



Approche biomédicale de la prévention des risques liés aux rayonnements optiques artificiels (ROA)[☆]

Nihad Rebbah^{1,2,3}, Solène Molle⁴

1. Étudiante à l'école supérieure Mohamed VI d'ingénierie en sciences de la santé, Casablanca, Maroc
2. Étudiante en échange universitaire à l'université de technologie de Compiègne, Compiègne, France
3. Étudiante stagiaire aux hospices civils de Lyon, Lyon, France
4. Ingénieure biomédicale à la direction de l'ingénierie biomédicale et des équipements (DIBE), aux hospices civils de Lyon, Lyon, France

Correspondance :

Nihad Rebbah, Étudiante en échange universitaire à l'université de technologie de Compiègne, Compiègne, France.
nihad.rebbah@etu.utc.fr, nihad12b@gmail.com



UNIVERSITÉ MOHAMMED VI
DES SCIENCES ET DE LA SANTÉ
CASABLANCA

■ Résumé

La lumière n'a jamais posé de problème depuis sa découverte, mais comme toute chose dans l'univers, l'équilibre est essentiel. Bien que la lumière puisse guérir la peau, elle a également le potentiel de causer des dommages. Les lasers, par exemple, sont des outils très efficaces, mais peuvent aussi endommager les tissus s'ils sont mal utilisés. Dans cet article, nous aborderons en détail la physique de la lumière cohérente et incohérente et nous comprendrons la différence entre la lumière artificielle et la lumière naturelle, ainsi que la manière dont la lumière interagit avec nos cellules et les stimule. Nous verrons ensuite ce qui rend la lumière potentiellement dangereuse dans un contexte médical. Enfin, nous explorerons le rôle des ingénieurs biomédicaux dans les

[☆] Les rayonnements optiques artificiels (ROA) désignent l'ensemble des rayonnements électromagnétiques non ionisants situés entre 100 nm et 1 mm de longueur d'onde, produits par des sources artificielles. Ils regroupent les ultraviolets (UV), la lumière visible et les infrarouges (IR).

hôpitaux, leur implication dans la gestion et l'atténuation de ces risques, ainsi que leur contribution à la protection du personnel médical face aux dangers liés aux technologies utilisant la lumière.

■ Summary

Light has never been a problem since the moment it was discovered, but like everything in this universe, balance is the key. While light can heal the skin, it also has the potential to cause harm. Lasers, for example, can be highly effective tools, but they can also damage tissue if misused. In this article, we will discuss in detail the physics behind light — both coherent and incoherent — and understand the difference between artificial and natural light, as well as how light interacts with and stimulates our cells. We will then examine what makes light a potentially dangerous source in a medical context. Finally, we will explore how biomedical engineers are involved in hospitals to manage and mitigate these risks, and how their role contributes to protecting medical staff from the hazards associated with light-based technologies.

Introduction

Depuis l'intégration formelle des obligations de radioprotection en 2002, à travers le Code du travail, cette notion s'est essentiellement focalisée sur les rayonnements ionisants, notamment dans le domaine médical.

C'est en 2006, avec la directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril, publiée au Journal officiel de l'Union européenne, que la radioprotection a été étendue aux rayonnements non ionisants, en particulier les rayonnements optiques. Cette directive a désigné des zones à risque où une protection est obligatoire et a introduit des valeurs limites d'exposition (VLE) spécifiques. Pourtant, sur le terrain, même après 20 ans de la publication de la directive, la mise en œuvre réelle reste discutable. Les risques associés aux ROA (rayonnements optiques artificiels) sont bel et bien reconnus réglementairement, mais le respect de ces limites est encore loin d'être systématique.

Comme indiqué sur la [figure 1](#), les rayonnements gamma, et X (dits ionisants) appartiennent au spectre électromagnétique et sont caractérisés par une très courte longueur d'onde, ce qui leur confère une énergie élevée, capable d'arracher des électrons aux atomes, d'où leur pouvoir ionisant.

Mais le spectre électromagnétique ne s'arrête pas là : il comprend aussi les rayonnements non ionisants, comme les ondes radio, micro-ondes, et surtout, la portion optique non ionisante qui nous intéresse ici : les UV, le spectre visible et l'infrarouge.

Ces rayonnements, dits "optique", sont des ondes lumineuses, d'où leur nom. Si le rayonnement solaire en est une source naturelle, nous sommes aujourd'hui capables de reproduire artificiellement ces rayonnements ce qui justifie l'expression rayonnements optiques artificiels.

Et plus encore : non seulement nous les imitons, mais nous les optimisons, en concentrant l'énergie et en dirigeant la lumière de façon précise. C'est le cas des lasers, qui

produisent un rayonnement cohérent, plus énergétique, et plus ciblé.

Ces technologies ont démontré leurs avantages considérables, notamment en médecine, avec :

- la photothérapie UV pour le traitement de pathologies dermatologiques comme le psoriasis¹ ou le vitiligo² ;
- la photothérapie néonatale pour traiter l'hyperbilirubinémie³ chez les nouveau-nés ;
- la thérapie par lumière rouge visible pour les lésions précancéreuses ;
- l'éclairage opératoire LED, à la fois performant et économique ;
- et même la stérilisation UVC pour les dispositifs sensibles à la vapeur (ex. : sondes d'échographie) ;
- les interventions invasives grâce à l'introduction des lasers.

Les ROA sont donc devenus indispensables en milieu médical. Mais comme toute technologie puissante, leur usage est à double tranchant : ce qui est conçu pour avoir un effet biologique sur un patient peut aussi en avoir sur le professionnel qui l'utilise ?

Cela dit, toutes les sources ROA en milieu hospitalier ne sont pas dangereuses. Il est essentiel de rappeler que « ROA » signifie simplement lumière artificielle. Ainsi, des dispositifs tels que :

- les lampes d'examen ;
- les petits capteurs infrarouges des tensiomètres ou oxymètres ;
- les lasers de positionnement patient ;
- ou les Infrared Vein Finders pour visualiser les veines.

Sont eux aussi des sources ROA, mais à risque négligeable.

¹ Maladie inflammatoire chronique sous forme plaques rouges épaisses recouvertes de squames blanches.

² Maladie cutanée auto-immune caractérisée par la perte progressive de la pigmentation de la peau.

³ Accumulation excessive de bilirubine dans le sang. Elle se manifeste par un jaunissement de la peau et des yeux.

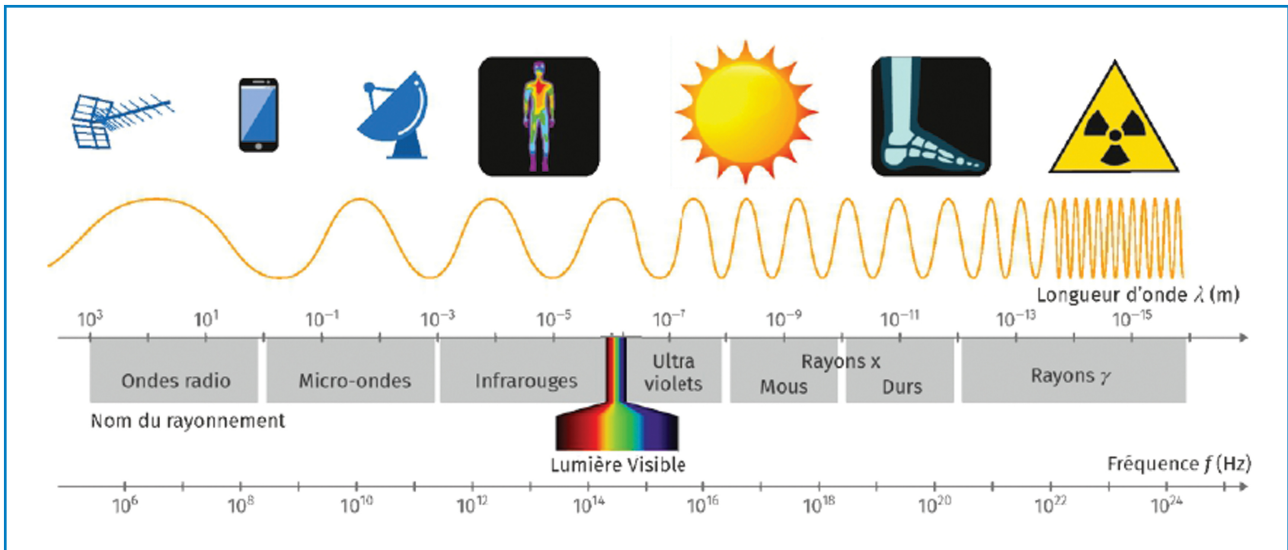


FIGURE 1

Le spectre électromagnétique simplifié

Ce qui définit la dangerosité d'un ROA, ce n'est pas sa nature ou sa fonction, mais son intensité, sa durée d'exposition, et surtout ses effets biologiques potentiels.

Ce sont ces critères qui seront explorés et analysés plus en détail dans la suite de cet article.

Les bases physiques des sources incohérentes et cohérentes

Avant de se plonger dans toute la partie d'analyse des risques liés à ces sources, il faut d'abord comprendre les notions de lumière cohérente et incohérente, qui sont toujours associées à leur définition physique.

Les sources ROA, comme je l'ai déjà expliqué, sont une onde lumineuse d'un point de vue physique classique, mais aussi d'un point de vue physique quantique sont des particules appelées photons.

Dans le cas classique de la production de lumière, ces photons se propagent dans toutes les directions.

Pour comprendre cela de manière « atomique », prenons l'exemple d'une source d'énergie (comme un courant électrique) appliquée à une matière (milieu actif) : les électrons des atomes de cette matière vont alors changer d'orbite et passer à une orbite supérieure.

Après un moment donné, l'électron revient à son orbite d'origine, et cela se traduit par une émission d'énergie sous forme de photon, accompagnée d'une partie thermique.

Ces photons sont désynchronisés et émis dans toutes les directions : on parle alors d'émission spontanée [1].

C'est le cas de la lumière naturelle, ou de la lumière émise par les LEDs ou les lampes fluorescentes utilisées en photothérapie : on parle donc de lumière incohérente.

Cette lumière reste énergétique selon la source d'excitation, mais elle n'est pas suffisamment ciblée, car elle est aussi polychromatique (c'est-à-dire composée de plusieurs longueurs d'onde, avec un spectre large).

L'objectif, en ingénierie biomédicale, est parfois d'obtenir une lumière plus énergétique et plus ciblée, qui agisse précisément sur une structure biologique donnée (chromophore).

Alors que se passe-t-il ?

Si, au moment où l'atome est excité (électron sur une orbite supérieure), un autre photon arrive avec la même énergie que celle séparant les deux orbites, ce photon va perturber l'atome. Cela déclenche le retour de l'électron à son état d'équilibre, mais cette fois, deux photons sont émis ayant exactement la même direction, la même fréquence et la même phase et surtout monochromatique (avec une seule longueur d'onde ou avec un spectre très étroit).

On parle alors d'émission stimulée [1] : c'est le principe même du laser, une source cohérente. La figure 2 illustre ce phénomène.

Pour en savoir plus sur les principes physiques des lasers je vous invite à consulter l'article intitulé laser : *Fundamental principles* rédigé par Jeff Hecht et publié dans le journal *Britannica* [1].

