

# Table des matières

<b>Chapitre 1 – Introduction</b> .....	1
1.1 – Conditions requises pour une utilisation «industrielle» des fils et câbles supraconducteurs .....	1
1.2 – Longueurs caractéristiques.....	2
1.2.1 – Longueur de cohérence .....	2
1.2.2 – Longueurs de London et de pénétration .....	3
1.3 – Comportement magnétique des supraconducteurs.....	4
1.3.1 – Quelques rappels.....	4
1.3.2 – Supraconducteurs de types I et II.....	5
Supraconducteur de type I ( $\kappa < 1/\sqrt{2}$ ).....	5
Supraconducteur de type II ( $\kappa > 1/\sqrt{2}$ ) .....	6
1.4 – Milieu anisotrope .....	7
1.4.1 – Longueurs de pénétration en milieu anisotrope .....	7
1.4.2 – Longueurs de cohérence en milieu anisotrope.....	8
1.4.3 – Anisotropie des champs critiques .....	9
1.5 – Transport du courant .....	9
1.5.1 – Problématique .....	9
1.5.2 – Distribution du courant .....	10
1.5.3 – Densités de courant critique.....	11
Densité de courant critique dans les supraconducteurs de type I.....	11
Densité de courant critique dans les supraconducteurs de type II .....	11
1.6 – Les fils supraconducteurs opérationnels .....	12
1.6.1 – Structure des fils supraconducteurs.....	12
1.6.2 – Intensité nominale de courant critique.....	13
Définition .....	13
Indice de transition résistive .....	13
1.6.3 – Densités nominales de courant critique .....	14
1.6.4 – Performances industrielles .....	15

<b>Chapitre 2 – Structuration des fils et câbles supraconducteurs</b> .....	17
2.1 – Du filament au câble supraconducteur .....	18
2.2 – Pourquoi des brins composés de filaments de petit diamètre plutôt que des fils uniques? .....	19
2.2.1 – Puissance dissipée ; modèle de Bean .....	20
2.2.2 – Chaleur produite lors d’une variation du champ magnétique appliqué .....	22
2.2.3 – Chaleur produite par un champ appliqué alternatif .....	23
2.2.4 – Chaleur produite lors d’une variation de la densité de courant critique .....	24
2.2.5 – Intérêt de la subdivision de brins en filaments .....	25
2.3 – Pourquoi noyer les filaments dans une matrice de cuivre? .....	26
2.4 – Pourquoi torsader les brins? .....	27
2.4.1 – Effet de couplage entre filaments .....	27
2.4.2 – Constante de temps des courants interbrins .....	27
Estimation de l’inductance $L_{eq}$ .....	28
Estimation de $\mathcal{R}_{eq}$ .....	28
Estimation du temps $\theta$ .....	29
2.4.3 – Réduction du temps d’amortissement dans le cuivre : le torsadage .....	29
2.4.4 – Énergie dissipée .....	29
2.5 – Quel diamètre de brin choisir? Avec quelle fraction de cuivre? .....	31
2.5.1 – Pertes en courant alternatif .....	31
2.5.2 – Pas de torsadage et taille de brin .....	32
2.5.3 – Cryostabilisation, taille de brin et fraction de cuivre .....	33
Définitions .....	33
Condition de cryostabilité .....	33
2.6 – Groupement en câbles .....	36
2.6.1 – Fils monolithes .....	36
2.6.2 – Intérêts d’un groupement des brins en câbles .....	36
2.6.3 – Câbles complètement transposés .....	37
Raisons de la transposition .....	37
Câbles plats et en corde .....	37
Câbles en conduits .....	38
<b>Chapitre 3 – Fils et câbles supraconducteurs métalliques Nb – Ti, Nb<sub>3</sub>Sn, MgB<sub>2</sub></b> .....	43
3.1 – Propriétés physico-métallurgiques de l’alliage Nb–Ti .....	44
3.1.1 – Diagramme des phases .....	44
3.1.2 – Propriétés supraconductrices de la phase $\beta$ homogène .....	45

