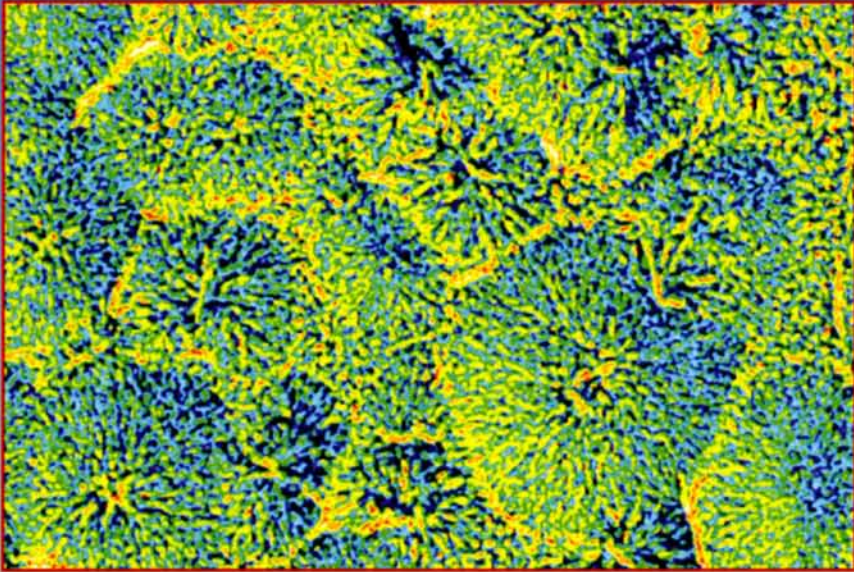


PHYSIQUE ET INGÉNIERIE DES SURFACES

A. CORNET et J.-P. DEVILLE



PHYSIQUE ET INGÉNIERIE DES SURFACES

A. Cornet

Ingénieur ENSAIS
Docteur ès Sciences physiques
Professeur des universités
Professeur à l'École Nationale Supérieure
des Arts et Industries de Strasbourg

J.-P. Deville

Ingénieur ENSCS
Docteur ès Sciences physiques
Directeur de recherche au CNRS



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

MONOGRAPHIES DE MATÉRIALOGIE

Directeur de collection : Jean PHILIBERT

Ouvrages déjà parus

Mécanique de la rupture

D. Miannay

Les quasicristaux, matière à paradoxes

C. Janot et J.-M. Dubois

Ouvrage à paraître

Objets et matériaux polymères : le pourquoi et le comment

M. Carrega

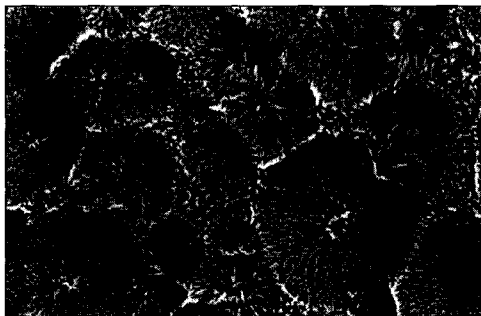


Illustration de couverture : Surface d'un polymère traitée par décharge corona afin de permettre l'accrochage des encres d'impression (voir Fig. 7.26).

ISBN : 2-86883-352-7

ISSN : 1275-3807

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© EDP Sciences 1998



Avant-propos

Physique et ingénierie des surfaces est un ouvrage qui se veut le point de rencontre entre les sciences pour l'Ingénieur et la physique des Surfaces.

La science des Surfaces existe à Strasbourg : Stanislas Goldsztaub fut, avec son équipe, un pionnier dans ce domaine depuis plus de trente-cinq ans. Il avait conçu et développé les premiers diffracteurs d'électrons lents de la seconde génération. Grâce à lui, des spectres Auger destinés à l'analyse des surfaces ont été observés pour la première fois en France. Petit à petit, avec l'aide des grands organismes de recherche, de l'université Louis Pasteur, des écoles d'ingénieurs et de la région Alsace, se sont constituées des équipes qui ont développé avec constance des instruments et des méthodes pour comprendre les phénomènes qui ont lieu au voisinage des surfaces. La catalyse, la mécanique des surfaces, les propriétés optiques, électroniques et magnétiques des interfaces dans les nouveaux matériaux en sont quelques exemples.

Ce livre est né aussi de l'enseignement donné à Strasbourg aux élèves ingénieurs de l'École nationale supérieure des arts et industries (ENSAIS) et aux étudiants du DESS « Techniques de dépôt des matériaux en couches minces », puis à Bucarest dans le cadre d'un module d'enseignement en français qui porte le nom du présent ouvrage. À ce titre, nous voudrions remercier les initiateurs de ces enseignements et les étudiants, notamment nos amis roumains qui s'astreignent à découvrir une science nouvelle dans une langue qui n'est pas la leur.