La lumière naturelle et artificielle

Lumière incohérente naturelle : le rayonnement solaire

La principale source de lumière incohérente dans notre environnement est le Soleil. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cette lumière n'est pas composée d'un seul type de rayonnement. Grâce aux travaux d'Isaac Newton et aux expériences de dispersion spectrale (comme le prisme), nous savons

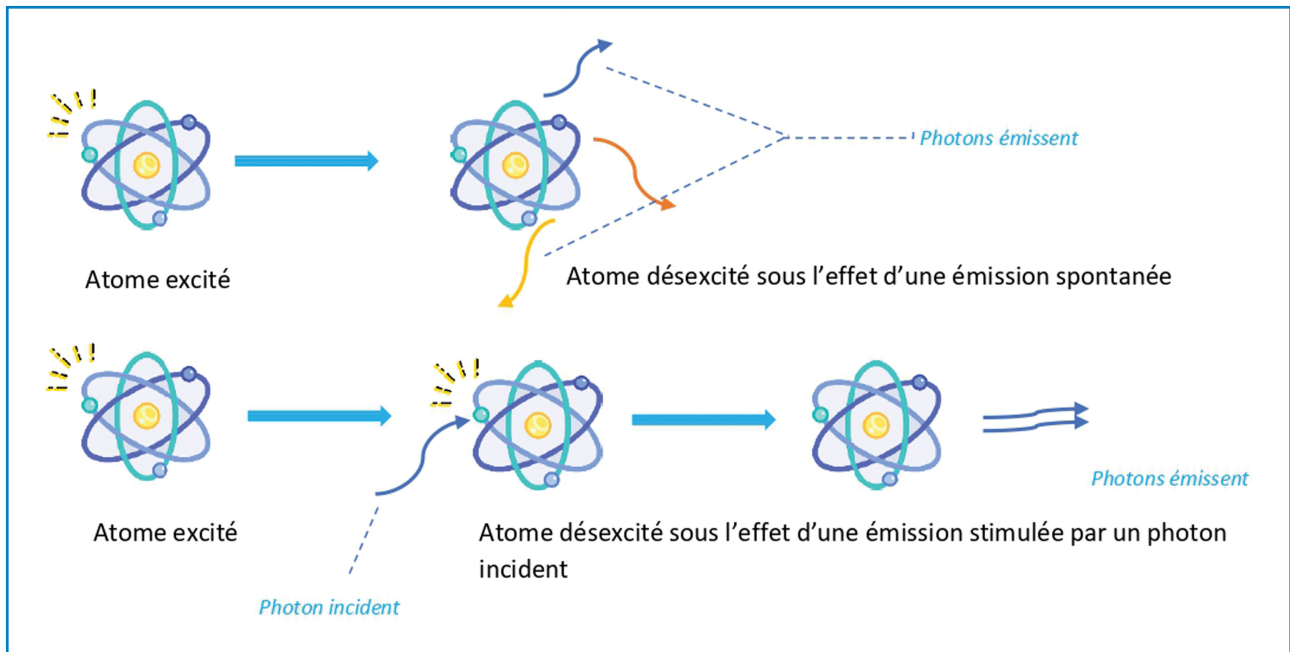


FIGURE 2

Illustration simplifiée de la différence entre l'émission spontanée et l'émission stimulée

que la lumière blanche du Soleil est en réalité constituée de plusieurs couleurs, chacune correspondant à une longueur d'onde spécifique et donc à une énergie photonique distincte. C'est la partie de la lumière visible constituée la seule portion du spectre électromagnétique que l'œil humain peut percevoir et qui traverse presque entièrement l'atmosphère comme illustré sur la *figure 3*. La longueur d'onde s'étend d'environ 400 nm (violet) à 700 nm (rouge) et comprend les 7 couleurs du spectre lumineux : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange et rouge comme on les observe dans un arc-en-ciel.

Cependant, le rayonnement solaire ne se limite pas à la lumière visible. Il s'étend également à des zones invisibles du spectre, comme l'ultraviolet (UV), situé à des longueurs d'onde plus courtes, et les infrarouges, situé à des longueurs d'ondes plus longues.

Les trois types d'ultraviolets :

- UVC (100–280 nm), Ce sont les plus énergétiques et donc les plus dangereux. Leur forte énergie leur donne un caractère parfois ionisant, capable d'endommager directement l'ADN, comme indiqué sur la *figure 3*, les UVC sont totalement absorbés par la couche d'ozone et n'atteignent pas la surface terrestre ce qui souligne l'importance cruciale de la protection de cette couche dans le contexte du changement climatique [2] ;
- UVB (280–315 nm). Partiellement filtrés par l'atmosphère, environ 5 % des UVB parviennent jusqu'à nous. Ils jouent un rôle important dans la synthèse de la vitamine D dans notre organisme [2] ;

- UVA (315–400 nm). Ce sont les UV les moins filtrés par l'atmosphère : plus de 90 % atteignent la surface de la Terre. Ce rayonnement pénètre profondément dans la peau et est principalement responsable du bronzage [2].

△ La proportion d'UVB et d'UVA reçue à la surface terrestre varie selon l'altitude, la saison, l'heure de la journée, et les conditions climatiques (nuages, pollution...).

Le domaine infrarouge est perçu sous forme de chaleur mais reste invisible pour l'œil humain s'étend approximativement de 700 nm à 1 mm, et il est classé en trois zones :

- infrarouge proche (IR-A) : de 0,7 μm à 1,4 μm , Il provient directement du Soleil et traverse l'atmosphère. Il est partiellement absorbé par la peau, et peut pénétrer jusqu'au derme ;
- infrarouge moyen (IR-B) : de 1,4 μm à 3 μm , parfois jusqu'à 25 μm selon les classifications, également présent dans le rayonnement solaire, il est plus absorbé par l'eau contenue dans l'atmosphère ou les tissus ;
- infrarouge lointain (IR-C) : au-delà de 25 μm jusqu'à 1 mm. Moins présent dans le spectre solaire. Il est surtout émis par des corps à température ambiante, comme la Terre, les êtres humains, ou les objets chauffés.

La lumière incohérente artificielle

L'exposition à la lumière naturelle joue un rôle essentiel pour le corps humain : elle stimule de nombreux processus biologiques et physiologiques. D'autant plus que c'est grâce à elle que nous pouvons voir et ressentir la chaleur.

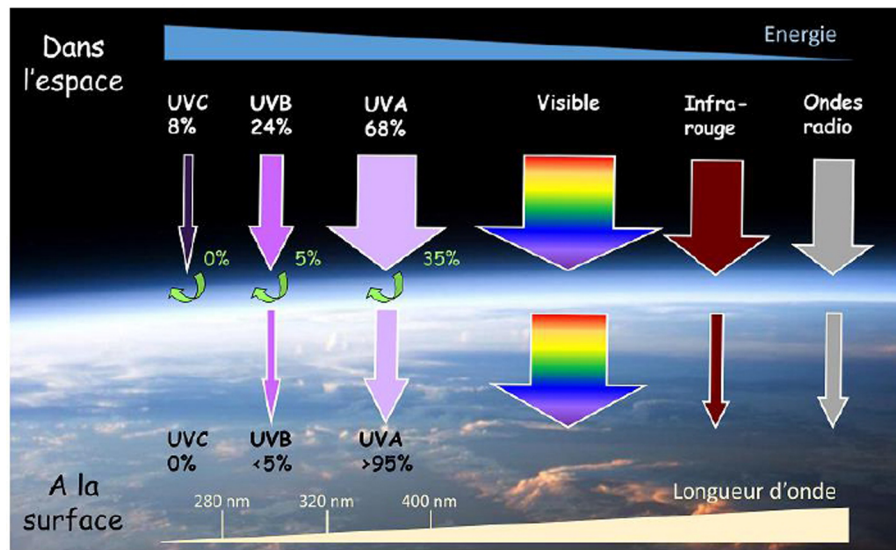


FIGURE 3
Composition du rayonnement solaire dans l'espace et après traversée de l'atmosphère terrestre [3]

La science s'est toujours inspirée de la nature, et l'une des grandes questions a été : comment reproduire cette lumière artificiellement pour en tirer des bénéfices médicaux et technologiques ?

Un peu d'histoire sur les sources incohérentes artificielles et leur production

Historique

L'histoire de la lumière incohérente artificielle commence en 1800 avec les travaux de William Herschel. En étudiant la lumière solaire, il place des thermomètres à différents endroits du spectre visible projeté par un prisme. Il observe alors une élévation de température au-delà du rouge, dans une zone invisible à l'œil nu. Il en conclut l'existence d'un rayonnement invisible qu'il nomme « rayonnement thermique », ce que nous appelons aujourd'hui l'infrarouge.

Un an plus tard, en 1801, Johann Wilhelm Ritter découvre l'ultraviolet, en observant que certaines substances (comme le sel d'aragonite) réagissent fortement à une zone située au-delà du violet du spectre visible. Il démontre ainsi l'existence d'un rayonnement encore plus énergétique que la lumière violette, et invisible à l'œil humain.

L'infrarouge commence à être utilisé en médecine dès 1900, principalement à des fins thermos thérapeutiques : traitement de la douleur, des troubles circulatoires et des tensions musculaires.

Plus d'un siècle plus tard, en 1903, le médecin danois Niels Ryberg Finsen reçoit le prix Nobel de Médecine pour ses travaux pionniers en photothérapie UV, notamment dans le traitement

du lupus vulgaire (forme cutanée de la tuberculose). Ses recherches marquent la première reconnaissance officielle de l'utilisation médicale des rayonnements UV [4].

Entre 1920 et 1950, les UV commencent à être largement utilisés en médecine, principalement pour :

- stimuler la synthèse de vitamine D [5] ;
- traiter certaines maladies dermatologiques comme le psoriasis ou l'eczéma [5] ;
- stériliser du matériel médical, notamment à l'aide des rayons UVC [5] ;

En 1950, à l'hôpital Rochford en Angleterre, une infirmière, Sœur Ward, remarque qu'un bébé placé près d'une fenêtre ensoleillée montre une amélioration de son ictère néonatal (excès de bilirubine dans le sang).

Des études cliniques ultérieures ont confirmé que la lumière bleue (≈ 450 nm) permettait de transformer la bilirubine en une forme soluble, facilitant son élimination naturelle par le foie du nourrisson [6].

C'est ainsi que la photothérapie à lumière visible bleue est entrée dans la pratique médicale.

Quant à la lumière rouge visible, ce n'est que dans les années 2000 qu'elle commence à être utilisée à des fins médicales, notamment grâce aux avancées en recherche biomédicale dans le domaine de la photothérapie dynamique (PDT). Cette technologie combine un photosensibilisant et une lumière rouge pour le traitement des lésions précancéreuses et de certains cancers cutanés [7].

L'historique de la découverte du rayonnement incohérent artificiel est synthétisé sur la [figure 4](#).

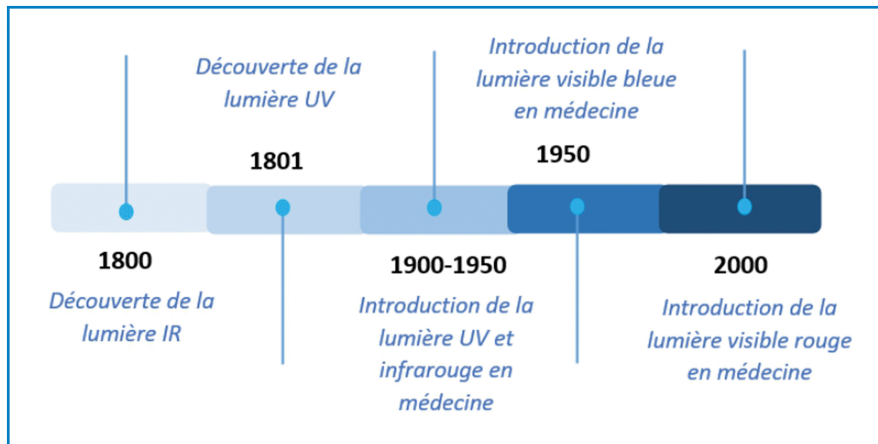


FIGURE 4

Frise chronologique retraçant la découverte de la lumière incohérente et son introduction en médecine

Production des sources incohérentes artificielles

Les sources incohérentes artificielles, et en particulier les UV, sont généralement produites par des lampes fluorescentes spécifiques.

