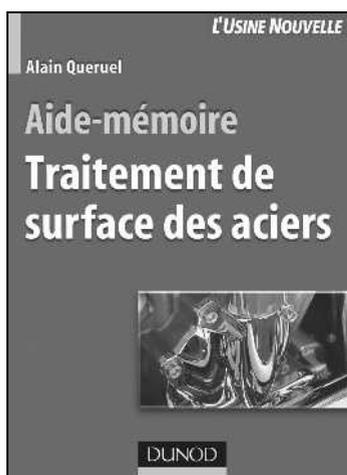


Robert Lévêque

TRAITEMENTS
ET REVÊTEMENTS
DE SURFACE DES MÉTAUX

DUNOD

Chez le même éditeur



*Aide-mémoire de traitement
de surface des aciers*

Alain Queruel

512 pages

Conseiller éditorial : Michel Colombié

Illustration de couverture : quka/shutterstock.com

Mise en pages : Nord Compo

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2007, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083402-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

AVANT PROPOS

Les traitements et revêtements de surface constituent actuellement un des moyens essentiels pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux, notamment la résistance à l'oxydation et à la corrosion, la tenue à la fatigue sous toutes ses formes (fatigue mécanique, fatigue thermique, fatigue de surface), l'isolation thermique, la conductivité électrique, la résistance au frottement et à l'usure, sans oublier la couleur et l'aspect, la biocompatibilité ou l'adhésion d'une autre classe de matériaux (céramique ou polymère). Ils représentent en 2017 entre 8 et 9 % du chiffre d'affaires global de la sous-traitance industrielle du travail des métaux et jusqu'à 15 % si l'on compte leur part dans les ateliers intégrés. Il existe une très grande variété de techniques dont certaines, et non des moindres, sont actuellement menacées par l'évolution des normes européennes sur le plan environnemental, ainsi que par la mise en place progressive de nouvelles réglementations, par exemple celles qui laissent subsister sur les produits du chrome hexavalent ou celles qui utilisent des sels de cadmium. Ces techniques sont interdites depuis septembre 2017 et font l'objet d'autorisation de poursuite dans certains secteurs industriels pour lesquels des solutions de substitution n'ont pas encore été trouvées. Par ailleurs, l'utilisation des métaux lourds toxiques est soumise à des restrictions de plus en plus fortes.

Parmi les différents procédés de traitements de surface, il est possible de distinguer quatre familles : les traitements de transformation structurale d'origine mécanique ou thermique, les traitements de diffusion ou thermochimiques, les traitements de conversion et les revêtements. Les principaux secteurs d'activité sont l'automobile, le bâtiment, les travaux publics, la mécanique, l'aéronautique et le spatial, l'armement, le matériel électrique et le biomédical.

Le but du présent ouvrage est de décrire les différentes filières de traitements et revêtements de surface à partir des propriétés fonctionnelles améliorées en s'appuyant sur de nombreux exemples industriels. L'amélioration de ces propriétés est directement fonction de la santé interne des dépôts ou des couches superficielles modifiées par le traitement et les différents moyens de contrôle destructifs et non destructifs seront évoqués. Le document abordera dans un dernier chapitre l'aspect technico-économique et environnemental, ainsi que les critères de choix avec des exemples d'application empruntés aux principaux domaines de l'industrie préalablement évoqués.

□ Public concerné par cet ouvrage

- Ingénieurs métallurgistes et mécaniciens appartenant notamment aux bureaux d'études et des méthodes, aux services de maintenance, centres techniques, centres de recherche, services métallurgiques confrontés à des critères de choix de solutions matériaux pour satisfaire à un cahier des charges donné;
- Ingénieurs mécaniciens et concepteurs de biens d'équipement dont la finalité est de trouver les solutions matériaux et leurs combinaisons, ainsi que leur mise en œuvre, pour permettre de garantir à leurs clients un fonctionnement sans défaillance critique et optimisé des pièces ou ensembles commercialisés;
- Étudiants des universités et écoles d'ingénieurs engagés dans les filières matériaux;
- Responsables industriels confrontés à des problèmes de choix de filières de traitements de surface en conformité avec les normes environnementales et la mise en place progressive de nouvelles réglementations.

TABLE DES MATIÈRES

Avant propos	V
Table des matières	VII
1 • Définition et critères fonctionnels des surfaces	3
1.1 Propriétés spécifiques des surfaces	3
1.2 Critères fonctionnels des surfaces industrielles	16
1.3 Bibliographie	23
2 • Propriétés des surfaces industrielles	25
2.1 Introduction	25
2.2 Aspect, coloration	26
2.3 Réactivité	27
2.4 Biocompatibilité	28
2.5 Résistance au frottement et à l'usure	29
2.6 Résistance à la corrosion et à l'oxydation	35
2.7 Résistance à la dégradation par usure et corrosion	44
2.8 Résistance à la fatigue	50
2.9 Bibliographie	54
3 • La propreté de surface	57
3.1 Rappel de la définition d'une surface industrielle	57
3.2 Définition d'une surface propre	59
3.3 Les principales opérations de préparation de surface	59
4 • Évaluation de la propreté de surface	61
4.1 Évaluation par des méthodes de contrôle courant ou d'atelier	61
4.2 Évaluation par des techniques de laboratoire	63
4.3 Bibliographie	70
5 • L'opération de dégraissage	73
5.1 Choix du mode de dégraissage	73
5.2 Dégraissage en phase solvant organique	76

5.3	Dégraissage chimique en phase aqueuse	79
5.4	Dégraissage assisté par ultrasons ou par le vide	90
5.5	Dégraissage par vapeur sèche	91
5.6	Dégraissage par fluide cryogénique	92
5.7	Dégraissage par fluide supercritique	94
5.8	Dégraissage assisté par plasma froid	97
5.9	Évaluation de la qualité du dégraissage	100
5.10	Bibliographie	103
6	• L'opération de décapage	105
6.1	Décapage chimique	106
6.2	Décapage électrolytique	120
6.3	Décapage mécanique des surfaces métalliques	121
6.4	Bibliographie	127
7	• L'opération de polissage	129
7.1	Polissage mécanique	129
7.2	Polissage électrolytique	132
7.3	Polissage chimique	135
7.4	Bibliographie	136
8	• Historique et enjeux	139
8.1	Historique des traitements et revêtements de surface	139
8.2	Enjeux des revêtements et traitements de surface	142
8.3	Bibliographie	145
9	• Classification des traitements et revêtements de surface	147
9.1	Traitements de surface par transformation structurale d'origine mécanique ou thermique	148
9.2	Traitements par diffusion	149
9.3	Traitements de conversion	150
9.4	Les revêtements	153
9.5	Bibliographie	158
10	• Revêtements obtenus en voie liquide	161
10.1	Dépôts électrolytiques	161
10.2	Dépôts chimiques	194
10.3	Bibliographie	201
11	• Revêtements obtenus en bains fondus	205
11.1	Dépôt par immersion dans un métal fondu	205

11.2	Dépôt par immersion dans un bain de sel fondu	212
11.3	Autres dépôts par voie liquide réalisés à chaud	214
11.4	Bibliographie	217
12	• Revêtements obtenus en phase gazeuse	219
12.1	Dépôts chimiques en phase vapeur	219
12.2	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	226
12.3	Propriétés des dépôts PVD, PACVD	233
12.4	Bibliographie	241
13	• Projection à chaud, rechargement , procédés divers	243
13.1	Projection à chaud	243
13.2	Rechargement	252
13.3	Procédés divers	260
13.4	Bibliographie	264
14	• Les traitements par transformation structurale	269
14.1	Transformation structurale d'origine mécanique	269
14.2	Transformation structurale d'origine thermique	280
14.3	Bibliographie	292
15	• Les traitements de diffusion	295
15.1	Cémentation	296
15.2	Carbonituration	307
15.3	Nitruration	309
15.4	Oxydation	319
15.5	Implantation ionique	324
15.6	Bibliographie	330
16	• Les traitements de conversion	335
16.1	Les traitements de conversion par voie chimique	335
16.2	Traitements de conversion par voie électrochimique	349
16.3	Oxydation anodique	351
16.4	Traitements de conversion par voie sèche	364
16.5	Bibliographie	373
17	• Introduction aux contrôles des traitements et revêtements de surface	379
17.1	Objectifs de l'opération de contrôle	379
17.2	Les différents moyens de contrôle	381