Si chacun connaît le mot surface, il n'a pas pour tout le monde la même signification. Le mathématicien conçoit une surface au sens de Laplace comme une entité sans épaisseur, le géologue l'entend comme la partie supérieure de la croûte terrestre épaisse de quelques kilomètres. Entre ces extrêmes, prennent place toutes sortes de définitions (y compris celle qui nous est, hélas, offerte par la langue de bois administrative qui fait d'un agent de nettoyage un technicien de surface). C'est pourquoi cet ouvrage voudrait comprendre la surface comme

une zone pénétrant le volume sur une épaisseur allant des premiers nanomètres à, parfois, quelques centaines de micromètres et permettre ainsi à deux communautés scientifiques et technologiques de se rencontrer et de confronter leurs concepts : celle des « métallurgistes » (au sens large) qui se préoccupent surtout des matériaux de structure (tournés vers les propriétés mécaniques et la protection vis-à-vis des agressions chimiques) et celle des physiciens et physico-chimistes des surfaces qui étudient plutôt les matériaux de fonction (orientés vers les propriétés électroniques, optiques ou magnétiques). Par convention, on parlera de **surface** pour la séparation entre une phase diluée (gaz) et une phase condensée (liquide ou solide), d'**interface** pour une séparation entre deux phases condensées (liquide/liquide, liquide/solide, solide/solide). Quoique consacré pour l'essentiel aux surfaces, cet ouvrage traitera aussi d'interfaces, sachant que la différence entre les deux concepts est souvent faible, notamment en thermodynamique. Mais dans ce texte, hormis le mouillage, nous considérerons rarement les interfaces mettant en présence des liquides. Celles-ci sont très bien décrites dans les ouvrages qui traitent de la corrosion ou de l'électrochimie.

La plupart des ouvrages traitent les surfaces comme des entités « en soi » et les envisagent essentiellement comme étant le siège de propriétés spécifiques (adsorption physique ou chimique, corrosion, catalyse...). En revanche, peu d'ouvrages sont consacrés à l'état mécanique des surfaces et à ce qu'on pourrait appeler leur ingénierie. Il s'agit ici d'étudier la surface **après son élaboration**, donc d'analyser sa morphologie, sa structure, sa composition après sa création ou sa modification. En réalité, dans de nombreuses applications industrielles cet « état mécanique » joue un rôle important sur les propriétés et il est nécessaire de connaître les concepts physiques ou physico-chimiques qui permettent de le décrire, le caractériser et le comprendre.

Nous débutons cet ouvrage par la création de la surface (clivage, étirement, dressage mécanique, dépôt de matière, modification physico-chimique...). Nous montrons que la surface considérée comme séparation arbitraire d'un volume ou d'un cristal en deux parties non affectées par la coupure n'est pas stable. À partir de notions simples de thermodynamique classique (quantités d'excès de Gibbs notamment), nous établissons que la tension superficielle est reliée directement à un potentiel thermodynamique dont la minimisation permet de comprendre l'évolution tant de la surface propre sous vide (métaux, semi-conducteurs) que des surfaces créées à l'air libre ou en atmosphère contrôlée (polymères, matériaux). C'est dans ce premier chapitre que nous abordons relaxation, reconstruction, adsorption, mouillabilité.

Ensuite, dans un second chapitre, nous commençons la description de l'état mécanique et géométrique des surfaces en nous intéressant notamment aux définitions de la rugosité. Nous voudrions montrer que les concepts de rugosité utilisés dans la technologie des traitements de surface sont universels et que seules les échelles de résolution des instruments de mesure changent. Ce chapitre est aussi le début d'une exploration vers la profondeur du matériau sous-jacent car, outre la rugosité, nous prenons en compte contraintes et dureté superficielles.

La question du comportement mécanique des surfaces et celle de leurs propriétés fonctionnelles (frottement et usure) sont traitées dans le troisième

chapitre, à partir des mécanismes de base, en dégageant et expliquant les transformations de surface (formation de couches d'oxydes, adhésion entre surfaces frottantes, transformations métallurgiques superficielles induites, évolution des surfaces portantes...). Bien que la corrosion soit une grande cause de dégradation des surfaces nous avons volontairement choisi de ne pas la traiter en raison de l'ampleur du sujet ; elle est cependant présente à travers les états de la surface qui risquent de l'induire ou qui permettent de l'éviter.

