

COLLECTION

SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE

THOMSON-CSF

# RADARS AÉROPORTÉS ET SPATIAUX

J.-P. H A R D A N G E

P H. L A C O M M E

J.-C. M A R C H A I S

MASSON 



# Table des matières

(see contents page XVII)

Préface.....	VII
Avant-propos.....	1
Avertissement.....	2
<b>Partie I — Généralités, bases et principes.....</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre I — Historique et principe du RADAR .....</b>	<b>5</b>
1.1 Historique.....	5
1.2 Principe.....	6
1.2.1 Synoptiques de base.....	6
1.2.2 Choix de la longueur d'onde.....	14
<b>Chapitre II — Premières expressions des besoins opérationnels.....</b>	<b>15</b>
2.1 Missions.....	15
2.2 Porteurs et Armements.....	16
2.2.1 Porteurs.....	16
2.2.2 Armements.....	17
2.3 Fonctions « Système ».....	17
2.3.1 Fonctions de base.....	18
2.3.2 Fonctions spécifiques.....	19
2.3.3 Modes radar.....	20
<b>Chapitre III — Equation du RADAR.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introduction.....	21
3.2 Emission et réception du signal.....	21
3.2.1 Rôle de l'antenne à l'émission.....	21
3.2.2 Rôle de l'antenne à la réception.....	22
3.2.3 Réflexion sur la cible.....	23
3.3 Equation du radar dans le vide.....	23
3.4 Surface équivalente d'une cible.....	24
3.4.1 Exemple du biboule.....	24
3.4.2 Cas général.....	25
3.5 Représentation mathématique du signal reçu.....	27
3.6 Direction d'arrivée. Ecartométrie monopulse.....	29
<b>Chapitre IV — Propagation.....</b>	<b>31</b>
4.1 Introduction.....	31
4.2 Rôle du sol.....	31
4.2.1 Phénomène de réflexion.....	31
4.2.2 Présence d'obstacles - Diffraction.....	35
4.3 Rôle de la troposphère.....	35
4.3.1 Propagation normale.....	35
4.3.2 Propagation anormale.....	36
4.3.3 Absorption atmosphérique.....	37
4.4 Phénomènes divers.....	38



Chapitre V — <i>Bruits et signaux parasites</i> .....	39
5.1 Introduction.....	39
5.2 Bruit thermique.....	40
5.2.1 Caractéristiques du bruit thermique.....	40
5.2.2 Définition du facteur de bruit.....	40
5.2.3 Facteur de bruit d'une chaîne de réception.....	41
5.3 Bruit radiométrique.....	42
5.4 Echos parasites, fouillis (clutter).....	43
5.4.1 Fouillis et échos de sol (clutter de sol).....	43
5.4.2 Retour de mer (clutter de mer).....	46
5.4.3 Echos météorologiques (clutter atmosphérique).....	46
Chapitre VI — <i>Détection des cibles ponctuelles</i> .....	49
6.1 Introduction.....	49
6.2 Récepteur optimal (bruit blanc).....	50
6.2.1 Définition du traitement effectué.....	50
6.2.2 Interprétation du récepteur optimal.....	52
6.2.3 Rapport signal sur bruit en sortie du récepteur optimal.....	52
6.2.4 Détection du signal en bruit blanc.....	53
6.3 Récepteur optimal en bruit coloré connu.....	57
6.4 Récepteur adaptatif en bruit coloré inconnu.....	58
6.4.1 Traitement adaptatif avec référence bruit seul.....	58
6.4.2 Traitement adaptatif sans référence bruit seul (FFC).....	59
6.5 Traitement spatio-temporel.....	61
6.6 Forme d'onde et fonction d'ambiguïté.....	62
6.6.1 Fonction d'ambiguïté.....	64
6.6.2 Pouvoir de résolution.....	67
6.6.3 Précision de mesure distance et vitesse.....	68
Partie II — <i>Détection et poursuite des cibles</i> .....	69
Chapitre I — <i>Élimination du fouillis</i> .....	71
1.1 Introduction.....	71
1.2 Choix de la forme d'onde.....	71
1.2.1 Calcul du fouillis de sol reçu par le radar.....	71
1.2.2 Élimination du fouillis dans le cas général.....	74
1.2.3 Choix d'une forme d'onde adaptée à l'élimination du fouillis.....	78
1.3 Taux d'élimination et pureté spectrale.....	83
1.3.1 Définition du taux d'élimination et du taux de visibilité.....	83
1.3.2 Pureté spectrale.....	84
1.3.3 Contraintes liées à l'élimination des échos de sol.....	88
1.4 Dynamique et linéarité.....	91
Chapitre II — <i>Détection Air-Air</i> .....	93
2.1 Introduction.....	93
2.2 Mode BFR non cohérent.....	93
2.2.1 Forme d'onde et traitement théorique.....	94
2.2.2 Synoptique du radar classique non cohérent.....	95
2.3 Le radar à compression d'impulsion.....	101
2.3.1 Définition.....	101
2.3.2 Synoptique du radar à compression d'impulsion.....	102
2.3.3 Dispositifs de compression d'impulsion.....	102



