

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 1 – Les SQUIDs et leur mise en œuvre</b> .....	3
1.1 – Rappel des bases théoriques sur la jonction Josephson .....	3
1.1.1 – Effet Josephson .....	4
Jonction Josephson.....	4
Équations de Josephson .....	5
Énergie d’une jonction Josephson.....	5
Jonction 0 et jonction $\pi$ .....	5
1.1.2 – Modèle RCSJ de la jonction Josephson .....	6
Présentation du modèle.....	6
Paramètre de Stewart-McCumber.....	7
1.2 – Les types de SQUIDs.....	8
1.3 – Fonctionnement du DC-SQUID .....	9
1.3.1 – Régime à tension $V = 0$ .....	9
Relations générales .....	9
Champ magnétique appliqué et flux à travers le circuit.....	10
Intensité maximale (à température nulle) .....	11
1.3.2 – Régime à tension $V \neq 0$ .....	12
Caractéristique courant-tension à température nulle.....	13
Caractéristique courant-tension : effet de la température .....	14
Oscillation de $\langle V \rangle$ avec $\phi^{\text{app}}$ sous courant de polarisation imposé .....	14
1.4 – DC-SQUID opérationnel .....	15
1.4.1 – Paramètres optimaux du DC-SQUID .....	15
Intensité de courant critique.....	15
Résistance des jonctions : coefficient de Stewart-McCumber.....	15
Coefficient d’induction : facteur d’écrantage .....	15
Capacité des jonctions et bruit de Nyquist.....	16
Bruit en $1/f$ .....	18

1.4.2 – Jonctions Josephson adaptées au SQUID .....	19
Jonction Josephson LTS Nb/AIO <sub>x</sub> /Nb.....	19
Jonctions Josephson HTS à joint de grains.....	21
Jonction Josephson HTS à coin .....	22
1.4.3 – Le circuit DC-SQUID à flux focalisé .....	24
Effet de focalisation de flux .....	24
Géométrie du DC-SQUID à flux focalisé (DC-SQUID-FF).....	25
Inductance DC-SQUID à flux focalisé .....	26
Bruit en $1/f$ .....	28
Résolution du circuit SQUID à flux focalisé .....	28
1.5 – Lecture du DC-SQUID par contre-réaction de flux.....	29
1.5.1 – Principe de la mesure.....	29
1.5.2 – Détection de l'écart au point de fonctionnement.....	30
1.6 – Micro et nano-SQUIDS.....	33
1.6.1 – Micro-SQUID à jonction SNS.....	33
1.6.2 – Micro-SQUID à constriction .....	34
1.6.3 – Micro-SQUID à nano-jonction .....	36
1.6.4 – Micro-SQUID sur pointe .....	38
<i>Complément C1A – Le rf-SQUID</i> .....	40
C1A.1 – Le rf-SQUID ; relations fondamentales.....	40
C1A.2 – Lecture du rf-SQUID .....	41
C1A.2.1 – Le circuit résonant isolé.....	42
C1A.2.2 – Couplage entre le circuit résonant et le rf-SQUID .....	43
C1A.3 – Mesure en mode non-hystérétique $\beta_L^{rf} < 1$ .....	44
C1A.4 – Mesure en mode hystérétique $\beta_L^{rf} > 1$ .....	45
C1A.4.1 – Présentation.....	45
C1A.4.2 – Cas $\phi^{app} = \phi_0$ .....	46
C1A.4.3 – Cas $\phi^{app} = 3\phi_0/2$ .....	49
C1A.4.4 – Cas général : valeur de la tension sur le premier palier.....	50
C1A.5 – Mesure d'une variation de flux $\delta\phi^{app}$ .....	51
C1A.6 – Bruit intrinsèque d'un rf-SQUID .....	53
<i>Complément C1B – Structure des cuprates supraconducteurs</i> <i>à haute température critique HTS</i> .....	54
C1B.1 – Caractères généraux.....	54
C1B.2 – Blocs supraconducteurs.....	55
C1B.2.1 – Le plan CuO <sub>2</sub> .....	55