Le quatrième chapitre met en place les concepts physiques nécessaires à la compréhension des méthodes d'analyse des surfaces suivant les trois aspects évoqués dans le premier paragraphe (morphologie, structure, composition). Nous attachons une grande importance à l'analyse morphologique qui décrit le mieux l'état mécanique des surfaces et nous abordons l'analyse de rugosité en allant du « plus gros » au « plus fin », de la rugosité microscopique à la rugosité atomique, du palpeur à l'AFM en passant par le nanoindenteur. Ceci suppose une connaissance préalable des forces s'exerçant au voisinage des surfaces : elles sont rappelées brièvement en référence à l'œuvre d'Israelachvili. Du point de vue des méthodes structurales et analytiques, il était difficile de ne pas faire un rappel sur l'interaction rayonnement-matière dans la mesure où ions, rayons X, électrons, lasers interviennent de façon majeure dans l'étude et la modification des surfaces. Une étude plus poussée du transfert d'énergie dans le cas de l'interaction photon-matière (cas de l'ablation laser notamment) a semblé nécessaire face à la relative rareté des ouvrages disponibles sur ce sujet.

Le cinquième chapitre décrit les méthodes en elles-mêmes. Le choix de ces méthodes est guidé par le fait qu'elles doivent être déjà utilisables dans le domaine industriel ou en voie de l'être dans un proche futur. Les méthodes plus académiques comme la diffraction d'électrons lents ou connues depuis très longtemps comme les isothermes d'adsorption (méthode BET) sont amplement discutées dans d'autres publications. Nous décrivons donc à l'aide de nombreux exemples tirés de notre expérience :

- la diffraction des rayons X rasants et la réflectométrie (spéculaire et diffuse), la microscopie à force atomique (AFM), la nanoindentation, la microscopie à balayage (MEB) et les mesures de rugosité avec ou sans contact ;
- la décharge luminescente (SDL), la spectroscopie Auger et la photoémission (ESCA), les spectroscopies de masse d'ions secondaires (SIMS et SNMS) et les spectroscopies d'absorption (EXAFS).

Le sixième chapitre traite des méthodes de préparation des surfaces. Comment déposer des couches actives ou protectrices, comment introduire des contraintes mécaniques dans la région superficielle, comment utiliser des faisceaux d'ions ou des rayonnements laser, telles seront nos préoccupations majeures.

Le septième et dernier chapitre est une étude de cas où l'on montre de nombreux exemples de réalisations techniques appliquées aux modifications de surface. Par cette approche, nous espérons couvrir un spectre suffisamment large, allant des matériaux de structure aux matériaux de fonction, incluant les couches de protection comme les couches actives.

L'étude des problèmes d'adhésion et de collage qui pourrait évidemment s'inscrire dans ces exemples nous semble suffisamment vaste, notamment du

point de vue des concepts physico-chimiques mis en jeu, pour faire l'objet d'un autre ouvrage... que nous n'écrirons certainement pas !

Notre travail vise à donner une vue d'ensemble sur l'évolution des connaissances sur les surfaces, leurs traitements et leur analyse. Il est conçu pour les étudiants (formations d'ingénieurs, DESS, DEA...), les jeunes chercheurs et les industriels, pour un usage allant du bureau d'études à la formation continue. Par conséquent, aucun des sujets abordés ne peut être traité dans son intégralité. La plupart d'entre eux justifieraient un développement de la même ampleur que le présent ouvrage. L'important est d'acquérir une base sur chaque procédé ou chaque méthode et surtout de bien comprendre la cohérence entre les diverses techniques.

La part théorique est minimisée car nous avons surtout cherché à privilégier les mécanismes physiques des éléments présentés. Dans le même esprit, la bibliographie ne prétend pas être exhaustive : elle est très partielle et certainement partielle. Elle doit être considérée comme une clé permettant au lecteur de retrouver les autres publications afin qu'il puisse développer par lui-même tout point l'intéressant plus particulièrement. Enfin, les techniques d'étude et d'ingénierie des surfaces évoluent très vite et il ne semble pas nécessaire de surcharger le texte d'informations qui seront probablement périmées dans quelques années.

Alain Cornet et Jean-Paul Deville
Strasbourg, Bucarest, mai 1998.



Table des matières

Petit lexique des acronymes et abréviations.....	1
---	----------

1 • Propriétés physico-chimiques des surfaces

1. Description des surfaces	10
1.1. <i>Surface idéale d'un solide.....</i>	10
1.2. <i>Surface réelle d'un matériau</i>	13
1.3. <i>Critères de stabilité et d'évolution d'une surface</i>	15
2. Reconstruction et relaxation	22
2.1. <i>Définitions.....</i>	23
2.2. <i>Relaxation.....</i>	24
2.3. <i>Les grands types de reconstruction</i>	26
3. Mouillabilité	31
3.1. <i>Interfaces liquide-solide.....</i>	32
3.2. <i>Interfaces solide-solide</i>	33
3.3. <i>Mouillabilité pratique</i>	37