18 • Contrôle analytique	383
18.1 Rappel des principales techniques d'analyse	383
18.2 Exemples d'application des techniques d'analyse	387
18.3 Bibliographie	393
19 • Contrôle topographique et géométrique	395
19.1 Contrôle de la rugosité	395
19.2 Contrôle de l'aspect et de la brillance	398
19.3 Bibliographie	401
20 • Contrôle mécanique	403
20.1 Contrôle de la dureté	403
20.2 Évaluation des contraintes résiduelles	409
20.3 Bibliographie	417
21 • Contrôle de l'épaisseur et de l'adhérence	419
21.1 Contrôle de l'épaisseur	419
21.2 Contrôle de l'adhérence	428
21.3 Bibliographie	431
22 • Contrôle de la ductilité et de la porosité	433
22.1 Contrôle de la ductilité	433
22.2 Contrôle de la porosité	436
22.3 Bibliographie	443
23 • Aspect technico-économique et environnemental	447
23.1 Aspect technico-économique	447
23.2 Aspect environnemental	449
23.3 Bibliographie	458
24 • Perspectives d'évolution	461
24.1 Étude de cas industriels	461
24.2 Évolution des différentes technologies	474
24.3 Bibliographie	478
Index	481

A

Surfaces métalliques



Définition et propriétés

1 • DÉFINITION ET CRITÈRES FONCTIONNELS DES SURFACES

1.1 Propriétés spécifiques des surfaces

1.1.1 Introduction

Dans une majorité de cas, dès que se pose le problème de l'optimisation des propriétés d'un matériau, métallique ou non, il apparaît que les phénomènes de surface jouent un rôle déterminant dans cette démarche. Quelques exemples industriels permettent d'illustrer cette forte influence : économie de matière et respect de l'environnement par le choix de matériaux à résistance accrue vis-à-vis des agressions subies en service, optimisation des propriétés catalytiques des surfaces impliquées dans les procédés du génie chimique, réduction du frottement et de l'usure dans la transmission de puissance utilisée dans l'industrie du transport, biocompatibilité et résistance à l'usure des biomatériaux prothétiques, structure et propriétés des interfaces dans les constituants actifs et passifs de la microélectronique.

De nombreux phénomènes métallurgiques sont liés à un rôle déterminant des surfaces, on peut citer à titre indicatif :

- en élaboration, le processus de solidification, la croissance cristalline, le frittage et la réalisation d'un dépôt,
- en évaluation des propriétés d'usage, les modes de fissuration et de rupture en fatigue mécanique ou thermique, la résistance à l'érosion et à la cavitation, la résistance mécanique et son évolution avec la température, l'aptitude à l'usinage avec ou sans enlèvement de copeaux, le comportement au frottement et à l'usure, l'adhérence et l'aptitude au collage, l'influence de la lubrification,
- en réactivité physico-chimique, la corrosion et l'oxydation, la coloration et l'aspect, la catalyse, les processus de recristallisation, de transformation de phases et de coalescence, la liaison céramique métal ou polymère métal, la biocompatibilité,
- en évaluation des propriétés physiques, le pouvoir réflecteur et la résistance de contact, la conduction thermique ou électrique.

Tous ces critères spécifiques des surfaces liés aux propriétés de mise en œuvre et d'usage des matériaux peuvent être représentés schématiquement sur la figure 1.1. La surface est effectivement une discontinuité dans l'arrangement des atomes d'un solide, ce qui lui confère une énergie supérieure à celle du volume; il en résulte une grande réactivité des atomes et un réarrangement de leur distribution, avec

formation de figures géométriques comme par exemple les striations qui apparaissent dans les premiers stades de l'oxydation, des ségrégations d'éléments résiduels ou d'additions mineures qui vont migrer du volume vers la surface, comme par exemple l'étain qui peut perturber les phénomènes diffusionnels liés à un traitement thermo-chimique comme la cémentation ou la carbonituration. La notion de surface est donc par essence pluridisciplinaire; elle concerne le mécanicien, le chimiste, le physicien et le métallurgiste. Seule, une approche globale permet d'aboutir à une description complète d'une surface et d'appréhender l'ensemble de ses propriétés fonctionnelles.

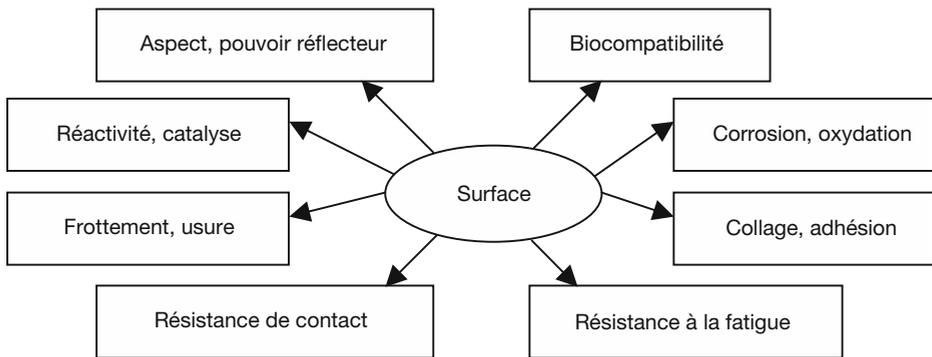


Figure 1.1 – Propriétés fonctionnelles d'une surface.

L'objet de ce chapitre d'introduction traitant des critères spécifiques des surfaces est de définir leurs principales caractéristiques avec une approche multidisciplinaire. Les points suivants seront donc examinés successivement :

- une description géométrique et cristallographique, permettant de caractériser les modèles de structure atomique les plus généralement admis,
- une description physique, avec en particulier une définition de la structure électronique,
- une description thermodynamique et énergétique, avec notamment la notion de tension superficielle, ainsi que les phénomènes de ségrégation et d'adsorption.

1.1.2 Structure des surfaces

La surface d'un corps correspond à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de ce dernier; en surface, le nombre des plus proches voisins d'un atome est plus faible qu'en volume, comme le montre la figure 1.2, relative à une structure cubique centrée. Dans cet exemple en effet, si l'on coupe le cristal par un plan $\{100\}$ passant par le sommet commun à huit cubes adjacents, le nombre de plus proches voisins qui sont au centre des cubes passe de huit à quatre. Pour rétablir l'équilibre des champs de force auxquels ils sont soumis, les atomes de la surface vont avoir tendance à échanger des liaisons nouvelles avec les plus proches voisins, soit en surface, soit dans le volume sous jacent, soit avec des atomes, des molécules

ou même des espèces ionisées du milieu environnant. Il en résulte une grande **réactivité** des atomes de surface qui va dépendre de l'orientation de cette surface. La structure des matériaux a une incidence sur la nature et l'arrangement des atomes dans un plan de coupe donné; cela prend toute son importance dans les matériaux polycristallins qui sont le cas de loin le plus répandu en pratique. Certaines propriétés, comme la réactivité, en liaison avec les mécanismes de corrosion et d'oxydation, sont fonction de l'orientation des grains en surface.

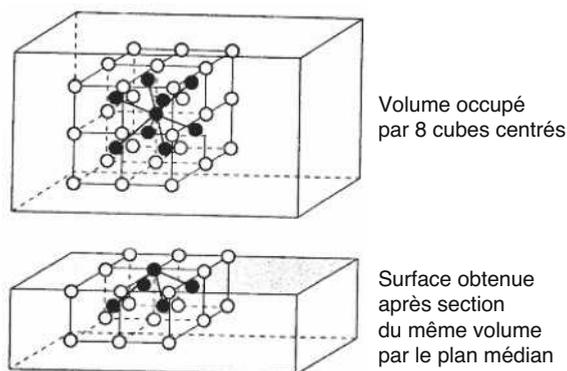


Figure 1.2 – Proches voisins d'un atome dans la structure cubique centrée : en volume (partie supérieure) et en surface (partie inférieure).

Ces différences de réactivité constituent un moyen fort utile pour révéler la structure des métaux et alliages, lors d'une observation métallographique. L'attaque dans un réactif donné permet de révéler les grains dont chacun, en liaison avec son orientation propre, va avoir son propre potentiel, ce qui conduira à l'existence de couples galvaniques locaux et à des différences d'attaque qui pourront être amplifiées par un gravage sélectif des zones voisines des joints de grains. Ce dernier phénomène peut même être amplifié par les ségrégations d'éléments résiduels qui ont diffusé du cœur vers les joints.

Un autre exemple d'illustration de la différence de réactivité en fonction de l'orientation des grains est la révélation de la structure par oxydation. Pour de faibles durées d'exposition, l'épaisseur des films d'oxydes généralement épitaxiaux dépend de l'orientation des grains; il en résulte des colorations, dues à des phénomènes d'interférences, variables en fonction de l'orientation des grains.

