sur lequel le revêtement est directement appliqué : acier, alliage d'aluminium, alliage cuivreux, ...	
Q3	QUEL EST LE DIMENSIONNEL DE LA FIXATION ? Diamètre, longueur, masse, ...	
Q4	LA FIXATION COMPORTE-T-ELLE UN CORPS CREUX ? Empreinte, trou borgne ou débouchant, zone de rétention, ...	
Q5	QUELLES SONT LES NATURES DES MATERIAUX A ASSEMBLER ? Risque de couplage galvanique	
Q6	QUEL VOLUME DE FIXATIONS SERA A TRAITER ? Volume annuel de fixations à traiter, volume par lot	
Q7	QUELLE EPAISSEUR DE REVETEMENT MAXIMALE EST ADMISSIBLE POUR LA MONTABILITE ? C'est l'épaisseur de revêtement permettant de monter correctement la fixation.	
Q8	QUELLE TEMPERATURE MAXIMALE EST SUPPORTABLE PAR LES PIECES ? C'est la température qui peut endommager les caractéristiques mécaniques et/ou fonctionnelles de la fixation.	
Q9	Y AURA-T-IL DES TRAITEMENTS COMPLEMENTAIRES ?	
Q10	Y AURA-T-IL DES OPERATIONS SUPPLEMENTAIRES APRES REVETEMENT ? Patch sur filet, frein filet, sertissage, peinture, ... (compatibilité à vérifier)	

		Réponse
Q11	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE CONFORMITE REGLEMENTAIRE ? RoHS, VHU, alimentarité, eau potable, ...	
Q12	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE TENUE EN CORROSION ? Brouillard salin (NSS), Kesternich, test cyclique, ... et durées minimales associées. Sinon, milieu urbain, rural, industriel, marin, tropical, ...	
Q13	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE TENUE AUX AGENTS CHIMIQUES ? En milieu acide, alcalin, chloré, ...	
Q14	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE TENUE EN TEMPERATURE EN SERVICE ? En palier, en pointe, ...	
Q15	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE TENUE MECANIQUE DU REVETEMENT ? Ductilité (aptitude à suivre une déformation élastique et/ou plastique de la fixation sans altérer les caractéristiques fonctionnelles du revêtement), dureté, résistance au choc, à l'érosion, au gravillonnage, ...	
Q16	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE D'ASPECT ? Coloré, mat, brillant, irisé, uniforme, ...	
Q17	EXISTE-T-IL UN RISQUE DE FRAGILISATION PAR L'HYDROGENE POUR LES FIXATIONS EN ACIER ? Dureté maximale de la fixation, type de sollicitation, ...	
Q18	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ?	
Q19	EXISTE-T-IL UNE EXIGENCE DE COEFFICIENT DE FROTTEMENT ?	

Informations généralistes* sur les procédés de traitement de surface

* Ce tableau est informatif et non exhaustif. Il regroupe les données courantes pour les principales applications dans le domaine des fixations métalliques.

