

QuinteSciences

# Photoémission dans les solides

## Concepts et applications

**Antonio Tejeda et Daniel Malterre**

# Photoémission dans les solides

*Concepts et applications*

Antonio Tejeda et Daniel Malterre

Ce livre a été édité avec le concours du Laboratoire de Physique des Solides, de l'Institut Jean Lamour et du synchrotron SOLEIL.



Illustration de couverture : de gauche à droite, bandes du graphène, schéma d'un processus de photoémission et surface de Fermi du bismuth.

Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-1773-3

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 1<sup>er</sup> 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 2015

*À nos pères respectifs  
disparus récemment  
Antonio et Daniel*



# Table des matières

Préface .....	ix
Remerciements .....	xi
Introduction .....	1
<b>Partie I</b> Généralités .....	3
<b>Chapitre 1</b> • Histoire de la photoémission .....	5
1.1 Origine de la photoémission : l'effet photoélectrique .....	6
1.2 Spectroscopie des niveaux de cœur .....	9
1.3 Structure de bandes .....	11
1.4 La photoémission : une technique standard pour l'étude des propriétés électroniques .....	13

<b>Chapitre 2 • Approche élémentaire de la photoémission . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1 Le processus de photoémission des électrons . . . . .	17
2.2 Aspects techniques d'une expérience de photoémission . . . . .	21
2.3 Modèle pour décrire la photoémission . . . . .	22
2.4 Les niveaux de cœur . . . . .	23
2.5 Les états de valence . . . . .	26
<b>Chapitre 3 • Concepts de base . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1 Modélisation de la photoémission . . . . .	29
3.1.1 Hamiltonien d'interaction et probabilité de transition . . . . .	30
3.1.2 Approche qualitative : électrons presque libres . . . . .	33
3.1.3 Approche qualitative : états de cœur . . . . .	42
3.1.4 Modèle à une étape et à trois étapes . . . . .	45
3.1.5 Modèle à trois étapes . . . . .	49
3.2 Analyse détaillée des états de valence : approche à $N$ corps . . . . .	56
3.2.1 Liquide de Fermi et quasi-particules . . . . .	56
3.2.2 Description à $N$ corps . . . . .	57
3.2.3 Illustrations . . . . .	68
3.2.4 Règles de sélection et symétrie . . . . .	72
3.2.5 Éléments de matrice . . . . .	76
3.2.6 Dépendance en température . . . . .	86
3.3 Analyse détaillée des états de cœur . . . . .	91
3.3.1 Forme de ligne dans les métaux . . . . .	91
3.3.2 Effet multiplet . . . . .	94
3.3.3 Structures satellites . . . . .	97
3.3.4 Règles de sélection pour la photoémission sur les états de cœur . . . . .	101
3.3.5 Section efficace . . . . .	104
3.4 Processus connexes . . . . .	107
3.4.1 Les processus Auger . . . . .	107
3.4.2 La diffraction de photoélectrons . . . . .	110
3.4.3 La photoémission résonante . . . . .	115
3.4.4 Les processus à deux photons . . . . .	121
3.4.5 La photoémission inverse . . . . .	124

<b>Chapitre 4 • Aspects expérimentaux</b>	129
4.1 Ultravide	129
4.2 Micromécanique	131
4.3 Production des photons	132
4.3.1 Les lampes à décharge	132
4.3.2 Tubes à rayons X	135
4.3.3 Lasers : ultra haute résolution et résolution temporelle	137
4.3.4 Le synchrotron et les lignes de lumière	140
4.3.5 Laser à électrons libres	154
4.4 Détecteurs d'électrons	155
4.4.1 Détecteur cylindrique	158
4.4.2 Détecteur hémisphérique	159
4.4.3 Détecteur torique	161
4.4.4 Détection sous haute pression	162
4.4.5 Détecteur de temps de vol	163
4.4.6 Détecteurs de spin	164
4.4.7 Microscope de photoémission	167
<b>Partie II Exemples d'utilisation de la photoémission</b>	171

