

III.1 Introduction

L'industrie utilise une grande variété de traitements de surface des métaux. Ces traitements modifient ou confèrent une propriété superficielle. En première approximation, on peut distinguer les traitements chimiques des traitements mécaniques, thermiques, physiques ou électrochimiques.

les dépôts électrolytiques, malgré leurs nombreux avantages, ont le grave inconvénient d'être tributaires de la répartition des lignes de courant. Les dépôts chimiques, au contraire, ne sont pas soumis à cette contrainte et il est possible grâce à eux d'obtenir des revêtements homogènes en épaisseur, même sur des pièces de formes très compliquées. Plus besoin d'anodes, plus besoin de source extérieure de courant. Les électrons nécessaires à la réduction des ions métalliques sont fournis à l'électrode selon deux processus différents :

- ionisation d'un métal : méthode dite par déplacement ou par contact ;
- oxydation d'une forme réduite en solution : méthode dite par réduction chimique.

Les traitements chimiques s'appliquent sur presque tous les métaux usuels pour en améliorer l'aspect décoratif, la résistance à la corrosion, la tenue aux frottements ou l'aptitude à l'accrochage des peintures. Le traitement s'effectue, le plus souvent, en plusieurs opérations élémentaires :

- conditionnement de la surface (décapage, dégraissage...) ;
- traitement chimique proprement dit ;
- finition (colmatage, séchage...) ; entrecoupées d'autant de rinçages qu'il est nécessaire.

Ainsi le terme traitement chimique sous-entend celui de gamme de traitement.

III.2 Rappels d'électrochimie

Si on met en présence les corps RED2 et OX1 qui n'ont aucun domaine de potentiel où ils peuvent coexister (figure 1), il va se produire la réaction chimique $OX1 + RED2 \rightarrow RED1 + OX2$, qui est la somme d'une oxydation $RED2 - ne \rightarrow OX2$ et d'une réduction $OX1 + ne \rightarrow RED1$ où ne sont les électrons. **Exemple** : cuivrage du fer immergé dans du sulfate de cuivre :

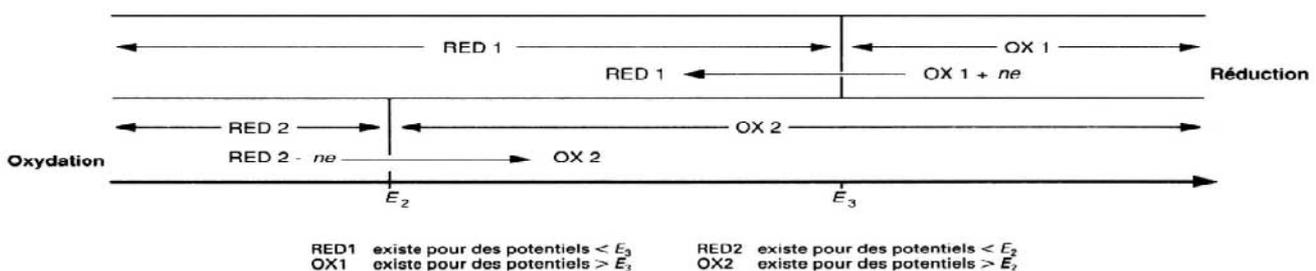
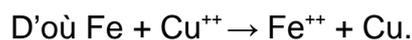


Figure 1 : Domaines d'existence d'espèces chimiques oxydantes ou réductrices

III.3 Classification chimique des différents traitements : D’après la façon de procéder et le résultat apparent de la gamme de traitement, on distingue les **patinages** (coloration à but décoratif), les **passivations** (inhibitions par simple immersion sans dépôt apparent), les **dépôts de métaux**, les **conversions** (formation d’un dépôt perceptible non métallique) (tableau 1).