C1B.2.2 – Les blocs supraconducteurs .....	55
C1B.3 – Les blocs dopants ; familles de supraconducteurs .....	56
C1B.3.1 – Famille BSCCO .....	57
C1B.3.2 – Famille REBaCuO .....	58
C1B.4 – Mobilité électronique à l'état supraconducteur .....	58
<b>Chapitre 2 – Magnétométrie à SQUID .....</b>	<b>59</b>
2.1 – Les magnétomètres .....	60
2.1.1 – Magnétomètres à flux direct .....	60
Le SQUID comme magnétomètre .....	60
Magnétomètre multi-boucle.....	60
2.1.2 – Magnétomètres à transfert de flux .....	61
Principe .....	61
Magnétomètres LTS.....	64
Magnétomètres HTS .....	65
2.1.3 – Vue d'ensemble du dispositif de mesure .....	67
2.2 – Gradiomètres.....	68
2.2.1 – Principes de mesure de gradients.....	68
2.2.2 – Quelques exemples de gradiomètres HTS .....	70
Gradiomètre HTS planaire à boucles de champ intégrées .....	70
Gradiomètre HTS planaire à « bobines de champ » .....	70
Gradiomètre HTS axial à ruban .....	71
2.2.3 – Gradiomètres tensoriels .....	72
Configuration à 8 DC-SQUIDs.....	72
Configuration à 5 gradiomètres.....	73
Configuration à 3 gradiomètres en rotation .....	74
2.3 – Magnétomètres de laboratoire.....	74
2.4 – Applications en géophysique .....	76
2.4.1 – Magnétométrie des roches .....	76
2.4.2 – Paléomagnétisme .....	76
2.4.3 – Détection de minerais .....	77
Technique MAD.....	78
Technique TEM.....	78
2.4.4 – Application sismique : détection des séismes de faible amplitude .....	79
Principe .....	79
[SQUID] <sup>2</sup> au Laboratoire Souterrain Bas Bruit (LSBB) .....	80

2.4.5 – Applications médicales .....	81
La magnétoencéphalographie .....	81
La magnétocardiographie.....	84
Les magnétopneumographie et magnétogastrographie.....	84
2.5 – Applications des micro et nano-SQUIDS.....	84
2.5.1 – Comportement magnétique de nano-objets .....	84
2.5.2 – Microscopie SQUID à balayage .....	86
2.6 – Expérience « <i>Gravity Probe B</i> » .....	87
2.6.1 – Objectif de l'expérience.....	87
2.6.2 – Nature des gyroscopes .....	88
2.6.3 – Principe de la mesure.....	89
2.6.4 – Résultat .....	89
<b>Chapitre 3 – Bolomètres supraconducteurs.....</b>	<b>91</b>
3.1 – Généralités sur les bolomètres .....	91
3.1.1 – Principe de fonctionnement .....	91
3.1.2 – Classes de bolomètres.....	92
3.1.3 – Les contraintes .....	93
3.1.4 – Des détecteurs à très basse température.....	93
3.2 – Principe du bolomètre supraconducteur TES.....	93
3.2.1 – Le « thermomètre » supraconducteur .....	93
3.2.2 – Principe de la mesure.....	94
3.2.3 – Paramètres fondamentaux d'un bolomètre TES .....	95
3.3 – Comportement thermique du bolomètre TES .....	95
3.3.1 – Bilan thermique.....	95
3.3.2 – État d'équilibre initial (point zéro) .....	96
3.3.3 – Mode de fonctionnement à tension fixe.....	97
3.3.4 – Dynamique de retour au point zéro.....	97
Temps de relaxation par conduction .....	97
Temps de relaxation effectif.....	98
Corrélation entre les variations de température et d'intensité $I_{TES}$ .....	98
Ordres de grandeur des temps de relaxation .....	99
3.4 – Dispositif expérimental de mesure.....	99
3.4.1 – Alimentation du TES par une tension constante.....	99
3.4.2 – Mesure du courant .....	100

3.5 – Mesure des flux et énergies .....	100
3.5.1 – Réponse à un flux de particules : mesure de la puissance du rayonnement... 100	
3.5.2 – Réponse à la réception de particules individuelles : mesure de l'énergie..... 101	
3.6 – Résolution des bolomètres TES .....	102
3.6.1 – Sources de bruit .....	102
Modélisation d'un bruit.....	102
Bruit de phonons : fluctuation de $\mathcal{P}_{\text{bain}}(T)$ .....	103
Bruit de résistance (Johnson-Nyquist) : fluctuations de $\mathcal{P}_{\text{Joule}}(T)$ .....	103
Bruit de photons.....	103
3.6.2 – Résolution des bolomètres de puissance.....	104
3.6.3 – Résolution des bolomètres d'énergie.....	104
3.7 – Mise en œuvre des bolomètres TES.....	105
3.7.1 – Support.....	105
3.7.2 – Films TES .....	105
3.7.3 – Absorbeurs .....	106
Rayonnement visible et proche.....	106
Rayons X.....	107
Rayons $\gamma$ .....	108
Infrarouge lointain – ondes millimétriques.....	109
3.8 – Quelques exemples d'utilisation de bolomètres TES .....	111
3.8.1 – Bolomètres d'énergie.....	111
Caractérisation d'éléments radioactifs .....	112
Télescope à rayons X (mission Athena).....	112
3.8.2 – Les bolomètres de puissance.....	112
Bolomètre SCUBA-II .....	113
3.9 – Bolomètre à électrons chauds .....	116
3.9.1 – Principe .....	116
3.9.2 – Modèles du point chaud.....	118
3.9.3 – Effet d'inhomogénéité de température.....	119
<i>Complément C3A – Accessibilité aux ondes millimétriques d'origine astronomique .....</i>	<i>121</i>
<i>Complément C3B – Multidétecteurs bolométriques .....</i>	<i>123</i>
C3B.1 – Multidétecteur bolométrique à division temporelle (TDM).....	124
C3B.2 – Multidétecteur bolométrique à division fréquentielle (FDM).....	127