<b>Chapitre 5 • Transitions depuis des états localisés</b>	173
5.1 Forme spectrale des transitions de niveaux de cœur	174
5.1.1 Transitions Auger	175
5.1.2 Transitions de photoémission	176
5.1.3 Spectres d'états de cœur plus complexes	180
5.2 Applications de la spectroscopie des raies de cœur	187
5.2.1 Analyse chimique quantitative	187
5.2.2 Déplacements chimiques d'un élément	188
5.2.3 Profil de composition sous la surface	192
5.2.4 Estimation du taux de couverture	193
5.2.5 Cinétique de croissance	194
5.2.6 Le dichroïsme en photoémission	196



<b>Chapitre 6 • Diffraction de photoélectrons</b>	199
6.1 Considérations expérimentales	199
6.2 Méthodes de détermination de structures	201
6.2.1 Méthodes directes	202
6.2.2 Méthodes comparatives	204
6.3 Exemples de diffraction de photoélectrons	209
<b>Chapitre 7 • Les relations de dispersion</b>	217
7.1 Représentation des données expérimentales	219
7.1.1 Représentations bidimensionnelles de la dispersion	219
7.1.2 Distributions en énergie et en vecteur d'onde	221
7.1.3 Symétrisation énergies négatives-énergies positives des données	224
7.1.4 Normalisations pour étudier des états au niveau de Fermi	224
7.1.5 Représentation de la surface de Fermi	227
7.1.6 Transport	230
7.2 Analyse des signatures spectrales	231
7.2.1 Couplage électron-phonon	231
7.2.2 Détermination de $k$ perpendiculaire	235
7.2.3 Polarisation des bandes	236
7.2.4 Effets d'état final et éléments de matrice	238
7.2.5 D'autres applications	241
<b>Appendice A • Photoémission avec une fente de détection parallèle à la rotation polaire</b>	249
<b>Appendice B • Qualité de l'ajustement d'un niveau de cœur</b>	253
<b>Appendice C • Détermination du niveau de Fermi</b>	257
<b>Appendice D • Acronymes</b>	261
<b>Index</b>	263

# Préface

La photoémission joue un rôle clef dans la caractérisation des propriétés des nouveaux matériaux et, à ce titre, l'ouvrage proposé par Antonio Tejeda et Daniel Malterre arrive à point nommé étant donné le dynamisme du domaine. Il permettra au lecteur d'avoir une vue à la fois globale et approfondie de la technique, tant au niveau conceptuel qu'expérimental.

Le dynamisme du domaine est évident si l'on évoque par exemple l'apport de la photoémission à la compréhension de la structure et des propriétés des matériaux prometteurs comme le graphène (ou ses proches cousins le silicène et le germanène) ou les isolants topologiques pour ne citer que ceux donnant lieu au plus grand nombre de publications du moment.

L'essor de la technique a été de plus renforcé avec le développement de nouvelles sources (synchrotrons de grande brillance, lasers ultracourts), d'analyseurs de très grande ouverture angulaire ou opérant dans des conditions autour de l'échantillon se rapprochant du monde « réel » (études *in situ*, *in operando*). C'est ainsi qu'au synchrotron SOLEIL, notre stratégie de développement nous a amenés à proposer un grand nombre de lignes/montages expérimentaux permettant d'observer par photoémission des phénomènes dépendant du temps (de la seconde à la femto-seconde), d'analyser des échantillons dans des conditions d'ultravide jusqu'à la pression ambiante (ou presque), de sonder la structure électronique des échantillons jusqu'à

l'échelle nanométrique pour, au final, faire le lien entre propriétés fondamentales à l'échelle atomique et propriétés macroscopiques.

Dans une première partie de l'ouvrage, les auteurs nous retracent l'histoire de la photoémission en rappelant les concepts de base, avec une analyse détaillée des aspects expérimentaux. Ils nous emmènent ensuite, par des exemples judicieusement choisis, vers un approfondissement des concepts les plus actuels, ce qui fera de cet ouvrage une référence indispensable pour l'étudiant comme pour le chercheur confirmé. Enfin, le choix d'une rédaction en français positionne l'ouvrage de manière originale, comblant certainement une lacune en la matière.