2 • Topographie et mécanique des surfaces

1. Topographie des surfaces	41
1.1. <i>Importance de la topographie des surfaces</i>	41
1.2. <i>Topographie aléatoire et topographie déterministe</i>	42
1.3. <i>Perception et échelle de mesure</i>	45
1.4. <i>Les paramètres des surfaces</i>	46
1.5. <i>Profilométrie 2D</i>	48
1.6. <i>Vers une topographie 3D</i>	58
1.7. <i>De la topographie à l'ingénierie des surfaces</i>	58
2. Contraintes superficielles	59
2.1. <i>Importance des contraintes superficielles</i>	59
2.2. <i>Origine physique des contraintes superficielles</i>	61
2.3. <i>Critères de qualité des contraintes superficielles</i>	66
3. Dureté superficielle	70
3.1. <i>De la macrodureté à la dureté superficielle</i>	70
3.2. <i>La nanoindentation</i>	74
3.3. <i>Caractérisation des couches minces</i>	82

3 • Tribologie : frottement et usure des surfaces

1. Contact et frottement entre solides	89
1.1. <i>Contact entre surfaces</i>	89
1.2. <i>Introduction au frottement</i>	93
1.3. <i>De la nanotribologie à la macrotribologie</i>	99
2. Principaux modes d'usure des surfaces	106
2.1. <i>Usure abrasive</i>	108
2.2. <i>Usure adhésive</i>	111
2.3. <i>Usure induite par petits débattements</i>	117
2.4. <i>Usure par fatigue superficielle</i>	120
2.5. <i>Usure par fatigue thermique superficielle</i>	122
2.6. <i>Usure par érosion et/ou cavitation</i>	125
2.7. <i>Usure par corrosion sous frottement</i>	129
3. Frottement, usure et ingénierie des surfaces	130
3.1. <i>Approche expérimentale et cartes de mécanismes d'usure</i>	130
3.2. <i>Modélisation de l'usure en frottement sec</i>	131

3.3. Application à l'étude de l'usure en petits débattements	135
3.4. Usure et frottement des outillages	137

4 • Bases physiques de l'analyse des surfaces

1. Interaction rayonnement – matière	141
1.1. Relation énergie – longueur d'onde	141
1.2. Interaction rayons X – matière	142
1.3. Interaction électron – matière	155
2. Les forces atomiques et moléculaires	157
2.1. Les forces coulombiennes	159
2.2. Les forces dipolaires	159
2.3. Interactions avec les molécules polarisables	160
2.4. Les forces de dispersion	160
2.5. La mesure des forces atomiques et moléculaires	161
3. L'effet tunnel	161

5 • Méthodes d'analyse de l'ingénieur des surfaces

1. Essai de classement des méthodes d'analyse	163
2. Caractérisation morphologique	168
2.1. Rugosité.....	168
2.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	179
2.3. Microscopies en champ proche	183
3. Caractérisation mécanique	188
3.1. Mesures par nanoindentation	188
3.2. Mesure des contraintes superficielles	191
4. Caractérisation structurale	202
4.1. Diffraction rasante et réflectométrie X.....	202
4.2. Les spectroscopies d'absorption (EXAFS – SEXAFS).....	208
4.3. Ellipsométrie	209

5. Caractérisation physico-chimique	215
5.1. <i>Les bases de la mesure des angles de contact</i>	215
5.2. <i>L'analyse dynamique des angles de contact</i>	216
6. Caractérisation chimique	218
6.1. <i>Spectroscopie des électrons Auger</i>	218
6.2. <i>Spectroscopie de photoélectrons induits par les rayons X</i>	227
6.3. <i>Spectroscopie par décharge lumineuse</i>	233
6.4. <i>Spectroscopie de masse d'ions ou de neutres secondaires</i>	236

6 • Méthodes de préparation des surfaces

1. Essai de classement des méthodes de préparation	243
2. Traitements hors équilibre	247
2.1. <i>Implantation ionique</i>	247
2.2. <i>Techniques laser</i>	256
3. Introduction de précontraintes mécaniques	268
3.1. <i>Exemple du grenailage</i>	268
3.2. <i>Exemple du choc laser</i>	271
4. Réalisation de couches minces par PVD et CVD	272
4.1. <i>Dépôt physique en phase vapeur – PVD</i>	273
4.2. <i>Dépôt chimique en phase vapeur – CVD</i>	274
5. Essai de comparaison des méthodes	275
5.1. <i>Les paramètres physiques</i>	275
5.2. <i>Les paramètres pratiques</i>	276
5.3. <i>Les matériaux déposés</i>	277
6. Réalisation de multicouches	277

