

PROfil

La pratique de la sécurité des rayonnements optiques artificiels

José Garcia et Daniel Courant

La pratique de la sécurité des rayonnements optiques artificiels

José Garcia et Daniel Courant

Cet ouvrage a pour objectif d'aider le responsable d'installation et l'ingénieur de sécurité à concevoir l'organisation et la mise en œuvre des mesures de prévention et de protection collective et individuelle. Il doit permettre également au technicien de valider la sécurité des procédures de réglages et au concepteur de laser, d'appareil à laser ou de systèmes à lampes, d'accéder aux méthodes de mesure en vue de la classification et de la commercialisation de ses produits.

Il présente les principaux lasers dont les lasers à fibre et les sources incohérentes avec différentes lampes y compris les diodes électroluminescentes, mais aussi les corps noirs comme le métal en fusion. Il donne des exemples de calculs intégrant l'influence des phénomènes atmosphériques et des systèmes optiques grossissants sur la propagation des rayonnements optiques. Il recense également les connaissances actuelles sur les dommages induits par les différents rayonnements et les limites d'expositions recommandées par les organismes internationaux.

Des calculs de limites d'exposition, des distances de sécurité, mais aussi de la classification d'appareil à laser ou de groupe de risque de lampes sont expliqués en fonction des paramètres de l'émission. Un chapitre est consacré aux risques associés (hors faisceau) liés aux fonctionnements des sources. Différents exemples d'analyse et de réduction du risque sont détaillés dans cet ouvrage. Les mesures de prévention sont issues du rapport technique IEC 60825-14, mais aussi de l'expérience accumulée par les auteurs au cours des vingt dernières années. Elles s'appuient sur les textes, sur le matériel, ainsi que sur la formation des opérateurs.

Les systèmes de protection collective sont réalisés par des mesures d'ingénierie associées à des équipements actifs ou passifs. La protection individuelle contre les rayonnements incohérents et les lasers est traitée avec des exemples de calculs pour les écrans collectifs et pour les lunettes de protection et de réglage. Enfin, un chapitre recense les accidents induits et présente des exemples de situations accidentelles fréquentes.

***José Garcia**, diplômé de l'École Supérieure d'Optique, a dirigé la société LASOPTIC pendant 20 ans. Il est aujourd'hui chez ALPhANOV le spécialiste de la sécurité d'emploi des rayonnements optiques artificiels, expert auprès de l'IEC TC 76, membre de la SFRP et coordinateur de la commission technique du Comité national de sécurité optique et lasers.*

***Daniel Courant** a étudié les effets des rayonnements laser sur la fonction visuelle au Centre de recherches du service de santé des armées (CRSSA) puis à la direction des sciences du vivant du CEA. Ses travaux ont contribué aux modifications des limites d'exposition. Il a participé jusqu'en 2008 à l'IEC/TC76 chargé de la révision de la publication 60825-1.*

978-2-7598-3505-8



Les ouvrages de la collection PROfil ont pour vocation la transmission des savoirs professionnels dans différentes disciplines. Ils sont rédigés par des experts reconnus dans leurs domaines et contribuent à la formation et l'information des professionnels.

La pratique de la sécurité des rayonnements optiques artificiels

La pratique de la sécurité des rayonnements optiques artificiels

José GARCIA et Daniel COURANT

Illustration de couverture : Trois photographies illustrant la spécificité des problèmes de sécurité associés aux principales applications de lasers (industrie, laboratoire et grand public).

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3505-8 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-3506-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2024

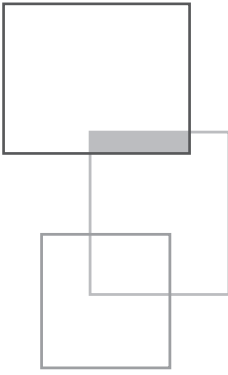


Table des matières

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 multiraies	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

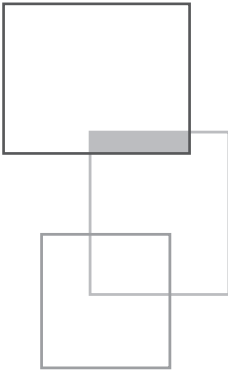
6.1	Introduction	293
6.2	Accès aux locaux et surveillance des zones	294
6.2.1	Accès aux locaux (zones confinées)	294
6.2.2	Surveillance des zones laser (zones non confinées)	296
6.3	Organisation des zones laser	300
6.3.1	Zone confinée	300
6.3.2	Zone non confinée	301
6.4	Procédures en phase d'utilisation 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'éclairage 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