Ces lampes contiennent un gaz (souvent du mercure Hg ou du xénon Xe), enfermé dans un tube en verre. Une source d'énergie (électrique) excite les atomes du gaz, qui émettent alors un rayonnement UV [8].

La lumière visible des lampes UV en médecine

La plupart des lampes UV utilisées en médecine semblent produire une lumière visible, mais ce n'est pas le rayonnement UV que nous voyons. En réalité, la lampe est recouverte d'un revêtement phosphorescent qui réagit avec les UV pour émettre une couleur visible, souvent bleu-violet. Ce mécanisme permet de visualiser le fonctionnement de l'appareil, mais la lumière thérapeutique elle-même reste invisible à l'œil nu.

La lumière visible à des fins thérapeutiques est aujourd'hui principalement générée à l'aide des LEDs (*light emitting diodes*), qui sont des dispositifs optoélectroniques reposant sur des matériaux semi-conducteurs. Leur fonctionnement repose sur un principe physique appelé électroluminescence⁴ [9].

Quant à l'infrarouge, sa génération repose sur le chauffage d'un matériau (fil métallique en tungstène, semi-conducteur ou

métal chauffé), dont l'élévation de température provoque l'émission de rayonnement thermique [10].

La lumière cohérente artificielle

La lumière cohérente, principalement représentée par le laser, ne se limite pas à des effets biologiques sur le corps. Elle est conçue pour couper, brûler et coaguler les tissus biologiques. Il s'agit d'une lumière très puissante, hautement directionnelle et fortement absorbée par les chromophores présents dans le corps humain (comme l'eau, l'hémoglobine ou la mélanine), ce qui lui confère une grande efficacité en chirurgie et en dermatologie.

Un peu d'histoire sur les sources cohérentes artificielles et leur production

Historique

En 1917 Albert Einstein a publié un article théorique dans lequel il décrit pour la première fois le phénomène d'émission stimulée, permettant la génération d'une lumière cohérente et monochromatique [11].

Le premier laser fonctionnel est mis au point en 1960 par Theodore Maiman, à l'aide d'un cristal de rubis comme milieu actif. Cette avancée technologique a rapidement ouvert la voie à de nombreuses applications, tant scientifiques que médicales [12].

Dès 1961, le Dr Charles J. Campbell réalise la première application thérapeutique documentée en ophtalmologie, en utilisant le laser pour effectuer une photo-coagulation rétinienne [13]. En 1963, le laser à gaz hélium-néon (He-Ne) est utilisé pour traiter des lésions cutanées, marquant l'entrée du laser en dermatologie.

À partir des années 1970, les lasers CO₂ deviennent courants en dermatologie, ORL et chirurgie générale, grâce à leur capacité à vaporiser et inciser les tissus mous avec une extrême précision [14].

⁴ Émission de lumière résultant de la recombinaison entre des électrons et des trous dans un semi-conducteur lorsqu'un courant traverse une jonction P-N.

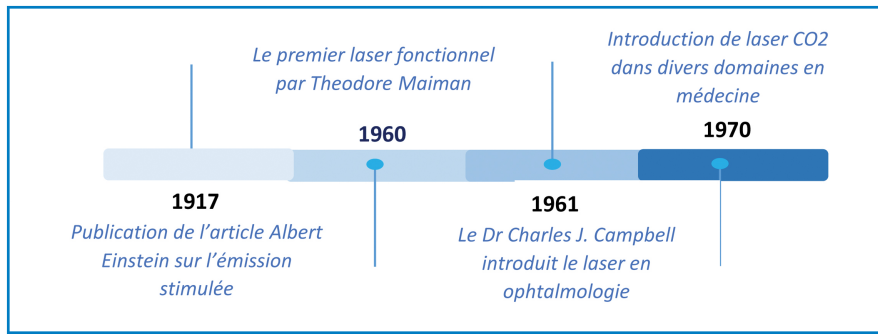


FIGURE 5

Frise chronologique retraçant la découverte de la lumière incohérente et son introduction en médecine

Au fil des décennies, le laser est devenu un outil incontournable en médecine, grâce à sa précision, sa capacité à réduire les saignements, et à limiter les effets secondaires.

L'historique de la découverte du rayonnement cohérent artificiel est synthétisé sur la [figure 5](#).

Production des sources cohérentes artificielles (laser)

La [figure 6](#) représente un exemple d'un tube laser type cristal de Ruby, et met en évidence les trois composants fondamentaux nécessaires à la production d'un rayonnement laser : le milieu actif, la source d'excitation et la cavité optique.

- le milieu actif constitue la matière dans laquelle les photons sont générés. Il peut être sous forme solide (comme un cristal dopé), gazeuse (CO₂, hélium-néon), liquide (laser colorant), semi-conducteur (diodes laser) ou même cristallin non linéaire (laser KTP) ;
- source d'excitation ou Source de pompage qui peut être optique (lampe flash, diode), électrique (décharge dans un gaz, courant), chimique ou thermique. Elle permet de transférer les électrons du milieu actif à un état d'énergie supérieur pour créer une inversion de population⁵ ;
- cavité optique ou résonateur optique, Cette cavité est constituée de deux miroirs placés face à face, l'un totalement réfléchissant, l'autre partiellement. Les allers-retours successifs des photons à l'intérieur de cette cavité favorisent leur multiplication par émission stimulée, jusqu'à ce qu'un faisceau laser cohérent, directionnel et intense soit émis à travers le miroir semi-transparent [15].

Interaction des ROA avec le tissu biologique

Les ROA interagissent avec les tissus biologiques de la même manière que la lumière naturelle. En effet, chaque tissu absorbe

une longueur d'onde spécifique, car chaque molécule possède des chromophores⁶ sensibles à certaines longueurs d'onde. En ciblant la bonne longueur d'onde, on peut diriger l'énergie vers un organe ou tissu spécifique. Ensuite, en adaptant la puissance, on module l'intensité de la réaction souhaitée. Ainsi, les lumières incohérentes sont principalement utilisées pour activer des processus photochimiques (photobiomodulation) spécifiques. À l'inverse, la lumière cohérente (laser) permet aussi à faible puissance, d'initier des réactions biologiques sans destructions, tandis qu'à haute puissance, on entre dans le domaine chirurgical pour découper, brûler ou coaguler les tissus.

Les UV et le tissu biologique

Les UV pénètrent mal dans l'œil, mais sont fortement absorbés par la peau, comme illustré sur la [figure 7](#) :

- les UVB sont absorbés majoritairement dans l'épiderme [16] ;
- les UVA pénètrent plus profondément, jusqu'au derme (ou hypoderme) [16].

Dans l'œil, la cornée et le cristallin jouent un rôle crucial à ce qui concerne la pénétration des rayonnements UV dans les structures oculaires, comme indiqué sur la [figure 8](#),

- la cornée filtre quasi totalement les longueurs < 300 nm (UVB) ;
- le cristallin arrête les UV jusqu'à ≈390 nm (UVA), empêchant ainsi que ces rayonnements n'atteignent la rétine [17].

⚠ Le chromophore principal des UV c'est l'ADN

La lumière visible et le tissu biologique

La lumière visible est fortement absorbée par les structures oculaires, en particulier par les photorécepteurs (cônes et bâtonnets) de la rétine, ce qui permet la vision à notre environnement. Cette lumière visible est également absorbée par la peau,

⁵ L'état où plus d'atomes sont excités que dans l'état fondamental, condition essentielle à l'émission stimulée.

⁶ Une molécule ou une partie de molécule sensible à une longueur d'onde spécifique de la lumière.

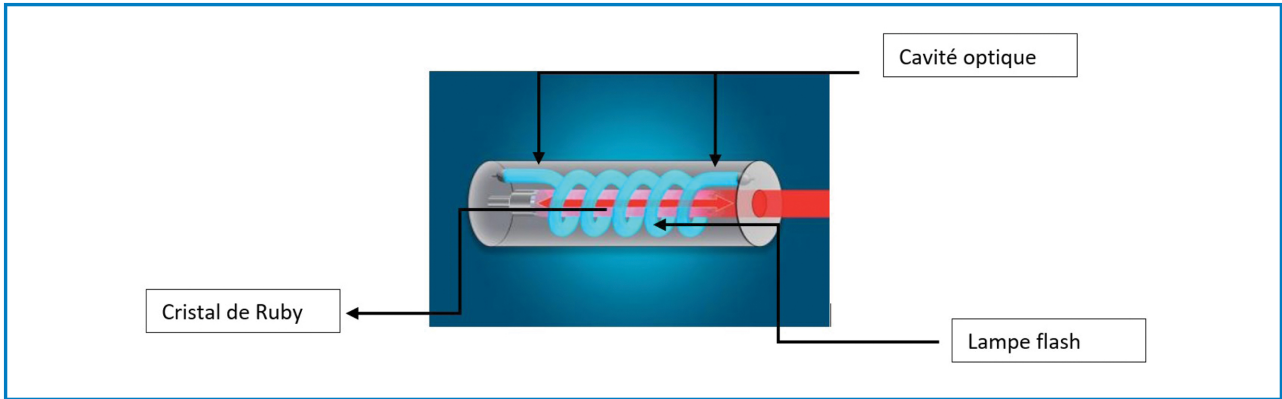


FIGURE 6
Schéma simplifié d'un tube Ruby laser [15]

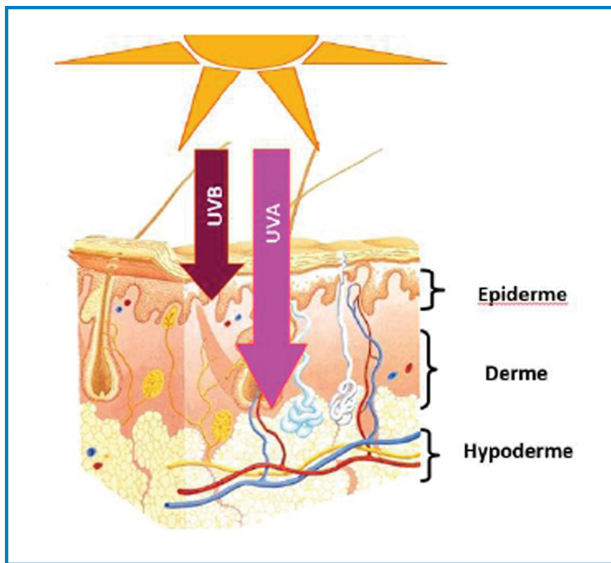


FIGURE 7
Pénétration des rayons UV dans les différentes couches de la peau [16]

où les chromophores principaux sont la mélanine, l'hème⁷ (dans l'hémoglobine), et des opsines⁸ exprimées par les cellules cutanées. Toutefois, toutes les longueurs d'onde visibles ne sont pas également actives biologiquement : le bleu et le rouge sont particulièrement efficaces [18].

- la lumière rouge, qui pénètre profondément dans la peau jusqu'au derme, cible principalement le cytochrome c oxydase

⁷ Groupe chimique contenant du fer, présent dans l'hémoglobine, qui permet le transport de l'oxygène dans le sang.

⁸ Protéines situées dans les cellules de la rétine, qui réagissent à la lumière et permettent la vision.