Tableau 1 – Principaux traitements chimiques et leurs applications

Traitement (1)	Métal	Applications
Passivations : Nitrique Chromique Phosphochromique	Aciers inoxydables Métaux cuivreux, argent Fer	} Sans finition, protection temporaire conservation d’un état de surface
Oxydations alcalines : Noir alcalin - Bronzage EW, MBW, Pytumin, Alrok, Decoral Protectatin Dow n° 6	Fer, fonte Cuivre Aluminium Étain Magnésium	Huilé, décoration et anticorrosion Sans finition, base de collage Coloré, colmaté ou peint Décoration Décoration
Chromatations : Mordançage Conversion, activation	Zinc et cadmium, cuivre et alliages, aluminium, magnésium et alliages Titane	} Sans finition, verni ou peint, anticorrosion Base de dépôt électrochimique ou lubrifié pour antigrippage
Phosphatations : Au fer (amorphe, alcaline) Au zinc, Zn/Mn, Zn/Ca, Zn/Ni Au manganèse Au calcium Au chrome	} Fer, zinc, aluminium Fer Fer Aluminium	} Sans finition en base d’adhérence et isolement électrique Huilé, verni, peint en anticorrosion Lubrifié pour frottement et déformation à froid Lubrifié pour frottement Isolement électrique Décoration, base de peinture
Oxalation	Acier inoxydable	Lubrifié pour frottement et déformation à froid
Dépôts par déplacement : Cuivrage Nickel DIP Duclanisation	Cu(II)/Fe Ni(II)/Fe Sn(II)/Cu	Sans finition en tréfilage, base de traçage en chaudronnerie Sans finition, base d’émaillage Décoration
Dépôts autocatalytiques : Kanigen, Nibodur	Ni(II)/Fe Cu(II)/plastique Au(III)/Au/Ag/Pd/Pt ou Cu Pd(II)/[idem Au(III) ou autre]	Anticorrosion Création de conductivité } Décoration

Les traitements chimiques sont concernés par deux classes de cette norme :

- dépôts chimiques (de métaux) classe II ;
- traitements chimiques (conversions)..... classe XII.

À partir du schéma $OX1 + RED2 \rightarrow OX2 + RED1$, les principaux traitements chimiques sont classables selon les circonstances chimiques de leur élaboration (tableau 2).

Les **passivations** sont des conversions dont la réaction s'est bloquée lorsque le potentiel électrochimique du métal a atteint une valeur limite au-dessus de laquelle la vitesse d'attaque devient pratiquement nulle. La surface du métal conserve son aspect métallique. Les passivations électrochimiques vraies doivent être distinguées de l'inhibition par adsorption.

Le fer, les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et l'argent sont passivables.

Les **oxydations** se pratiquent le plus souvent à chaud en milieu alcalin en présence d'un oxydant. Les métaux ferreux (*noir alcalin*), le cuivre, l'étain, l'aluminium, le magnésium sont oxydables.

La plupart des **patines** (dépôts colorés décoratifs) utilisent l'insolubilité des sulfures, du sulfure de cuivre en particulier.

Tableau 2 – Vue d'ensemble des traitements chimiques. Classement d'après les réactions chimiques

RED2 + OX1	→	OX2 + RED1	Nature de la couche	Procédé
RED2 est le métal à traiter	OX1 est { H ⁺ , l'oxygène ou un autre oxydant	La réaction est assez rapide pour atteindre le potentiel de passivation.....	Le métal à traiter (RED2) est très légèrement oxydé en surface.....	Passivations
		Au pH de la solution, le cation OX2 est insoluble.....	La couche est un sel du métal à traiter (oxyde, sulfure, chromate).....	{ Oxydations alcalines Patinages (sulfures)
		La réduction de OX1 sur le métal alcalinise la surface et provoque.....	{ La précipitation d'un oxyde, phosphate, chromate, oxalate, molybdate ou autre..... La coagulation d'une résine.....	Conversions { phosphatation chromatation Autophorèse
RED2 est un ion en solution	OX1 est un cation métallique	Le métal (RED1) du cation en solution constitue la couche.....	Métallisation par déplacement	
	OX1 est un cation métallique	Le métal (RED1) du cation en solution constitue la couche.....	Dépôt chimique autocatalytique	

Trois procédés de coloration sont également à joindre à cette catégorie : le noircissement du fer dans la vapeur d'eau surchauffée, la formation de couleurs d'interférence au four sec et le noircissement du cuivre par les sulfures en pâte.

Dans le cas des **conversions** en milieu acide, l'espèce qui se dépose est soluble au pH du bain. L'alcalinisation qui provoque la précipitation, localisée sur le métal, est due aux réactions de réduction qui consomment des ions H⁺ ou produisent des ions OH⁻.

Exemples : phosphatations, chromatations, *autophorèse* (= coagulation d'une résine) (article *Phosphatation*). Le métal à traiter n'est pas forcément un constituant de la couche de conversion.