2.4	Le radar BFR Doppler (MTI).....	104
2.4.1	Définition du radar BFR Doppler.....	104
2.4.2	Etude théorique du radar BFR cohérent.....	105
2.4.3	Synoptique de base du BFR Doppler.....	106
2.4.4	Remarques diverses concernant le VCM.....	108
2.4.5	VCM aéroporté (AMTI = Airborne MTI).....	108
2.5	Mode HFR.....	108
2.5.1	Le radar à onde continue (CW).....	109
2.5.2	Radar HFR à taux de charge 1/2.....	110
2.5.3	Mesures de distance.....	114
2.6	Modes pulse-Doppler (HFR et MFR).....	114
2.6.1	Définition.....	114
2.6.2	Le récepteur pulse-Doppler idéal.....	115
2.6.3	Synoptique du radar pulse-Doppler.....	117
2.6.4	Fenêtres d'échantillonnage distancé.....	118
2.6.5	Analyse en fréquence.....	119
2.6.6	Eclipses et lever d'ambiguïtés.....	119
2.6.7	Performances de détection.....	120
<b>Chapitre III — Poursuite des cibles aériennes.....</b>		<b>123</b>
3.1	Introduction.....	123
3.2	Mouvements et attitudes du porteur. Référentiels.....	124
3.3	Poursuite sur information continue PSIC.....	125
3.3.1	Définition.....	125
3.3.2	Acquisition - Présence.....	125
3.3.3	Structure générale des boucles de poursuite.....	126
3.3.4	Poursuite distance.....	126
3.3.5	Poursuite vitesse Doppler.....	127
3.3.6	Poursuite angulaire.....	128
3.4	Pistage.....	128
3.4.1	Définition.....	128
3.4.2	Estimation de la trajectoire.....	129
3.4.3	Gestion et entretien des pistes.....	130
3.5	Poursuite sur information discontinue.....	130
<b>Chapitre IV — Détection et poursuite des cibles au sol.....</b>		<b>131</b>
4.1	Introduction.....	131
4.2	Détection et poursuite des cibles contrastées.....	131
4.3	Détection et poursuite des cibles terrestres mobiles.....	132
4.3.1	Porteurs lents (hélicoptères).....	132
4.3.2	Porteurs rapides (avions).....	132
<b>Chapitre V — Détection et poursuite des cibles marines.....</b>		<b>135</b>
5.1	Radars de surveillance maritime.....	135
5.2	Stratégie de recherche.....	136
5.2.1	Position par rapport au vent.....	136
5.2.2	Altitude de vol.....	136
5.3	Détection des navires de surface.....	138
5.3.1	Fréquence de récurrence.....	138
5.3.2	Résolution.....	138
5.3.3	Polarisation.....	139
5.3.4	Fréquences d'émission.....	139
5.3.5	Traitements.....	139