3.1.3 – Microstructure.....	45
3.1.4 – Densité de courant critique .....	47
3.1.5 – Composition optimale.....	48
3.2 – Processus de fabrication des brins et des câbles Nb–Ti.....	49
3.2.1 – Dimensions et ordres de grandeur .....	49
3.2.2 – Brins à recompactage unique (1000–10 000 filaments).....	50
Billette primaire .....	50
Filage.....	51
Étirage à froid .....	51
Formation du brin .....	52
Torsadage .....	54
Traitements thermiques.....	54
3.2.3 – Brin à recompactage multiple.....	54
3.2.4 – Brins monolithes.....	55
Processus de fabrication.....	55
Exemples et marchés de brins Nb–Ti monolithes.....	55
3.3 – Propriétés physico-métallurgiques du composé Nb <sub>3</sub> Sn.....	57
3.3.1 – Diagramme des phases.....	57
3.3.2 – Propriétés supraconductrices .....	58
3.3.3 – Densité de courant critique .....	58
3.3.4 – Effet des contraintes.....	59
3.4 – Procédés de fabrication des brins et des câbles Nb <sub>3</sub> Sn.....	60
3.4.1 – Caractères généraux .....	60
3.4.2 – Méthode du bronze .....	61
3.4.3 – Méthode de l'étain interne .....	65
3.4.4 – Méthode de «poudre en tube» (Powder In Tube PIT) .....	67
3.5 – Fils supraconducteurs MgB <sub>2</sub> .....	70
3.5.1 – Aspects physico-métallurgiques du composé MgB <sub>2</sub> .....	71
Structure.....	71
Champs magnétiques critiques .....	71
Dopage au carbone.....	72
Contraction de volume.....	73
3.5.2 – Les techniques de préparation.....	73
Méthode in situ .....	74
Méthode ex situ.....	77
Procédé du magnésium interne (IMD).....	77

<b>Chapitre 4 – Fils et câbles supraconducteurs à haute température critique (HTS) ...</b>	<b>81</b>
4.1 – Spécificité des cuprates HTS .....	82
4.1.1 – Structure des cuprates HTS.....	82
Caractères généraux .....	82
Blocs supraconducteurs .....	83
Les blocs dopants ; familles de supraconducteurs.....	84
4.1.2 – Incidences technologiques .....	86
Propriétés mécaniques .....	86
Propriétés de transport .....	87
4.2 – Rubans BSCCO (rubans de première génération – 1G) .....	89
4.2.1 – Processus de fabrication des rubans Bi-2223 .....	89
Poudres précurseurs .....	90
Tubes d'encapsulation et de compactage .....	91
Traitements thermomécaniques .....	91
Torsadage pour courant alternatif .....	92
Renforcement mécanique.....	93
4.2.2 – Performances des rubans Bi-2223 .....	93
Intensités critiques des rubans Bi-2223 .....	93
Bobinage des rubans Bi-2223 .....	94
Torsadage des rubans Bi-2223 .....	95
4.2.3 – Retour du composé Bi-2212 .....	96
4.3 – Rubans REBaCuO (rubans de seconde génération – 2G).....	97
4.3.1 – Méthode de texture induite (IBAD-ABAD) .....	98
Stratification.....	98
Rubans du marché.....	101
4.3.2 – Méthode de la texture initiée (RABiTS).....	103
Le substrat biaxial .....	103
Rubans supraconducteurs RABiTS.....	104
Rubans du marché (Amperium <sup>®</sup> ).....	106
4.3.3 – Rubans 2G en courant alternatif .....	107
4.4 – Câbles de supraconducteurs HTS .....	108
4.4.1 – Câbles pour le transport de courant .....	108
4.4.2 – Câbles supraconducteurs sur « cœur rond » .....	108
4.4.3 – Câbles de Roebel .....	110
Géométrie d'un câble de Roebel.....	110
Performances actuelles des câbles de Roebel .....	112