Le fer, le zinc, l'aluminium sont phosphatables, le cuivre, le zinc, l'aluminium sont chromatables

III.4 Applications industrielles

Les applications industrielles des traitements chimiques sont nombreuses et, pour certaines, d'une grande importance économique. Elles interviennent soit en facilitant une fabrication, soit comme traitement de finition d'un objet manufacturé.

III.4.1 Protection temporaire et anticorrosion

L'anticorrosion est une des applications principales des traitements chimiques.

Les **passivations** offrent une protection limitée destinée à conserver un état de surface après un brillantage par exemple.

Pour augmenter leurs performances, l'oxydation alcaline du fer doit recevoir une finition huilée et l'oxydation de l'aluminium (*blanche*) doit être colmatée ou *passivée* au chromate.

Les **chromatations** sont utilisables brutes, vernies ou peintes.

La **phosphatation** brute ou huilée est utilisable en protection temporaire, mais c'est surtout le traitement avant peinture qui assure une meilleure résistance à la corrosion.

Pour s'opposer aux corrosions dues à des couplages galvaniques, il est possible d'isoler le fer par des phosphatations particulières.

Les **dépôts chimiques autocatalytiques** présentent une bonne résistance à la corrosion et peuvent être utilisés dans des environnements chimiques relativement agressifs.

Les **patines** n'ont pas une résistance suffisante en milieu industriel, un vernissage incolore est nécessaire.

Quelle que soit l'application visée, on doit prendre en compte la durabilité de l'objet et considérer la résistance à la corrosion

III.4.2 Base d'adhérence

Un traitement chimique est parfois nécessaire pour obtenir l'adhérence de divers dépôts sur un métal ; citons :

- la phosphatation avant peinture, notamment phosphatation au zinc avant peinture par électrophorèse ;
- la phosphatation avant enrobage de caoutchouc, plastique, etc., l'oxydation alcaline du cuivre avant collage ;
- le cuivrage chimique sur fer avant enrobage de caoutchouc dans l'industrie des pneumatiques ;

- le nickelage chimique de l'acier avant émaillage;
- la conversion du titane avant dépôt électrolytique

III.4.3 Lubrification et diminution des bruits de fonctionnement

En déformation à froid, le traitement chimique forme ou participe à la formation d'une couche à faible coefficient de frottement :

- savon de zinc formé aux dépens d'une phosphatation au zinc ;
- oxalation des aciers inoxydables et réfractaires avant savonnage ;
- cuivrage chimique en tréfilerie.

En lubrification de mécanismes (engrenages), la capillarité d'une couche de phosphatation épaisse au manganèse empêche la rupture du film d'huile.

La lubrification à sec par une métallisation chimique en présence de particules lubrifiantes en suspension (PTFE, graphite) est en développement.

Ces techniques de métallisation chimique en présence de particules amplifient considérablement les applications potentielles de ces traitements, notamment dans le domaine des surfaces abrasives

III.4.4 Décoration : coloration et réflexion de la lumière

À des fins décoratives on peut colorer les métaux de teintes diverses : brun, bleu, vert imitant la patine naturelle du cuivre par exemple. Si le métal de base ne se prête pas à l'opération, on effectue un cuivrage préalable.

III.5 Mise en œuvre industrielle

III.5.1 Adaptation mutuelle du procédé et des pièces

Le procédé sera choisi en fonction du but du traitement et du métal à traiter. L'analyse détaillée des critères de choix sort des limites de ce texte dans la mesure où elle doit inclure tous les traitements de surface.

Les traitements chimiques s'appliquent par immersion ou par pulvérisation, en défilement continu ou en pas à pas, selon la nature de la production, la durée des traitements et l'agressivité des solutions. La complexité de la gamme de traitement dépendra de l'état des pièces à l'entrée et du niveau de performance demandé. Les traitements chimiques sont assez souples pour s'appliquer à n'importe quel type de pièces, on prendra garde cependant :

- à la formation de poches d'air isolant le métal des solutions de traitement (panneaux horizontaux, trous borgnes) ;

III.5.2 Hygiène, sécurité, environnement

Les traitements chimiques utilisent des produits chimiques dont la manipulation demande un minimum de précaution. D'une manière générale, les solutions employées sont moyennement

chaudes (ambiante ou 60 à 80 °C), relativement diluées (20 g/ L) donc peu agressives et peu toxiques avec des exceptions notables.