5.4	Détection des petites cibles (périscopes).....	140
5.4.1	Traitements.....	140
5.4.2	Résolution.....	141
5.4.3	Fréquence de récurrence.....	142
5.5	Poursuite des cibles marines.....	142
5.5.1	Objectifs de la poursuite.....	142
5.5.2	Initialisation de la poursuite.....	142
5.5.3	Principe de l'algorithme.....	142
5.6	Classification des cibles marines.....	144
5.6.1	Mesure de la SER.....	144
5.6.2	Profil en distance.....	144
5.6.3	Imagerie.....	144
<b>Chapitre VI — Pollution électromagnétique.....</b>		<b>145</b>
6.1	Introduction.....	145
6.2	Compatibilité électromagnétique.....	145
6.3	Pollutions internes au radar.....	147
6.3.1	Pilote de fréquences.....	147
6.3.2	Emetteur.....	148
6.3.3	Ensemble avant.....	148
6.3.4	Récepteur à fréquence intermédiaire.....	149
6.3.5	Traitements numériques.....	149
6.4	Pollutions entre équipements d'un porteur.....	150
6.4.1	Découplage entre aériens.....	150
6.4.2	Découplage en fréquence.....	150
6.4.3	Gestion des fonctionnements.....	151
6.5	Interactions non intentionnelles.....	151
6.5.1	Interactions hors bande radar.....	152
6.5.2	Interactions dans la bande radar.....	152
<b>Partie III — Visualisation du sol et imagerie.....</b>		<b>153</b>
<b>Chapitre I — Visualisation du sol.....</b>		<b>155</b>
1.1	Introduction.....	155
1.2	Principaux paramètres.....	155
1.2.1	Mouvements du porteur.....	155
1.2.2	Forme du faisceau.....	156
1.2.3	Dynamique des signaux.....	156
1.2.4	Résolution en distance.....	157
1.2.5	Résolution angulaire.....	157
1.3	Visualisation avec affinage monopulse.....	158
1.3.1	Affinage par suppression.....	158
1.3.2	Affinage par compression.....	158
<b>Chapitre II — Imagerie.....</b>		<b>159</b>
2.1	Applications des radars d'imagerie.....	159
2.2	Qualité de l'image.....	160
2.2.1	Résolution.....	160
2.2.2	Conformité géographique.....	163
2.2.3	Rapport signal sur bruit.....	163
2.2.4	Résolution radiométrique.....	163
2.2.5	Conformité radiométrique.....	164
2.2.6	Contraste.....	164



2.3	Haute résolution suivant l'axe distance.....	165
2.3.1	Bande synthétique.....	165
2.3.2	Deramp.....	167
<b>Chapitre III — Antenne synthétique.....</b>		<b>171</b>
3.1	Principe.....	171
3.1.1	L'antenne synthétique : un traitement Doppler.....	172
3.1.2	Antenne synthétique focalisée ou non focalisée.....	173
3.1.3	Une configuration remarquable : le radar à antenne latérale.....	178
3.1.4	La résolution ultime du radar à antenne synthétique.....	181
3.2	Les ambiguïtés du radar à antenne synthétique.....	182
3.2.1	Ambiguïté de distance.....	182
3.2.2	Ambiguïté transverse.....	183
3.3	Le radar à antenne synthétique dans l'espace.....	185
3.3.1	Résolution du radar à antenne synthétique latérale focalisée.....	186
3.3.2	Une forme d'onde ambiguë en distance.....	186
3.3.3	Surface de l'antenne.....	187
3.3.4	Fréquence Doppler et pilotage en lacet.....	189
3.4	Les modes de fonctionnement du radar à antenne synthétique.....	191
3.4.1	L'affinage Doppler, antenne en rotation.....	191
3.4.2	Le télescope.....	192
3.4.3	Le scansar.....	193
3.4.4	Le squint, ou mode dépointé.....	193
3.4.5	Le multivue.....	194
3.4.6	Autres modes.....	194
<b>Chapitre IV — Antenne synthétique, aspects spécifiques.....</b>		<b>195</b>
4.1	Migrations.....	195
4.2	Erreurs de phase.....	196
4.2.1	Effet d'une erreur de phase périodique de fréquence $f_n$ .....	197
4.2.2	Effet d'une erreur aléatoire.....	199
4.3	Mouvements du porteur.....	201
4.3.1	Exemple de calcul : Mouvements suivant la route du porteur.....	202
4.3.2	Calcul de l'effet des mouvements transverses et des vibrations.....	205
4.3.3	Synthèse des mouvements du porteur.....	206
4.3.4	Bande X ou bande L ?.....	209
4.4	Pureté spectrale.....	210
4.4.1	Modélisation.....	210
4.4.2	Effet des instabilités.....	210
4.4.3	Autres sources d'instabilités de fréquence.....	212
4.5	Traitement du signal.....	212
4.5.1	Fonction de transfert.....	213
4.5.2	Synoptique du traitement.....	216
4.5.3	Traitement « une-passe ».....	217
4.5.4	Traitements multivue.....	217
4.6	Bilan énergétique.....	219
4.6.1	Bilan énergétique sur cible ponctuelle.....	219
4.6.2	Bilan énergétique sur cible diffuse.....	219
4.6.3	Cas du traitement multivue.....	220
4.7	Autres traitements.....	221
4.7.1	Visualisation des cibles mobiles.....	221
4.7.2	Mesure de hauteur par interférométrie.....	222
4.7.3	Polarimétrie.....	224