7.8-3 Tableau de recensement des types d'application des revêtements

Lien avec Q (voir tableau 7.8-2)	Q2	Q1-Q3-Q4	Q8	Q7	Q12	Q13	Q14	Q16	Q15	Q19	Q9
Type de revêtement	Matériau fixation	Mode d'application	Température de mise en œuvre du procédé TS	Epaisseur usuelle	Tenue en corrosion sur acier (NF EN ISO 9227 NSS et/ou NFA 05-109)	Tenue aux agents chimiques	Tenue en température	Aspect	Microdureté	Coefficient de frottement NF EN ISO 16047	Traitements complémentaires
Zinc lamellaire revêtement non électrolytique composé de lamelles métalliques (majoritairement de Zn), dispersées dans un liant et suivi d'une cuisson NF EN ISO 10683	Acier Acier inox Aluminium et alliages	Par trempé centrifugé Par pulvérisation En vrac ou à l'attache	De 160 à 310°C selon le procédé	De 4 à 10 µm Peut également être exprimé en poids de couche, de 18 à 36g/m²	Protection temporaire : oui	De pH1 à pH13 selon le système de Zn lamellaire	Variable selon le procédé 400°C sans dégrader la tenue à la corrosion 500°C possible	Gris ou noir en standard Autres couleurs possibles	Inférieur à 100 HV	0,30 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Pour la tenue en corrosion, la couleur, le coefficient de frottement, la tenue aux agents chimiques, la tenue en température
					Usuellement de 480 à 1000 heures BS						
					Usage extrême : jusqu'à 3000 heures BS						
Zinc électrolytique revêtement de Zn déposé par électrolyse suivi d'une passivation NF EN ISO 4042	Acier Acier inox Aluminium et alliages Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 60 à 90°C lors du séchage (hors dégazage éventuel)	De 5 à 15 µm	Protection temporaire : oui (sans passivation)	Usuellement de pH6 à pH11 De pH1 à pH13 selon le type de traitement supplémentaire	120°C sans dégrader la tenue à la corrosion 250°C maximum possible	Gris ou noir en standard Autres couleurs possibles	De 60 à 120 HV	0,25 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Pour la tenue en corrosion, la couleur, le coefficient de frottement, la tenue aux agents chimiques, la tenue en température Peinture Eventuellement top coat ou sealer
					Usuellement de 96 à 600 heures BS						
					Usage extrême : jusqu'à 1200 heures BS						
Zinc Nickel électrolytique (entre 12 et 16% Ni) revêtement d'alliage de ZnNi déposé par électrolyse suivi d'une passivation NF EN ISO 4042	Acier Acier inox Aluminium et alliages Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 60 à 90°C lors du séchage (hors dégazage éventuel)	De 5 à 15 µm	Protection temporaire : non	Usuellement de pH6 à pH11 De pH1 à pH13 selon le type de traitement supplémentaire	250°C sans dégrader la tenue à la corrosion 350°C possible	Gris ou noir ou irisé	De 350 à 450 HV	0,35 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Pour la tenue en corrosion, la couleur, le coefficient de frottement, la tenue aux agents chimiques, la tenue en température Eventuellement top coat ou sealer
					Usuellement de 480 à 1000 heures BS						
					Usage extrême : au-delà de 2000 heures BS						
Zinc Fer électrolytique (entre 0,5 et 1,2% Fe) revêtement d'alliage de ZnFe déposé par électrolyse suivi d'une passivation NF EN ISO 4042	Acier Acier inox Aluminium et alliages Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 60 à 90°C lors du séchage (hors dégazage éventuel)	De 5 à 15 µm	Protection temporaire : non	Usuellement de pH6 à pH11 De pH1 à pH13 selon le type de traitement supplémentaire	120°C sans dégrader la tenue à la corrosion 200°C maximum possible	Noir en standard Gris ou irisé possible	De 200 à 240 HV	0,25 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Pour la tenue en corrosion, la couleur, le coefficient de frottement, la tenue aux agents chimiques, la tenue en température Peinture Eventuellement top coat ou sealer
					Usuellement de 96 à 600 heures BS						
					Usage extrême : jusqu'à 1200 heures BS						
Zinc par matoplastie revêtement de Zn et Zn allié en poudre obtenu par action mécanique - Zn - ZnSn (en multicouche ou alliage) - ZnAl (9-25% Al)	Acier	Par compactage mécanique En vrac	Température ambiante	De 5 à 20 µm	Protection temporaire : oui (sans passivation)	Usuellement de pH6 à pH11 De pH1 à pH13 selon le type de traitement supplémentaire	120°C sans dégrader la tenue à la corrosion 250°C maximum possible	Gris en standard	De 60 à 120 HV	0,25 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Pour la tenue en corrosion, la couleur, le coefficient de frottement, la tenue aux agents chimiques, la tenue en température Eventuellement top coat ou sealer ou incorporation dans la masse (type PTFE)
					Usuellement de 96 à 600 heures BS						
					Usage extrême : jusqu'à 1200 heures BS						