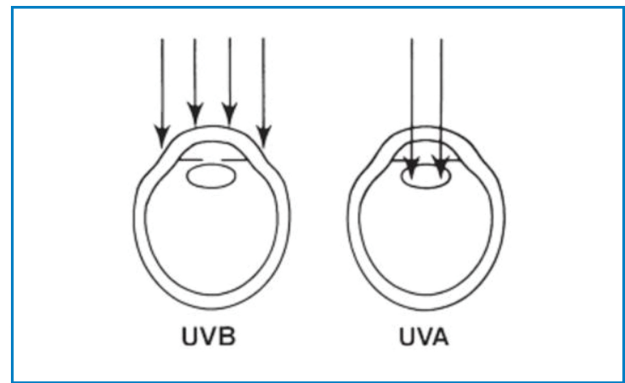


FIGURE 8
Pénétration des rayons UV dans les structures de l'œil [17]

(CCO), une enzyme mitochondriale. Ce chromophore absorbe efficacement la lumière rouge ;

- le bleu visible, bien absorbé par la rétine via les photorécepteurs (cônes S, mélanopsine), est capté en surface de la peau grâce à des chromophores cutanés tels que la mélanine, les opsines, et les flavoprotéines.

Les infrarouges sont également absorbés par l'enzyme cytochrome c oxydase (CCO), ainsi que par les protéines structurales et l'eau cutanée [19].

Pour une meilleure compréhension, la *figure 9* synthétise les chromophores associés à chaque type de rayonnement optique artificiel.

Relation dose-effet des ROA

La lumière est bénéfique pour notre corps, dans certaines limites et avec des doses spécifiques : elle a démontré ses avantages, notamment en dermatologie pour le traitement de nombreuses maladies chroniques de la peau, ainsi que dans des interventions peu invasives et très ciblées, par exemple en

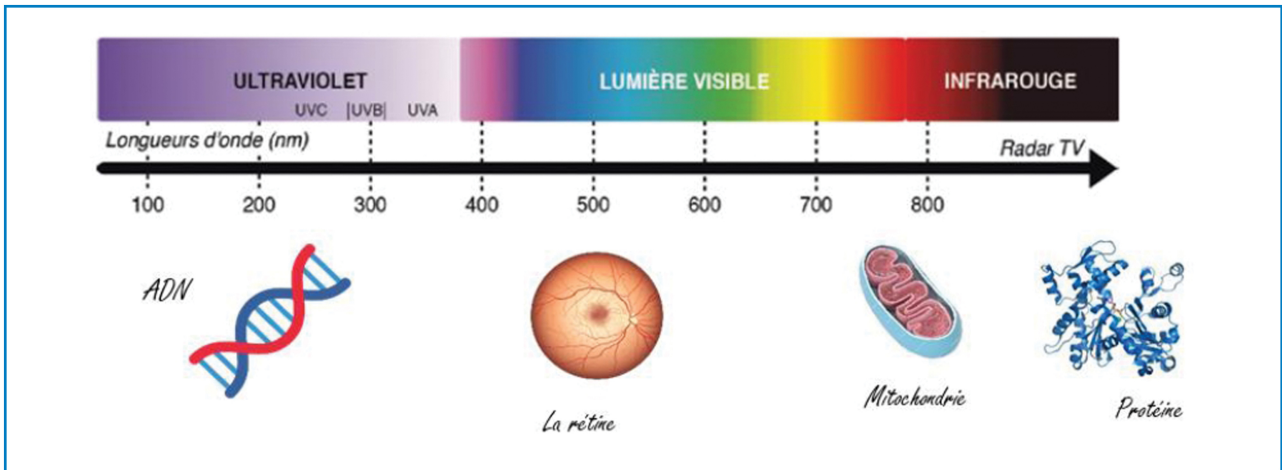


FIGURE 9
Chromophores biologiques selon le spectre électromagnétique

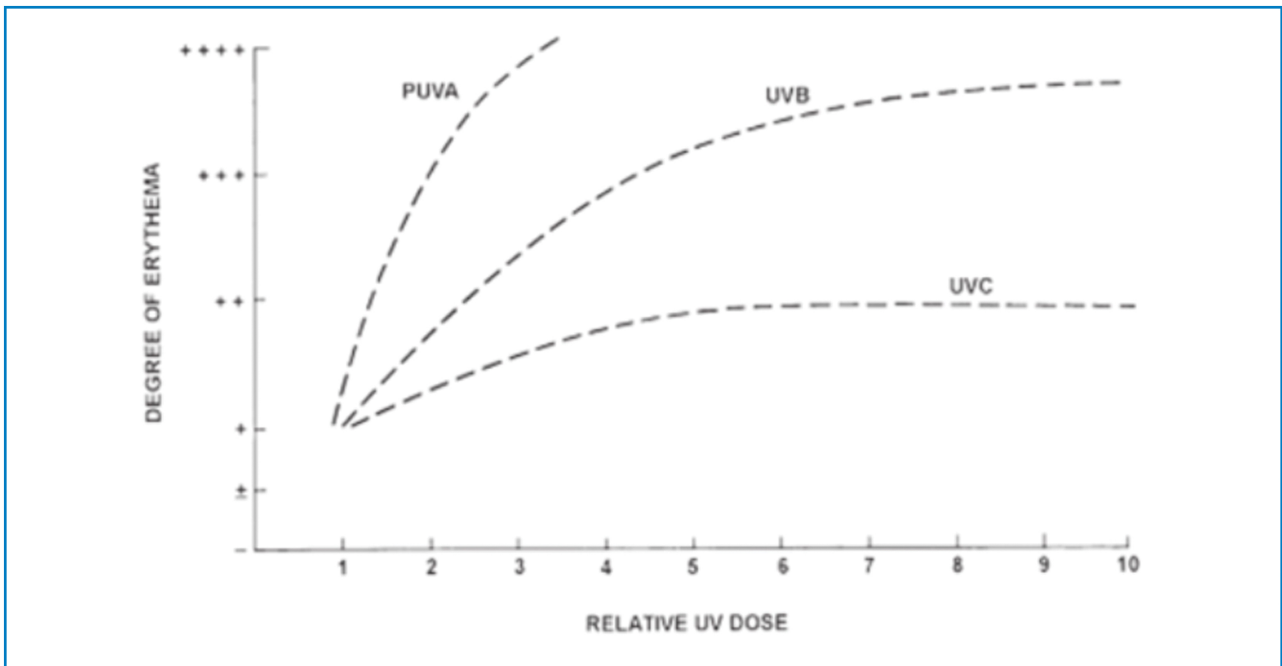


FIGURE 10
Effet de doses relatives d'UV sur l'érythème¹¹ cutané [17]

ophtalmologie pour les LASIK⁹, et SMILE¹⁰. Aujourd'hui, le laser, notamment en urologie pour la lithotritie, commence

à s'imposer comme une solution efficace. Cependant, ses effets ne restent positifs que si la dose est précisément contrôlée. La *figure 10* illustre un exemple des effets de la dose d'UV sur l'apparition de l'érythème cutané :

⁹ Laser-Assisted In Situ Keratomileusis c'est une technique chirurgicale qui remodèle la cornée à l'aide d'un laser.

¹⁰ Small Incision Lenticule Extraction c'est méthode plus récente qui consiste à retirer, par une petite incision, un lenticule cornéen découpé au laser.

¹¹ Une rougeur de la peau due à une dilatation des vaisseaux sanguins.

La lumière étant dose-dépendante, on se demande si les professionnels de santé opérant ces équipements sont suffisamment protégés. Comment sont-ils exposés ? Dépassent-ils les valeurs limites d'exposition (VLE/MPE) fixées par les directives 2006/26/CE ? Et surtout, comment peuvent-ils se protéger ?

Qu'est-ce que dit la réglementation sur les risques des ROA

La directive 2006/25/CE du Parlement européen confirme l'existence d'une relation dose-effet entre les rayonnements optiques artificiels (ROA) et la santé des personnes exposées. Elle précise, dans son article 4 intitulé *Détermination de l'exposition et évaluation des risques*, que la réalisation de mesures des valeurs limites d'exposition (VLE) est requise si l'employeur estime cela est nécessaire. Les VLE sont définies dans l'annexe I pour les rayonnements incohérents et dans l'annexe II pour les rayonnements cohérents (comme les lasers).

Cependant, si l'employeur suspecte que les VLE pourraient être dépassées dans son environnement de travail, il a alors l'obligation d'évaluer les risques et de mettre en œuvre des mesures pour limiter l'exposition.

À la suite de cette directive, plusieurs documents complémentaires ont été publiés pour aider les employeurs à en appliquer les exigences. Parmi eux :

- un document de sensibilisation publié en 2019 par l'INRS, en partenariat avec l'Assurance maladie, concernant les ROA hors laser [20]. Il y est notamment question des effets biologiques, des mesures de prévention à privilégier, des EPI à utiliser et des outils d'évaluation disponibles ;
- un rapport complet du Centre national de radioprotection (CNRP) sur les lasers [21], qui propose une revue historique, technique et physique des types de lasers, des risques associés, des zones de danger (DNRO), ainsi que des exemples concrets de calcul des VLE, des fiches d'évaluation et des guides de classification.

Ces publications constituent aujourd'hui une base documentaire essentielle pour comprendre les enjeux liés aux ROA, et pour construire une démarche de prévention efficace et conforme aux obligations réglementaires.

Cela dit ces documents produits jusqu'à présent abordent les ROA dangereux en milieu professionnel de manière générale, sans se concentrer spécifiquement sur le milieu hospitalier. Ce manque de ciblage soulève une question légitime : **le secteur hospitalier est-il concerné par les recommandations et les exigences de la directive 2006/25/CE ? et qui est le responsable de la sécurité contre les expositions aux ROA ?**

Les ROA au sein de l'hôpital

Les sources de rayonnements optiques artificiels (ROA) sont omniprésentes au sein des établissements hospitaliers. Certains

équipements sont particulièrement puissants, ce qui laisse présumer que les valeurs limites d'exposition (VLE) peuvent être facilement dépassées dans certaines situations. La directive 2006/25/CE souligne d'ailleurs que les lasers de classe 3B et 4 sont parmi les plus dangereux, et qu'une évaluation rigoureuse de leurs risques est indispensable. Or, ces types de lasers sont largement utilisés dans plusieurs services hospitaliers, ce qui confirme que le secteur hospitalier est pleinement concerné par les recommandations de cette directive.

Le Référent ROA à l'hôpital : un rôle pour l'ingénieur biomédical ?

Du côté de la directive, il faut désigner un référent ROA au sein de chaque établissement, mais est-ce que cela doit être le rôle de l'ingénieur biomédical d'assurer ces missions ?

Pour répondre à cette question, explorons la *figure 11* qui indique les missions principales d'un référent ROA :

Afin de compléter ces missions, le référent ROA doit disposer des compétences suivantes :

- connaissance réglementaire ;
- connaissances biomédicales et ergonomiques ;
- suivi qualité et audit de sécurité.

Ces compétences s'ajoutent aux aptitudes techniques propres au métier d'ingénieur biomédical. En milieu hospitalier, la plupart des sources de rayonnements optiques artificiels (ROA) sont des dispositifs médicaux. De ce fait, leur gestion et leur sécurité relèvent naturellement du périmètre de compétences de l'ingénieur biomédical référent, qui combine expertise technique, connaissance du cadre légal et sensibilité au contexte des soins. En effet, l'ingénieur biomédical possède, d'une part, l'expertise technique nécessaire pour comprendre le fonctionnement de ces dispositifs et identifier les risques potentiels associés à la technologie elle-même. D'autre part, il est également responsable de l'acquisition de ces équipements, ce qui fait de lui un acteur clé dans la gestion de la sécurité des utilisateurs : médecins, praticiens et tout autre personnel exposé à ces sources de ROA.

Cela dit, bien que l'ingénieur biomédical soit un acteur central dans la sécurité liée aux ROA, il n'est pas le seul responsable. Pour mener à bien ses missions et répondre pleinement aux exigences réglementaires, il doit travailler en collaboration avec le médecin du travail, le référent du bureau des conditions de travail, ainsi qu'avec les services et cadres concernés. Cette coopération est essentielle pour garantir une protection globale et efficace.

