

Table des matières

Chapitre 1 – Introduction aux matériaux supraconducteurs	1
1.1 – Émergence des grandes classes de matériaux supraconducteurs	1
1.2 – Longueurs caractéristiques	3
1.2.1 – Densité d'électrons supraconducteurs	4
1.2.2 – Longueur de cohérence	4
1.2.3 – Longueurs de London et de pénétration	5
1.3 – Comportement magnétique des supraconducteurs	6
1.3.1 – Quelques rappels de magnétisme	6
1.3.2 – Supraconducteurs de types I et II	7
Supraconducteur de type I	7
Supraconducteur de type II	7
1.3.3 – Vortex d'Abrikosov	9
Description d'un vortex	9
Réseaux de vortex	10
1.4 – Supraconducteurs anisotropes	11
1.4.1 – Longueurs de pénétration en milieu anisotrope axial	11
1.4.2 – Longueurs de cohérence en milieu anisotrope	13
1.4.3 – Paramètre d'anisotropie	13
1.4.4 – Champs magnétiques critiques	13
1.4.5 – Vortex en milieu anisotrope	13
Vortex en milieu anisotrope continu	13
Vortex en milieux lamellaires	14
1.5 – Champs magnétiques critiques des classes de supraconducteurs	14
1.6 – Approche « physico-chimique »	15
<i>Complément C1A – Théories microscopiques</i>	17
C1A.1 – Paires de Cooper	17
C1A.1.1 – États quantiques individuels	17
C1A.1.2 – États de paires	17
C1A.1.3 – La paire de Cooper	17

C1A.2 – Énergie de liaison par délocalisation.....	18
C1A.2.1 – Exemple d'un système à deux états : la molécule H_2^+	18
C1A.2.2 – Extension à un système à un nombre croissant d'états	18
C1A.2.3 – Énergie de liaison par délocalisation d'une paire de Cooper	19
C1A.3 – État supraconducteur fondamental.....	19
C1A.3.1 – État normal	19
C1A.3.2 – Potentiel d'interaction	19
C1A.3.3 – États impliqués dans le balayage des paires de Cooper	20
C1A.3.4 – Énergie et phase.....	22
C1A.4 – Quasiparticules.....	22
C1A.5 – Approximation BCS.....	23
C1A.5.1 – Hypothèses simplificatrices.....	23
C1A.5.2 – Expression du gap	24
C1A.5.3 – Longueur de Cohérence BCS.....	25
C1A.5.4 – Comportement en température	26
C1A.5.5 – Traitement BCS en couplage fort	27
C1A.6 – Phénomènes de transport.....	28
C1A.6.1 – Électrons supraconducteurs et électrons normaux	28
C1A.7 – Supraconductivité multibande.....	30
C1A.8 – Supraconductivité à potentiel structuré.....	32
C1A.8.1 – Modèle de supraconductivité des cuprates.....	32
C1A.8.2 – Supraconductivité des composés à base de fer (pnictides).....	35
C1A.9 – Supraconductivité non-conventionnelle.....	35
C1A.9.1 – Définition.....	35
C1A.9.2 – Supraconductivité singulet et supraconductivité triplet	36
<i>Complément C1B – Supraconductivité BCS à couplage fort – Traitement d'Eliashberg</i>	<i>40</i>
Chapitre 2 – Métaux et alliages métalliques.....	43
2.1 – Métaux purs	43
2.1.1 – Métaux supraconducteurs dans le tableau de Mendeleiev.....	44
2.1.2 – Structure cristalline	46
2.1.3 – Champ magnétique critique.....	46
2.1.4 – Effet des impuretés (magnétiques et non-magnétiques).....	47
2.1.5 – Mécanisme de la supraconductivité dans les métaux	48
2.2 – Alliages et composés intermétalliques.....	48
2.2.1 – Introduction.....	48