Cet effet de l'orientation des grains est mis en pratique dans le cas du laminage de tôles minces en acier doux (structure cubique centrée) pour les boîtes de conserve. On donne à ces produits, par un traitement thermomécanique approprié, une forte texture afin de réduire au maximum les éventuels risques d'attaque des grains et de différences sensibles de réactivité vis-à-vis de l'environnement lors de la réalisation des revêtements ultérieurs.

Sur le **plan topographique**, une surface « idéale », telle qu'elle peut apparaître au moyen d'outils de détection puissants comme le microscope à effet tunnel,

correspond à la coupe d'un cristal dont l'orientation est bien définie par rapport aux axes cristallographiques. Suivant l'orientation de ce plan par rapport à un plan de grande densité atomique, on pourra considérer trois catégories de surfaces (1) :

- des **surfaces dites singulières**, atomiquement planes, dont l'énergie superficielle est minimale; c'est par exemple la coupe (111) de cristaux CFC pour des métaux ou des semi conducteurs à structure covalente du type diamant, c'est également le cas pour des cristaux ioniques du type NaCl que l'on trouve dans les céramiques et pour lesquelles les surfaces d'énergie minimale sont celles qui correspondent à une stricte neutralité électrique (voir figure 1.3a);

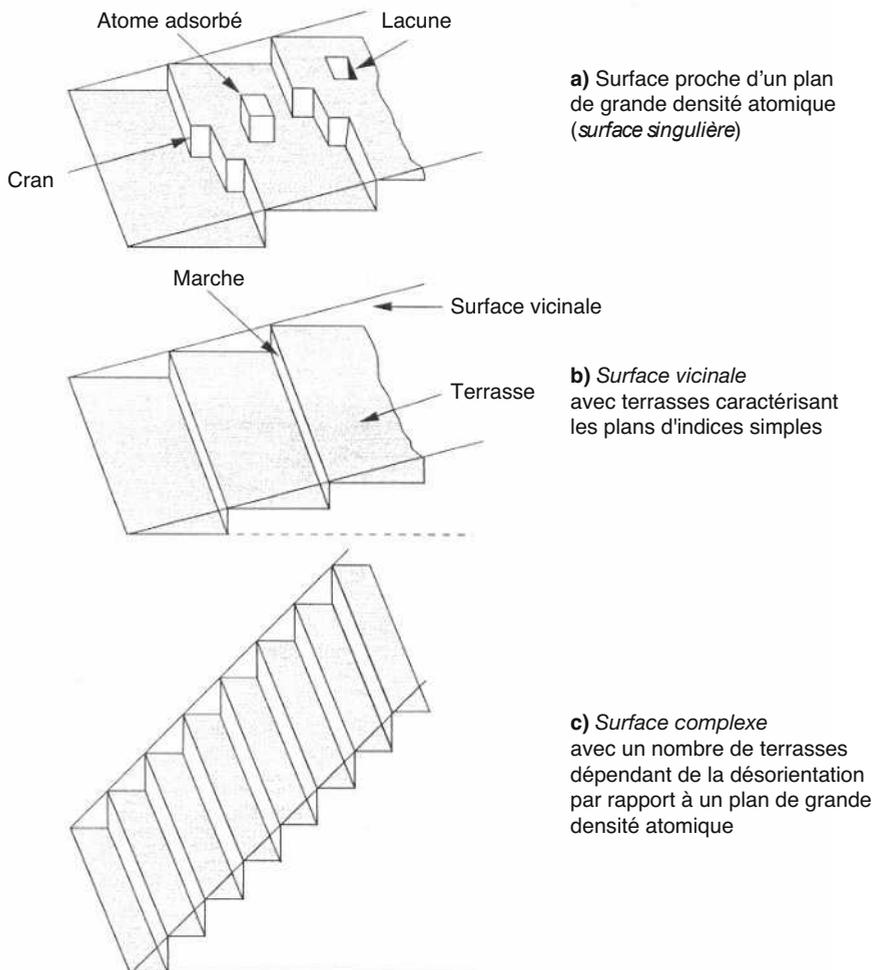


Figure 1.3 – Défauts d'une surface vicinale faiblement désorientée avec schématisation du modèle TLK, d'après G. BERANGER, C. RICHARD, C. LANGLADE-BOMBA et B. VANNES (2).

- des **surfaces dites vicinales**, faiblement désorientées par rapport aux plans de grande densité, qui apparaissent formées de plages de surfaces singulières très développées séparées entre elles par des marches monoatomiques. Elles peuvent être décrites par le modèle TLK (Terrace Ledge Kink) ou (terrasse, lisière de marche, cran ou décrochement) et dont le nombre de marches augmente avec l'angle de désorientation (voir figure 1.3b);
- des **surfaces complexes** fortement perturbées et caractérisées par une rugosité naturelle non décrite par les modèles précédents. Cette rugosité à l'échelle atomique est totalement différente de la rugosité à l'échelle du μm qui résulte de la préparation par abrasion ou par usinage (voir figure 1.3c).

Ainsi, dans le cas général, à l'échelle atomique, la surface possède déjà une certaine rugosité qui augmente avec la désorientation par rapport à un plan de grande densité atomique. Chaque marche et chaque cran constituent autant de sites à réactivité plus forte. Ainsi, une surface est d'autant plus réactive qu'elle est plus rugueuse à l'échelle atomique. Une surface courbe a une réactivité d'autant plus forte que la densité de défauts superficiels (et notamment de crans) est grande et que son rayon de courbure est plus faible. Cette réactivité va atteindre son maximum pour des zones à très faible rayon de courbure telles que les « pointes ». En plus des défauts définis précédemment tels qu'atomes ou lacunes adsorbés, marche ou décrochement, il faut ajouter d'autres défauts linéaires ou planaires tels que l'émergence de dislocations ou de plans de glissement, de sous joints et de joints de grains, qui contribuent à modifier la réactivité de la surface.

Des relaxations tangentielles peuvent se produire avec changement des angles des arêtes et des crans, ainsi que des déformations au voisinage des marches de surface. Si les contraintes de tension développées sur une surface plane par la relaxation tangentielle sont trop élevées, une reconstruction de cette dernière peut se produire avec multiplication de défauts, pseudo épitaxie ou même développement d'une couche en discordance avec le substrat. Ces reconstructions très variées, dont l'amplitude est de l'ordre de la distance atomique, disparaissent pour la plupart par élévation de la température, multiplication des marches ou dopage. La diffusion superficielle des atomes qui en résulte entraîne un réarrangement qui se traduit par la formation de facettes et de stries.

1.1.3 Propriétés électroniques

La création d'une surface, outre les aspects structuraux, entraîne une altération des propriétés électroniques du matériau. Les atomes de la dernière couche ont des électrons non appariés dans les orbitales atomiques; leurs fonctions d'onde interfèrent avec celles des autres orbitales atomiques des atomes voisins. Il s'ensuit une espèce de structure du type double couche, avec un excès et un déficit électronique, respectivement au dessus et au-dessous de la surface. Ces perturbations de la structure électronique des atomes sont d'autant plus importantes que le nombre de liaisons rompues est élevé. On peut en déduire que les surfaces idéalement planes (surfaces singulières) sont peu réactives et caractérisées par un niveau faible du travail d'extraction des électrons; en revanche les marches, crans, lacunes que l'on rencontre sur les surfaces vicinales ou même complexes constituent des sites

réactifs pour des éléments comme l'oxygène ou le soufre. Cette adsorption d'atomes en surface va se traduire par une forte réduction du niveau du travail d'extraction des électrons.

L'existence de liaisons coupées et des modifications des densités électroniques associées prend toute son importance dans le cas des matériaux semi conducteurs comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Dans ces matériaux pour lesquels les liaisons sont fortement covalentes donc dirigées, la création d'une surface ne peut pas modifier les longueurs de ces liaisons et les angles d'hybridation des orbitales doivent être respectés. Les liaisons pendantes ainsi créées ne vont pas provoquer de phénomènes de relaxation tels que ceux précédemment définis, mais plutôt une reconstruction avec modification de la structure électronique en surface. Ainsi, différents modèles ont été proposés pour supprimer le maximum de liaisons pendantes dans les coupes suivant les plans {111} ou {100} du silicium, avec intervention d'atomes adsorbés et même de fautes d'empilement.