7 • Étude de cas

1. Traitements de surface des ressorts de soupapes	279
1.1. <i>Fabrication des ressorts et traitements de surface</i>	281
1.2. <i>Mesure des contraintes superficielles</i>	283

2. Quelques traitements de surface de biomatériaux	285
2.1. <i>Implantation ionique</i>	287
2.2. <i>Dépôts sous plasma froid</i>	289
2.3. <i>Nitruration CVD assistée plasma avec diffusion</i>	290
2.4. <i>Caractérisation et test des traitements</i>	291
3. Mise en œuvre des techniques laser	293
3.1. <i>Décapage des surfaces</i>	294
3.2. <i>Exemple de traitement thermique</i>	295
3.3. <i>Exemples de refusion superficielle sans alliage</i>	296
3.4. <i>Exemples de refusion avec alliage superficiel</i>	299
4. Nucléation et croissance de couches diamant par CVD	300
5. Modification de surfaces de polymères par plasma	308
5.1. <i>Traitements de surface de Nylon 6 par plasma micro-ondes</i>	309
5.2. <i>Étude macroscopique de la surface modifiée</i>	310
5.3. <i>Étude microscopique de la surface modifiée</i>	312
6. Synthèse et croissance d'un matériau pour la catalyse hétérogène : le carbure de silicium de haute surface spécifique	314
6.1. <i>Synthèse, nucléation et croissance de carbure de silicium de haute surface spécifique</i>	315
6.2. <i>Mise en évidence du mécanisme de croissance VLS de whiskers de SiC</i>	315
6.3. <i>Du matériau à la catalyse : nanoparticules métalliques dispersées sur du SiC dopé</i>	318
7. Couches minces pour l'enregistrement magnétique	319
7.1. <i>Croissance de cobalt sur la face (001) du chrome</i>	320
7.2. <i>Croissance de chrome sur la face (0001) du cobalt</i>	323
7.3. <i>Étude des propriétés magnétiques</i>	325
 Annexe A : Les fractales	 327
Annexe B : Introduction aux systèmes dynamiques	 331



Petit lexique des acronymes et abréviations

Ce lexique n'est pas exhaustif. L'inventivité des spectroscopistes et autres analystes est sans limite. De nouveaux termes sont créés ou modifiés chaque année. Certaines abréviations sont utilisées en préfixe ou en suffixe : elles sont soulignées dans ce lexique. Notre choix dépasse les seules méthodes d'analyse des surfaces pour offrir au lecteur de publications spécialisées le moyen de comprendre des titres comme ceux-là :

* *Studies of polymorphic systems using the methods of FTIR, DRIFT, ¹³C-, CP/MAR/NMR, DTA and XRD.*

* *An investigation of the structures of the chemisorbed species from hydrocarbons on metal surfaces using FTIR and EELS in conjunction with LEED, AES and TPD.*

AAS : **Atomic absorption spectroscopy**
Spectroscopie d'absorption atomique

AES : **Auger electron spectroscopy**
Spectroscopie des électrons Auger

mais aussi

AES : **Atomic emission spectroscopy**
Spectroscopie d'émission atomique

AFM : **Atomic force microscopy**
Microscopie à force atomique

AFS : **Atomic fluorescence spectroscopy**
Spectroscopie de fluorescence atomique

ALE : **Atomic layer epitaxy**

AP : **Atom probe**
Sonde atomique

<u>AR</u> :	Angular resolved <i>Résolu angulairement</i>
ARUPS :	Angular resolved ultraviolet photoemission spectroscopy <i>Photoémission UV résolue angulairement</i>
ATD :	DTA <i>Analyse thermique différentielle</i>
<u>ATR</u> :	Attenuated total reflection <i>Réflexion totale atténuée</i>
bcc :	body centered cubic (voir cc)
BET :	Brunauer, Emmett, Teller
BIS :	Bremstrahlung Isokromat Spektroskopie <i>Photoémission inverse</i>
CARS :	Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy <i>Spectroscopie Raman anti Stokes cohérente</i>
cc :	<i>cubique centré</i> (voir bcc)
<u>CD</u> :	Circular dichroism <i>Dichroïsme circulaire</i>
CER :	<i>Constante d'élasticité radiocristallographique</i>
cfc	<i>cubique à faces centrées</i> (voir fcc)
CP/MAR/NMR :	Cross polarization magic angle rotation NMR <i>RMN en polarisation croisée à l'angle magique</i>
CSM :	Continus stiffness measurement <i>Nanoindentation dynamique</i>
CVD :	Chemical vapor deposition <i>Déposition en phase vapeur par voie chimique</i>
DAS :	Dimer adatom stacking fault <i>Dimère adatome faute d'empilement</i>
<u>DCP</u> :	Direct current plasma <i>Plasma induit en courant continu</i>
DRS :	Direct recoil spectroscopy <i>Spectrométrie à temps de vol</i>
DRIFT :	Diffuse reflectance infrared spectroscopy (with FT) <i>Spectroscopie infrarouge en réflectance diffuse (avec TF)</i>
DSC :	Differential scanning calorimetry <i>Calorimétrie à balayage différentiel</i>
DTA :	Differential thermal analysis (voir ATD)