De manière générale, la sécurité face aux agents ROA repose sur une responsabilité et de l'ingénieur biomédical qui doit veiller à sensibiliser les utilisateurs et à garantir la sécurité lors de l'achat, en s'assurant de la conformité des équipements du côté fournisseur. Et du fournisseur, quant à lui, a l'obligation de fournir toutes les informations nécessaires dans la notice d'utilisation afin de protéger l'utilisateur. Enfin, ce dernier doit

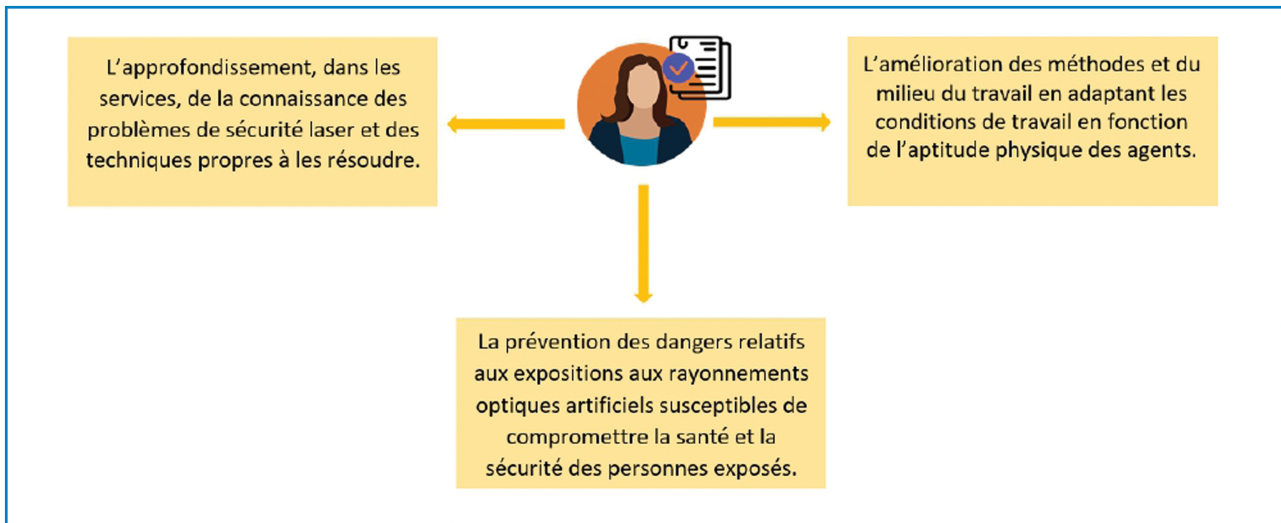


FIGURE 11
Schéma synthèse des trois missions principales d'un référent ROA

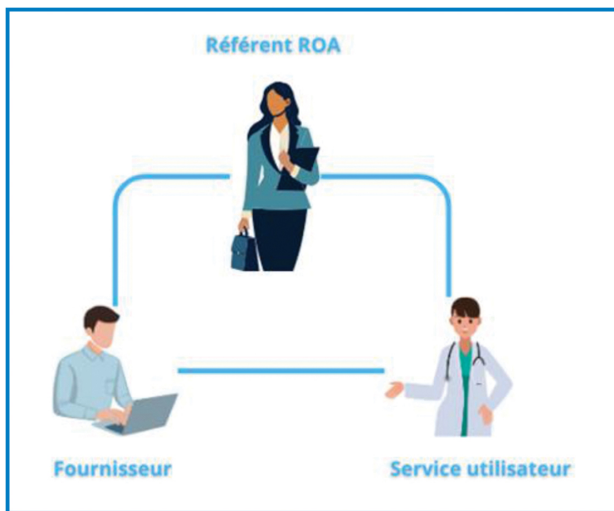


FIGURE 12
Schéma des acteurs responsables de la sécurité du ROA

comprendre les risques et être correctement formé avant toute utilisation d'une source ROA potentiellement dangereuse. Voir *figure 12*.

Comment gérer les risques liés aux ROA en milieu hospitalier

Classification des ROA

La première mission du référent ROA au sein des hôpitaux est de tenir à jour l'inventaire du parc ROA, qu'il s'agisse des équipements utilisés ou stockés, et de mettre à disposition les

informations relatives à leurs dangers. Pour mener à bien cette tâche, il est essentiel de classer les sources en fonction de leur niveau de risque et d'établir les priorités à partir de cette analyse.

La directive et les exigences réglementaires ne concernent pas cette partie des ROA, mais plutôt les dispositifs potentiellement dangereux. Pour faire simple, en tant qu'ingénieur biomédical référent ROA au sein d'un établissement hospitalier, il faut comprendre comment classer ces sources, et donc recenser toutes les sources potentiellement dangereuses pour gérer le risque.

Afin de pouvoir classer les sources ROA, deux normes harmonisées complètent la directive 2006/25/CE : la norme EN 62471 pour les sources incohérentes et la norme EN 60825-1 pour les lasers.

Les sources ROA sont-elles toutes dangereuses ?

Il faut savoir que toutes les Sources ROA ne sont pas considérées potentiellement dangereuses en milieu hospitalier. Comme évoqué précédemment, les ROA restent des sources lumineuses qui, dans la plupart des cas, ont pour objectif d'éclairer un champ spécifique, comme les lampes d'examen, ou encore les lasers de positionnement utilisés sur les tables de radiologie, les scanners médicaux, et en radiothérapie, ces lasers présentent pratiquement aucun danger. Les dispositifs de mesure spécifiques, tels que les tensiomètres ou oxymètres qui utilisent la lumière infrarouge pour calculer la saturation en oxygène ou même le nombre de globules rouges, en font également partie, et la liste continue.

Classification des sources incohérentes

La classification des sources incohérentes repose principalement sur leur intensité d'émission, mais aussi sur la notion de source biologiquement active. Une source est dite biologiquement active lorsqu'elle émet une lumière avec une longueur d'onde facilement absorbée par les structures oculaires ou cutanées, entraînant un effet biologique mesurable.

Sur cette base, la norme l'EN 62471 définit plusieurs groupes de risque, allant de 0 à 3 :

- les groupes de risque 0 et 1 correspondent aux sources à risque négligeable ou faible, comme les lampes d'examen, les sources infrarouges des petits dispositifs de diagnostic (tensiomètres, oxymètres, etc.), ou encore les sources dont l'observation directe n'induit ni gêne visuelle, ni altération rétinienne, ni danger cutané notable ;
- les groupes de risque 2 et 3, en revanche, englobent les sources considérées comme nocives, susceptibles, à long terme, de provoquer des phototoxicités rétiniennes, des mutations de l'ADN, voire des effets irréversibles. C'est notamment le cas des lampes fluorescentes émettant des UV, ou des LEDs utilisées en photothérapie, très présentes en dermatologie.

Le *tableau I* présente une classification des sources incohérentes potentiellement dangereuses, selon leur groupe de risque, conformément à la norme en vigueur.

La classification des sources cohérentes

La classification des lasers selon la norme EN 60825-1 dépend principalement de leur puissance d'émission, de leur mode de fonctionnement (continu ou impulsif), ainsi que de leur longueur d'onde, car ces paramètres influencent directement leur dangerosité pour les tissus biologiques. En l'absence d'un accès direct à la norme, j'ai basé mon analyse sur le guide publié par le Centre National de Radioprotection (CNRP), qui décrit précisément les critères de classification des lasers, de la classe 1 (sans danger) à la classe 4 (à haut risque), avec des sous-classifications selon l'usage d'instruments optiques ou les risques d'incendie. En croisant ces données avec celles de la directive 2006/25/CE, j'ai retenu que les lasers de classe 3B et 4 sont les plus préoccupants, car une exposition directe ou

TABLEAU I
Classification de groupe de risque des sources incohérentes.

Groupe de risque	Exemples des sources incohérentes
0 à 1 (risque faible à négligeable)	Toute source qui n'a pas un objectif thérapeutique pour le patient (capteur de tensiomètre ou d'oxymètre de pouls, lampes d'examen. . .)
2 à 3 (risque élevé)	Toutes les sources qui ont un objectif thérapeutique pour le patient (les traitements par photothérapie. . .)

TABLEAU II
Classification des sources cohérentes.

Classe	Exemples des sources incohérentes
1 à 3R	Les lasers ou la puissance < 0,5 W, et/ou ils n'ont pas un objectif thérapeutique
3B à 4 (risque élevé)	Les lasers ou la puissance > 0,5 W et/ou ils ont un objectif thérapeutique

indirecte peut entraîner des brûlures cutanées et des lésions oculaires immédiates [22]. L'identification de ces lasers a été facilitée par l'obligation, pour les fournisseurs, de mentionner la classe du dispositif médical selon la MDR et le niveau de risque laser sur la fiche technique. À noter également qu'un laser dont la puissance dépasse 0,5 W est généralement considéré comme dangereux, car il peut commencer à produire des effets thermiques sur les tissus [23].

Le *tableau II* présente une classification des sources incohérentes potentiellement dangereuses, selon leur groupe de risque, conformément à la norme en vigueur.

Grâce à ces informations, le référent ROA peut identifier les sources à risque, ce qui lui permet ensuite d'évaluer les niveaux d'exposition et de mettre en place des moyens de protection appropriés, dans le but de réduire le risque au maximum.

Évaluation des risques des sources ROA potentiellement dangereuses au sein de l'hôpital

La deuxième mission du référent ROA est d'évaluer correctement les risques liés aux sources de ROA, pour cela il est essentiel de distinguer les rayonnements incohérents des rayonnements cohérents, car leurs effets sur la santé ne sont pas les mêmes. Les sources incohérentes peuvent entraîner des effets à long terme, tandis que les sources cohérentes, telles que les lasers, peuvent provoquer des brûlures cutanées ou des lésions oculaires immédiates en cas d'exposition directe.

Dans cette démarche d'évaluation, il faut se poser les questions indiquées sur la *figure 13*.

Source incohérente

Le problème avec les sources incohérentes c'est que l'exposition directe n'entraîne pas d'effets immédiats sur le corps du médecin ou de l'utilisateur. Cette absence de réaction visible tend à minimiser la perception du risque par l'utilisateur, et donc ces sources sont souvent perçues comme inoffensives, voire bénéfiques, plutôt que dangereuses. Pourtant, malgré cette perception, il s'agit généralement de lumières très intenses, et un dépassement des valeurs limites d'exposition (VLE) peut facilement survenir.

De plus, l'intensité lumineuse élevée attire souvent le regard, ce qui pousse les praticien et staff médical ou les personnes à proximité à regarder directement la source, augmentant ainsi considérablement le risque d'exposition oculaire.



FIGURE 13

Schéma synthèse des trois questions principales à poser pour analyser le risque des ROA

L'exposition aux UV en milieu hospitalier

Valeurs limites dépassées ?

Les UV en médecine constituent la base de la photothérapie, notamment en dermatologie, où ils sont utilisés pour traiter certaines affections, comme évoqué précédemment. Bien que bénéfiques, ils ne sont pas dénués de risques. En effet, les UV naturels sont classés cancérigènes de catégorie 1 par le CIRC, soulignant leur danger potentiel.

Concernant les patients, le risque est minime, car les doses sont rigoureusement calculées. Pour les praticiens, en revanche, la situation peut différer : en travaillant quotidiennement à proximité des patients pendant une journée de 8 h, les valeurs limites d'exposition (VLE) peuvent être dépassées, bien que cela reste à confirmer sur le terrain.

Les UV sont utilisés principalement en dermatologie, mais aussi dans des applications de stérilisation, comme les cabines UVC ou bien dans des systèmes de désinfection de l'air (*Upper-room UVGI*). Ces lampes UVC, très nocives à faible dose (effet « ionisant-like » sur les microorganismes), sont utilisées pour détruire l'ADN des bactéries. Cependant, elles sont généralement totalement sécurisées : la cabine reste fermée et les lampes s'éteignent à la fin du cycle, évitant toute exposition au personnel, même lors de la maintenance externe. Le risque d'exposition est aussi minime pour le système *Upper-room UVGI* car les lampes UVC sont bien installées au plafond de 2 mètres du sol et ne sont jamais dirigé vers la zone occupante par les personnels.