Il faut éviter les méthodes d'emploi des solvants présentant des risques d'inhalation par l'opérateur (essuyage). Les enceintes closes ou semi-closes de dégraissage et de dégraissage-phosphatant solvantés sont sans risque.

Cr(VI) et nitrite sont les produits toxiques les plus répandus dans les traitements chimiques. Par exemple, la projection du Cr (VI) est interdite au lance-vapeur.

III.6 Nickelage chimique

III.6.1 Introduction

Le dépôt de nickel chimique constitue actuellement le processus de métallisation le plus utilisé dans l'industrie pour multiples substrats. En effet, les revêtements à base de nickel chimique présentent des propriétés paramagnétiques, une très bonne résistance à la corrosion et une dureté très importante. L'épaisseur des dépôts formes, contrairement à celle des dépôts obtenus par voie électrolytique, est régulière et indépendante de la géométrie des pièces et de leur complexité. Ceci est dû au fait que les dépôts électrolytiques dépendent essentiellement de la répartition des lignes de courant. Les premiers dépôts de nickel chimique ont été réalisés par Wurtz en 1844. Au fil des années, la connaissance des principes du nickelage chimique a nettement évolué.

III.6.2 Procédés

La figure 2 rappelle les 3 modes d'approvisionnement en électrons De la réaction de dépôt.

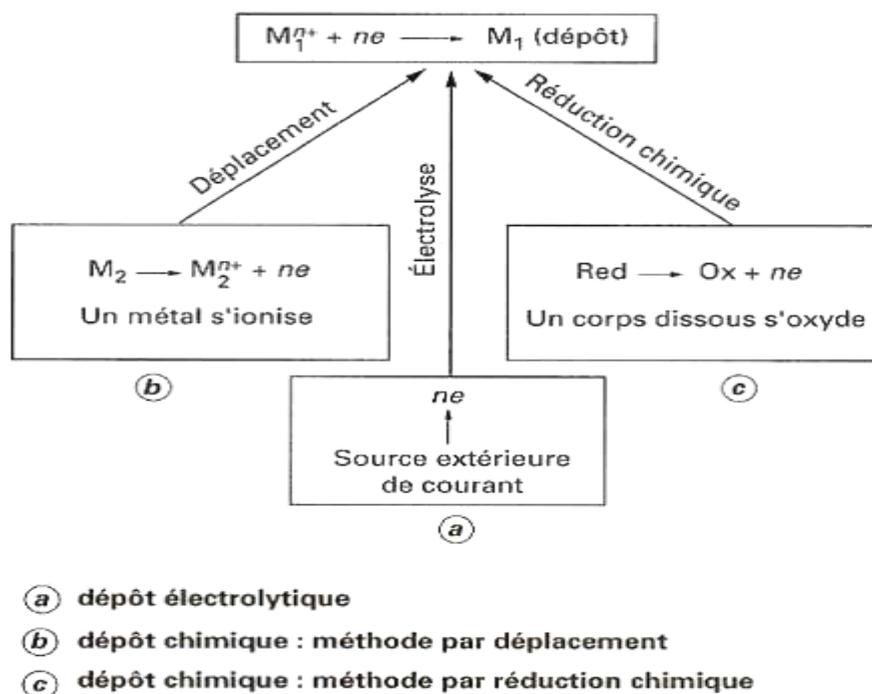


Figure 2 – Les trois modes d'approvisionnement en électrons de dépôt métallique

III.6.2.1 Procédé par déplacement

Il existe des métaux qui sont plus ou moins nobles, c'est-à-dire Qui possèdent une plus ou moins grande propension à se trouver, dans la nature, à l'état métallique ou à l'état de sels. Ainsi, dans le cas où l'on immerge un métal M2 dans une solution contenant des ions du métal M1, et si M1 est plus noble que M2, il y a un retour aux formes thermodynamiquement stables :

- M2 passe en solution sous forme d'ions ;
- est réduit à l'état de M1 métal.

Puisque l'échange se fait au niveau de l'interface métal-solution, il y a arrêt de la réaction lorsque M1 a totalement recouvert M2 et les épaisseurs obtenues sont très faibles.

Notons que le mode par déplacement est un cas particulier du mode par réduction chimique, la forme réduite étant le métal de base.

III.6.2.2 Procédé par réduction chimique

Contrairement au procédé par déplacement, l'agent réducteur se trouve dans la solution elle-même, la réaction peut donc se poursuivre et l'épaisseur devenir importante.