EBIC :	Electron beam induced current <i>Courant induit par un faisceau d'électrons</i>
EBSD :	Electron back scattered diffraction <i>Diffraction d'électrons rétrodiffusés</i>
ECR :	Electron cyclotron resonance <i>Résonance cyclotron électronique</i>
EDS :	Energy dispersive spectrometer <i>Spectromètre à dispersion d'énergie</i>
EDX :	Electron dispersion X-ray (spectroscopy) <i>Analyse en spectroscopie dispersive des rayons X</i>
EELS :	Electron energy loss spectroscopy <i>Spectroscopie de pertes d'énergie électroniques</i>
ENDOR :	Electron and nuclear double resonance <i>Double résonance électronique et nucléaire (pratiquée en RPE)</i>
EPMA :	Electron probe microanalysis <i>Microsonde électronique, ou Sonde de Castaing</i>
ESCA :	Electron spectroscopy for chemical analysis <i>Spectroscopie électronique pour l'analyse chimique (voir XPS)</i>
ESD :	Electron stimulated desorption <i>Désorption assistée par les électrons</i>
ESR :	Electron spin resonance <i>Résonance paramagnétique électronique (RPE)</i>
EXAFS :	Extended X-ray absorption fine structure <i>Spectroscopie d'absorption X étendue</i>
FABMS :	Fast atom bombardment mass spectrometry <i>SIMS statique avec des faisceaux de neutres</i>
fcc	face centered cubic (voir cfc)
FIM :	Field ion microscopy <i>Microscopie ionique à effet de champ</i>
FIP :	Fretting fatigue <i>Fatigue induite en petits débattements</i>
<u>FIR</u> :	Far infrared <i>Infrarouge lointain</i>
<u>FT</u> :	Fourier transform <i>Transformée de Fourier (TF)</i>
FTIR :	Frustrated total internal reflexion <i>Réflexion totale interne frustrée</i>

mais surtout

FTIR :	Fourier transform infrared (spectroscopy) <i>Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier</i>
GC :	Gas chromatography <i>Chromatographie en phase gazeuse</i>
GDL :	Glow discharge lamp <i>Lampe à décharge lumineuse (voir SDL)</i>
GIXS :	Grazing incidence X-ray scattering <i>Diffusion des rayons X en incidence rasante</i>
GPC :	Gel permeation chromatography <i>Chromatographie à perméation de gel</i>
hc :	<i>hexagonal compact (voir hcp)</i>
hcp :	hexagonal closed packed (voir hc)
HPLC :	High performance liquid chromatography <i>Chromatographie en phase liquide de haute performance</i>
<u>HR</u> :	High resolution <i>Haute résolution</i>
IBAD :	Ion beam assisted deposition <i>Mixage ionique dynamique</i>
IBS :	Ion beam sputtering <i>Pulvérisation par faisceaux d'ions</i>
<u>ICP</u> :	Inductively coupled plasma <i>Plasma couplé par induction</i>
IR :	Infrared <i>Infrarouge</i>
ISS :	Ion scattering spectroscopy <i>Spectroscopie d'ions rétrodiffusés</i>
LAMMA :	Laser assisted microprobe analysis <i>Microsonde assistée par laser</i>
<u>LC</u> :	Liquid chromatography <i>Chromatographie en phase liquide</i>
LEED :	Low energy electron diffraction <i>Diffraction des électrons lents (ou de faible énergie)</i>
LPA :	Lorentz-polarisation-absorption <i>Correction Lorentz polarisation absorption</i>
MBE :	Molecular beam epitaxy <i>Epitaxie par jets moléculaires</i>
MC :	<i>Monocouche (voir ML)</i>