Présentation

Bien qu'il existe des ouvrages traitant de sécurité laser d'excellente qualité [1–6], il nous est apparu indispensable d'établir un document de référence dans ce domaine pour plusieurs raisons. La première est qu'aucun d'entre eux ne traite des rayonnements optiques issus des sources incohérentes. Pourtant de nouvelles techniques d'éclairage, comme les diodes électroluminescentes, présentent un danger croissant par leur dissémination, leur compacité et leur intensité lumineuse de plus en plus importante. L'évolution technologique des lasers n'est pas non plus prise en compte. L'avènement des lasers à fibre, à effets non linéaires multiples et à très large spectre n'est jamais évoqué. Enfin ces documents, bien que toujours d'actualité sur certains aspects, n'intègrent ni les dernières modifications normatives et réglementaires notamment européennes, ni l'état de l'art en matière de protection.

Par une démarche logique, le **premier chapitre** de cet ouvrage s'appuyant sur le rappel des bases optiques et radiométriques traite de la propagation des rayonnements optiques jusqu'aux tissus biologiques. Il présente d'abord les sources de rayonnements optiques artificiels : les principaux lasers, leurs caractéristiques et leurs applications puis des exemples de sources incohérentes, de leurs caractéristiques spectro-radiométriques et de leurs applications. Ce chapitre montre ensuite l'influence des phénomènes atmosphériques sur la libre propagation avec des exemples de calcul mais aussi le rôle des systèmes optiques grossissants (jumelles, microscopes) sur la dangerosité du faisceau, de la propagation guidée ainsi que de l'influence des surfaces et des milieux sur le bilan énergétique.

Le **second chapitre** s'intitule naturellement propagation et effets des rayonnements optiques dans les tissus vivants que sont la peau et l'œil. Un bref rappel anatomique de ces structures et de leurs fonctions permet de mieux appréhender l'influence des différents facteurs physiques, diffusion, réflexion, absorption mais aussi

physiologiques qui conditionnent les effets des rayonnements laser et incohérents. Des exemples empruntés au génie biomédical aident à comprendre les principaux mécanismes d'interaction : photochimique et thermique pour les rayonnements laser et incohérents, photoablatifs et disruptifs pour les faisceaux laser susceptibles de délivrer un éclairement crête $\geq 10^6 \text{ W.cm}^{-2}$. Les lésions induites par les rayonnements ultraviolets, visibles et infrarouges sur les structures cutanées et oculaires sont établies en référence à un seuil de dommage anatomique. Les seuils les plus faibles concernent les longueurs d'onde comprises entre 400 et 1400 nm susceptibles d'être focalisés sur la rétine. À titre de comparaison et en dehors de tout cadre réglementaire, un paragraphe évoque l'éblouissement généré par un laser. Le lecteur aura donc accès aux connaissances actuelles sur les effets biologiques des différentes fréquences du spectre optique, la manière dont elles sont obtenues et aux limites d'exposition recommandées par les organismes internationaux qui sont présentées dans le chapitre suivant.