On distingue trois réducteurs principaux :

- l'hypophosphite ;
- les composés du bore ;
- l'hydrazine ou les sels d'hydrazine.

Tout l'art du procédé par réduction chimique consiste à se placer en équilibre métastable, c'est-à-dire dans des conditions telles que la réduction métallique ne se produise pas spontanément, mais seulement en présence de catalyseurs. Seuls certains métaux, appartenant principalement **au huitième groupe de la classification périodique des éléments naturels**, sont dits *catalyseurs* ; ils présentent une vacance orbitale au niveau *d*. Ce sont surtout le nickel, le cobalt, le fer, le platine, le palladium et le rhodium. Participent également à ce mécanisme, mais dans une moindre mesure, les éléments ayant une vacance orbitale en *s* : cuivre, argent, or. Lorsque le métal à déposer sert lui-même de catalyseur, l'épaisseur continue à croître dans le temps et les dépôts sont dits autocatalytiques. Lorsque le métal n'est pas suffisamment autocatalytique, des dépôts épais peuvent néanmoins être obtenus en employant des procédés, tels que ceux qui consistent à mélanger la solution contenant la forme réduite au moment opportun : l'argent en est un exemple.

III.6.3. Types de dépôts

III.6.3.1 Classification

Il existe à l'heure actuelle deux grandes familles de dépôts. Celles-ci se distinguent par le type de réducteur mis en oeuvre :

— si le réducteur employé est un sel d'hypophosphite, **le dépôt obtenu sera à base de phosphore** ;

— si le réducteur est un composé dérivé du bore, **le dépôt contiendra du bore**.

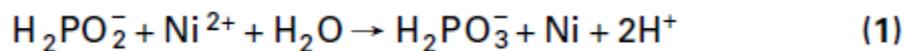
III.6.3.2 Nickelage chimique à l'hypophosphite (types A et B)

Le pouvoir réducteur de l'ion hypophosphite, vis-à-vis d'ions métalliques et principalement du nickel.

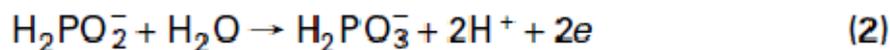
Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1, le procédé par réduction chimique se distingue par le fait que le réducteur appartient à un système rédox où les formes oxydée et réduite sont en équilibre dans la solution elle-même.

III.6.3.2.1 Processus réactionnels

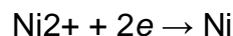
La présence de phosphates n'ayant semble-t-il jamais été mise en évidence, on peut admettre la réaction suivante :



consécutives à la réaction d'oxydation de l'ion hypophosphite en ion orthophosphite :

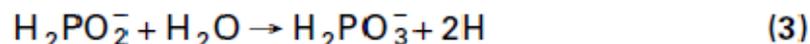


et à la réaction de réduction des ions nickel :



On constate ainsi qu'il faut 1 mole d'hypophosphite pour 1 mole de nickel.

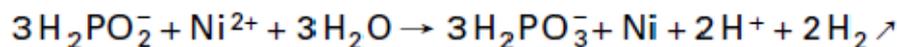
Or, l'expérience montre que la consommation à pH 4,4 est d'environ 3 moles d'hypophosphite pour 1 mole de nickel. Cela provient de l'existence de réactions secondaires dont :



elle-même consécutive à la réaction d'oxydation (2) et à la réaction de réduction :

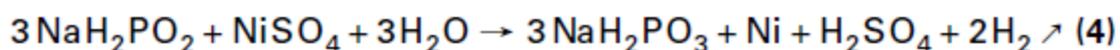


Pour répondre aux observations expérimentales, on constate qu'il faut additionner 1 fois la réaction (1) et 2 fois la réaction (3). On obtient ainsi :

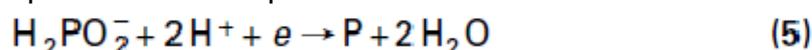


2H_2 provenant de la recombinaison immédiate de l'hydrogène atomique.

Soit, sous forme moléculaire :



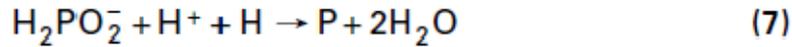
La formation de phosphore dans le dépôt est due à la réduction selon :



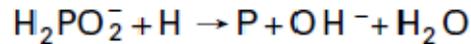
Le réducteur étant l'hydrogène naissant H, qui s'oxyde suivant :



on peut écrire, en additionnant les réactions (5) et (6) :



ou, ce qui revient au même :



L'acidification produite (4) favorise la formation du phosphore dans le dépôt. Cette réaction modifie le rapport exact de 3 moles d'hypophosphite pour 1 mole de nickel. En pratique, on compte plutôt un rapport de 2,7.