MEB :	<i>Microscopie électronique à balayage</i> (voir SEM)
MFM :	Magnetic force microscopy <i>Microscopie à force magnétique</i>
ML :	Monolayer (voir MC)
MMB :	<i>Microscope mécanique à balayage</i>
MO :	Metal organic <i>Organo-métallique</i>
MOKE :	Magneto-optic Kerr Effect <i>Effet Kerr magnéto-optique</i>
MS :	Mass spectrometry <i>Spectrométrie de masse</i>
NAA :	Neutron activation analysis <i>Analyse par activation neutronique</i>
NMR :	Nuclear magnetic resonance <i>Résonance magnétique nucléaire (RMN)</i>
PE :	Plasma enhanced <i>Assisté par plasma</i>
PIBE :	Pulsed ion beam evaporation <i>Évaporation sous faisceau pulsé d'ions</i>
PIXE :	Proton induced X-ray emission <i>Émission de rayons X induits par les protons</i>
PLD :	Pulsed laser deposition <i>Ablation laser</i>
PVD :	Physical vapor deposition <i>Déposition en phase vapeur par voie physique</i>
RBS :	Rutherford backscattering <i>Rétrodiffusion coulombienne</i>
RHEED :	Reflexion high energy electron diffraction <i>Diffraction d'électrons rapides sous incidence rasante</i>
RMN :	(voir NMR)
RMS :	Root mean square <i>Ecart quadratique moyen</i>
RPE :	(voir ESR)
S :	Surface ou Scanning « de surface » ou « à balayage »
SAM :	Scanning Auger microscope <i>Microscope Auger à balayage</i>

S(O)DL :	<i>Spectroscopie (optique) à décharge lumineuse (voir GDL)</i>
SEM :	<i>(voir MEB)</i>
SERS :	Surface enhanced Raman spectroscopy <i>Diffusion Raman exaltée de surface</i>
SFA :	Surface force apparatus <i>Machine de force</i>
SIMS :	Secondary ion mass spectroscopy <i>Spectroscopie de masse d'ions secondaires</i>
SNMS :	Secondary neutral ion mass spectroscopy <i>Spectroscopie de masse de neutres secondaires</i>
SNOM :	Scanning near field optical microscopy <i>Microscope à champ proche optique</i>
<u>SR</u> :	Synchrotron radiation <i>Rayonnement synchrotron</i>
STEM :	Scanning transmission electron microscopy <i>Microscopie électronique à balayage en transmission</i>
STM :	Scanning tunneling microscopy <i>Microscopie à effet tunnel</i>
TEM :	Transmission electron microscopy <i>Microscopie électronique à transmission</i>
TLK :	Terrace, ledge, kink <i>Terrasse, gradin, cran</i>
<u>ToF</u> :	Time of flight <i>Temps de vol</i>
TPD :	Temperature programmed desorption <i>Désorption thermique programmée en température</i>
UPS :	Ultraviolet photoelectron spectroscopy <i>Spectroscopie de photoélectrons induits par les UV</i>
UV/vis :	Ultraviolet/visible <i>UV/visible</i>
<u>VUV</u> :	Very far ultraviolet <i>Ultraviolet lointain</i>
<u>WDS</u> :	Wavelength dispersive spectrometer <i>Spectromètre à dispersion de longueur d'onde</i>
XANES :	X-ray absorption near edge structure <i>Absorption X au voisinage des seuils</i>
XAS :	X-ray absorption spectroscopy <i>Spectroscopie d'absorption X</i>

- XPS : **X-ray photoelectron spectroscopy**
Spectroscopie de photoélectrons induits par les rayons X
- XRD : **X-ray diffraction**
Diffraction des rayons X
- XRF : **X-ray fluorescence**
Fluorescence X

Et pour conclure :

ENSAIS - LMCM : École nationale supérieure des arts et industries de
Strasbourg – Laboratoire de mécanique, corrosion et
matériaux

IPCMS - GSI : Institut de physique et chimie des matériaux de
Strasbourg – Groupe Surfaces et Interfaces

1	¹ H <i>hc</i> 0,47 0,34								
2	³ Li <i>cc</i> 0,351	⁴ Be <i>hc</i> 0,229 0,358							
3	¹¹ Na <i>cc</i> 0,429	¹² Mg <i>hc</i> 0,321 0,521							
4	¹⁹ K <i>cc</i> 0,533	²⁰ Ca <i>cfc</i> 0,559	²¹ Sc HEX 0,331 0,527	²² Ti <i>hc</i> 0,295 0,469	²³ V <i>cc</i> 0,303	²⁴ Cr <i>cc</i> 0,291	²⁵ Mn CUB 0,891	²⁶ Fe <i>cc</i> 0,287	²⁷ Co <i>hc</i> 0,251 0,407
5	³⁷ Rb <i>cc</i> 0,559	³⁸ Sr <i>cfc</i> 0,608	³⁹ Y <i>hc</i> 0,365 0,573	⁴⁰ Zr <i>hc</i> 0,323 0,515	⁴¹ Nb <i>cc</i> 0,330	⁴² Mo <i>cc</i> 0,315	⁴³ Tc <i>hc</i> 0,274 0,439	⁴⁴ Ru <i>hc</i> 0,271 0,428	⁴⁵ Rh <i>cfc</i> 0,380
6	⁵⁵ Cs <i>cc</i> 0,614	⁵⁶ Ba <i>cc</i> 0,503	⁵⁷ La HEX2 0,377 1,217	⁷² Hf <i>hc</i> 0,320 0,505	⁷³ Ta <i>cc</i> 0,330	⁷⁴ W <i>cc</i> 0,317	⁷⁵ Re <i>hc</i> 0,276 0,446	⁷⁶ Os <i>hc</i> 0,273 0,432	⁷⁷ Ir <i>cc</i> 0,384
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra <i>cc</i> 0,515	⁸⁹ Ac <i>cfc</i> 0,531	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt
Lanthanides et terres rares				⁵⁸ Ce <i>cfc</i> 0,516	⁵⁹ Pr HEX2 0,367 1,183	⁶⁰ Nd HEX2 0,366 1,180	⁶¹ Pm	⁶² Sm RHOM 0,899 23°13'	⁶³ Eu <i>cc</i> 0,459
Actinides et transuraniens				⁹⁰ Th <i>cfc</i> 0,508	⁹¹ Pa TET 3,93 3,24	⁹² U ORTH 0,347	⁹³ Np ORTH 0,352	⁹⁴ Pu MONO 0,364	⁹⁵ Am HEX2 0,347 1,124