4.7.4	Traitements d'amélioration de l'image.....	226
4.7.5	Traitements thématiques.....	226
<b>Chapitre V — Antenne synthétique inverse.....</b>		<b>227</b>
5.1	Objectifs et applications.....	227
5.2	Description préliminaire de l'ISAR.....	228
5.2.1	Principe général.....	228
5.2.2	Résolution.....	228
5.2.3	Plan de projection.....	229
5.3	Imagerie de navires à la mer.....	230
5.3.1	Modélisation.....	230
5.3.2	Application.....	232
<b>Chapitre VI — Autres moyens d'observation.....</b>		<b>233</b>
6.1	Radars en ondes millimétriques.....	233
6.1.1	Intérêt des ondes millimétriques.....	234
6.1.2	Applications aéroportées : domaine d'emploi.....	234
6.1.3	Surface équivalente radar des câbles.....	234
6.2	Diffusiomètres.....	235
6.3	Altimètres.....	237
6.3.1	Faisceau d'antenne.....	237
6.3.2	Bilan énergétique.....	238
<b>Partie IV — Principales applications.....</b>		<b>239</b>
<b>Chapitre I — Missions et rôle du radar.....</b>		<b>241</b>
1.1	Introduction.....	241
1.2	Applications civiles.....	241
1.2.1	Domaine spatial.....	241
1.2.2	Domaine du transport aérien.....	241
1.2.3	Domaine maritime.....	242
1.3	Applications militaires.....	242
1.3.1	Domaine spatial.....	242
1.3.2	Domaine aéroporté.....	242
1.3.3	Domaine maritime.....	242
1.4	Quelques exemples d'applications.....	243
1.4.1	Observation spatiale du sol.....	243
1.4.2	Surveillance aérienne.....	245
1.4.3	Surveillance maritime.....	246
1.4.4	Surveillance du champ de bataille.....	249
1.4.5	Supériorité aérienne, Interception, Combat.....	251
1.4.6	Appui tactique, attaque au sol, interdiction.....	253
1.4.7	Pénétration à très basse altitude.....	255
<b>Chapitre II — Descriptions techniques de radars.....</b>		<b>257</b>
2.1	Formules de base.....	257
2.2	Synoptique générique d'un radar.....	259
2.3	Radar d'observation spatiale.....	259
2.3.1	Chaîne de préparation et de gestion de la mission.....	259
2.3.2	Chaîne image.....	260
2.3.3	Chaîne d'exploitation de l'image.....	262
2.4	Radar de surveillance aérienne (AEW).....	263
2.4.1	Spécifications des radars AEW.....	263