<b>Chapitre 4 – Détecteurs quantiques</b> .....	131
4.1 – Condensat supraconducteur et quasiparticules .....	131
4.1.1 – Paires de Cooper .....	131
États quantiques individuels .....	131
États de paires .....	131
La paire de Cooper .....	132
Paires de Cooper actives .....	132
4.1.2 – Quasiparticules .....	133
Quasiparticules d’origine thermique .....	133
Temps de vie des quasiparticules .....	134
Quasiparticules générées par un rayonnement .....	135
4.2 – Impédance cinétique .....	137
4.2.1 – Quasiparticules et modèle à deux fluides .....	137
4.2.2 – Impédance d’un ruban supraconducteur .....	137
Réponse des électrons normaux .....	138
Réponse des électrons supraconducteurs .....	139
4.2.3 – Impédance cinétique du supraconducteur .....	139
Expressions de l’inductance et de la résistance cinétiques .....	139
Relation à l’impédance de surface .....	140
Énergie cinétique des électrons et inductance cinétique .....	140
4.3 – Incidence de la longueur de cohérence .....	141
4.3.1 – Longueur de cohérence .....	141
4.3.2 – Film mince ; inductance cinétique à 0 K et sans rayonnement .....	141
Densité d’électrons supraconducteurs à 0 K et sans rayonnement .....	141
Impédance cinétique à 0 K .....	142
4.3.3 – Impédance cinétique de quelques matériaux .....	142
4.4 – Mise en œuvre des KIDs .....	143
4.4.1 – Principe de mesure par KIDs .....	143
4.4.2 – KIDs d’énergie et de puissance .....	144
Terminologie .....	144
KIDs d’énergie .....	144
KIDs de puissance .....	145
4.4.3 – Choix des paramètres .....	145
Température .....	145
Géométrie du micro-ruban KID .....	146

4.5 – Dispositifs KIDs.....	146
4.5.1 – «LEKID» .....	146
La cellule LEKID.....	146
Effet de l'éclairement.....	148
Mode opératoire de mesure.....	148
Exemple de structure de LEKID.....	149
4.5.2 – Détecteurs CPW-KIDs.....	150
4.6 – Multidétecteur et multiplexage KID .....	152
4.6.1 – Principe de fonctionnement .....	152
4.6.2 – Dispositif expérimental.....	153
4.6.3 – Détecteurs NIKA et NIKA2 de l'IRAM.....	154
Cryostat du détecteur NIKA2 .....	154
Choix du supraconducteur .....	155
Matrice de détecteurs et fréquences de mesure.....	156
4.7 – Bolomètre à KID (TKID) pour photons X.....	156
4.8 – Détecteurs à effet tunnel .....	158
4.8.1 – Modèle semi-conducteur.....	158
4.8.2 – Détection par effet tunnel assisté.....	158
4.8.3 – Détection par dissociation de paires .....	159
4.9 – Détecteurs à jonction tunnel Josephson (STJ) .....	161
<b>Chapitre 5 – Introduction à l'électronique supraconductrice RSFQ.....</b>	<b>165</b>
5.1 – Dispositifs à logique statique.....	165
5.1.1 – Cryotron à transition N/S.....	166
5.1.2 – Cryotron à jonction Josephson.....	167
5.1.3 – Ordinateur supraconducteur IBM .....	168
5.2 – La logique RSFQ .....	169
5.2.1 – Les impulsions SFQ.....	169
5.2.2 – Stockage d'informations.....	170
5.2.3 – Horloge de la logique RSFQ.....	171
5.2.4 – Nature des bits en électronique RSFQ.....	171
Rappel du bit classique .....	171
Bits en logique RSFQ .....	172
5.3 – Les dispositifs ( <i>hardware</i> ) .....	173
5.3.1 – Équivalence pendule mécanique/jonction Josephson .....	174
5.3.2 – Glissement $2\pi$ .....	176

5.3.3 – Équivalence mécanique d'une inductance .....	177
5.3.4 – Ligne JTL et son équivalence .....	177
5.3.5 – Fréquence d'horloge .....	179
5.3.6 – Fonctionnement des cellules ( <b>0/1</b> ) .....	179
Cellule ( <b>0/1</b> ) et système mécanique équivalent .....	179
Illustration de la règle R1 .....	180
Règle R2 et jonction de blocage .....	181
5.4 – Un exemple : la porte «ET» .....	182
5.5 – Aspect énergétique de la cellule ( <b>0/1</b> ) .....	183
5.6 – Vers l'électronique RSFQ à jonctions $\pi$ .....	184
5.7 – Une voie ouverte .....	185
<b>Notations</b> .....	187
<b>Index</b> .....	193