Il faut signaler toutefois que les effets liés à l'existence d'une surface se limitent à une ou deux couches atomiques dans les métaux, par suite de la grande mobilité et de l'abondance des électrons qui écrantent très efficacement les champs extérieurs.

1.1.4 Propriétés énergétiques, phénomènes de surface

■ Énergie de surface et tension superficielle

L'**énergie de surface** est la grandeur la plus importante qui est utilisée dans la thermodynamique des surfaces. Il s'agit de l'excès d'énergie libre qu'il faut fournir à une surface pour augmenter l'aire de celle-ci d'un incrément dA , en tenant compte de la nécessité de rééquilibrer les liaisons atomiques superficielles et en supposant que la température, le volume du solide et le nombre de constituants (au sens de la règle des phases) reste constant. L'unité d'énergie de surface est le joule par mètre carré; pour des raisons pratiques, on utilise souvent un sous-multiple :

$$1 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2} = 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ (système CGS)}$$

Dans le cas des solides et des liquides, il est souvent fait appel à la notion de **tension superficielle** γ , grandeur caractéristique de la surface et reliée au potentiel thermodynamique. L'unité de tension superficielle est le newton par mètre, mais comme précédemment, un sous-multiple est plus fréquemment utilisé :

$$1 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1} = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ (système CGS)}$$

La procédure de Gibbs, rappelée par F. DABOSI (3), consiste à introduire dans l'expression classique reliant l'énergie interne E à l'entropie S , la pression P sur le volume V et les potentiels chimiques μ_i de différents constituants N_i , rappelée ci après :

$$E = TS - PV + \sum \mu_i \cdot N_i$$

une grandeur d'excès liée à l'énergie mécanique à fournir pour rompre les liaisons et créer une surface A , c'est-à-dire γA . L'équation fondamentale de Gibbs

s'exprime donc, en présence d'une surface plane, à T , P , γ et μ_i constants, par la relation suivante :

$$E = TS - PV + \gamma A + \sum \mu_i \cdot N_i$$

En retranchant de cette expression la contribution des phases massives, il subsiste les grandeurs superficielles d'excès qui prennent pour l'aire totale créée les valeurs :

$$E_\sigma \text{ (énergie superficielle)} = TS_\sigma + \gamma A + \sum_2^n \mu_\sigma^i \cdot N_\sigma^i$$

$$F_\sigma \text{ (énergie libre superficielle)} = E_\sigma - TS_\sigma \text{ (entropie de surface)}$$

Dans le cas d'un seul composant ($n = 1$), alors $F_\sigma = \gamma A$ car $\sum_2^n \mu_\sigma^i \cdot N_\sigma^i = 0$. Dans la relation précédente de définition de E , on constate que γ est en fait la dérivée partielle de E par rapport à l'aire A , à S , V et N_i constants. L'énergie de surface apparaît comme le travail réversible nécessaire pour augmenter la surface d'une unité d'aire, à S , V et N_i constants, ce qui correspond bien à la définition donnée précédemment.

Ces considérations théoriques permettent d'en tirer quelques conséquences pratiques en ingénierie des surfaces. Tout d'abord, une surface « idéalement propre » est instable car l'évolution énergétique va se faire dans le sens d'une diminution du produit γA . En l'absence de toute espèce chimique dans le milieu environnant (ultravide), c'est le terme A qui va être modifié avec des effets de restructuration superficielle. En présence de molécules étrangères, il y aura adsorption ou réaction avec formation par exemple d'une couche de contamination (oxydes, molécules organiques...). Il faudra avoir recours à des modifications de surface par des méthodes adaptées (bombardement ionique par exemple) pour traiter ces surfaces en vue de leur conférer d'autres propriétés fonctionnelles.

Tableau 1.1 – Énergie superficielle de quelques matériaux caractéristiques.

Classe de matériaux	Nature du matériau	Énergie superficielle γ (erg · cm ⁻²)
Métaux	Plomb	450
	Magnésium	560
	Étain	570
	Cadmium	620
	Zinc	790
	Aluminium	900
	Cuivre	1 100
	Titane	1 200
	Chrome	1 400
	Zirconium	1 400
	Fer	1 700
	Nickel	1 700
	Cobalt	1 800
	Molybdène	2 300
Tungstène	2 300	

Tableau 1.1 – Énergie superficielle de quelques matériaux caractéristiques. (suite)

Classe de matériaux	Nature du matériau	Énergie superficielle γ (erg \cdot cm $^{-2}$)
Oxydes, carbures	ZrO ₂	530
	Al ₂ O ₃	740
	TiC	900
	V ₄ C ₃	1 250
Polymères	PTFE	20
	PEHD	35
	polyamide	50

En général, les énergies superficielles les plus élevées (jusqu'à plusieurs milliers d'ergs \cdot cm $^{-2}$) correspondent aux métaux et solides covalents, les plus faibles (moins de 100 ergs \cdot cm $^{-2}$) aux molécules organiques (polymères et notamment les composés fluorés), tandis que les composés ioniques (oxydes) se situent à des niveaux intermédiaires, soit quelques centaines d'ergs \cdot cm $^{-2}$. Le tableau I donne à titre indicatif quelques valeurs pour les matériaux les plus usuels des principales familles.

L'énergie superficielle influe sur le comportement au frottement à sec des matériaux (forces d'adhésion, coefficient de frottement). La corrélation entre énergie de surface et aptitude à l'adhésion des matériaux apparaît clairement sur le tableau 1.1 à travers l'usage des matériaux fluorés (PTFE) dont l'aptitude au frottement est bien connue.

La notion de tension superficielle influe également sur le comportement des matériaux en régime lubrifié à travers les phénomènes de **mouillabilité** qui interviennent dans de nombreuses étapes de mise en œuvre des métaux : élaboration et transformation à chaud et à froid, brasage, soudage, galvanisation, dépôts électrolytiques, fragilisation par les métaux liquides, adhésion métal-polymère et ses conséquences pour l'aptitude au collage.

■ Mouillabilité

□ Définition de la mouillabilité

La tension superficielle concerne toutes les interfaces : liquide-gaz, solide-gaz et solide-liquide. L'interface solide-liquide est celle qui est la plus importante sur le plan pratique car elle concerne beaucoup d'applications métallurgiques. Quand une goutte de liquide est déposée sur la surface d'un solide, elle va s'étaler et adopter une configuration d'équilibre. Le système est représenté traditionnellement par le schéma en coupe sur la figure 1.4. L'angle de contact θ résulte de l'équilibre des tensions des trois interfaces solide-liquide γ_{SL} , liquide-vapeur γ_{LV} et solide-vapeur γ_{SV} . Ces grandeurs sont liées entre elles par la relation de Young :

$$\gamma_{LV} \cdot \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$$

Quatre cas de figure doivent être considérés :

- $\theta = 0$: c'est le mouillage parfait et le liquide s'étale spontanément;

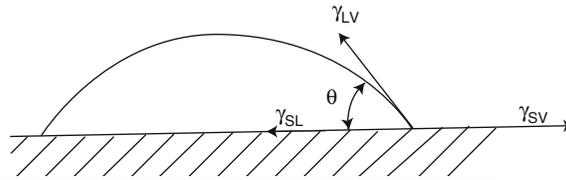


Figure 1.4 – Représentation schématique des différentes tensions s'exerçant sur une goutte de liquide en équilibre sur un solide.

- $0 < \theta < 90^\circ$: le mouillage est bon (cas général des métaux);
- $90 < \theta < 180^\circ$: le mouillage est mauvais (exemple $\theta = 110^\circ$ avec PTFE);
- $\theta = 180^\circ$: il n'y a pas de mouillage du tout.

L'angle de contact θ traduit l'énergie fournie lors de l'étalement de la goutte. Pour une unité d'aire de surface, le travail nécessaire pour séparer de façon réversible le solide du liquide s'écrit : $W_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} + \gamma_{LV}$. En combinant cette relation avec celle de Young, on obtient celle de Dupré :

$$\cos\theta = W_{SL}/\gamma_{LV} - 1$$

Cette relation montre que le mouillage résulte de la compétition entre deux types de forces : celles qui régissent la cohésion du liquide qui sont traduites par sa tension superficielle γ_{LV} et celles d'attraction des atomes du liquide par le solide, exprimées par l'énergie d'adhésion solide-liquide W_{SL} .

L'aptitude au mouillage d'un solide peut être fortement influencée par un certain nombre de paramètres, notamment les caractéristiques topographiques de la surface : rugosité, morphologie des couches superficielles, présence de porosités ou de microfissures. L'amélioration des caractéristiques de mouillage par ces structures superficielles peut aller jusqu'à de véritables imprégnations par les liquides en liaison avec les phénomènes de capillarité.