2.4.2	Description technique.....	263
2.4.3	Calculs des performances.....	265
2.5	Radar de surveillance maritime.....	267
2.5.1	Mode de détection des navires de surface.....	267
2.5.2	Mode de détection des petites cibles (périscopes).....	267
2.6	Radar de surveillance du champ de bataille.....	269
2.6.1	Spécifications.....	269
2.6.2	Description technique.....	269
2.7	Radar d'interception.....	272
2.7.1	Spécifications.....	272
2.7.2	Description technique.....	273
2.8	Radar d'appui tactique.....	276
2.8.1	Spécifications.....	276
2.8.2	Description technique.....	276
2.9	Radar de pénétration.....	283
2.9.1	Spécifications.....	283
2.9.2	Description technique.....	283
<b>Chapitre III — Radar multifonction.....</b>		<b>285</b>
3.1	Introduction.....	285
3.2	Fonctions et modes radar.....	285
3.2.1	Fonctions.....	285
3.2.2	Aspects dimensionnels.....	287
3.2.3	Performances et contraintes.....	287
3.3	Spécifications techniques.....	289
3.4	Description technique.....	290
3.4.1	Antenne.....	290
3.4.2	Emetteur.....	290
<b>Chapitre IV — Aspects technologiques.....</b>		<b>291</b>
4.1	Introduction.....	291
4.2	Les grandes étapes technologiques.....	291
4.2.1	L'ère de l'analogique.....	292
4.2.2	L'ère du numérique.....	294
4.2.3	L'ère prochaine.....	296
4.3	Evolution des constituants radar.....	297
4.3.1	Les circuits électroniques.....	297
4.3.2	Les circuits électroniques de puissance.....	298
4.3.3	Les émetteurs.....	298
4.3.4	Les antennes.....	299
4.3.5	Les pilotes de fréquences.....	301
4.3.6	Les récepteurs.....	302
4.3.7	Les traitements.....	303
4.4	Technologie spatiale.....	307
4.4.1	Durée de vie.....	307
4.4.2	Tenue aux radiations.....	308
<b>Partie V — Radars du futur.....</b>		<b>309</b>
<b>Chapitre I — Evolution des cibles et des objectifs.....</b>		<b>311</b>
1.1	Introduction.....	311
1.2	Signature électromagnétique.....	311



1.3	Surface équivalente radar.....	312
1.3.1	Effets produisant la SER.....	312
1.3.2	Facteurs agissant sur la SER.....	314
1.3.3	Quelques valeurs de SER.....	314
1.3.4	SER d'un radar.....	315
1.4	Réduction de la signature électromagnétique.....	317
1.4.1	Obtention de faibles SER.....	317
1.4.2	Réduction de la SER du radar.....	319
1.5	Conclusion.....	319
<b>Chapitre II — Aspects opérationnels.....</b>		<b>321</b>
2.1	Introduction.....	321
2.2	Valeurs de SER.....	321
2.3	Portée de détection.....	322
2.4	Distance d'auto-protection.....	323
2.5	Missions.....	324
<b>Chapitre III — Principales limitations des radars actuels.....</b>		<b>325</b>
3.1	Introduction.....	325
3.2	Limites physiques.....	325
3.2.1	Bilan énergétique.....	325
3.2.2	Cibles fugitives : Probabilité d'interception.....	327
3.2.3	Limites de précision de mesure des paramètres de la cible.....	327
3.2.4	Limites de résolution.....	327
3.2.5	Limite de couverture angulaire.....	328
3.3	Limitations technologiques.....	328
3.3.1	Forme d'onde.....	328
3.3.2	Pureté spectrale et dynamique.....	329
3.3.3	Flux de données.....	330
3.3.4	Exploitation.....	330
<b>Chapitre IV — Evolution des radars aéroportés et spatiaux.....</b>		<b>331</b>
4.1	Introduction.....	331
4.2	Répliques à la réduction de SER des cibles.....	331
4.2.1	Compensation du bilan énergétique.....	331
4.2.2	Utilisation de bandes basses.....	332
4.2.3	Multistatisme.....	333
4.3	Lutte contre les menaces électromagnétiques.....	334
4.3.1	Formes d'ondes.....	334
4.3.2	Adaptativité du faisceau (FFC).....	335
4.4	Cibles multiples et évolutives et couverture angulaire.....	336
4.4.1	Balayage électronique, stratégie de balayage et de détection.....	336
4.4.2	Antennes conformes. Antennes dispersées.....	337
4.5	Radar d'imagerie spatial.....	338
4.5.1	Evolution à court et moyen terme.....	338
4.5.2	Evolution à long terme.....	338
4.5.3	Coopération air-espace.....	338
<b>Chapitre V — Conclusions.....</b>		<b>339</b>
<b>Liste des symboles.....</b>		<b>341</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>343</b>
<b>Index.....</b>		<b>345</b>