La plupart des éléments cristallisent dans des systèmes compacts. Parmi eux certains présentent des variétés allotropiques (Fe_α et Fe_γ , C_{graphite} et C_{diamant} , Co_{hc} et Co_{cfc} ...).

Légende :

hc : P63/mmc ($c/a = 1,633$ représente la compacité idéale) ; *cfc* : Fm3m ; *cc* : Im3m ; *dia* : Fd3m (diamant = mode particulier de *cfc*) ; CUB, HEX2, ORTH, RHOM, TET et MONO sont respectivement des structures cubique, hexagonale à maille double, orthorhombique, rhomboédrique, tétragonale et monoclinique correspondant à des empilements compacts plus ou moins déformés.

				C <i>dia</i> 0,357				²He <i>cfc</i> 0,424	1
			5 B RHOM 0,506 $\alpha = 58,06$	6 C <i>hc</i> 0,246 0,670	7 N <i>hc</i> 0,386 0,318	8 O	9 F	10 Ne <i>cfc</i> 0,443	2
			13 Al <i>cfc</i> 0,405	14 Si <i>dia</i> 0,543	15 P ORTH ?	16 S ORTH	17 Cl ORTH	18 Ar <i>cfc</i> 0,526	3
28 Ni <i>cfc</i> 0,352	29 Cu <i>cfc</i> 0,361	30 Zn <i>hc</i> 0,266 0,495	31 Ga ORTH	32 Ge <i>dia</i> 0,566	33 As <i>R3m</i> 0,376 1,055	34 Se <i>P3₁21</i> 0,436 0,496	35 Br ORTH	36 Kr <i>cfc</i> 0,572	4
46 Pd <i>cfc</i> 0,389	47 Ag <i>cfc</i> 0,409	48 Cd <i>hc</i> 0,298 0,562	49 In TET 0,325 0,495	50 Sn TET 0,583 0,318	51 Sb <i>R3m</i> 0,431 1,127	52 Te <i>P3₁21</i> 0,446 0,593	53 I ORTH	54 Xe <i>cfc</i> 0,620	5
78 Pt <i>cfc</i> 0,392	79 Au <i>cfc</i> 0,408	80 Hg RHOM 0,301 $\alpha = 70,52$	81 Tl <i>hc</i>	82 Pb <i>cfc</i> 0,495	83 Bi <i>R3m</i> 0,455 1,186	84 Po <i>cc</i> 0,336	85 At	86 Rn	6
									7
64 Gd <i>hc</i> 0,363 0,578	65 Tb <i>hc</i> 0,360 0,569	66 Dy <i>hc</i> 0,359 0,565	67 Ho <i>hc</i> 0,358 0,562	68 Er <i>hc</i> 0,356 0,559	69 Tm <i>hc</i> 0,354 0,555	70 Yb <i>cfc</i> 0,548	71 Lu <i>hc</i> 0,350 0,555	Z X <i>mode</i> a_0 c_0 ou b_0	
96 Cm HEX2 0,350 1,133	97 Bk HEX2 0,342 1,107	98 Cf HEX2 0,338 1,103	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Paramètre de référence : Si = 0,543088 ± 0,000011 nm (25 °C)

Valeurs extraites de Wickoff R.W.G., *Crystal structures*, Vol. 1
(John Wiley and Sons, New York, 1963).

Mises à jour effectuées à partir du serveur de l'université de Sheffield :

<http://www.shef.ac.uk/chemistry/web-elements/>