□ Détermination de la mouillabilité

La détermination de la mouillabilité consiste à mesurer l'angle de contact θ . Il existe deux types de méthodes, statique et dynamique.

Mesure statique : méthode de la goutte posée

L'expérience consiste à mesurer directement l'angle de contact d'une goutte de liquide déposée à la surface du métal, par une méthode de visée optique. Les mesures doivent être répétées en raison de la dispersion due par exemple à la rugosité et à des hétérogénéités, soit de structure, soit de composition chimique. Cette méthode, utilisée industriellement, permet d'avoir des informations pratiques quant à la propreté de surface. Elle permet aussi, en élaboration, de caractériser le comportement de matériaux réfractaires au contact de métaux liquides et de prévoir les risques de réactivité entre le solide et le liquide.

Mesure dynamique : méthode tensiométrique

Cette méthode consiste à immerger un solide dans un liquide, puis à l'émerger et à mesurer la force F exercée sur le bras d'une balance pendant la phase d'émergence (voir figure 1.5). Cette force s'exprime par la relation : $F = \gamma_{LV} \cdot L \cdot \cos\theta$, avec : L = périmètre de l'échantillon, γ_{LV} = tension de surface du liquide dans l'air.

Comme la vitesse relative solide-liquide est très faible (< 1 mm/min), il est possible de considérer que le système est à l'équilibre. La force mesurée doit être diminuée du poids apparent p de l'échantillon dans l'air. Elle vaut alors : $\gamma_{LV} \cdot L \cdot \cos\theta - \rho \cdot g \cdot S \cdot L$ (ρ , masse spécifique du solide, g , accélération de la pesanteur, S , aire de contact).

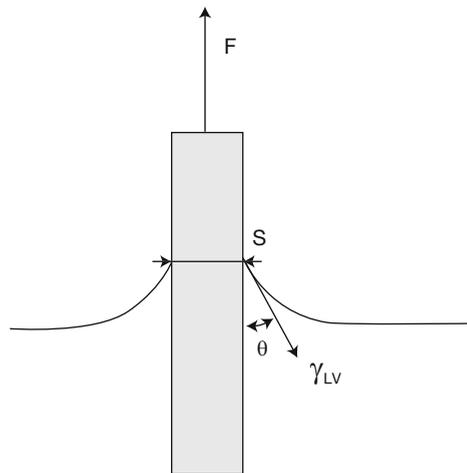


Figure 1.5 – Schéma de principe d'une mesure de tension superficielle par la méthode tensiométrique.

Mesure dynamique : Méthode de la balance méniscographique

Cette méthode est très utilisée dans l'industrie pour assurer le suivi de la mouillabilité lors d'opérations de traitements de surface de produits plats, par exemple lors d'immersion dans les métaux liquides (procédés au trempé ou au défilé). Elle consiste à immerger rapidement un échantillon jusqu'à une profondeur donnée et à suivre, en fonction du temps, la résultante des forces exercées sur le bras de la balance diminuée du poids apparent de l'échantillon dans l'air (4). On obtient des courbes comme celle schématisée sur la figure 1.6, qui donnent accès à trois paramètres :

- la tension interfaciale $\gamma_{LV} = F_R \cdot g/L$,
- l'angle de contact θ défini par $\cos \theta = (F_{\max} + \rho \cdot g \cdot S \cdot d)/L \cdot \gamma_{LV}$,
- la vitesse de mouillage $d\theta/dt = 180 - \arccos[(F_3 + \rho Sd)/F_R]$,

avec S aire de la section de l'éprouvette, ρ masse volumique du liquide, d profondeur d'immersion, L périmètre du solide. La méthode permet, en plus, de suivre la réacti-

tivité entre l'acier et le zinc liquide et de prendre en compte l'influence des éléments d'addition dans le bain.

Les approches classiques de la mouillabilité supposent non seulement que le système soit à l'équilibre, mais aussi qu'il n'y ait pas de transfert chimique à l'interface. Or, il n'en est pas toujours ainsi, notamment lorsque les essais sont faits à température élevée, comme dans les études de galvanisation ou d'aluminage. Dans ces conditions de non équilibre chimique, les variations d'énergie libre du système sont associées à la fois aux variations d'aire interfaciale et aux variations de tension interfaciale liquide-solide. De grandes précautions sont alors nécessaires pour exploiter les résultats obtenus à l'aide de la balance méniscographique (figure 1.6).

■ Adsorption sur les surfaces

□ Généralités sur les phénomènes d'adsorption

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment sur l'approche géométrique et cristallographique des surfaces, ces dernières sont très réactives. Elles se recouvrent rapidement, même sous atmosphère raréfiée, d'atomes étrangers qui vont modifier profondément leurs propriétés, malgré la très faible épaisseur de ces couches adsorbées (une ou plusieurs couches atomiques selon la température, le type d'atmosphère et la nature du substrat).

Ces processus sont d'une grande importance en métallurgie où ils interviennent notamment en oxydation ou corrosion aqueuse, dans les traitements de surface, dans la réactivité des catalyseurs et lors de traitements dans des atmosphères sous très basse pression résiduelle. Plusieurs équipes à travers le monde ont contribué à l'étude de ces couches adsorbées et on peut citer notamment les travaux de J. BENARD et de ses collaborateurs (5) (6). Il a été démontré que le phénomène d'adsorption était réversible et qu'il pouvait répondre aux lois de la thermodynamique.

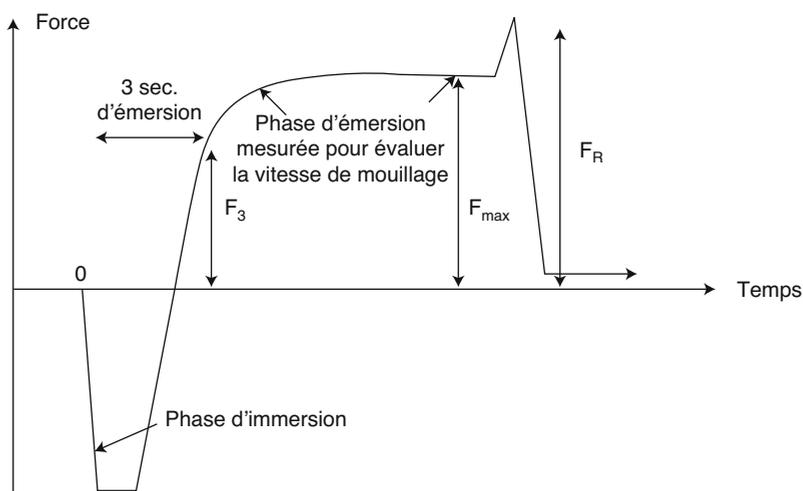


Figure 1.6 – Suivi, en fonction du temps, de la force exercée sur une lame d'acier immergée dans un bain de zinc par la méthode méniscographique.

En présence d'adsorbats, la structure électronique d'une surface est modifiée. Selon les énergies de liaison mises en œuvre, l'adsorption peut être classée en deux domaines :

- le **domaine de la physisorption** pour des énergies de liaison $E < 0,5$ eV; les liaisons sont de type Van der Waals ou hydrogène et il y a peu d'interaction d'origine électronique;
- le **domaine de la chimisorption** pour des énergies de liaison $E > 0,5$ eV; il y a mise en commun ou transfert d'électrons et les liaisons sont fortes.

L'étude thermodynamique de l'adsorption conduit à rechercher une description simple dans laquelle l'espèce adsorbée est considérée comme un système à un seul composant en équilibre avec sa vapeur, identifiant ainsi le substrat à un solide inerte. L'approche la plus usuelle consiste à caractériser le **taux de recouvrement** τ de la surface qui est égal au rapport entre la fraction atomique superficielle réelle et la fraction atomique superficielle maximale de l'espèce considérée. Ce taux est fonction de l'activité de l'espèce dans le milieu environnant (c'est-à-dire une pression partielle pour un gaz et une concentration pour un liquide) ou dans le solide (concentration) :

$$\tau_i = A/(1 + A), \text{ avec :}$$

$$A = (p_i/p_t) \cdot \exp(-\Delta G_i^{\text{ads}}/RT) \text{ pour un gaz}$$

(p_i = pression partielle de l'espèce i , p_t = pression totale,

ΔG_i^{ads} = variation d'enthalpie libre d'adsorption);

$$\tau_i = B/(1 + B), \text{ avec :}$$

$$B = C_i \cdot \exp(-\Delta G_i^{\text{seg}}/RT) \text{ pour un liquide}$$

(C_i = concentration de l'espèce i dans le liquide,

ΔG_i^{seg} = variation d'enthalpie libre de ségrégation).