De plus, l'intensité d'irradiation mesurée dans les zones accessibles reste bien inférieure à la dose limite d'exposition fixée par l'ICNIRP, soit 30 J/m^2 par jour pour une longueur d'onde de 254 nm, garantissant la sécurité du personnel hospitalier.

En photothérapie dermatologique avec les UVB/UVA, la situation est similaire avec des cabines fermées UVC où les risques sont faibles.

Le risque augmente lorsque les UV sont utilisés de manière approximative, par exemple sous forme de rampe pour mains/pieds ou de lampes portatives pour des traitements ciblés. Dans ces cas, le praticien comme indiqué sur la [figure 14](#), est exposé directement à la source et à la lumière réfléchiée. Selon l'ICNIRP, la réflexion peut renvoyer jusqu'à 30 à 50 % de l'énergie incidente, ce qui, à la distance typique de travail, peut placer le praticien dans la zone de risque et augmenter fortement le risque de dépassement des VLE.

Un article de Tenkate (1999) [24] a d'ailleurs montré que, lors de l'utilisation de lampes de photothérapie UV, les VLE pouvaient être dépassées en quelques minutes chez les personnels présents à proximité.

Risques de l'exposition ?

Comme indiqué sur la [figure 7](#), les UV sont principalement absorbés par la peau, et leur chromophore majeur est l'ADN. Dès lors, on peut se demander : qu'advient-il de l'ADN en cas d'exposition aux UV ? À faible dose, l'organisme réagit en stimulant la synthèse de vitamine D et la production de mélanine en fonction du phototype cutané. Cependant, à des doses



FIGURE 14
Exposition du personnel médical au rayonnement UV en cas de présence dans la salle

Skin type	Dose range (J/cm ²)
I-II	10-80
III-IV	40-110
V-VI	70-140

FIGURE 15
Plages de doses d'UVA pour la détermination de la MED selon le phototype cutané [17]

plus élevées variables selon le type de peau une altération possible de la fonction immunitaire est observée, reflet d'une activité mutagène provoquée par les UV. Il y a même des suspicions que la mélanine peut être le photosensibilisateur de l'ADN. Toutefois, ce risque varie principalement en fonction du photo type et de la dose minimale requise pour provoquer des effets (figure 15).

Aujourd'hui, la question reste ouverte : les UV participent-ils au développement du cancer de la peau chez l'homme ? À ce jour, la réponse est : peut-être, mais suffisamment solide pour justifier des protections renforcées, en particulier pour les praticiens aux phototypes I, II et III.

Les UV n'agissant pas efficacement sur la cornée et le cristallin, mais ils peuvent atteindre le cristallin et provoquer des dommages progressifs pouvant conduire à une cataracte et donne l'impression que du sable a été frotté sur l'œil, surtout chez les personnes à yeux clairs représentant environ 10 à 20 % des cas dans le monde.

Précautions recommandées

Maintenant que les risques liés aux UV sont bien compris, il est important de rappeler qu'une exposition du personnel soignant est possible, notamment s'il reste dans la salle pendant une séance de photothérapie.

Dans la majorité des cas, cela ne pose pas de problème, car les traitements par photothérapie n'exigent pas la présence du personnel à proximité du patient.

Cependant, certaines situations imposent la présence d'un soignant dans la pièce, par exemple lorsqu'il s'agit d'un enfant, d'une personne âgée, ou d'un patient en situation de dépendance.

Dans ce cas, le référent ROA (rayonnements optiques artificiels) doit sensibiliser les soignants aux bonnes pratiques de sécurité :

- ne jamais fixer la source lumineuse ;
- porter des lunettes de protection UV appropriées ;
- se couvrir la peau exposée (manches longues, gants) ;
- rester à distance autant que possible pendant la séance.

Voir figure 16 pour une vue globale des recommandations pour se protéger contre le rayonnement UV.

En complément, lors de la conception des salles de photothérapie, il est recommandé :

D'éviter l'utilisation de peintures ou matériaux réfléchissants, qui pourraient augmenter la diffusion des UV.

L'exposition à la lumière visible en milieu hospitalier

Valeur limites dépassées ?

La lumière visible est également utilisée en médecine comme photothérapie efficace pour traiter plusieurs pathologies. On la retrouve notamment :

- en néonatalogie, pour le traitement de l'hyperbilirubinémie chez les nourrissons à l'aide de lumière bleue ;
- et en dermatologie, avec l'usage de la lumière rouge pour soigner certaines lésions cancéreuses ;
- elle est aussi employée à des fins non thérapeutiques, comme en odontologie, où la lumière bleue sous forme de lampe de polymérisation qui permet de durcir les composites dentaires.

Le dépassement des valeurs limites d'exposition (VLE), tout comme pour les UV, dépend de la proximité du personnel par rapport à la source lumineuse, car l'intensité de ces équipements peut être importante.

En néonatalogie, on pourrait penser que seul le bébé reçoit le traitement, mais le risque pour le personnel reste présent aussi et dépend surtout de la manière dont la photothérapie est administrée.

Il existe différents types de dispositifs :

POUR SE PROTÉGER



Rester à distance
autant que possible
pendant la séance.



Porter des vêtements
couvrants ou couvrir la
source si possible



Port des lunettes de
protection adaptées

FIGURE 16

Recommandation principale pour se protéger contre les rayonnements UV

- les tunnels de photothérapie : souvent accompagnés d'un filtre jaune destiné à protéger le personnel. Dans ce cas, l'exposition directe est très limitée ;
- les rampes lumineuses : elles se présentent sous forme de lampes fixées au-dessus des incubateurs. Une fois allumées, elles diffusent une lumière très intense tout autour. Si un soignant reste trop longtemps à proximité, il risque de recevoir une dose lumineuse non contrôlée, d'autant plus que le traitement peut durer jusqu'à 24 h.

Les nattes de photothérapie : ici, le risque concerne davantage les parents. Même si la source lumineuse est orientée vers le bébé, la lumière reste forte et une diffusion résiduelle est toujours présente, ce qui augmente le risque d'exposition.

Risques après l'exposition ?

On sait désormais que le chromophore principal de la lumière visible bleue est la rétine, ce qui fait des yeux du praticien l'organe le plus exposé et potentiellement à risque.

L'œil est constitué de différentes structures, dont la couche intérieure principale est la rétine, contenant des photorécepteurs (cônes et bâtonnets) sensibles à la lumière visible, avec des pics d'absorption spécifiques à certaines longueurs d'onde. Cette lumière visible provoque une stimulation des photorécepteurs, activant une structure appelée rétine neuronale, qui assure la conversion des photons lumineux en signaux nerveux, transmis ensuite au cerveau via le nerf optique pour permettre la perception visuelle.

De nombreuses études ont montré que la lumière bleue, à certaines intensités, peut déclencher une cascade de réactions chimiques dans la rétine, pouvant aller jusqu'à l'apoptose des cellules rétinienne neuronales et pigmentaires.

La littérature scientifique montre également une forte corrélation entre l'exposition chronique à la lumière bleue et la survenue de la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge).

En plus de ces effets oculaires, des publications suggèrent une possible implication de la lumière bleue dans certaines pathologies cutanées, notamment le mélasma. Des observations cliniques rapportent que des praticiens dentistes, après plusieurs années d'exposition (souvent >10 ans), peuvent développer des taches pigmentaires sur le visage. Bien que cela ne

soit pas formellement prouvé, la simple suspicion justifie déjà des mesures de protection pour les utilisateurs réguliers.

Par ailleurs, selon l'étude de Huang et al. (2009) [25], l'exposition à la lumière rouge, dans certaines plages de doses, peut avoir des effets biologiques bénéfiques, en particulier par l'activation de la cytochrome c oxydase dans les mitochondries : À faibles doses (< 10 J/cm²), on observe :

- une augmentation de la production d'ATP, source d'énergie cellulaire ;
- la libération d'oxyde nitrique (NO), qui améliore la microcirculation ;
- une production contrôlée de ROS (espèces réactives de l'oxygène), participant à la signalisation cellulaire et à la régénération.

En revanche, lorsque la dose dépasse les 10 J/cm², les effets deviennent délétères :

- excès de NO et de ROS, entraînant un stress oxydatif ;
- dysfonctionnement mitochondrial ;
- inflammation chronique ;
- et, à terme, apoptose ou nécrose cellulaire.

Comme le précisent les auteurs :

« Excessive doses of light will produce too much ROS and NO, and rather than enhancing cell function, they damage the cells, or even induce apoptosis and necrosis. » [25].

Précautions recommandées

Le référent ROA (risques optiques artificiels) doit veiller à limiter la diffusion de la lumière bleue et à proposer des lunettes de protection adaptées à tout praticien se trouvant à proximité de la source, notamment pour la protection des yeux.

Il est également conseillé de réduire la diffusion de cette lumière dans la mesure du possible, en utilisant par exemple des couvertures pour les incubateurs ou éviter/limiter l'utilisation des nattes pour nourrissons. Il est également essentiel de s'assurer que les salles d'examen ou de soins ne soient pas insuffisamment éclairées, car une faible luminosité ambiante peut augmenter la dilatation pupillaire, ce qui accroît la quantité de lumière bleue absorbée par la rétine.

Cas particulier des lampes de photopolymérisation (dentisterie)

- Vérifier systématiquement la présence de filtres anti-lumière bleue sur les lampes.
- Si ces filtres sont absents ou insuffisants, recommander au chirurgien-dentiste :
- Le port de lunettes de protection spécifiques.
- L'utilisation de masques et de gants capables d'absorber la lumière bleue.

À noter : selon des publications scientifiques récentes, une discussion est en cours concernant l'utilisation de photosensibilisateurs activés par la lumière orange ou rouge, afin d'éviter les risques liés à la lumière bleue.

La lumière bleue est également présente dans les éclairages opératoires ; pour en savoir plus sur ses risques à l'avenir, voir [figure 17](#).

Lumière rouge :

Bien qu'elle soit moins nocive que la lumière bleue, il est nécessaire de maintenir une distance de sécurité par rapport à la source. Le port de lunettes de protection adaptées reste recommandé, en particulier lors d'expositions prolongées ou rapprochées.

L'exposition à la lumière infrarouge en milieu hospitalier

Valeurs limites dépassées ?

Les sources infrarouges utilisées en milieu hospitalier fonctionnent essentiellement comme des radiateurs médicaux, avec un objectif de chauffage localisé, que ce soit pour maintenir la température corporelle d'un nouveau-né ou pour réchauffer un patient brûlé. D'un point de vue technique, ces dispositifs ne présentent pas de risque biologique majeur, car tout dépassement du seuil thermique de tolérance se manifeste

immédiatement par une sensation de chaleur, incitant l'utilisateur à s'éloigner spontanément de la source.

Précautions recommandées

Ces dispositifs ne présentent pas de risque optique majeur, car la sensation immédiate de chaleur constitue un mécanisme d'alerte naturel.

Il est toutefois important de :

- éviter de fixer directement la source lumineuse ;
- ne pas toucher l'appareil pour prévenir les brûlures.

Source cohérente

L'exposition aux faisceaux laser en milieu hospitalier

Avec le laser thérapeutique de classe 3B et 4, les effets sont immédiats. Ils sont très puissants et très précis, au point qu'ils peuvent brûler le tissu biologique en quelques secondes.

Pour un objectif médical, c'est parfait, mais être exposé à ce rayonnement est inquiétant quand même.

Valeur limite d'exposition dépassée ?