Câble de Roebel en courant alternatif.....	114
Le futur des câbles de Roebel.....	114
<b>Chapitre 5 – Quelques éléments de cryogénie .....</b>	<b>117</b>
5.1 – Le cryostat.....	118
5.2 – Rendement énergétique de réfrigération.....	118
5.3 – Les matériaux.....	119
5.3.1 – Chaleur spécifique.....	119
5.3.2 – Conductivité thermique.....	121
5.3.3 – Relation entre les conductivités thermique et électrique.....	122
5.4 – Cryogénérateurs.....	122
5.5 – Les liquides cryogéniques.....	123
5.5.1 – Azote liquide.....	123
5.5.2 – Hélium à basse température.....	124
5.6 – Refroidissement par He-I liquide saturé.....	126
5.6.1 – Capacité de refroidissement.....	126
5.6.2 – Thermalisation en bain.....	127
Ébullition nucléée.....	128
Ébullition en film.....	128
5.6.3 – Refroidissement par circulation d’hélium saturé à 2 phases.....	129
5.7 – Refroidissement par circulation d’hélium supercritique.....	131
5.8 – Refroidissement par hélium superfluide (He-II).....	132
5.8.1 – Hélium superfluide saturé.....	132
5.8.2 – Hélium superfluide pressurisé.....	133
5.8.3 – Combinaison d’hélium II pressurisé et d’hélium II saturé.....	133
5.9 – Très basses températures.....	134
<b>Chapitre 6 – Aimants supraconducteurs.....</b>	<b>135</b>
6.1 – Généralités sur les bobines supraconductrices.....	135
6.1.1 – Caractéristiques d’une bobine supraconductrice.....	135
6.1.2 – Matériaux utilisés.....	136
6.1.3 – Types d’enroulements.....	137
Enroulement jointif.....	137
Enroulement en galettes.....	137
6.1.4 – Amenées de courant hybrides.....	138
6.2 – Bobines supraconductrices pour mesures en laboratoire.....	140

6.3 – Champs magnétiques très intenses.....	140
6.3.1 – Bobines tout-cuivre.....	141
Bobine de Bitter .....	142
Bobine poly-hélices .....	143
6.3.2 – Aimants hybrides .....	144
Aimant hybride 45 T du NHMFL .....	144
Aimant hybride en construction au LNCMI-Grenoble.....	145
6.3.3 – Aimant champ intense «tout supraconducteur».....	147
<b>Chapitre 7 – Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)</b> .....	151
7.1 – Principes physiques de l'IRM.....	152
7.1.1 – Spin et moment magnétique .....	152
7.1.2 – Précession de Larmor.....	152
7.1.3 – Relaxation longitudinale.....	152
Temps de relaxation $T_1$ .....	152
Impulsion $\pi/2$ .....	153
7.1.4 – Assemblée de protons .....	154
7.1.5 – Relaxation transversale.....	155
7.1.6 – Principe généraux de la mesure de $\rho$ , $T_1$ , $T_2$ .....	156
7.1.7 – Cartographie à 3 dimensions.....	157
Paramètres $\rho$ , $T_1$ , $T_2$ et tissus biologiques.....	157
Technique de localisation par gradients .....	158
7.1.8 – Contraste et résolution .....	159
7.2 – IRM et supraconductivité.....	160
7.2.1 – Les instruments IRM standards .....	160
7.2.2 – IRM à champ bas et moyen .....	161
IRM à bobines $MgB_2$ .....	162
IRM à bobines HTS .....	163
7.2.3 – IRM à champs intenses du Laboratoire NEUROSPIN .....	163
7.3 – Potentialités et futur de l'IRM .....	166
7.3.1 – Imagerie multi-nucléaire.....	166
7.3.2 – Imagerie de perfusion .....	166
7.3.3 – Imagerie fonctionnelle .....	167
7.3.4 – Imagerie de diffusion .....	167

7.4 – Spectroscopie RMN .....	168
7.4.1 – Objectifs de la spectroscopie RMN .....	168
7.4.2 – Technique expérimentale .....	169
7.4.3 – Allure d'un spectre RMN.....	169
7.4.4 – Rôle de la supraconductivité en RMN .....	171
<b>Chapitre 8 – Le grand collisionneur de hadrons (LHC) .....</b>	<b>173</b>
8.1 – Présentation générale du LHC .....	173
8.2 – Guidage des protons : aimants dipolaires .....	175
8.2.1 – Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique .....	175
8.2.2 – Production d'un champ magnétique uniforme par un dipôle .....	176
8.2.3 – Les aimants dipolaires du LHC .....	177
8.3 – Focalisation des faisceaux : aimants quadripolaires .....	182
8.3.1 – Géométrie d'un champ quadripolaire .....	182
8.3.2 – Optique de refocalisation .....	183
8.3.3 – Les quadripôles principaux du LHC .....	183
8.4 – Modules d'accélération .....	184
8.4.1 – Accélération par cavités résonantes .....	184
8.4.2 – Cavités supraconductrices.....	186
8.5 – Répartition des aimants .....	188
8.6 – Cryogénie au LHC .....	189
8.6.1 – Paramètres cryogéniques .....	189
8.6.2 – Amenées de courant .....	190
8.7 – Détecteurs de particules au LHC .....	191
8.7.1 – Généralités .....	191
8.7.2 – Présentation des détecteurs .....	192
8.7.3 – Le détecteur ATLAS .....	193
8.7.4 – Le détecteur CMS .....	194
<b>Chapitre 9 – Réacteurs à fusion – Projet ITER .....</b>	<b>197</b>
9.1 – La fusion par confinement magnétique .....	197
9.1.1 – La réaction de fusion.....	197
9.1.2 – Le plasma.....	198
9.1.3 – Étapes vers un réacteur opérationnel .....	198
9.1.4 – Géométrie d'un TOKAMAK .....	200