2.2.2 – Alliages métalliques	50
Caractères généraux	50
Alliage Nb–Ti	51
2.2.3 – Composés intermétalliques	53
Composés de type NaCl (B1)	54
Phases de Laves	54
2.2.4 – Composés de type A15	55
Généralités	55
Composé Nb ₃ Sn	58
2.3 – Composé MgB ₂	59
2.3.1 – Structure	59
2.3.2 – Une supraconductivité conventionnelle à deux bandes	62
2.3.3 – Anisotropie des champs critiques de MgB ₂	63
2.3.4 – Effet du dopage	64
2.4 – Supraconductivité et pression	66
2.4.1 – Supraconductivité et changement de structure cristalline	67
Effet de la pression sur les metalloïdes	67
Effet de la pression sur le fer	69
2.4.2 – Modification des paramètres BCS	69
Effet de la pression sur les métaux pauvres et de transition	69
Effet de la pression sur le lithium et les alcalino-terreux	70
2.5 – Supraconductivité induite par les éléments légers – Composé H ₂ S–H ₃ S	73
2.5.1 – L’hydrogène pur	73
2.5.2 – Composés	73
2.5.3 – Les calculs et prédictions	74
2.5.4 – Succès expérimentaux	74
<i>Complément C2A – Phases de Chevrel</i>	77
C2A.1 – Structures	77
C2A.2 – Origines de la supraconductivité	78
C2A.3 – Supraconductivité et magnétisme	82
C2A.4 – Famille des phases de Chevrel	82
Chapitre 3 – Oxydes supraconducteurs – Cuprates et autres systèmes	85
3.1 – Supraconductivité et plan CuO ₂	86
3.1.1 – Structure cristalline des plans CuO ₂	86
3.1.2 – Structure électronique des plans CuO ₂	87

3.1.3 – Les plans CuO_2 : de l'isolant de Mott au supraconducteur	88
Isolant de Mott	88
Plan CuO_2 dopé en trous.....	90
Plan CuO_2 dopé en électrons	91
3.1.4 – Esquisse du mécanisme de la supraconductivité	92
3.1.5 – Spécificité du cuivre.....	93
3.2 – Principe généraux de construction des composés cuprates.....	94
3.2.1 – Plans atomiques : définitions et notations.....	94
3.2.2 – Les blocs supraconducteurs	94
3.2.3 – Les blocs « dopants ».....	95
3.2.4 – Structure des cuprates : dopage	96
3.2.5 – Anisotropie dans les cuprates.....	97
3.3 – Familles de cuprates supraconducteurs dopés en trous.....	97
3.3.1 – Supraconducteurs à blocs dopants « biplans décalés ».....	97
Le bloc biplan décalé	97
Composés de la famille LaBaCuO (0201)	98
3.3.2 – Analogie avec les pérovskites.....	100
3.3.3 – Blocs dopants à 3 plans décalés (TlBaCaCuO)	101
3.3.4 – Blocs dopants à 4 plans décalés (TlBaCaCuO et BiSrCaCuO).....	103
3.3.5 – Bloc dopant triplan à mercure aligné HgBaCaCuO	104
3.4 – Représentation structurale et classification des cuprates	107
3.4.1 – Schématisation des structures	107
3.4.2 – Nomenclature.....	107
3.5 – Le composé YBaCuO et sa famille.....	109
3.6 – Cuprates dopés en électrons.....	112
3.7 – Rhuthénates Sr_2RuO_4	114
3.8 – Autres oxydes.....	115
3.8.1 – Pyrochlores	116
3.8.2 – Spinelles.....	117
3.8.3 – $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$	117
3.8.4 – Cobaltates.....	117
3.8.5 – Pérovskites $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$	119
Chapitre 4 – Supraconducteurs organiques et composés du carbone	121
4.1 – Supraconducteurs organiques	122