Paul Morin

Directeur scientifique  
du synchrotron SOLEIL

# Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier nos collègues et amis qui ont aimablement relu cet ouvrage et nous ont permis de l'améliorer avant l'envoi en production. Patrick Le Fèvre a revu le chapitre sur l'approche élémentaire de la photoémission. Marco Grioni s'est consacré au chapitre sur les concepts de base. Celui consacré aux aspects expérimentaux a nécessité une lecture d'un grand nombre de personnes selon leur spécialité : Yannick Fagot-Revurat pour les sources conventionnelles de rayonnement, Marie-Agnès Tordeux pour la partie sur le rayonnement synchrotron, Evangelos Papalazarou, Marino Marsi et Luca Perfetti pour la photoémission résolue en temps, Fausto Sirotti pour les aspects concernant les lignes de lumière et la contamination au carbone des miroirs, Catalin Miron pour les détecteurs d'électrons et François Bertran pour la détection en spin. Amina Taleb-Ibrahimi et Enrique García Michel se sont penchés sur le chapitre sur les transitions depuis des états localisés, Jose-Ángel Martín Gago sur celui de la diffraction de photoélectrons et Véronique Brouet sur celui concernant les relations de dispersion. Cette dernière a également revu les aspects techniques sur l'utilisation de détecteurs bidimensionnels. Les appendices sur la qualité des ajustements des niveaux de cœur et sur la détermination du niveau de Fermi ont été relus par Enrique García Michel. Nous remercions aussi Olivier Marcouillé et Fabien Briquez pour les figures et les calculs de la brillance des éléments d'insertion et le flux de l'aimant de courbure ainsi que Guillaume Vasseur et Simon Moser pour les figures sur les effets des éléments de matrice extraits de leurs thèses.



# Introduction

La photoémission est la technique reine pour étudier les différents aspects de la structure électronique des matériaux. Du point de vue fondamental, la photoémission permet une détermination expérimentale de la structure de bande. Mais elle donne également accès à des informations uniques sur les effets à  $n$  corps comme l'ont montré, ces deux dernières décennies, les nombreuses études sur des systèmes à corrélation forte, les supraconducteurs à haute température critique ou les isolants de Mott. Du point de vue appliqué, elle permet d'avoir des informations sur les propriétés physicochimiques des surfaces comme la composition, le degré d'oxydation des différents éléments, etc. mais également d'étudier des systèmes d'intérêt technologique comme la barrière Schottky dans les interfaces métal-semiconducteur. La photoémission s'avère donc une spectroscopie précieuse dans le développement de la physique des surfaces et des nanosciences.

Deux prix Nobel ont récompensé des travaux sur la photoémission : le premier en 1921 pour l'explication fondamentale de l'effet photoélectrique par Albert Einstein ; le second en 1981 pour les travaux de Kai Siegbahn sur l'utilisation spectroscopique des photoélectrons à l'étude chimique des matériaux. Ces dernières années, la photoémission est devenue une technique mature. L'intensité des nouvelles sources synchrotron ainsi que l'amélioration spectaculaire de l'optique des lignes de lumière et des détecteurs d'électrons permettent désormais de mettre en évidence des effets très fins associés à des échelles d'énergie très petites. C'est le cas par exemple

des effets du couplage électron-phonon sur la dispersion des bandes de valence ou des corrélations électroniques dans les fermions lourds. De nouveaux champs d'investigation se sont ouverts à la spectroscopie de photoémission : des détecteurs de spin permettent d'avoir accès à la distribution des photoélectrons résolue en spin et l'utilisation de lasers pulsés a donné naissance à la photoémission résolue en temps. De même des progrès dans la résolution spatiale ont conduit à développer la microscopie de photoémission qui conjugue informations structurales et spectroscopiques.