Dans le cas de ces lasers, il y a pas mal de facteurs qui indiquent une grande probabilité de dépasser les VLE : d'une part, le médecin qui se trouve dans la zone DNRO dite, et d'autre part, la puissance énorme de ces dispositifs. En plus, les recommandations des fournisseurs, indiquées sur leurs étiquettes de signalisation, précisent clairement de ne jamais regarder directement le faisceau et de faire attention au faisceau diffusé. Cela entraîne une réflexion : les VLE sont largement dépassées et le médecin doit donc faire très attention avec ces dispositifs médicaux.

La lumière cohérente est différente de la lumière incohérente : elle n'est pas diffusée dans toute la salle, elle est bien confinée et dirigée directement vers le patient. Cela amène à se poser la question suivante : comment le médecin peut-il être exposé ?



**WARNING
NOT SAFE
FOR YOUR
EYES**

La lumière bleue est également présente dans les éclairages opératoires, composés de LED bleues recouvertes d'un filtre au phosphore pour produire une lumière blanche. La puissance n'est pas la même que celle des autres équipements à lumière bleue déjà cités, mais elle reste importante. Le pic spectral demeure situé dans le bleu, ce qui soulève des questions.

Dans ce cas, le risque ne concerne pas les médecins, mais les techniciens, qui peuvent être exposés plusieurs fois par jour à ces éclairages opératoires, souvent à intensité maximale. Cette exposition répétée augmente le risque de phototoxicité. Imaginez que vous regardez directement le soleil un jour d'été : c'est exactement l'effet que peut produire l'observation prolongée de ces LED.

Le technicien peut alors ressentir une gêne oculaire, voire développer à long terme une myopie ou d'autres troubles visuels. C'est pourquoi il est indispensable de porter des lunettes de protection lors des opérations de maintenance.

FIGURE 17

Risque potentiel des LED opératoires sur la rétine des techniciens biomédicaux



FIGURE 18
Exposition du médecin au rayonnement laser classe 3b et 4 par réflexion

Dans le cas des lasers et pour répondre à la question du médecin sur la *figure 18*, ce n'est pas la source elle-même qui pose un problème d'exposition, mais plutôt les facteurs liés à la technologie ou à l'environnement, qui augmentent cette probabilité.

Facteurs technologiques :

- mode de délivrance du faisceau ;
- défaillance des éléments optiques ;
- défaillance des systèmes de refroidissement.

Facteurs humains :

- activation hors de l'axe opératoire ;
- formation insuffisante ;
- réglages incorrects ;

Facteurs environnementaux :

- Présence d'instruments réfléchissants

Chaque élément est lié aux autres, et leur impact dépend du niveau de compréhension des risques au sein de chaque service. La formation, la compréhension de la technologie et l'utilisation

correcte des accessoires (comme la fibre, la pièce à main, le microscope ou le colposcope) jouent un rôle essentiel.

Un risque peut être minime dans un service bien formé qui respecte les consignes du fournisseur, mais très présent dans un autre service qui ne les respecte pas ou qui n'a pas été suffisamment formé.

Il est donc essentiel pour le référent ROA de prendre en compte tous ces éléments, de les analyser puis de les hiérarchiser selon leur criticité, afin d'adapter les moyens de protection. Cela peut passer, par exemple, par la méthode AMDEC, pour identifier chaque élément à risque en fonction des spécificités de chaque service dans l'établissement.

Les éléments à risques qui amènent à une exposition accidentelle au faisceau laser

J'ai mené moi-même l'analyse de risque suivant la méthode AMDEC au sein des HCL en tant que référent ROA temporaire. La *figure 19*, indique ma conclusion de cette analyse pour le laser médical. En résumé, le risque de réflexion et donc d'exposition

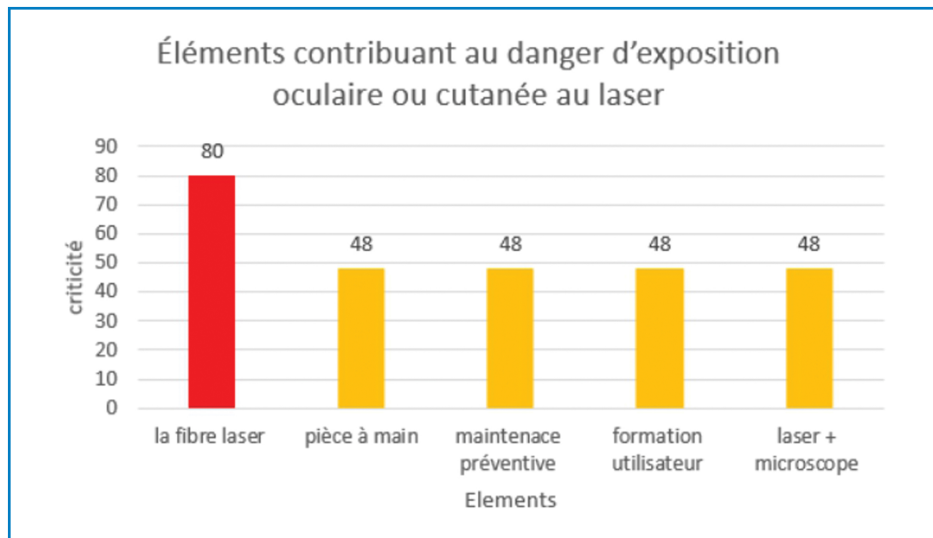


FIGURE 19
Évaluation du risque d'exposition accidentelle au laser médical des éléments critiques identifiés

des utilisateurs dépend fortement de 5 éléments : le mode de délivrance du faisceau, la période la maintenance préventive, la technologie de l'appareil, la combinaison laser + microscope/colposcope et finalement le niveau de formation des utilisateurs.

En effet, le laser peut être émis soit via une fibre, soit par une pièce à main : cela dépend du type de laser et de la procédure souhaitée.

Mode de délivrance de faisceau laser

- La pièce à main, utilisée notamment en dermatologie, ORL ou gynécologie. Dans ces cas, le faisceau est délivré dans un champ ouvert ou semi-ouvert, avec un risque de réflexion élevé (jusqu'à 30 % de l'énergie peut se réfléchir vers l'utilisateur), rendant le port de lunettes de protection indispensable. La pièce à main intègre aussi un système optique sensible : en cas de choc ou de mauvaise manipulation, un désalignement des miroirs peut provoquer une déviation du faisceau hors du champ prévu, augmentant le risque pour le praticien.
- La fibre laser, utilisée en urologie ou en exploration vasculaire (ex. : laser endoveineux). Ici, le faisceau est confiné à l'intérieur du patient via une fibre laser. Cependant, le risque est concentré sur l'intégrité de la fibre. Une cassure ou microfissure de la fibre peut provoquer une fuite du faisceau, entraînant des brûlures cutanées ou une réflexion oculaire. Ce point est d'autant plus critique dans les cas de patients complexes ou lors de manipulations répétées.

Période de la maintenance préventive

Le non-respect de la maintenance préventive représente un élément critique pour les lasers médicaux. En effet, les fournisseurs recommandent au minimum un entretien annuel, durant lequel les éléments suivants sont vérifiés :

- L'alignement du faisceau laser ;
- La puissance du faisceau ;
- Le système de refroidissement.

Ces contrôles permettent d'éviter les réflexions accidentelles vers le médecin et réduisent d'autres risques potentiels, notamment ceux liés aux incendies.

La technologie des équipements laser

Par ailleurs, les technologies laser les plus récentes intègrent des systèmes d'alerte intelligents capables de détecter des anomalies comme le dépassement des seuils de puissance, un retard dans la maintenance, ou un usage excessif de la fibre optique au-delà des recommandations fabricant. Bien que ces fonctionnalités réduisent les risques, elles ne suffisent pas à elles seules : elles doivent être contrôlées et validées avant l'achat de l'équipement et intégrées au cahier des charges de l'appel d'offre.

△ Combinaison laser + microscope/colposcope

Lorsque le laser est utilisé en combinaison avec un microscope ou un colposcope, le risque augmente :

- le praticien ne peut pas porter de lunettes, car il regarde à travers l'optique ;

- si le filtre intégré n'est pas présent ou mal positionné, il peut être directement exposé au faisceau.

Dans les appareils plus sophistiqués, comme le cas des lasers femtoseconde et excimère d'ophtalmologie, les filtres de protection sont intégrés automatiquement. Mais pour les lasers à visée diagnostique en ophtalmologie, le filtre doit être ajouté manuellement.

Le niveau de formation des utilisateurs

Et finalement vient l'élément le plus critique : la formation des utilisateurs, qui joue un rôle primordial. Un utilisateur bien formé connaît les risques de réflexion, la sensibilité de la fibre optique, l'importance de respecter la maintenance, la vérification de l'alignement du faisceau avant toute utilisation, et surtout ne jamais employer un instrument réfléchissant avec un laser. La criticité de ces éléments dépend à la fois du responsable de service et des utilisateurs, qui doivent se montrer vigilants avec ces dispositifs médicaux, mais aussi du référent ROA, chargé d'assurer la formation régulière de l'équipe. L'ingénieur biomédical a quant à lui la responsabilité de garantir que les équipements intègrent tous les dispositifs de contrôle des risques. Il revient également à l'ingénieur de solliciter auprès du fournisseur un plan de suivi et de maintenance précis, afin de minimiser au maximum les risques liés à l'utilisation de laser.

Précautions recommandées

Maintenant que les éléments à risque sont clairement identifiés, il est essentiel de mettre en place des mesures de prévention pour réduire la criticité.

Attention : Le port des lunettes de protection adaptées à chaque type de laser reste indispensable, une obligation à ne surtout pas négliger.

Pour la fibre optique :

- Vérifier systématiquement l'intégrité de la fibre.
- Former le personnel et/ou afficher une fiche de recommandations dans la salle.
- Intégrer cette vérification à la check-list avant intervention, notamment pour les fibres réutilisables, bien que les fibres à usage unique restent préférables.

Pour les lasers à pièce à main :

- Imposer le port des lunettes de protection, car les réflexions diffuses peuvent être importantes et se propager partout dans la salle de traitement.

Garantir la maintenance préventive :

- Sensibiliser les équipes à l'alignement du faisceau avant utilisation.
- Inspecter la pièce à main : si des brûlures sont visibles, cela indique un laser désaligné.
- Enregistrer ces anomalies dans le GMAO comme alertes, et afficher dans les services des étiquettes mentionnant la date de la dernière maintenance.

Pour les dispositifs combinés (laser + endoscope/coloscope) :

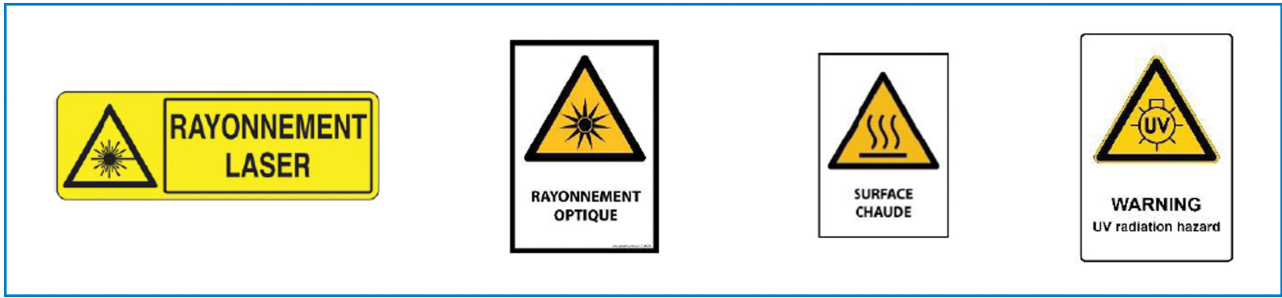


FIGURE 20

Types de signalisation recommandés pour chaque type de rayonnement optique artificiel

• Il est obligatoire d'intégrer des filtres adaptés, car le praticien se trouve dans la zone à risque, exposé indirectement au faisceau.