Bien sûr, le **chapitre 3** a trait aux textes de référence. Actuellement l'organisation à l'origine des valeurs limites d'exposition au rayonnement cohérent est l'International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) qui publie des recommandations concernant l'ensemble des rayonnements optiques. Celles-ci sont ensuite diffusées par des organisations de normalisation internationales dont l'International Electrotechnical Committee (IEC). Au niveau des rayonnements incohérents, l'ICNIRP est encore à l'origine des valeurs limites d'exposition qui sont diffusées par l'IEC et la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Les textes de référence pour les utilisateurs et les fabricants d'appareils à laser sont répartis entre la directive européenne de 2006 et la norme EN IEC 60825-1 de 2014. Cette dernière contient une révision plus récente des limites d'exposition. Le commentaire de cette révision concerne les limites dans le spectre ultraviolet et surtout dans le spectre visible et le proche infrarouge avec l'ajout d'un nouveau facteur de correction plus conservateur. Les limites dans l'infrarouge moyen et lointain sont confirmées. Toutefois, une revue des données a permis de recommander une simplification des limites aux impulsions ultra courtes dans le spectre visible et le proche infrarouge. Une révision récente a permis de prendre en considération l'influence de l'additivité des impulsions répétitives pour des trains irréguliers en fréquence et puissance crête. Le chapitre 3 présente les tableaux des limites d'exposition selon la directive européenne et selon la norme EN IEC 60825-1:2014. Il présente également la définition des huit classes de laser ainsi que les tableaux représentant les limites d'émissions accessibles qui délimitent les valeurs supérieures de ces classes. Ce chapitre contient des calculs d'applications des textes relatifs aux limites d'exposition aux faisceaux lasers mais aussi à la classification d'un appareil à laser avec des exemples et des explications concernant : le choix de la durée d'exposition, la valeur du diaphragme limite, l'angle apparent, le calcul des effets des impulsions répétitives selon la directive européenne, le même calcul selon la norme EN IEC 60825-1:2014, le cas des sources larges bandes ou multi-raies. Bien sûr, le chapitre 3 traite aussi de l'évaluation du niveau de danger des sources de rayonnements incohérents. Les groupes de risque des lampes et la classification des sources sont mentionnés. Des exemples de calculs d'applications des textes sont également présentés comme

l'évaluation du niveau de risque d'une lampe au mercure, d'un ensemble de seize diodes électroluminescentes blanches et d'une lampe au xénon. Le concepteur de laser ou de systèmes à lampes peut ainsi accéder aux méthodes de mesure en vue de la classification et de la commercialisation de son produit.

Le **chapitre 4** traite de risques souvent négligés ou oubliés mais présents autour des installations utilisant des rayonnements optiques artificiels. Ces risques peuvent être liés au fonctionnement de la source ou aux conséquences de son utilisation. Ce sont parmi les exemples traités :

- les matériaux soumis à l'action d'un faisceau laser lors de découpe, soudage, traitement de surface produisent parfois un plasma qui dépasse les valeurs limites d'exposition recommandées. Les mesures montrent que ce sont surtout les ultraviolets et les courtes longueurs d'onde du visible qui peuvent engendrer des risques imprévus ;
- les rayonnements X parasites émis par l'alimentation de certains lasers peuvent se révéler dangereux pendant les phases de réglage ou de maintenance où le capotage est parfois absent ;
- le risque électrique de la haute tension surtout représenté par la présence dans les alimentations de condensateurs qui ne sont pas toujours identifiés et demeurent chargés après l'arrêt du laser ;
- le risque chimique peut entraîner une contamination de l'atmosphère par les systèmes laser à circulation de gaz, par dégradation ou vaporisation de la cible, par les produits des opérations de découpe, perçage ou soudage ;
- les risques spécifiques comme la présence d'ozone, d'oxyde d'azote ou de matériaux particuliers ;
- les colorants et leurs solvants qui sont très toxiques, souvent classés allergènes ou mutagènes.

Le **chapitre 5** concerne l'analyse des risques générés par l'utilisation des rayonnements optiques artificiels. Le risque lié à l'exposition à un faisceau laser dans l'immense majorité des applications est de nature probabiliste puisqu'en principe les utilisateurs ne sont pas directement exposés au faisceau laser. La probabilité d'exposition est faible mais le niveau de danger est important. Une approche probabiliste sera donc souvent privilégiée. Pour les sources incohérentes, la situation est diamétralement opposée puisque majoritairement la probabilité d'exposition est forte mais le niveau de danger est faible. L'approche probabiliste n'est pas adaptée.

L'analyse et la réduction du risque s'appuient sur la norme « Machines » EN ISO 12100:2010 qui fait référence en la matière. L'analyse débute par une détermination des limites de l'équipement pour le fabricant ou des phases de l'installation pour l'utilisateur. Plus la description est fine, plus elle permet de différencier les situations et d'adapter les mesures de prévention et de protection. Des applications sont détaillées dans les exemples. Pour chaque phase ou situation le risque laser doit être identifié avec les autres risques. Pour chaque phase, il convient d'estimer sa gravité et son occurrence. Puis d'examiner si le danger peut être évité. Sinon, il convient d'appliquer une démarche itérative. Des exemples d'analyses sont présentés dans le

cas d'utilisation de lasers en extérieur, de traitement de matériaux par laser en usine-atelier, d'instrumentalisation par laser en milieu industriel, d'utilisation de laser en laboratoire et en milieu médical. Un exemple d'analyse de risque est également présenté avec une source incohérente.