Ce livre introduit les bases de la photoémission mais présente bon nombre de développements récents. Le premier chapitre sur l'histoire de la photoémission présente comment le problème que posait l'effet photoélectrique a été résolu par le développement de la physique quantique pour devenir aujourd'hui la base de la spectroscopie de photoémission. Le deuxième chapitre est consacré à l'introduction élémentaire des concepts de base de la technique sans faire appel au formalisme mathématique. Ce formalisme est développé dans le troisième chapitre qui décrit les concepts de base de la photoémission, notamment sa modélisation dans une approche à  $n$  corps et l'analyse détaillée des états de valence et des états de cœur. Après ce chapitre, nous abordons les aspects expérimentaux, c'est-à-dire que nous décrivons les dispositifs nécessaires pour effectuer des expériences de photoémission. En particulier, nous discutons les sources de photons et les détecteurs d'électrons. Ce chapitre sur la technique expérimentale finit la partie I, « Généralités », qui est suivie d'une seconde partie sur les exemples d'utilisation de la photoémission. Le chapitre 5 porte sur l'analyse des niveaux de cœur. Les électrons de ces états électroniques sont très localisés et leurs fonctions d'onde et leurs énergies sont très proches de celles d'un atome isolé. Cette propriété est à la base de l'intérêt des spectroscopies des états de cœur puisque les énergies de liaison constituent une signature de la nature chimique de l'émetteur. Le chapitre 6 présente des exemples de la diffraction de photoélectrons, une manifestation de la dualité onde-corpuscule des photoélectrons qui se manifeste dans la diffraction par le réseau atomique et qui permet d'obtenir des informations structurales à partir de l'anisotropie de l'intensité du signal de photoémission. Le chapitre 7 fournit des illustrations sur la détermination expérimentale de la structure de bande, ainsi que d'autres informations plus subtiles sur la structure électronique, comme les mécanismes d'interactions entre les électrons et les excitations collectives dans un cristal (phonons, magnons, etc.). Le livre se termine par quelques annexes techniques.

# Partie

Généralités







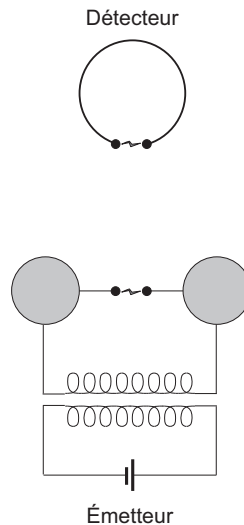
# Histoire de la photoémission

Le  $xx^e$  siècle a été une période marquante pour le développement technologique de l'humanité qui a connu plusieurs révolutions fondamentales. La physique est souvent à l'origine de ces progrès. Ainsi, le développement des dispositifs électroniques qui a révolutionné notre société a été possible grâce à la physique de l'état solide, par la maîtrise des propriétés des matériaux mais également par l'utilisation des concepts les plus modernes. Ainsi, les briques élémentaires de l'électronique comme le transistor ne peuvent se comprendre sans l'utilisation de la mécanique quantique appliquée aux solides.

La photoémission est une technique capable d'étudier les états électroniques des solides. Elle permet de déterminer la structure de bandes indispensable à la compréhension des propriétés électroniques de la matière (métaux, semiconducteurs) et donc le transport électronique dans les composants (diodes, transistors). Elle donne également accès aux niveaux électroniques de cœur, caractéristiques de chaque élément. Ces signatures atomiques permettent d'obtenir la composition chimique d'un matériau. Ce chapitre a pour objet de présenter l'histoire de la photoémission, en particulier le mécanisme à l'origine de cette spectroscopie. Celui-ci résulte de l'effet photoélectrique, qui a longtemps été une énigme de la physique avant d'être expliquée par Albert Einstein en 1905. Cette explication, fondée sur la quantification du champ électromagnétique, a contribué de manière notable au développement de la physique quantique.

## 1.1 Origine de la photoémission : l'effet photoélectrique

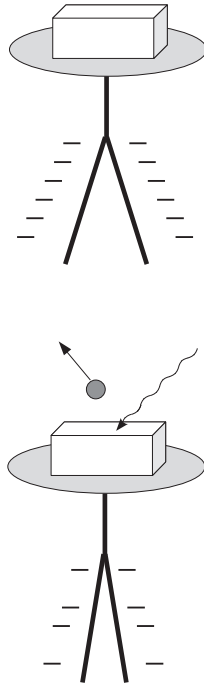
La découverte de l'effet photoélectrique par Heinrich Rudolf Hertz en 1887 est l'effet du hasard. En effet, Hertz avait conçu une expérience pour mettre en évidence la propagation des ondes électromagnétiques prévue par la théorie de Maxwell. Il avait construit un circuit oscillant émetteur et le récepteur était constitué par un éclateur constitué de deux sphères métalliques creuses (fig. 1.1), la réception de l'onde se manifestant par une étincelle entre les sphères. Hertz observa un effet inattendu : l'intensité de l'étincille variait avec l'éclairage du dispositif. Nous savons aujourd'hui qu'un rayonnement ultraviolet, qui conduit à l'émission d'électrons, stimule la décharge et donc rend l'étincille plus intense. Hertz a interposé entre la source et le détecteur différents matériaux jouant le rôle de filtre et a ainsi démontré que l'effet était dû au rayonnement ultraviolet.