Le pH, outre cette action, conditionne l'affinité de la réaction et corrélativement sa vitesse.

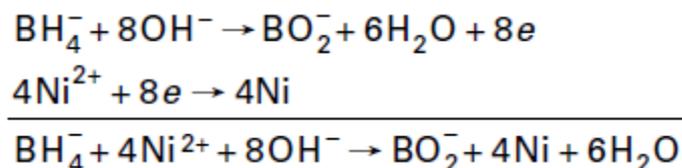
La décomposition de l'ion hypophosphite est d'autant plus violente et rapide que le pH est élevé. En milieu alcalin, elle peut être spontanée. Il est possible toutefois de minimiser l'affinité en diminuant l'activité du nickel par formation de complexe. C'est le cas, par exemple, du nickelage chimique en milieu ammoniacal. Le pH est le paramètre prépondérant, son élévation :

- augmente la vitesse de dépôt ;
- diminue la stabilité du bain ;
- diminue la teneur en phosphore du dépôt.

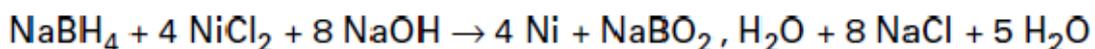
III.6.3.3 Nickelage chimique à partir des composés du bore (type C)

Les borohydrures sont utilisés avec succès dans les bains de nickelage ; ils conduisent à un alliage nickel-bore. Ce procédé est connu sous le nom de *Nibodur*.

III.6.3.3.1 Processus réactionnels

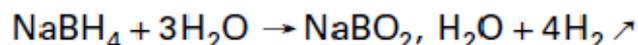


soit sous forme moléculaire :

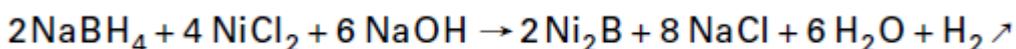


Nota : historiquement c'est le chlorure de nickel qui était utilisé mais l'on peut utiliser le sulfate de nickel. (0)D'autres réactions ont également lieu :

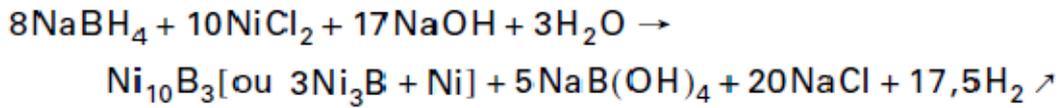
— consommation de l'agent réducteur par hydrolyse :



— formation de borure selon, par exemple :



Ni₂B correspond vraisemblablement à plusieurs composés du bore que l'on peut globalement exprimer par cette formule. La réaction globale tient évidemment compte des 3 réactions partielles précédentes. L'équation établie par voie empirique correspond au schéma suivant :



III.6.4. Post-traitements

Traitements thermiques

Ils doivent être compatibles avec la pérennité du matériau. Ils ont pour but :

- de réduire la fragilisation des aciers par l'hydrogène (tableau 3) ;
- d'augmenter la dureté des dépôts (par précipitation de phosphure de nickel dans la matrice (figure 3) ;
- d'améliorer l'adhérence des dépôts.

Tableau 3 – Conditions du traitement contre la fragilisation par l'hydrogène après dépôt

Résistance à la traction maximale spécifiée de l'acier R_m max. (Mpa)	Température (°C)	Durée (h)	Délai maximal admissible après dépôt (2) (h)
R_m max. < 1 050	Pas nécessaire		
$1\ 050 < R_m$ max. < 1 450	190 à 220	8	8
$1\ 450 < R_m$ max. < 1 800	190 à 220	18	4
$1\ 800 < R_m$ max.	190 à 220	24	0

(1) Ne s'applique pas aux pièces ayant subi une trempe superficielle.
 (2) La durée du dégazage dépend des épaisseurs réalisées.