Les mesures de prévention décrites dans le **chapitre 6** sont issues du rapport technique IEC 60825-14:2022 intitulé « User's guide » mais aussi de l'expérience accumulée par les auteurs au cours des vingt dernières années. Ces mesures s'appuient sur les textes, les réglementations, les normes, les procédures et les consignes mais aussi sur les hommes, leurs formations, les mesures organisationnelles et l'aménagement. Les utilisations des lasers et des appareils à laser s'effectuent dans des zones confinées : laboratoires, lieux d'activités médicales ou industrielles ou dans des zones ouvertes : en extérieur, dans des zones de spectacle, de manœuvres militaires. Les mesures de prévention font parfois référence à des rapports techniques qui traitent spécifiquement d'une application (ex IEC TR 60825-3 pour les spectacles et IEC TR 60825-8 pour les applications médicales).

Actuellement, il n'existe pas de normes ou de rapport technique pour l'utilisation des sources incohérentes et leur implantation. Le principe est basé sur la transposition des mesures de prévention et de protection appliquées aux lasers. En zone confinée, cela concerne l'aménagement, les consignes et l'organisation de la sécurité. En extérieur, cela concerne essentiellement la prévention.

L'accès aux locaux, la surveillance des zones en extérieur, en usine, en milieu médical ou dédié aux télécommunications doivent satisfaire à plusieurs contraintes évoquées dans les rapports techniques en fonction des classes de rayonnement. Des exemples de pictogrammes, de verrine, d'avertisseur d'émission ou d'accès protégés sont présentés sous forme de schémas et de photographies. Les éclairages, les réflexions des murs sont commentés comme l'accessibilité aux zones, la direction des faisceaux, la présence de chaises et bureaux, etc. L'organisation des locaux avec des sources incohérentes obéit aux mêmes principes. En extérieur, les zones nominales de danger oculaire (ZNDO) doivent être balisées et surveillées en tenant compte de la possibilité éventuelle d'utiliser des optiques grossissantes. Le chapitre évoque les procédures en cas d'utilisation normale ainsi qu'en phase de réglage.

La directive européenne de 2006 ainsi que la norme EN IEC 60825-1 insistent sur la nécessité d'une formation du personnel. Différents niveaux de formation sont à envisager en fonction de l'accessibilité à un certain niveau de risque : sensibilisation laser, sensibilisation aux risques présentés par les sources incohérentes, « habilitation » laser, « habilitation » ROA. Le terme d'habilitation est impropre puisqu'il n'existe pas actuellement en France et en Europe d'habilitation laser réglementaire. Toutefois, l'IEC 60825-14 fait référence à une personne compétente en sécurité laser ou le Laser Safety Officer, capable de déterminer les mesures de protection et les éléments de sécurité nécessaires pour éliminer ou réduire les risques. Les qualités de cette personne sont discutées dans ce chapitre.

Le **chapitre 7** présente les moyens de protection collective et individuelle. Dans ce chapitre les mesures d'ingénierie associées à des protecteurs actifs ou passifs, à des automates de sécurité, des obturateurs, des arrêts de faisceau et des atténuateurs

seront traitées pour les lasers comme pour les sources incohérentes. La protection individuelle contre les rayonnements incohérents diffère de celle contre les rayonnements laser car il n'y a pas de tenue au flux exigée. En revanche, la contrainte liée à une transmission globale dans le spectre visible peut s'avérer un critère difficile à satisfaire car ces sources incohérentes peuvent émettre sur un spectre très étendu. Le chapitre évoque les équipements de protection collective passifs contre les rayonnements laser, leurs caractéristiques générales et les normes spécifiques comme la norme EN 12254. Le texte fournit des explications concernant les différentes corrections à apporter aux valeurs à comparer avec la norme. Il montre des équipements de protection collective passifs employés pendant le soudage contre les rayonnements ultraviolets B et C, l'usage de films solaires contre les infrarouges et la protection contre la lumière bleue. Le chapitre 7 mentionne également des équipements de protection collective actifs. Nous citerons les systèmes à enceintes pressurisées, à détection de fumée, à jauge de contrainte et les détecteurs optiques. Parmi ceux-ci les fibres optiques dont certaines sont dédiées aux installations industrielles de laser de grande puissance. Le texte présente des schémas d'automates de sécurité ainsi que les éléments classiques de sécurité que sont les obturateurs, les atténuateurs et interrupteurs de faisceau.