9.2 – ITER.....	201
9.2.1 – Principaux paramètres.....	201
9.2.2 – ITER : maillon d’une approche globale.....	202
9.3 – Les aimants ; leur rôle respectif.....	203
9.4 – Quelques éléments techniques sur les bobines de ITER.....	206
9.4.1 – Caractères généraux.....	206
9.4.2 – Bobines de champ toroïdal.....	208
9.4.3 – Bobines de champ poloïdal.....	209
9.4.4 – Bobines du solénoïde central.....	210
9.4.5 – Bobines de correction.....	212
9.4.6 – Alimentation des bobines.....	212
Amenées de courant.....	213
Câbles de raccordement.....	214
Pièce de connexion.....	214
9.5 – Quelques autres TOKAMAK.....	214
9.5.1 – JET.....	215
9.5.2 – Tore Supra.....	215
9.5.3 – JT-60SA.....	216
9.6 – Confinement en stellarator (exemple W7-X).....	216
<b>Chapitre 10 – Supraconductivité et réseaux électriques.....</b>	<b>219</b>
10.1 – Câbles supraconducteurs de puissance.....	219
10.1.1 – Réseaux de distribution du courant.....	220
10.1.2 – Câbles supraconducteurs HTS pour le transport de courant.....	221
Positionnement économique et stratégique.....	221
Géométrie des câbles HTS.....	221
10.1.3 – Les lignes de transports d’électricité par câble HTS (en test ou en développement).....	223
Projets LIPA.....	224
Projet Ampacity.....	224
10.1.4 – Transport en courant continu.....	226
Projet Ishikari (Japon).....	226
Projet de Saint-Petersbourg.....	227
Projet Tres Amigas.....	227
Projet GENESIS.....	228
Projet BEST PATHS – Test d’une ligne MgB <sub>2</sub> .....	228



10.2 – Limiteurs de courant supraconducteurs .....	229
10.2.1 – Limiteur de courant « résistif».....	230
10.2.2 – Limiteur de courant inductif.....	232
Par couplage avec un circuit supraconducteur secondaire .....	232
Bobine magnétique à noyau écranté.....	232
10.2.3 – Limiteur de courant par circuit magnétique à saturation.....	233
Le montage instrumental .....	233
Point de fonctionnement.....	235
Fonctionnement normal.....	235
Réaction en cas de surintensité.....	236
Exemple de prototype.....	236
10.3 – Transformateurs supraconducteurs .....	236
10.3.1 – Quelques rappels.....	236
10.3.2 – Types de transformateurs supraconducteurs .....	238
Transformateurs supraconducteurs à noyau de fer .....	238
Transformateur supraconducteur sans noyau .....	239
10.3.3 – Quelques réalisations de transformateurs supraconducteurs .....	239
<b>Chapitre 11 – Applications de la supraconductivité en électromécanique .....</b>	<b>241</b>
11.1 – Paliers supraconducteurs.....	241
11.1.1 – Stabilité du palier supraconducteur .....	241
11.1.2 – Principe du palier supraconducteur de type II.....	242
11.1.3 – Palier supraconducteur axial-radial .....	244
11.2 – Trains à sustentation magnétique .....	245
11.2.1 – Le « Maglev-transrapid».....	246
11.2.2 – Le « JR-Maglev » .....	247
11.2.3 – Propulsion des Maglev .....	249
11.2.4 – Les projets.....	250
11.3 – Cryomoteurs supraconducteurs.....	251
11.3.1 – Moteur triphasé synchrone .....	251
Principe du moteur synchrone.....	251
Moteurs supraconducteurs « cryo-copie».....	252
Moteur à flux axial.....	255
11.3.2 – Quelques autres exemples de moteurs supraconducteurs .....	256
Moteur pour propulsion marine.....	256
Voiture à moteur supraconducteur .....	256