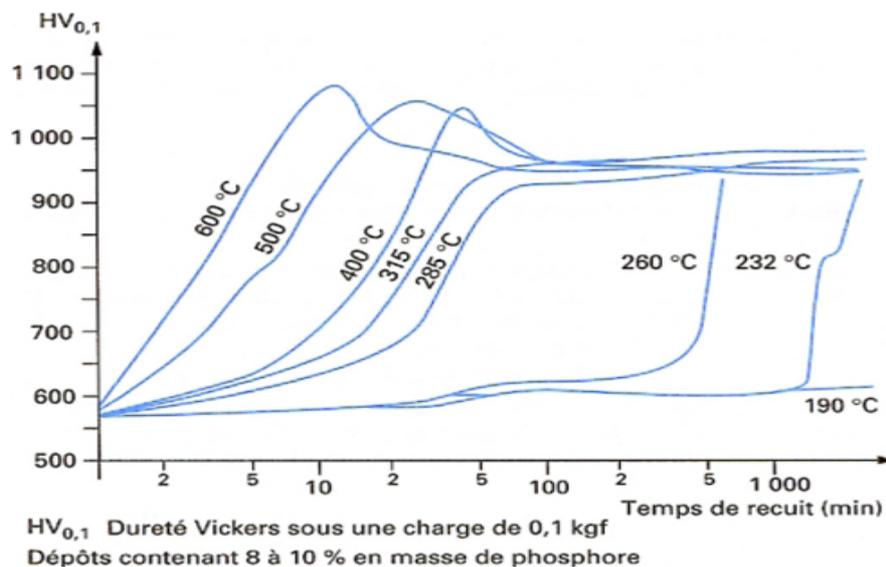


Figure 3 – Rapport entre la dureté des dépôts et le temps de recuit

III.6.5 Caractéristiques des dépôts

III.6.5.1 Épaisseur

La caractéristique la plus remarquable est celle de la régularité des épaisseurs pour autant que toutes les parties des pièces soient en contact avec la solution et que celle-ci soit correctement renouvelée. Il est intéressant de comparer la répartition des épaisseurs obtenues sur une même pièce par dépôt chimique ou par dépôt électrolytique. L'exemple le plus typique est constitué par des engrenages ou des pièces filetées. Dans le cas du **nickelage chimique**, quel que soit l'endroit, l'épaisseur mesurée est rigoureusement la même : sommet, flanc ou fond de filet.

III.6.5.2 Dureté

Les dépôts bruts de bain sont des structures amorphes. La dureté d'un dépôt nickel-phosphore varie entre 480 et 550 HV en sortie du bain ; elle est équivalente à celle de la plupart des aciers. L'examen métallographique révèle la présence de couches alternativement sombres et claires qui correspondent à des concentrations plus ou moins élevées de phosphore. Ces strates sont dues aux variations des conditions de formation du dépôt. Grâce à des traitements thermiques appropriés, on peut faire apparaître des composés définis qui précipitent finement sous forme de phosphure de nickel Ni_3P et qui augmentent la dureté. Elle peut alors atteindre 1000 HV pour un nickel-phosphore, dont la teneur en phosphore est supérieure à 10 %. La précipitation de phosphure de nickel en grains fins augmente progressivement avec l'élévation de température pour se stabiliser vers 400°C , où tout le phosphore est combiné au nickel.