4.1.1 – Supraconducteurs organiques quasi-unidimensionnels (Q1D) de la famille $(TM)_2X$: sels de Fabre et de Bechgaard.....	122
Structure cristalline	123
Structure électronique	125
Diagramme de phases générique	126
Effet de la dimensionnalité	128
Anisotropie.....	129
4.1.2 – Supraconducteurs organiques quasi-bidimensionnels (Q2D).....	129
Structures cristallines	129
Diagramme de phases	132
Quelques grandeurs caractéristiques.....	134
4.1.3 – Autres familles de supraconducteurs organiques.....	134
4.1.4 – Mécanismes de la supraconductivité	136
Supraconductivité Q2D de variété allotropique κ	136
Supraconductivité Q1D, singulet ou triplet?	137
4.2 – Supraconducteurs fullerènes	137
4.2.1 – Molécule C_{60} isolée	138
Structure atomique	138
Structure électronique	139
4.2.2 – Solide moléculaire C_{60} : réseau cristallin et insertion	139
Structure cristalline	139
Structure de bande et dopage	140
4.2.3 – Supraconductivité t_{1u}	141
Composés de structure cfc : A_3C_{60}	141
Composés Cs_3C_{60}	143
Composés A_3C_{60} expansés.....	144
4.2.4 – Supraconductivité t_{1g} : composés $(A, AT)C_{60}$	144
4.2.5 – Mécanisme de la supraconductivité dans les fullerènes	145
Supraconductivité t_{1u}	145
Limites du modèle BCS-Eliashberg.....	146
Supraconductivité t_{1g}	146
4.3 – Composés d’intercalation du graphite	147
4.4 – Graphène en couches très minces	149
4.5 – Nanotubes supraconducteurs	149
4.6 – Hydrocarbures aromatiques dopés.....	150
4.7 – Diamant et silicium dopé au bore	152

Chapitre 5 – Supraconducteurs à base de fer – Pnictides	155
5.1 – Le composant de base : le feuillet de FePn(FeCh)	155
5.2 – Les supraconducteurs FePn (pnictides)	158
5.2.1 – Famille 1 : Oxypnictides de type FeAs/LnO (« 1111 »)	158
Structure du composé parent.....	158
Structures électronique et magnétique des composés parents	159
Dopage en électrons.....	160
Dopage en trous	161
Rôle du paramètre de maille	162
5.2.2 – Famille 2 : type (FeAs) ₂ /AT (« 122 »)	164
Structure	164
Dopage en électrons.....	165
Dopage en trous	165
5.2.3 – Famille 3 : FeAs/ Li ; FeAs/ Na (« 111 »).....	167
Structure.....	167
Supraconductivité et dopage.....	168
Effet de la pression.....	169
5.2.4 – Famille 4 : composés à blocs de type pérovskite.....	169
5.3 – Supraconducteurs à feuillets FeCh (Ch : chalcogène)	170
5.3.1 – Famille 5 : supraconducteurs fer – chalcogène (FeCh ou « 11 »).....	170
FeSe.....	171
FeTe.....	172
5.3.2 – Famille 6 : (FeCh) ₂ /A (« 122* »)	174
5.3.3 – Et au-delà	174
5.4 – Champs critiques et paramètres de la supraconductivité	175
5.4.1 – Détermination expérimentale.....	175
5.4.2 – Paramètres de la supraconductivité.....	177
5.5 – Mécanisme de la supraconductivité	178
5.5.1 – Corrélation entre supraconductivité et structure.....	178
5.5.2 – Espace réciproque et zones de Brillouin.....	179
5.5.3 – Supraconductivité et fluctuations antiferromagnétiques.....	180
5.5.4 – Structure de bande au voisinage du niveau de Fermi	182
5.5.5 – Principe de l'appariement par fluctuation antiferromagnétique.....	183
5.5.6 – Supraconductivité s ⁺⁻	184
5.5.7 – Supraconductivité d	185

5.5.8 – Symétries plus complexes et preuves expérimentales	185
5.5.9 – Retour sur les paramètres	186
Chapitre 6 – Les fermions lourds	187
6.1 – Fermions lourds	187
6.2 – Nature des systèmes « fermions lourds »	187
6.2.1 – Comportement à basse température	187
6.2.2 – Comportement à haute température	188
6.3 – Caractéristiques de la supraconductivité « fermions lourds »	188
6.4 – Les matériaux fermions lourds supraconducteurs	190
6.5 – Supraconductivité à proximité d’une phase antiferromagnétique	191
6.5.1 – CePd ₂ Si ₂	191
6.5.2 – CeRhIn ₅	192
6.6 – Ferromagnétisme et supraconductivité : composés de l’uranium	193
6.6.1 – UGe ₂	193
6.6.2 – URhGe	194
6.7 – Supraconductivité de UPt ₃	195
6.7.1 – Diagramme des phases	195
6.7.2 – Un parfum de théorie	197
Modèles à deux dimensions	198
Modèles E_{1g} et E_{2u} de UPt ₃	198
Notations	199
Matériaux	203
Index	207