



Table des matières

Présentation	1
Les auteurs	7
Chapitre 1 • Propagation des rayonnements optiques jusqu'aux tissus biologiques	9
1.1 L'émission cohérente et incohérente	9
1.2 Le Laser	10
1.2.1 Principe de fonctionnement	10
1.2.2 Les principaux lasers	13
1.3 Les autres sources optiques artificielles	19
1.3.1 Caractéristiques radiométriques associées	19
1.3.2 Différents types de sources	20
1.4 Les caractéristiques de l'émission	25
1.4.1 Les caractéristiques spatiales	25
1.4.2 Caractéristiques spectrales	26
1.4.3 Caractéristiques temporelles	26
1.4.4 Caractéristiques énergétiques	28
1.5 La propagation des faisceaux optiques	30
1.5.1 Libre propagation	30
1.5.2 Phénomènes atmosphériques	32
1.5.3 Propagation dans les systèmes optiques	36

1.6	Les propriétés optiques des surfaces et des milieux	40
1.6.1	Bilan énergétique	40
1.6.2	Extinction	41
1.6.3	Réflexion et transmission diffuses	41
1.6.4	Réflexion spéculaire et transmission directe	46
1.7	Les propriétés thermiques des matériaux	51
1.7.1	Approche théorique générale	51
1.7.2	Approche théorique simplifiée	52
	Bibliographie	56

Chapitre 2 • Propagation et effets des rayonnements optiques dans les tissus vivants

		59
2.1	La peau	59
2.1.1	L'épiderme	60
2.1.2	Le derme et l'hypoderme	61
2.1.3	Principales fonctions de la peau	62
2.2	L'œil	64
2.2.1	La tunique fibreuse	64
2.2.2	La tunique uvéale	66
2.2.3	La rétine	67
2.2.4	Les milieux transparents	72
2.3	Aspect géométrique de la propagation des rayonnements optiques	73
2.3.1	La diffusion	74
2.3.2	La réflexion	75
2.3.3	L'absorption	75
2.3.4	Le bilan énergétique	76
2.3.5	Les aberrations optiques	77
2.4	Les mécanismes d'interaction	81
2.4.1	Les effets photochimiques (rayonnements laser et incohérents)	82
2.4.2	Les effets thermiques (rayonnements laser et incohérents)	84
2.4.3	L'effet photoablatif	86
2.4.4	Les effets disruptifs	87
2.5	Aspect énergétique et effets des rayonnements optiques	89
2.5.1	Les effets sur la peau	89
2.5.2	Les effets sur l'œil	98
2.5.3	Les bases des limites d'exposition définies par les normes	113
	Bibliographie	117

Chapitre 3 • Textes de référence	127
3.1 Historique et organisations traitant de sécurité des ROA	127
3.1.1 Rayonnements cohérents (lasers)	127
3.1.2 Rayonnements incohérents	129
3.2 Textes de référence pour les utilisateurs d'appareils à laser	131
3.2.1 Les textes réglementaires	131
3.3 Textes de référence pour les fabricants d'appareils à laser	143
3.3.1 Les textes réglementaires	143
3.3.2 Les normes	145
3.4 Calculs d'application des textes relatifs aux lasers	160
3.4.1 Durée d'exposition	160
3.4.2 Diaphragmes limites	161
3.4.3 Angle apparent	164
3.4.4 Les cas limites	167
3.4.5 Effet des impulsions répétitives selon la directive 2006/25/CE	169
3.4.6 Effets des impulsions répétitives selon la norme EN IEC 60825-1	173
3.4.7 Source large bande ou multitraies	178
3.5 Textes de référence pour les utilisateurs et fabricants d'appareils utilisant des sources incohérentes	180
3.5.1 Les textes réglementaires	180
3.5.2 Les normes	186
3.6 Calculs d'application des textes relatifs aux sources incohérentes	192
3.6.1 Exemple de calcul pour une lampe au Mercure	192
3.6.2 Exemple de calcul pour seize diodes électroluminescentes blanches	193
3.6.3 Exemple d'une lampe au Xénon	195
3.6.4 Exemples d'application aux corps noirs	196
3.7 Autres textes relatifs à la sécurité des ROA	197
3.7.1 Normes verticales de sécurité laser	197
3.7.2 Autres normes laser	199
Bibliographie	200
Chapitre 4 • Risques associés	207
4.1 Introduction	207
4.2 Risques d'exposition à des rayonnements connexes	208
4.2.1 Les rayonnements optiques ultraviolets, visibles et infrarouges	208
4.2.2 Les rayonnements ionisants parasites	212
4.2.3 Les radiofréquences	215