L'adsorption peut modifier profondément les propriétés des surfaces, par exemple :

- le travail d'extraction des électrons,
- la conductibilité électrique et la susceptibilité magnétique,
- le facettage et la striation, permettant de minimiser l'énergie libre,
- la réactivité, c'est-à-dire les cinétiques des réactions superficielles de germination et de croissance qui vont contribuer à la création d'une ou plusieurs nouvelles phases (oxydation, corrosion électrochimique et passivité),
- les opérations de conditionnement, notamment avant collage,
- les traitements de surface pour assurer de nouvelles fonctionnalités.

□ Exemples de comportements de surfaces modifiés par adsorption

Il existe de très nombreux exemples montrant l'incidence de l'adsorption de différentes espèces sur les propriétés fonctionnelles des métaux. On peut citer notamment :

- l'inhibition du chargement en carbone et azote de la surface de l'acier après adsorption de soufre ou d'oxygène, au cours d'un traitement thermo-chimique,
- la très grande sensibilité des propriétés de résistance au frottement à la présence d'atomes adsorbés : autolubrification du tungstène par ségrégation superficielle d'impuretés comme S ou P,
- dans le cas de contacts lubrifiés, formation de films superficiels favorables résultant de la réaction des additifs ou au contraire, en l'absence d'additifs, carbonisation de la base du lubrifiant par échauffement et dégradation des conditions du contact,
- la chimisorption d'acides gras sur des surfaces métalliques lors de la phase de mise en œuvre par emboutissage ou par laminage avec film mince de lubrifiant qui ne permet pas d'éviter le contact métallique entre les deux surfaces antagonistes, mais qui améliore substantiellement la résistance au grippage,
- la striation et le facetage de surface, induits par l'instabilité de certains plans cristallins et l'obtention de nouveaux profils d'équilibre, qui accompagnent les premiers stades d'oxydation de métaux comme le fer ou le cuivre, étapes strictement bidimensionnelles avant la formation des oxydes,
- la formation d'une couche passive d'hydroxydes de chrome et de fer sur la surface des aciers inoxydables immergés dans des solutions aqueuses d'acides oxydants (nitrique, sulfurique), par phénomènes de germination et croissance,
- l'adsorption d'espèces fluorées lors du polissage chimique de métaux et alliages dans un bain fluonitrique qui peut avoir des conséquences sur l'aptitude au vieillissement de structures collées.

1.1.5 La surface industrielle

■ Introduction

Les caractéristiques des surfaces industrielles sont éloignées de celles des surfaces modèles qui viennent d'être décrites dans le but de présenter une approche globale. En fait, une représentation en trois dimensions est nécessaire pour décrire de telles surfaces, car ce sont les propriétés des couches superficielles qui vont conditionner l'aptitude aux transformations ultérieures, notamment par traitement de surface ou apport d'un revêtement. Une surface industrielle garde l'empreinte du procédé de mise en œuvre : usinage à l'outil, rectification, laminage à froid avec cylindres texturés par grenailage ou ablation laser et lubrification, opération de surfaçage par skin pass sans lubrifiant avec des cylindres ayant subi un poli miroir... Les observations au microscope à balayage permettent de bien distinguer ces surfaces : rayures grossières et régulières par tournage ou régulières et croisées par fraisage, fines rayures par rectification, surface ponctuée par laminage avec un cylindre texturé laser et irrégulièrement morcelée par laminage avec un cylindre grenailé...

■ Représentation schématique d'une surface industrielle

Après qu'elle ait été conditionnée par différentes opérations de traitement thermique, d'usinage et de polissage mécanique, chimique ou électrochimique, une surface placée dans son environnement de travail, apparemment propre, est en fait la

succession d'une série de strates au-dessus du métal sain, qui peut aller de quelques couches atomiques à plusieurs centaines de nanomètres, voire plusieurs μm .

La figure 1.7, montre ce que représente une surface à l'échelle du métallurgiste avec en particulier des couches physisorbée et chimisorbée qui sont la conséquence de l'adsorption sur cette surface de molécules contenues dans l'environnement : O_2 , N_2 , CO_2 , SO_2 , Cl_2 et autres molécules organiques. Au-dessous de ces couches adsorbées, se trouvent des strates qui sont le résultat d'interactions entre le matériau et son environnement lors des phases d'élaboration (entre 10 et 100 nm), puis une zone pouvant atteindre plusieurs μm qui résulte de modifications mécaniques et thermiques lors des phases de mise en œuvre du matériau.

La présence de couches adsorbées concerne la quasi totalité des surfaces des métaux, céramiques et polymères. En fonction de la nature des éléments en présence, les liaisons pourront être de nature physique (physisorption) ou chimique (chimisorption), les couches chimisorbées se caractérisant par les forces de liaison les plus grandes.

1.2 Critères fonctionnels des surfaces industrielles

1.2.1 Introduction

Dans la mesure où la surface industrielle est le résultat de conditionnements mécaniques (mise en œuvre par usinage, rectification ou déformation par différents types d'outillage), métallurgiques (traitement thermique ou thermo-chimique), en liaison avec différents types d'atmosphères gazeuses ou de lubrifiants, ses caractéristiques font appel à différents domaines de compétence pour les évaluer. Il faudra

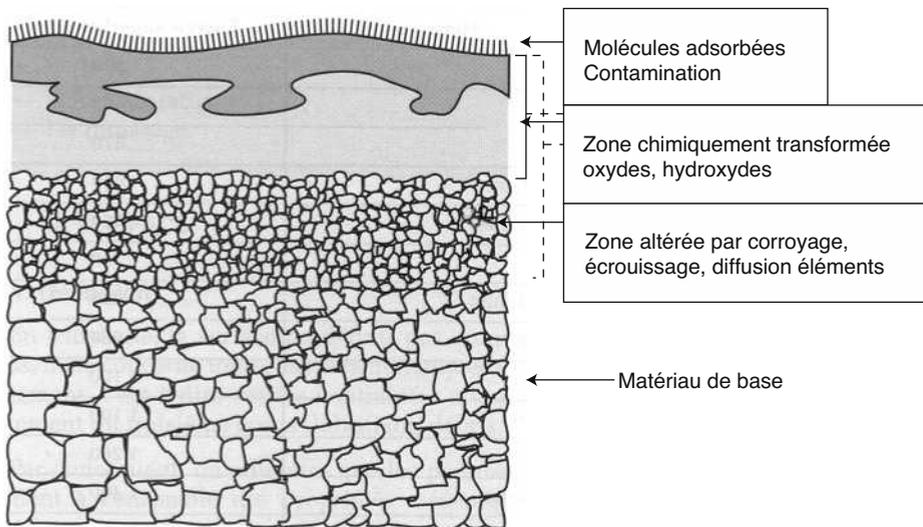


Figure 1.7 – Représentation schématique de l'état structural et analytique d'une surface après préparation par différentes méthodes.

un appui métallurgique, pour connaître les évolutions de structure et les effets éventuels de texture apportés par les différentes gammes de traitements réalisés, il faudra également un appui mécanique pour mesurer les déformations et en déduire l'état des contraintes résiduelles, ainsi que la charge d'application en liaison avec des critères géométriques tels que le tracé du profil de rugosité qui permettra de définir la notion de portance. Il faudra enfin un appui de physico-chimie, d'une part pour déterminer la réactivité d'une surface métallique réelle, en liaison avec les mécanismes d'adhésion, d'autre part pour connaître la nature des éléments chimiques présents en surface, leur concentration et dans la mesure du possible la nature de leur liaison.

1.2.2 Critères physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des surfaces, liées à la présence de couches adsorbées et d'une sous-couche que l'on peut regrouper sous le nom de films superficiels jouent un rôle fondamental sur de nombreux phénomènes de dégradation des surfaces comme l'usure ou la corrosion. La formation de ces films superficiels est liée à des **critères chimiques**, comme la cinétique d'oxydation, les possibilités de réaction avec des films de polymères, des lubrifiants, ainsi que les affinités entre éléments d'alliages constituant les deux surfaces antagonistes. La formation de ces films est également liée à des **critères physiques** tels que la conductibilité thermique et le pouvoir réflecteur.