Enfin, la formation régulière des équipes reste capitale :

- Une équipe bien formée diminue drastiquement les risques.
- Il faut organiser des sessions régulières, notamment lors des changements d'équipe fréquents (comme au CHU).
- Proposer des cours en ligne ou des documents synthétiques (fiches, posters) résumant les risques et les procédures à suivre.

N'oublions pas l'affichage de signalisation claire dans toutes les salles équipées de lasers, avec des pictogrammes « laser en fonctionnement » visibles à l'entrée. Voir [figure 20](#).

Fibre laser représente la majorité des accidents d'exposition

Entre janvier 2014 et avril 2023, l'ANSM a reçu 834 signalements d'incidents liés aux MV [26]. Parmi eux, 91 % concernaient les fibres laser, soit 761 incidents. Sur ces derniers, 540 étaient dus à des ruptures ou casses de fibres, ce qui confirme ce qui avait déjà été évoqué dans les paragraphes précédents [26].

La fibre reste un élément particulièrement sensible. Voir [figure 21](#).

Il est donc essentiel que le référent laser sensibilise les services utilisateurs et les forme aux bonnes pratiques, en insistant notamment sur l'inspection systématique de la fibre avant chaque utilisation. Cette inspection doit porter sur le bout distal ainsi que sur l'intégrité générale de la fibre, afin de détecter tout signe d'usure ou de dégradation. Il est également important de ne pas dépasser le nombre d'utilisations recommandé par le fabricant.

À ce titre, il serait pertinent de solliciter les fournisseurs pour qu'ils intègrent des dispositifs de suivi ou de comptage d'utilisation directement dans la technologie.

Dans mon établissement, afin de mieux contrôler ce risque, j'ai proposé la mise en place d'une fiche de recommandation précisant les bonnes pratiques d'utilisation de la fibre, ainsi que les étapes à suivre pour une inspection visuelle correcte avant chaque usage. Voir [figure 22](#).

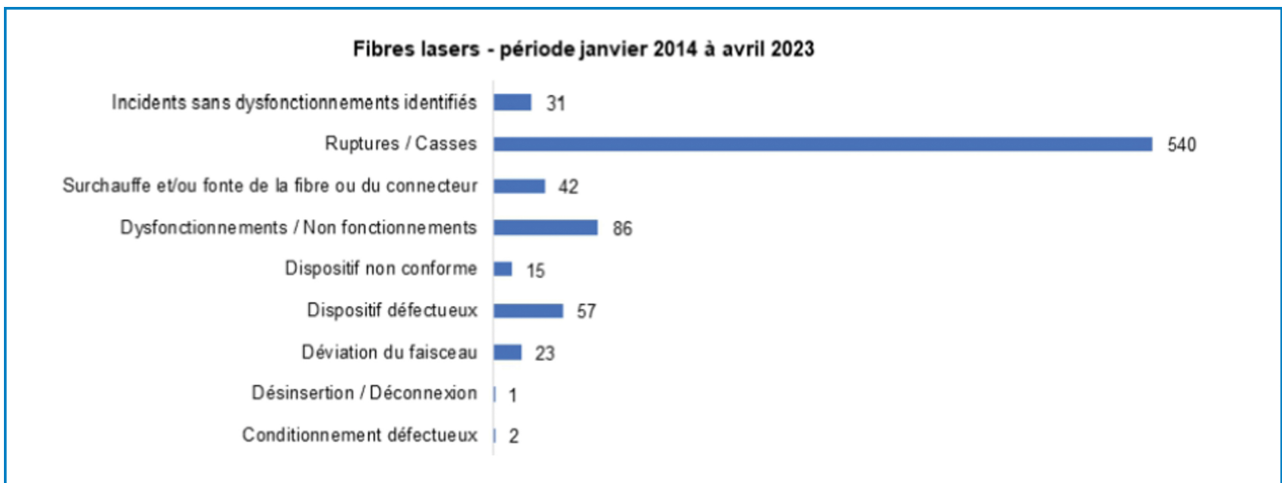





FIGURE 21

Répartition des incidents liés aux fibres lasers (2014-2023) [26]




Recommandations de Sécurité – fibre laser






Inspection avant usage de la fibre


- Insérer correctement le connecteur de la fibre optique dans le coupleur du dispositif laser.
- Allumer le faisceau de visée.
- Diriger l'extrémité distale de la fibre vers une surface non réfléchissante.
- Vérifier que la tache lumineuse générée est bien circulaire et nette.




Irrégulière, mal délimitée : ne pas utiliser



Nettement délimitée : OK



Contrôler l'intégrité de la fibre avant utilisation



Recommandations diverses

Manipulation et stock

- Ne pas courber excessivement la fibre pendant le déballage, le stockage ou l'utilisation.
- Éviter tout écrasement causé par la manipulation des instruments (canaux opérateurs, pinces).
- Maintenir la fibre humidifiée avec une compresse stérile lorsqu'elle n'est pas utilisée immédiatement.
- Ne pas forcer lors de l'introduction ou du retrait de la fibre.
- S'assurer que la fibre laser sélectionnée est compatible avec l'appareil à laser.

Sécurité

- Respecter les limitations de puissance éventuelles des fibres laser.
- S'assurer que la fibre laser est bien fixée dans la pièce à main et dans l'endoscope.
- Respecter le nombre d'utilisations indiqué par le fournisseur.
- Ne jamais activer le laser si la fibre n'est pas bien insérée et stabilisée dans le canal opérateur (s'assurer que l'extrémité est bien visible à l'écran).

Un connecteur optique de fibre défectueux ou sale risque de se réchauffer. Le contact avec un connecteur de fibre surchauffé peut provoquer des brûlures. Il y a également risque de détériorations au niveau de l'optique de couplage de l'appareil à laser

Date : 04/07/2025

Rédigé par : REBBAH Nihad (DIBE)

FIGURE 22

Fiche de recommandations pour une bonne pratique de la fibre laser

Suggestion diverse pour le référent ROA

Afin de faciliter le partage de l'information et la sensibilisation de l'équipe, il est pertinent pour le référent ROA de rédiger des fiches synthétiques sur les risques liés au ROA, de manière simple et efficace, puis de les distribuer dans les services.

De même, pour faciliter l'accès et le choix des lunettes de protection, des fiches similaires peuvent être élaborées afin d'expliquer leur sélection et le déchiffrement des marquages.

Des exemples de ce type de fiches, ainsi qu'un modèle expliquant le choix des lunettes, sont disponibles en annexe.

Conclusion

Le sujet des ROA est complexe, souvent mal compris, et parfois minimisé, car ces sources de rayonnements sont omniprésentes dans notre quotidien : téléphones portables, écrans d'ordinateur, pointeurs laser, stations de métro, dispositifs médicaux comme les scanners ou les appareils de radiothérapie, mais aussi les dispositifs de photothérapie, qui utilisent une lumière proche de la lumière naturelle.

Cette banalisation crée un faux sentiment de sécurité, amenant les utilisateurs à négliger les risques potentiels liés aux ROA. Cela complique considérablement le travail du référent, dont le

rôle est justement de rappeler que ces expositions ne sont pas sans conséquence.

À cela s'ajoute une grande diversité technologique : les sources ROA ne sont pas toutes équivalentes, et les niveaux de sécurité varient selon les fabricants. Certains fournisseurs appliquent des actions correctives de sécurité (FSCA) avant la mise en service de leurs équipements, tandis que d'autres sont moins vigilants ou moins bien informés des exigences réglementaires. Cette hétérogénéité rend le rôle du référent encore plus complexe.

Le référent ROA doit donc faire le lien entre les utilisateurs, les fournisseurs et les responsables techniques, afin de garantir à la fois :

- la mise en place de technologies les plus sûres ;
- une sensibilisation efficace des utilisateurs ;
- le respect des équipements de protection individuelle (EPI), en particulier les lunettes de protection adaptées.

C'est à ce niveau que le défi devient parfois culturel et organisationnel. Modifier les habitudes d'une équipe, faire accepter de nouvelles pratiques, imposer le port systématique d'EPI dans un contexte où le danger n'est pas toujours perçu, c'est un défi pour le référent ROA, un travail de fond, qui demande pédagogie, persévérance et diplomatie.

Déclaration de liens d'intérêts : Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Hecht J. Fundamental principles laser. *Britannica* (modifié le 23/06/2025).
- [2] Cherrie JCAM. Workplace exposure to UV radiation and strategies to minimize cancer risk. Oxford university; 2022.
- [3] Jacques F. Encyclopédie de l'environnement; 2018 [En ligne]. Available: <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impact-cellulaire-uv-solaires/>.
- [4] Grzybowski A. From patient to discoverer the founder of phototherapy in dermatology. Elsevier; 2012.
- [5] Roelandts R. The history of phototherapy: something new under the sun? *J Am Acad Dermatol* 2002.
- [6] Hansen TWR. Sixty years of phototherapy for neonatal jaundice - from serendipitous observation to standardized treatment and rescue for millions. *Pubmed*; 2019.
- [7] Yano S. Current states and future views in photodynamic therapy. *J Photochem Photobiol C* 2011 [photochemistry reviews in Elsevier].
- [8] Kowalski WJ. Ultraviolet germicidal irradiation handbook. Berlin & Heidelberg (Allemagne): Springer; 2009.
- [9] Developing experts [En ligne]. Available: [https://www.developingexperts.com/glossary/l-e-d-light-emitting-diode?info=secondary#:~:text=LEDs%20work%20by%20using%20the,gallium%20arsenide%20phosphide%20.\(GaAsP\)](https://www.developingexperts.com/glossary/l-e-d-light-emitting-diode?info=secondary#:~:text=LEDs%20work%20by%20using%20the,gallium%20arsenide%20phosphide%20.(GaAsP)).
- [10] André Kunze B-EG. Model-based optimization of the heat flux distribution of IR-heaters for high heats flux texting. *Fusion engineering and design*; 2017.
- [11] Straumann N. Einstein in 1916: on the quantum theory of radiation. *Physikalische Gesellschaft Zurich*; 2017.
- [12] Townes CH. News and views; 2007.
- [13] The first medical use of a ruby laser in ophthalmology. New York, USA: Columbia University; 1961.
- [14] Ronald M, Wheeland G. History of lasers in dermatology. Elsevier; 1995.
- [15] NIF&PS. [En ligne]. Available: <https://lasers.llnl.gov/education/nifs-guide-how-lasers-work>.
- [16] Mathew J. In: Exposure of the eye to ultraviolet light. Alcon Medical Affairs; 2019.
- [17] Morison WL. Phototherapy and photothermotherapy of skin disease; 2005.
- [18] B.A.J.N.A.J.J., Austin E. Visible Light Part I. Properties and cutaneous effects of visible light; 2021 [Author manuscript].
- [19] Dutta MBAAA. Computational modeling of the photon transport tissue heating, and cytochrome C oxidase absorption during transcranial near-infrared stimulation. *Brain Sci* 2019;9:179.
- [20] INRS. Sensibilisation à l'exposition aux rayonnements optiques artificiels hors laser; 2019.
- [21] CNRP. Risques liés aux lasers; 2019.
- [22] Union européen/Parlement européen et conseil. Directive 2006/25/CE; 2006.
- [23] CNRS. Risques liés aux lasers. les cahiers de préventions; 2019.
- [24] Tenkate TD. Occupational exposure to ultraviolet radiation. *Rev Environ Health* 1999;14:51-63.
- [25] Huang Y-Y. Biphasic dose response in low level light therapy. *National library of medicine*; 2025.
- [26] ANSM. In: Dispositifs médicaux à technologie laser – Signalements de matériovigilance reçus à l'ANSM et mesures de prévention. Saint-Denis: ANSM; 2025.