**Figure 1.1.** Dispositif expérimental utilisé par Hertz pour mettre en évidence la propagation des ondes électromagnétiques.

Un an plus tard, Wilhelm Hallwachs a étudié comment une plaque de zinc, initialement chargée, se décharge lorsqu'elle est éclairée [1]. En la reliant à un électroscope pour étudier la cinétique de la décharge en présence de lumière (fig. 1.2), il a ainsi montré qu'une plaque chargée négativement se décharge plus rapidement si elle est illuminée par de la lumière ultraviolette. Par contre, si la plaque est chargée positivement, on n'observe pas de décharge rapide.

Plus tard, Philipp Lenard a montré que les matériaux chargés négativement émettent des électrons [2]. Il a éclairé une cathode (métallique), et a mesuré le nombre d'électrons qui atteignent l'anode en fonction de la différence de potentiel  $V$  entre la



**Figure 1.2.** *Principe de l'expérience de Hallwachs avec un électroscope. L'angle entre les feuilles de l'électroscope dépend de la charge accumulée. Lorsqu'on éclaire la plaque de zinc avec un rayonnement ultraviolet, l'électroscope se décharge prouvant que des électrons sont émis.*

cathode et l'anode (fig. 1.3). Pour une valeur positive de  $V$ , tous les électrons sortant de la cathode par effet photoélectrique sont attirés par l'anode et un courant est mesuré. En revanche, pour une différence de potentiel négative, seuls les électrons d'énergie cinétique suffisante pour vaincre la répulsion de l'anode contribuent au courant. Le potentiel électrique qui annule le courant en repoussant tous les électrons photoémis vers la cathode est appelé contre-tension. Le résultat surprenant est que l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière et non de son intensité, l'intensité n'affectant que le nombre d'électrons photoémis et non leur énergie cinétique. Ce comportement, existence d'une fréquence seuil, est complètement inexplicable dans le cadre de l'électromagnétisme de Maxwell qui décrit les ondes électromagnétiques par des champs, c'est-à-dire des grandeurs continues. Dans la théorie de Maxwell, l'énergie dépend du carré de l'amplitude des champs et elle varie de façon continue ce qui ne permet pas de comprendre l'existence d'une fréquence seuil.

C'est Albert Einstein qui a expliqué l'effet photoélectrique. Pour y parvenir, il a appliqué les idées que Planck avait utilisées pour expliquer la radiation du corps

opérateurs de destruction 58  
 orbitales moléculaires 26, 81, 82  
 oscillateur harmonique 185  
 oxydes de terres rares 181, 183  
 oxydes 71, 97, 98, 175, 176, 182, 183

## P

paires de Cooper 27  
 paramètre d'asymétrie 93, 94, 105, 118, 119, 166, 177  
 parité 13, 75, 97, 103  
 partie cohérente 67, 68  
 partie incohérente 65, 67-69, 71  
 partie principale 62, 117  
 PED ou PhD (Photoelectron Diffraction) 11, 111, 114, 115, 208  
 PES (*Photoelectron Spectroscopy*) 10  
 phonons 2, 50, 67, 87-91, 184-186, 217, 231-233  
 photoémission à deux photons 121-123, 137, 262  
 photoémission de surface 31, 49  
 photoémission inverse 63, 124, 125, 225, 261  
 photoémission résonante 115, 116, 119-121  
 photovoltage 191, 258-260  
 pinning 258  
 Planck 7, 8  
 plasmons de surface 185  
 plasmons de volume 185  
 plasmons extrinsèques 185  
 plasmons intrinsèques 185  
 plasmons 50, 51, 109, 184, 185  
 polarisation p 56, 76, 84  
 polarisation s 56, 76, 84  
 Polarisation 13, 22, 55, 56, 74-77, 80, 82, 84, 102, 105, 134, 146, 149, 166-168, 196, 197, 221, 236, 239, 241  
 polynôme de Legendre 105  
 pompe-sonde 122, 124  
 potentiel vecteur 30, 31, 49, 50, 55, 56, 73

potentiel interne 37, 39, 54, 209, 235  
 precession de Thomas 45  
 principe d'incertitude 57, 164, 165  
 prix Nobel 1, 11  
 probabilité de transition 30-32, 45, 50, 55, 59-61, 102, 116-119, 123, 233  
 processus Auger 107, 175  
 profil de composition 192  
 profil de Fano 119, 120  
 projection stéréographique 200, 204  
 propagation 6, 11, 23, 48-50, 54, 75, 111, 129, 185  
 puits quantique 243