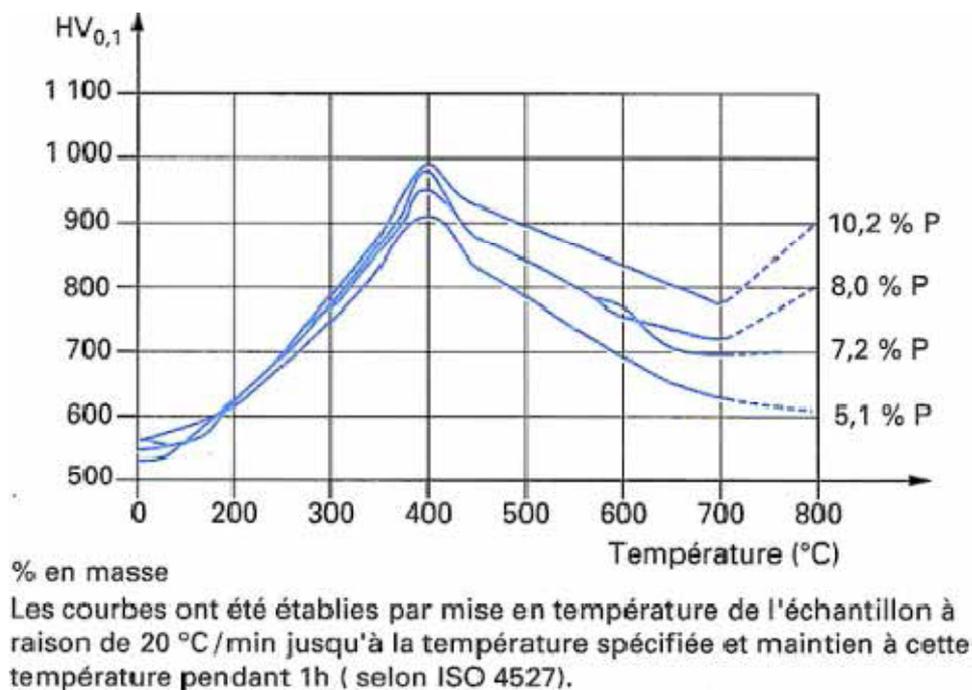


Figure 4 – Rapport entre la dureté et la température de traitement thermique

Au-delà d'une certaine température (environ 400°C), on observe l'apparition progressive d'une structure stable et homogène ayant l'aspect d'un mélange eutectique et la dureté diminue (figure 4) ; on observe alors la disparition des strates. Cette transformation est complète vers 600-650°C.

La dureté dépend donc de la température, de la durée du traitement thermique et de la composition du dépôt. L'augmentation de la teneur en phosphore entraîne des duretés plus élevées. Pour les alliages nickel-bore, la dureté Vickers initiale de 700 peut atteindre 1 200 si l'on maintient la température à 300°C au moins une douzaine d'heures.

III.6.5.3 Résistance au frottement

Contrairement au nickel qui a un très mauvais coefficient de frottement, les alliages nickel-phosphore et nickel-bore sont extrêmement intéressants. Le tableau 4 donne les coefficients de frottement du dépôt chimique en contact avec quelques matériaux usuels.

Tableau 4 – Coefficients de frottement d'un dépôt de nickel-phosphore en contact avec quelques matériaux usuels comparativement à ceux du nickel, de l'acier et du chrome

Matériaux en contact	Frottement à sec	Frottement lubrifié
Nickel-phosphore/nickel	grippage	0,26
Nickel-phosphore/nickel-phosphore	0,45	0,25
Nickel-phosphore/chrome	0,43	0,30
Nickel-phosphore/acier	0,38	0,21
Nickel-phosphore/fonte	0,16	0,08
Nickel/nickel	grippage	grippage
Nickel/chrome	grippage	0,20
Nickel/acier	grippage	0,20
Acier/acier	grippage	0,20
Chrome/chrome	0,43	0,20
Chrome/acier	0,21	0,13

III.6.5.4 Adhérence

Les dépôts de nickel chimique adhèrent correctement aux substrats, dès lors que les surfaces sont au préalable correctement préparées.

Pour certains alliages, un traitement thermique améliore l'adhérence grâce à une diffusion à l'interface. Pour les aciers, lorsque les caractéristiques métallurgiques le permettent, le meilleur résultat est assuré à 600-650°C, 2 h au minimum ; il se produit, en effet, une diffusion à l'interface, ce qui permet une meilleure liaison.

III.6.5.5 Ductilité

La ductilité est limitée. À température ambiante un dépôt de 7 à 10 % de phosphore de 25 μm peut supporter une élongation maximale de 2,2 % avant craquelures. Les traitements thermiques améliorent la ductilité, les meilleurs résultats sont obtenus après un passage au four à 600°C pendant 2 h.

III.6.6. Applications

Le nickel chimique concurrence çà et là certains dépôts électrolytiques, et trouve des champs d'application que lui seul peut couvrir. Mis à part le problème de protection contre la corrosion où le nickel chimique permet seul de résoudre certains problèmes de pièces de formes tourmentées, on utilise de plus en plus ce dépôt à des fins techniques. Les applications résultent de ses propriétés les plus intéressantes qui permettent de l'envisager quand on recherche une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- pouvoirs de répartition et couvrants maximaux ;
- résistance à la corrosion très bonne pouvant être optimisée grâce à des traitements préparatoires bien adaptés et des conditions soignées ;
- tenues au frottement, à l'usure et à l'érosion excellentes pouvant devenir remarquables avec les dépôts composites ;
- dureté superficielle susceptible d'augmentation avec des traitements thermiques appropriés ;
- aptitude à rendre conducteurs, voire soudables, des matériaux qui ne le sont pas ou pas assez.