■ Critères chimiques

Dans la pratique, une surface métallique a des propriétés spécifiques liées, soit à la présence de couches superficielles à caractère ionique ou covalent (oxyde, film de nature organique), conséquence de la gamme de fabrication du produit, soit à l'existence d'hétérogénéités dans la composition chimique superficielle comme la précipitation d'impuretés dans les joints de grains, les ségrégations d'éléments résiduels, ou la présence d'espèces étrangères chimisorbées. Il résulte de cette situation des déséquilibres dans la population électronique superficielle qui se traduisent au plan énergétique par la formation de charges électrostatiques qui modifient la répartition des lignes isopotentielles à la surface du solide. Les champs électrostatiques ainsi créés contribuent à l'activation de sites réactifs superficiels par une modification de leur affinité électronique (renforcement du caractère donneur ou accepteur d'électrons). Il se déduit de ces considérations que la surface d'un solide métallique réel peut être décrite comme un ensemble complexe de sites caractérisés par des affinités réactionnelles différentes (accepteur, neutre ou donneur d'électrons). La densité relative et la réactivité de ces sites sont liées, d'une part à la nature chimique du solide métallique et d'autre part à sa gamme de préparation.

Les possibilités de réaction d'une surface métallique avec des polymères ou des lubrifiants sont la conséquence directe de la formation de cet ensemble complexe de sites réactifs. En effet, de nombreuses molécules organiques sont caractérisées au niveau de leur squelette moléculaire par la présence d'un groupement fonctionnel induisant un moment dipolaire permanent. Il en résulte que sous l'influence de champs électriques superficiels, des phénomènes d'orientation vont se produire et

conduire à la sélection de sites susceptibles d'entrer en interaction. Il se crée ainsi entre les sites réactifs de la surface et ceux de la molécule organique en contact des **couples donneur accepteur** qui peuvent interagir par un processus du type **acide base** au sens de Lewis, si les conditions énergétiques sont favorables (7).

La cinétique d'oxydation est également un critère associé à la réactivité chimique de la surface métallique. Le critère important dans ce cas est l'ensemble des **caractéristiques rhéologiques** des couches d'**oxydes** en fonction de la température. Certains oxydes peuvent se comporter comme de véritables lubrifiants, et protéger la surface métallique contre toute dégradation par usure. C'est par exemple le cas de l'oxyde de fer FeO à la différence de la magnétite Fe_3O_4 qui est dure et fragile, comme le montrent les courbes de la figure 1.8.

La présence de **couches adsorbées** est également un **facteur limitant du travail d'adhésion** dans le contact de deux surfaces antagonistes. L'énergie d'adhésion est d'autant plus basse que la somme des énergies superficielles des deux surfaces antagonistes est plus faible. Pour les couples métalliques, les énergies d'adhésion les plus fortes correspondent au contact de métaux identiques avec des valeurs pouvant atteindre plusieurs milliers d'ergs. cm^{-2} . Les affinités entre éléments d'alliage des deux surfaces antagonistes constituent donc un critère chimique responsable des risques d'adhésion entre deux éléments métalliques en contact.

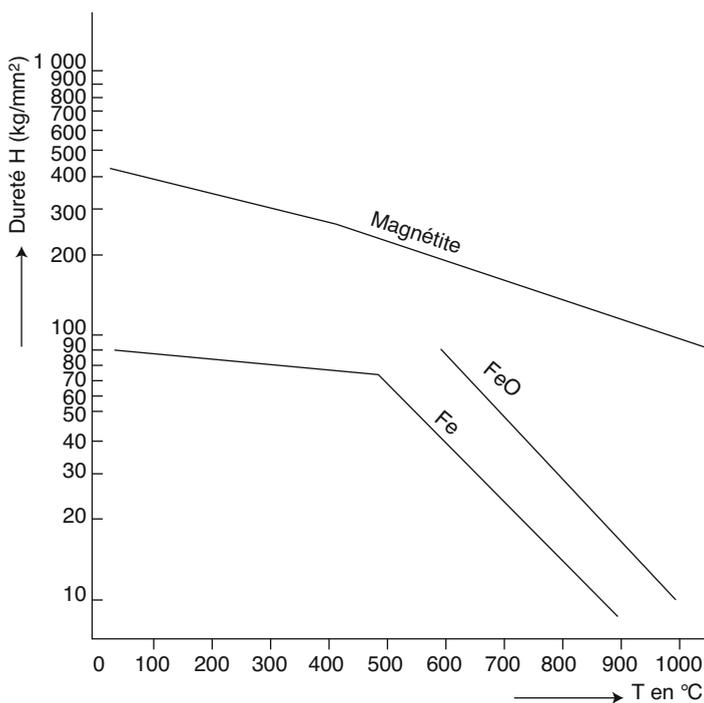


Figure 1.8 – Dureté des oxydes de fer en fonction de la température.

■ Critères physiques

Les critères physiques les plus représentatifs d'une surface métallique sont la **conductivité thermique** et le **pouvoir réflecteur**. Ces critères sont déterminants, le premier pour évacuer un flash thermique au sein du matériau en réduisant ainsi le gradient de température et le second pour limiter l'impact de ce même flash thermique dans le matériau. A titre d'exemple, un faisceau laser sera parfaitement réfléchi par une surface métallique d'acier inoxydable poli et il n'y aura pratiquement pas d'interaction laser matière. Le pouvoir réflecteur est par ailleurs un critère majeur dans tous les domaines d'application où la perception visuelle du matériau fait partie des critères de choix, comme en architecture ou dans l'industrie automobile. Une bonne conductivité thermique permettra d'évacuer plus facilement un apport de calories dans l'outillage lors de la mise en œuvre de matières plastiques. C'est pour cette raison que l'industrie de la plasturgie utilise de plus en plus de moules en alliages d'aluminium, notamment pour les moyennes séries car le gain au niveau productivité industrielle par rapport à l'acier est voisin de 70 % (8).

1.2.3 Critères géométriques

La description complète de la géométrie réelle d'une surface est relativement complexe puisqu'elle doit faire intervenir l'ensemble des défauts identifiables depuis l'échelle de la pièce jusqu'à l'échelle atomique. La topographie d'une surface regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques ou les écarts par rapport à la surface idéale qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact.

Les **irrégularités** d'ordre **macrogéométrique** correspondent à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice : les écarts de forme (1^{er} ordre) et les ondulations (2^e ordre) font partie de telles irrégularités. Il s'agit notamment de profils générés par exemple par le traitement thermique (ondulations du 1^{er} ordre) ou par l'usinage d'ébauche à l'outil (ondulations du 2^e ordre).

Les **irrégularités** d'ordre **microgéométrique** comprennent les écarts de faible amplitude dus à l'usinage (phases de finition mécanique), aux grains d'abrasifs, aux particules de sablage ou de grenailage ou éventuellement à des mécanismes vibratoires. Il s'agit de petites irrégularités qui appartiennent aux écarts du 3^e ordre par rapport à la surface géométrique, ainsi que le montrent les illustrations de la figure 1.9. La norme NF E 05 015 de décembre 1982 retient un certain nombre de critères pour caractériser ces écarts géométriques de profils : les prescriptions géométriques selon la norme NF E 04 552 de novembre 1983 pour les écarts du 1^{er} et du 2nd ordre (écarts de forme et ondulations), la symbolisation des écarts géométriques du 2^e au 4^e ordre (ondulations, stries et sillons périodiques ou pseudo périodiques, piqûres apériodiques) selon la norme NF E 05 016 de juin 1978. La procédure de traitement consistant à décomposer le profil en une succession de motifs élémentaires (motifs de rugosité) composés de deux pics entourant un creux et à y associer des motifs d'ondulation correspondant à la courbe enveloppe

des sommets a été utilisée pour l'établissement d'une norme européenne NF EN ISO 12085 en mars 1998 (9).

Les paramètres principaux qui sont définis par profilométrie bidimensionnelle sont la **rugosité moyenne arithmétique R_a** , la **rugosité maximale R_t** qui représente la dénivellation entre le pic le plus haut et la vallée la plus basse du matériau sur la longueur de la mesure ou la **rugosité R_z** qui est calculée sur la moyenne arithmétique de 5 ondulations successives. Une représentation schématique de R_a et R_z est donnée sur les figures 1.10 et 1.11.

Les irrégularités géométriques du 1^{er} et du 2nd ordre influent sur les fonctionnalités suivantes : le frottement de glissement et de roulement, l'étanchéité statique et dynamique, la charge unitaire en liaison avec la notion de portance. Les irrégularités du 3^e ordre influent sur les écoulements de fluides, la tenue à la fatigue sous toutes ses formes (fatigue dans la masse, fatigue de surface, fatigue thermique) et les irrégularités du 4^e ordre influent sur la tenue d'un revêtement ou l'adhésion polymère métal. Il est à signaler que les irrégularités du 4^e ordre ne sont pas prises en compte dans les critères de rugosité précédemment définis, mais qu'on peut les identifier qualitativement sur les relevés profilométriques précédemment définis.