Ce chapitre présente aussi les équipements de protection individuelle pour les lasers : les lunettes de protection passives qui satisfont à la norme EN 207 ainsi que les lunettes de réglage correspondant à la norme EN 208. Des systèmes actifs de visualisation où l'œil est remplacé par une caméra sont commentés. Les trois normes auxquelles doivent satisfaire les lunettes passives de protection individuelle contre les rayonnements incohérents correspondent à des applications industrielles bien définies : EN 169 soudage à l'arc et protection contre les UV et le visible, EN 170 brasage au gaz et même protection, EN 171 utilisation de fours et protection contre l'infrarouge, ressuage et détection de défauts par UV. Trois tableaux synthétisent les échelons des normes EN 169, EN 170, EN 171 et EN 172, les applications pratiques, les sources spécifiques et les altérations remarquées des couleurs. Actuellement les systèmes actifs de visualisation concernent exclusivement les masques de soudage à l'arc.

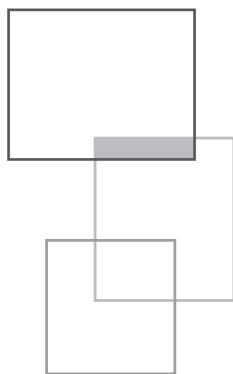
Le dernier **chapitre 8** « Accidents » a pour but de recenser les différents troubles ou dommages induits par l'utilisation des rayonnements optiques artificiels, tant sur le personnel utilisateur que sur le personnel occasionnellement en contact. Les dommages recensés sont ceux créés par le faisceau laser ou associés à son utilisation. Ils sont évoqués dans les chapitres 2 et 4. Ce sont ces dommages, leurs fréquences d'apparition, les lasers impliqués, les conditions d'utilisation et de protection qui sont analysés dans différentes applications en laboratoire, dans l'industrie et en extérieur. L'étude porte sur 366 cas. Quatre-vingt-douze pour cent d'entre eux impliquent le faisceau laser. La majorité des accidents provoqués par le faisceau proviennent de rayonnements invisibles. La majorité des accidentés ne portaient pas de protecteurs individuels. Les raisons en sont discutées. Huit pour cent des accidents sont imputables aux risques associés et la moitié de ceux-ci sont dus au risque électrique. Six cas d'électrocution sont mentionnés. Le chapitre présente quelques exemples de situations accidentelles fréquentes. Il apparaît que les lésions oculaires les plus

graves sont plus fréquemment observées chez les utilisateurs les moins expérimentés : stagiaires, apprentis, thésards possédant moins de 2 ans d'expérience et aucune formation de sécurité.

En conclusion, cet ouvrage a pour but d'aider le responsable d'installation et l'ingénieur de sécurité à concevoir l'organisation et la mise en œuvre des mesures de prévention et de protection collective et individuelle. Il doit permettre également au technicien de valider la sécurité de ses procédures de réglages. Le concepteur de laser, d'appareil à laser ou de systèmes à lampes peut aussi accéder aux méthodes de mesure en vue de la classification et de la commercialisation de ses produits.

Bibliographie

- [1] Sliney D., Wolbarst M. (1980) *Safety with lasers and other optical sources*, Plenum Press.
- [2] Henderson R., Schulmeister K. (2003) *Laser Safety*, CRC Press.
- [3] Henderson R., Schulmeister K. (2021) *Laser Safety: For Users and Manufacturers of Laser Equipment*, 2nd edn, Taylor & Francis.
- [4] Barat K., Ed. (2014) *Laser Safety – Tools and training*, 2nd edn, CRC Press.
- [5] Barat K., Ed. (2019) *Laser Safety – Practical knowledge and solutions*, IOP Series in Coherent Sources and Applications, Institute of Physics Publishing.
- [6] Marshall W. (2000) *Laser Safety Guide*, Laser Institute of America Laser Safety Committee.