Lien avec Q (voir tableau 7.8-2)	Q2	Q1-Q3-Q4	Q8	Q7	Q12	Q13	Q14	Q16	Q15	Q19	Q9
Zinc par shérardisation revêtement de ZnFe par tonnage dans un mélange de poudre de Zn et d'air à haute température	Acier peu ou faiblement allié	Par diffusion thermique En vrac	De 320 à 450°C	De 15 à 60 µm	Usuellement de 96 à 600 heures BS Usage extrême : jusqu'à 2000 heures BS	Usuellement de pH6 à pH11 De pH1 à pH13 selon le type de traitement supplémentaire	De 350 à 450°C	Gris anthracite ou noir	350 HV	De 0,3 à 0,2 sauf traitement complémentaire	Conversion au chrome trivalent Top coat noir Lubrification
Galvanisation à chaud revêtement par immersion dans un bain de Zn ou d'alliage de ZnAl fondu NF EN 10684	Acier	Par immersion Par trempé centrifugé En vrac ou à l'attache	De 455 à 480°C ou de 530 à 560°C selon teneur en silicium	De 50 à 70 µm	Essai BS non adapté Consommation annuelle de Zn située entre 1 et 4 µm en fonction de l'environnement	De pH4 à pH10	200°C sans dégrader la tenue à la corrosion 300°C maximum	Gris mat	Succession de 4 couches allant de 70 HV en surface jusqu'à 450 HV à l'interface	Jusqu'à 0,35 (risque de grippage) 0,10 ≤ K ≤ 0,16 avec traitement complémentaire (NF EN 14399-2)	Lubrification Passivation pouvant être colorée
Phosphatation couche de phosphates insolubles obtenue par immersion dans un bain d'acide phosphorique, de phosphates et d'additifs	Acier peu ou faiblement allié	Par immersion Par pulvérisation En vrac ou à l'attache	De 50 à 95°C	Couramment exprimé en poids de couche : de 3 à 20 g/m ² (correspondant à une surépaisseur maxi de 6 µm)	Inférieure à 24 heures BS sans huilage	Aucune	150°C maximum	De gris à noir	NC	0,2 et jusqu'à 0,06 selon traitement supplémentaire	Lubrification Peinture
Nickel chimique Allié au bore ou au phosphore - HP : haut phosphore (10-13%) - MP : moyen phosphore (5-10%) - BP : bas phosphore (2-5%)	Acier Acier inox Aluminium et alliages Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 60 à 95°C	De 20 à 100 µm	Haut phosphore - 20 < ép < 25 µm : 96 h - ép > 40 µm : supérieur à 200 h (maxi 600 h) Moyen et bas phosphore - 20 < ép < 25 µm : inférieur à 48 h	Excellente tenue en milieu alcalin (HP & BP) Assez bonne tenue en milieu acide (BP) Cas critique en présence de nitrique	Perte de résistance corrosion au-delà de 220°C Température de fusion : 860°C	Gris mat à brillant Eventuellement noir	De 450 à 750 HV sans traitement thermique De 800 à 1000 HV après traitement thermique de 1h à 380°C	0,4 non lubrifié 0,2 lubrifié dans la masse	Lubrification
Argentage	Acier Acier inox Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 20 à 35°C	De 6 à 30 µm	NC	De pH1 à pH14 Craint les composés soufrés	De 200°C à 500°C	Blanc argenté	De 40 à 180 HV	NC	NC
Dorure	Cuivre et alliages Revêtement de Ni	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 20 à 60°C	De 0,1 à 10 µm	NC	De pH1 à pH14	Maximum 300 à 400°C	Jaune Rose Blanc	De 50 à 300 HV	NC	NC
Cuivrage électrolytique	Acier Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 20 à 70°C	De 5 à 30 µm	NC	De pH1 à pH11 Craint l'acide nitrique	Maximum 800°C	Rouge orangé	De 50 à 200 HV	NC	Lubrification
Etamage	Acier Acier inox Cuivre et alliages Revêtement de Ni	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 20 à 40°C	De 5 à 20 µm	NC	De pH2 à pH12 Attaqué en milieu acide et très alcalin	Maximum 150°C	Blanc	De 10 à 40 HV	NC	NC
Cataphorèse	Acier Acier inox Acier zingué Alu. et alliages Cuivre et alliages	Par immersion En vrac ou à l'attache	De 150 à 180°C	De 8 à 45 µm	Usuellement de 96 à 800 heures BS	De pH1 à pH14	Maximum 220°C	Noir en général	NC	De 0,2 à 0,1	Lubrification Sealer Peinture