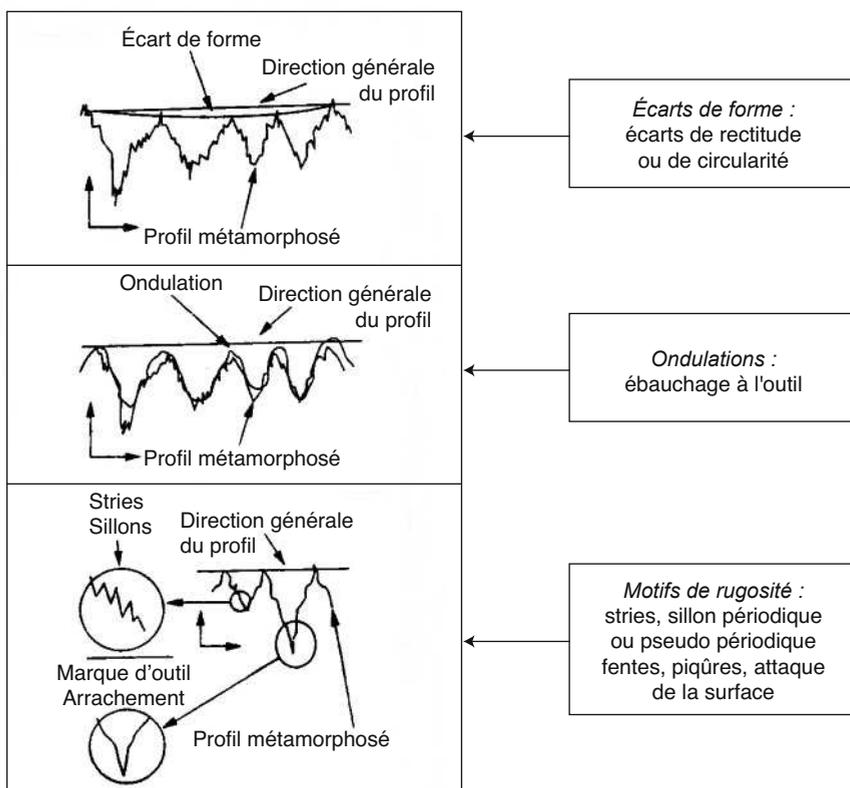


Figure 1.9 – Classification des écarts géométriques d'une surface selon la norme NF E 05015 de décembre 1982.

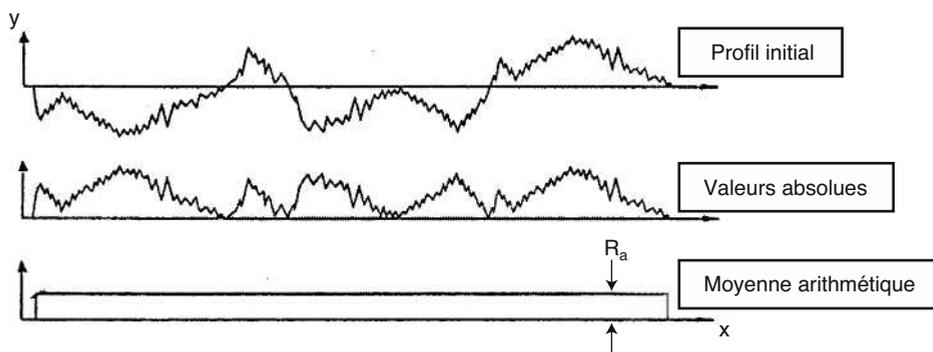


Figure 1.10 – Détermination de la rugosité quadratique moyenne :

$$R_a = 1/n \cdot \sum_1^n |y_i|.$$

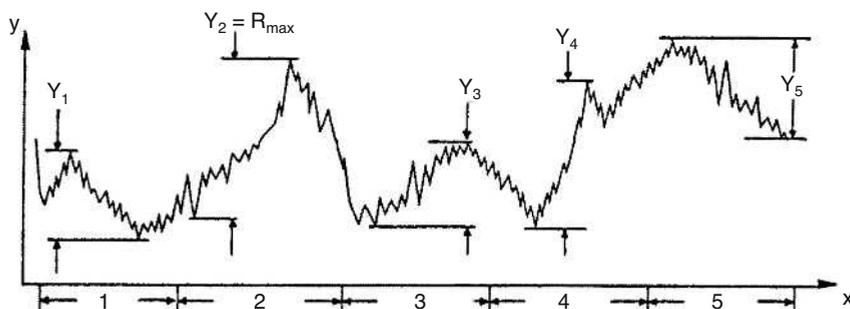


Figure 1.11 – Détermination de la rugosité R_z sur la moyenne de 5 ondulations successives. $R_z = 1/5 \cdot \sum_1^5 Y_i$.

1.2.4 Critères mécaniques

Ces critères sont à prendre en compte dans le contact de deux surfaces métalliques, où intervient la notion de portance, c'est-à-dire le contact entre sommets de rugosité. Il s'agit essentiellement du module d'élasticité, du niveau de dureté et de la résistance à la fissuration, ainsi que de l'état des contraintes résiduelles.

■ Résistance mécanique

Il s'agit de la rigidité et de la ténacité des irrégularités géométriques de la surface définies précédemment. En effet, la capacité de déformation des motifs de rugosité peut avoir une incidence favorable pour des conditions de lubrification hydrodynamiques (rodage d'une surface), en augmentant la surface de contact et en diminuant la charge unitaire d'application. Cependant, la déformation des motifs de rugosité peut favoriser les phénomènes d'adhésion en l'absence de lubrification ou dans des conditions de lubrification « limites » qui n'empêchent pas le contact métallique entre surfaces antagonistes. La résistance mécanique de la surface et la ductilité du matériau sont dans ce cas des critères mécaniques très importants car

ils vont piloter le comportement des motifs de rugosité à la déformation. Ces critères ont également une très grande influence sur l'amorçage des fissures lors d'un processus de fatigue (dans la masse ou en surface).

Ces mêmes caractéristiques en température sont également d'une grande importance pour des conditions de contact métallique sévères (fortes charges d'application ou vitesse de glissement élevée) en raison de l'élévation de la température du contact, ou lorsqu'une surface métallique est en contact avec une matière chauffée pour un procédé de mise en forme (cas des outillages de forge ou d'extrusion et des moules de coulée d'alliages métalliques). Le comportement en température des motifs de rugosité va également être très influent sur l'amorçage des fissures de fatigue thermique.

■ Contraintes résiduelles

Il s'agit également d'un critère déterminant pour le comportement d'une surface sollicitée mécaniquement. Il s'agit des contraintes existant dans une pièce en l'absence de toute contrainte extérieure, dont l'origine est liée à la préparation de la pièce.

Ces contraintes résiduelles peuvent être de **compression** après un traitement de mise en forme à froid, de déformation plastique superficielle (grenailage par exemple), après un traitement thermique ou thermochimique, elles seront dans ce cas plutôt favorables sauf si la surface est soumise à de fortes charges d'application auquel cas il peut y avoir risque de rupture des motifs de rugosité par compression.

Ces contraintes peuvent être également de **tension** dans des conditions d'usinage mal adaptées (par exemple une rectification sévère) ou lors d'opérations de soudage et de rechargements mettant en jeu de forts gradients thermiques. Elles seront dans ce cas plutôt défavorables, notamment pour l'amorçage de fissures de fatigue (mécanique ou thermique) dans les creux des motifs de rugosité, zones où se concentrent les sollicitations mécaniques. Elles pourront être également à l'origine de phénomènes de corrosion sous contrainte en présence de milieux agressifs.

1.2.5 Critères métallurgiques

La structure cristallographique de la surface d'un métal est également un critère déterminant pour son comportement au contact d'un autre métal, et cela en liaison avec les critères environnementaux comme la température ou la nature de l'atmosphère.

■ Structure cristallographique

La nature du réseau cristallin est un paramètre important. Par exemple, les mesures du coefficient d'adhésion de différents métaux sur eux mêmes ont conduit au classement suivant par ordre décroissant d'aptitude à l'adhésion :

- systèmes cubiques à faces centrées,
- systèmes cubiques centrés,
- systèmes hexagonaux.