Les auteurs

José Garcia est un ingénieur diplômé de l'École supérieure d'optique théorique et appliquée. De 1989 à 2011, il a créé et dirigé la société LASOPTIC spécialisée dans l'optronique. Parmi ses conceptions pour cette société, on peut citer :

- le système optique du Nautille dans le cadre de la mission Titanic ;
- le banc de caractérisation du système laser de Chemcam pour la mission Mars du Rover Curiosity ;
- le ROAmètre un multimètre optique pour l'évaluation du risque sur site des sources de rayonnements optiques incohérents.

Au cours de ces années, il a également réalisé des systèmes laser pour les domaines industriel et militaire et notamment développé des bancs de mesure de seuils de lésions oculaires qui ont contribué à l'évolution des normes de protection laser. Dès les années 2000, il a mis sur pied des formations en France et à l'étranger sur la sécurité des rayonnements optiques et depuis cette période réalise de multiples analyses de risque d'installations et d'équipements laser. Son logiciel LASERSAFETY est utilisé dans plusieurs laboratoires de recherche et dans l'industrie pour l'évaluation du risque lié aux Rayonnements Optiques Artificiels (ROA). Enfin depuis des années, il participe activement aux comités de normalisation internationaux IEC (CENELEC) TC 76 et ISO TC 94. Il est également membre de la SFRP section des rayonnements non ionisants. En 2014, il a rejoint PYLA puis ALPhANOV qui contribuent à la promotion de la filière photonique en France par la recherche et l'essaimage de nouvelles sociétés.

Daniel Courant est docteur en neurosciences. En tant que chercheur, il a étudié les effets des rayonnements laser sur la fonction visuelle au Centre de recherches du service de santé des armées (CRSSA) puis comme chef de projet à la direction

Kinurénine : c'est un métabolite du tryptophane qui présente une forte absorption entre 400 et 500 nm dans le bleu mais réfléchit le jaune.

Leucocytes : ou globules blancs sont des cellules sanguines du système immunitaire produites par la moelle osseuse qui comprennent les polynucléaires neutrophiles, éosinophiles et basophiles ainsi que les lymphocytes et les monocytes.

Létal : qui entraîne la mort.

MgF2 : le fluorure de magnésium est un cristal résistant aux chocs thermiques et mécaniques, transparent sur une très large gamme de longueur d'onde de 110 à 7500 nm.

Oxyhémoglobine : c'est un produit d'oxygénation de l'hémoglobine de couleur rouge qui peut céder facilement l'oxygène qu'il a fixé. Son contraire est la désoxyhémoglobine de couleur bleu violet.

Petite source : Source d'un diamètre apparent α inférieur ou égal au diamètre apparent minimal α_{\min} .

Photon : particule élémentaire de la lumière dont l'énergie E exprimée en Joules (J) ou en électronvolts (eV) est liée à la longueur d'onde λ (en m) par les relations :

$$E = (1,98 \cdot 10^{-25})/\lambda \text{ (en J)} = (1,24 \cdot 10^{-6})/\lambda \text{ (en eV)}.$$

Photosensibilisation : manifestation allergique consécutive à une hypersensibilité de la peau aux rayonnements optiques.

Porphyries : ce sont des molécules impliquées dans le transport du dioxygène, elles entrent dans la composition de l'hémoglobine.

Psoralène : c'est un agent toxique photosensibilisant largement utilisé en photochimiothérapie en association avec les UV-A.

Pyrimidine : molécule dont les dérivés thymine et cytosine sont des constituants de base de la molécule d'ADN. Les deux molécules complémentaires dans la double hélice d'ADN sont les bases adénine et guanine dérivées de la purine.

Rétinol : une des formes de la vitamine A qui stimule les défenses naturelles de la peau et l'aide à lutter contre son vieillissement.

Source apparente : pour un emplacement d'évaluation donné, objet réel ou virtuel qui forme la plus petite image rétinienne possible (en tenant compte de la plage d'accommodation de l'œil humain). Le diamètre dans l'espace objet de cet objet est appelé diamètre apparent.

Système à sécurité positive : Système conçu de façon que le défaut d'un composant n'accroisse pas le danger.

Tryptophane : est l'un des 9 acides aminés essentiels pour la vie, précurseur de la sérotonine qui favorise un bon sommeil.

Waist : rayon du faisceau ω_0 où se situe la plus forte concentration d'énergie. Le diamètre est noté d_0 .