4.3	Risque électrique	217
4.3.1	Les hautes tensions	217
4.3.2	L'électricité statique	219
4.4	Risque chimique	219
4.4.1	La contamination de l'atmosphère	219
4.4.2	Les risques spécifiques	220
4.5	Risque incendie et thermique	225
4.6	Risque lié à la cryogénie	225
4.7	Risques dus à la toxicité des matériaux traités	225
4.7.1	Les aérosols produits par les métaux	227
4.7.2	Les aérosols produits par les plastiques.	227
4.7.3	La réduction du risque	228
4.8	Risques liés à l'ergonomie du poste de travail	228
4.9	Risques liés à l'emploi de ROA en atmosphère explosive (ATEX)	228
	Bibliographie	230

Chapitre 5 • Analyse de risques des ROA 233

5.1	Principes généraux et références	233
5.1.1	Différences entre les sources incohérentes et les lasers	233
5.1.2	Références	233
5.1.3	Définitions	234
5.2	Méthode quantitative de type « AMDEC »	237
5.2.1	Description de la méthodologie	237
5.2.2	Estimation de l'occurrence	240
5.2.3	Évaluation de la gravité	248
5.2.4	Évaluation de la criticité C	258
5.3	Approche probabiliste pour les applications laser en extérieur	259
5.3.1	Introduction	259
5.3.2	Éléments de base des modèles probabilistes	260
5.3.3	Précautions pour l'application des modèles probabilistes	264
5.4	Introduction aux exemples	264
5.5	Exemple pour la conception d'un système laser (Méthode AMDEC)	265
5.5.1	Description de l'application, des phases et des zones	265
5.5.2	Analyse de risque	267
5.5.3	Réduction du risque	269
5.6	Exemple dans le cas de traitement de matériaux par laser	269
5.6.1	Description de l'application, des phases et des zones	269
5.6.2	Évaluation des niveaux de risque	271
5.6.3	Réduction du risque	276

5.7	Exemple dans le cas d'instrumentation par laser en milieu industriel	277
5.7.1	Description de l'application, des phases et des zones	277
5.7.2	Analyse de risque	279
5.7.3	Réduction du risque	280
5.8	Exemple d'utilisation d'un laser en laboratoire	281
5.8.1	Description de l'application, des phases et des zones	281
5.8.2	Analyse de risque	283
5.8.3	Réduction du risque	285
5.9	Exemple d'utilisation de lasers en milieu médical	286
5.9.1	Description de l'application, des phases et des zones	286
5.9.2	Définition des éléments de la chaîne de sécurité	288
5.9.3	Synoptique de la chaîne de sécurité	288
5.10	Exemple pour une source incohérente	289
5.10.1	Description de l'application, des phases et des zones	289
5.10.2	Évaluation des niveaux de risque	290
5.10.3	Mesures de prévention et de protection	290
	Bibliographie	291

Chapitre 6 • Mesures de prévention	293
6.1 Introduction	293
6.2 Accès aux locaux et surveillance des zones	294
6.2.1 Accès aux locaux (zones confinées)	294
6.2.2 Surveillance des zones laser (zones non confinées)	296
6.3 Organisation des zones laser	300
6.3.1 Zone confinée	300
6.3.2 Zone non confinée	301
6.4 Procédures en phase d'utilisation normale	307
6.4.1 Cas du laboratoire	307
6.4.2 Cas de l'utilisation en extérieur	312
6.4.3 Cas de l'utilisation dans une usine ou atelier	313
6.4.4 Cas de l'utilisation en milieu médical	313
6.4.5 Cas de l'utilisation en télécommunication	314
6.5 Procédures en phase de réglages	314
6.5.1 Cas du laboratoire	314
6.5.2 Cas de l'utilisation en extérieur	315
6.5.3 Cas de l'utilisation dans une usine ou atelier	316
6.5.4 Cas de l'utilisation en milieu médical	316
6.5.5 Cas de l'utilisation en télécommunication	317
6.6 Formations et « habilitation »	317
6.6.1 Sensibilisation laser ou PISL	317