Générateurs équipant des éoliennes.....	257
11.4 – Moteurs à supraconducteurs massifs.....	258
11.4.1 – Moteur à flux piégé.....	258
11.4.2 – Moteur à réluctance .....	258
11.4.3 – Moteur à concentration de flux .....	259
11.5 – Propulsion magnétohydrodynamique (MHD) .....	261
11.5.1 – Propulsion magnétohydrodynamique en champ statique .....	261
11.5.2 – Propulsion magnétohydrodynamique en champ alternatif .....	262
11.6 – Stockage de l'énergie .....	262
11.6.1 – Stockage d'énergie par SMES .....	262
11.6.2 – Volants d'inertie à palier supraconducteur (SFESS).....	265
<b>Annexe – Le courant critique dans les supraconducteurs de type II .....</b>	<b>267</b>
A.1 – Vortex d'Abrikosov .....	267
A.2 – Mécanismes d'ancrage.....	270
A.2.1 – Origine des forces d'ancrage.....	270
A.2.2 – Cavités et précipités de tailles inférieures à la longueur de cohérence .....	271
Force d'ancrage, à température et champ nuls, sur un vortex isolé .....	271
Force d'ancrage et champ magnétique .....	272
Effet de la température .....	273
Précipité métallique.....	274
Plaquettes et défauts colonnaires.....	274
A.2.3 – Cavités et précipités de taille supérieure à $\xi$ .....	275
A.2.4 – Amas de dislocations .....	276
A.3 – Élasticité du réseau de vortex.....	277
A.4 – Densité de force d'ancrage volumique.....	278
A.4.1 – Modèles microscopiques .....	278
Hypothèse de réseau totalement plastique.....	278
Hypothèse de réseau indéformable.....	279
Effet de l'élasticité du réseau de vortex .....	279
A.4.2 – Lois phénoménologiques de densité de force d'ancrage.....	281
A.5 – Densité de courant critique .....	282
A.5.1 – Lois de comportement du courant critique.....	282
A.5.2 – Effet de pic .....	283
A.6 – Vortex en milieu anisotrope .....	284
A.6.1 – Vortex en milieu continu anisotrope uniaxial .....	285

A.6.2 – Vortex dans les supraconducteurs HTS .....	286
Champ magnétique suivant l'axe <b>c</b> et vortex pancake .....	286
Champ magnétique dans le plan ( <b>a,b</b> ) et vortex de Josephson .....	287
Configuration en champ oblique .....	289
A.7 – Liquéfaction des vortex .....	289
A.7.1 – Liquide de vortex d'Abrikosov en milieu isotrope .....	290
A.7.2 – Liquide de vortex d'Abrikosov en milieu anisotrope .....	291
A.7.3 – Liquide de vortex pancake dans les supraconducteurs HTS .....	291
A.8 – Diagramme des phases des vortex en présence de défauts .....	293
A.9 – Densité de courant critique dans les cuprates HTS .....	294
A.9.1 – Notations .....	294
A.9.2 – Densité de courant critique $J_c^c(\mathbf{B}, \vartheta)$ .....	294
Effet Josephson .....	294
Champ magnétique appliqué dans le plan ( <b>a,b</b> ) .....	295
Champ magnétique appliqué dans la direction <b>c</b> .....	295
A.9.3 – Densité de courant critique $J_c^{ab}(\mathbf{B}, \vartheta)$ .....	295
Résultats expérimentaux .....	295
Supraconducteur continu anisotrope .....	296
Supraconducteur stratifié .....	297
A.10 – Conséquences pratiques des phénomènes de désancrage et de liquéfaction des vortex .....	298
A.10.1 – Supraconducteurs LTS (Nb–Ti, Nb <sub>3</sub> Sn) .....	298
A.10.2 – Supraconducteurs HTS (REBaCuO, BSCCO) .....	298
A.10.3 – Composé MgB <sub>2</sub> .....	299
A.11 – Ancrage collectif faible .....	299
A.11.1 – Présentation du modèle .....	299
A.11.2 – Ancrage d'un vortex isolé .....	301
Énergie potentielle d'ancrage .....	301
Énergie d'inclinaison .....	302
Densité de courant critique .....	302
A.11.3 – Ancrage d'un réseau de vortex .....	303
Énergie potentielle d'ancrage .....	303
Énergie élastique .....	304
Taille des domaines et force volumique d'ancrage .....	304
Densité de courant critique .....	305
Remarques .....	305
A.11.4 – Cross-over entre traitement collectif et individuel .....	306

<b>Notations</b> .....	309
<b>Index</b> .....	315