## Q

qualité de l'ajustement 253  
 quasi-impulsion 32  
 quasi-particule 56, 57, 65-69, 71, 87, 231, 242

## R

raffinement 204, 207, 208  
 Rayleigh-Jeans 8  
 réfraction de Descartes 12, 156  
 réfraction 12, 23, 40, 53, 83, 156, 157  
 règle de Friedel 92  
 règle de Pauli 18  
 règles de Hund 95  
 règles de sélection 72, 86, 101, 103, 120  
 règles de sélection dipolaires 103  
 relations de dispersion 12, 13, 20, 61, 70, 76, 217-219, 221, 223  
 relaxations 211  
 reliability factor 204  
 renormalisation 71, 87, 89, 90, 232, 233  
 répliques 238, 239  
 représentation des données expérimentales 219  
 représentations bidimensionnelles 219, 223  
 résidus 253, 254

résolution spatiale 2, 161, 174, 187  
 résonance cyclotron électronique 134  
 rétrodiffusion 25, 113, 114, 166,  
   202, 213  
*R*-factor 204, 205, 208, 209  
 rupture de pente 231  
 Russel-Saunders 95

## S

satellites 91, 94, 97, 102, 109, 137,  
   153, 178, 181, 184-186  
 seconde quantification 57, 58  
 section efficace 51, 72, 104-107,  
   112, 115, 116, 119, 124, 125,  
   141, 161, 165, 166, 178, 179,  
   187, 193, 200  
 self-énergie 64-70, 87-90, 117, 181,  
   232, 233, 235  
 semiconducteur 1, 5, 26, 177, 191,  
   236, 237, 257-260  
 semi-métal 26  
 sensibilité chimique 115, 187,  
   211-213  
 séparation charge-spin 242  
 sexyphényle 81  
 Shirley 178-180, 221  
 Siegbahn 1, 11, 19, 23  
 Slater 96  
 Sn sur Ge(111) 190  
 Snell-Descartes 23, 53  
 sodium 39, 69  
 sonde 51, 57, 121-124, 138  
 sources de photons 2, 13, 21, 129,  
   132, 137  
 spectres d'états de cœur plus  
   complexes 180  
 spectroscopie de niveaux de cœur  
   174, 188  
 spinon 242, 243  
 spin-orbite 45, 71, 94, 101, 109,  
   178, 180, 184, 237  
 Stranski-Krastanov 194, 195  
 super Coster-Krönig 109, 181  
 supraconducteurs 1, 14, 26, 224

surface core level shift 189  
 surface de Fermi 13, 64-67, 70, 89,  
   93, 219, 223, 227, 228, 230,  
   238-240  
 susceptibilité de Pauli 57, 71  
 symétrie d'inversion 237, 238  
 symétrie de translation 33, 45,  
   54  
 symétrisation 224  
 synchrotron 1, 13, 21, 22, 132,  
   137, 140, 142-146, 148,  
   150-154, 157, 163, 167,  
   173, 218, 223

## T

taux de couverture 193, 194, 195  
 temps de vie 24, 45, 50, 57, 67, 68,  
   91-93, 117, 124, 134, 177, 181,  
   218, 234, 238  
 terme d'échange 96  
 terme de Coulomb 96  
 terres rares 70, 94, 97, 98, 120,  
   180-183  
 théorème de Cauchy 62  
 Tougaard 179  
 transfert de charge 182, 261  
 transformation de coordonnées 249  
 transformée de Fourier 80-84, 86,  
   139, 143, 202-204  
 transition optique 24, 35, 41, 49,  
   238  
 transitions Auger 10, 20, 107-110,  
   175, 176, 194  
 transitions de phase 242, 244  
 transitions de photoémission 176  
 transitions depuis des états localisés  
   173  
 transitions directes 87, 90, 91  
 transitions indirectes 91  
 transport 5, 11, 13, 67, 230  
 travail de sortie 8, 18, 23, 37, 50,  
   55, 107, 137, 138, 155-158  
*two photon photoemission* (2PPE) 121,  
   262