6.6.2	Sensibilisation aux risques présentés par les sources incohérentes	318
6.6.3	« Habilitation laser » ou PERL	318
6.6.4	« Habilitation ROA »	319
6.6.5	Formations intermédiaires ou spécifiques	319
6.6.6	Renouvellement de la formation	320
6.7	Le responsable « sécurité laser » et la personne compétente	320
6.7.1	La personne compétente (au sens de l'IEC 60825-14)	320
6.7.2	Le Laser Safety Officer (LSO) ou le PCSL	320
6.8	Tableaux récapitulatifs des recommandations de prévention	322

Chapitre 7	• Moyens de protection	325
7.1	Introduction	325
7.2	Les équipements de protection collective passifs laser	326
7.2.1	Caractéristiques générales	326
7.2.2	Panneaux opaques	326
7.2.3	Panneaux transparents pour lasers	332
7.2.4	Gainage des fibres	332
7.3	Les équipements de protection collective passifs pour les sources incohérentes	334
7.3.1	Protection contre les UV	334
7.3.2	Protection contre les infrarouges	335
7.3.3	Protection contre la lumière bleue	336
7.4	Les équipements de protection collective actifs	338
7.4.1	Protecteurs actifs (y compris les fibres optiques)	338
7.4.2	Automates de sécurité	340
7.5	L'obturation, l'atténuation et l'interruption de faisceau	341
7.5.1	Objectifs de ces éléments de sécurité	341
7.5.2	Obturateurs	341
7.5.3	Atténuateurs	342
7.5.4	Bloqueurs et pièges à lumière	343
7.6	Les équipements de protection individuelle pour les lasers	345
7.6.1	Les lunettes passives	345
7.6.2	Les systèmes actifs de visualisation	354
7.7	Les équipements de protection individuelle pour les sources incohérentes	355
7.7.1	Les lunettes passives	355
7.7.2	Les systèmes actifs de visualisation	360
	Bibliographie	361

Chapitre 8 • Accidents	363
8.1 Introduction	363
8.2 La base de données	363
8.3 Analyse des accidents recensés	364
8.3.1 Les troubles dus au faisceau	364
8.3.2 Les accidents en laboratoire	365
8.3.3 Les accidents en milieu industriel	366
8.3.4 Les accidents en extérieur	367
8.4 Les protecteurs individuels	368
8.5 Les dommages induits par les risques associés	369
8.5.1 Les dommages d'origine électrique	369
8.5.2 Les dommages d'origine chimique	370
8.5.3 Le risque incendie	370
8.5.4 Les dommages dus à la toxicité des matières produites	370
8.5.5 Les dommages créés par les rayonnements connexes	370
8.5.6 Le risque lié au bruit	371
8.6 Quelques exemples de situations accidentelles fréquentes	371
8.7 Relation entre la gravité des accidents et l'expérience professionnelle	372
8.8 Conclusion	373
Bibliographie	374
 Annexe A • Comparaison des LEA de classe 3B et des valeurs d'éclairement correspondant aux risques associés avec la classe 3B	 375
A.1 Comparaison pour le risque cutané	376
A.2 Risque de réflexions diffuses	378
A.3 Conclusions	380
 Annexe B • Comparaison des valeurs limites d'exposition pour les lasers et pour les sources incohérentes	 381
B.1 Méthodologie	382
B.2 Résultats généraux	383
B.3 Interprétation pour la partie UV	384
B.4 Interprétation pour la partie visible	385
B.5 Interprétation pour la partie infrarouge	386
B.6 Conclusions	387
 Annexe C • Exemple de calculs pour les sources incohérentes de type « corps noirs »	 389
C.1 Méthodologie	389

C.2	Lampes halogènes	390
C.3	Plasma de réémission	392
C.4	Pièces en fusion ou fours	394
C.5	Émetteurs à ondes courtes et moyennes	395
C.6	Le Soleil	397
Acronymes		399
Unités et symboles (tirés de la norme ISO 11145:2018)		401
Glossaire		403