7.8-4 Considérations à prendre en compte

Q1-Q3	Généralement, les fixations sont traitées en vrac mais peuvent être traitées à l'attache selon la géométrie, le poids, l'aspect.
Q4	Le traitement des empreintes creuses inférieures à M4 et des trous borgnes est à valider par essai dans le cas des procédés en milieux liquides aqueux ou solvantés.
Q5	En plus d'assurer la résistance à la corrosion de la fixation, le revêtement peut permettre d'éviter la formation d'un couple galvanique entre la fixation et la structure qui la reçoit. Généralement, on considère comme préférable que les potentiels de la fixation et de la structure soient le plus proches possibles. D'autre part, il est préférable que le potentiel du matériau de la fixation soit plus noble que celui du revêtement de manière à ce que ce dernier se corrode préférentiellement (dépôt sacrificiel). De ce point de vue, tous les revêtements à base de zinc sont sacrificiels par rapport à l'acier ou à l'aluminium. A l'inverse, un dépôt de nickel est plus noble que l'acier ou l'aluminium, ainsi, ce sont ces derniers qui se corrodent préférentiellement.
Q6	Le volume annuel de fixations ou la taille de lot (quantité de fixations traitées ensemble en une seule fois) pourra conditionner la ligne de traitement (taille) et/ou le procédé utilisé, attache ou vrac (capacité des tonneaux).
Q7	L'épaisseur possible de revêtement sera limitée par le jeu disponible [cas des fixations à filetage métrique ISO] et/ou l'utilisation finale de la pièce (montabilité, fonctionnalité, ...) Selon l'utilisation, on prendra par exemple en compte une épaisseur maximale pour une montabilité et/ou une épaisseur minimale pour une tenue en corrosion dépendant du procédé utilisé. Il est préférable de définir une zone de référence pour mesurer l'épaisseur. Le poids de couche est défini comme la masse totale du revêtement rapporté à la surface totale de la fixation.
Q11	VHU : concerne l'absence de chrome hexavalent, mercure, cadmium et plomb dans les véhicules automobiles mis en décharge RoHS : concerne l'absence des mêmes éléments pour l'industrie électrique et électronique REACH : concerne toutes les industries et vise à l'élimination progressive des composés CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique), dans un premier temps le chrome hexavalent est visé.
Q12	Les exigences de tenue à la corrosion d'une fixation peuvent être qualifiées par 2 principaux types de tests, choisis en fonction de l'utilisation de la fixation : <ul style="list-style-type: none"> • tenue aux essais de brouillard salin (BS) : essai de corrosion au cours duquel les fixations sont exposées à un fin brouillard de solution saline <ul style="list-style-type: none"> - neutre (NSS) - acétique : avec un pH acide - cupro-acétique : avec ajout de cuivre • tenue aux essais Kesternich : essai de corrosion au cours duquel les fixations sont exposées à une atmosphère saturée en vapeur d'eau contenant du SO₂ (voir NF EN ISO 6988 et NF A05-132) <p>La tenue à la corrosion de la fixation est fonction du milieu (intérieur, extérieur, marin, industriel, urbain, ...- voir ISO 9223). A noter que les tests de corrosion accélérés permettent des évaluations comparatives entre systèmes de revêtements mais ne représentent pas nécessairement les comportements en atmosphère extérieure, très variable par nature.</p>
Q17	La fragilisation par l'hydrogène est la perte irréversible de ductilité d'un métal ou d'un alliage sous l'effet de contraintes de traction. Typiquement, à partir de 320 HV pour des pièces soumises à traction, vérifier que le traitement n'intègre pas une source de diffusion d'hydrogène dans l'acier. L'applicateur devra si besoin envisager un traitement de dégazage complémentaire pour minimiser le risque de fragilisation par l'hydrogène. Voir ISO DTR 20491
Q18	La conductibilité électrique dépend essentiellement du traitement complémentaire appliqué (passivation, top coat, sealer, ...)
Q19	Le coefficient de frottement dépend du procédé et/ou du traitement complémentaire appliqué (passivation, top coat, sealer, ...)