

- Nettoyage Laser
- Bâtiment
- Rayonnement Laser
- Rayonnement optique
- Œil
- Protection individuelle
- Efficacité

► S. SALSI, G. LOVAT⁽¹⁾
O. MUSSET, J.-P. BOQUILLON⁽²⁾
R. OLTRA⁽³⁾

(1) INRS, département Ingénierie des équipements de travail

(2) UMR CNRS 5027, Faculté des Sciences Mirande, Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne, Dijon

(3) UMR CNRS 5613, UFR Sciences et Techniques, Laboratoire de Recherche sur la Réactivité des Solides, Dijon

ASSESSMENT AND PREVENTION OF OPTICAL RISKS DUE TO LASER CLEANING OF BUILDINGS

Cleaning of buildings using a Nd:YAG Q-switched (pulsed) laser is a relatively recent process. Contractors specialized in building external finishes have in fact been interested by this technique since the early 1990s in replacement of conventional processes often using products that are excessively abrasive for materials or chemicals that are dangerous for the operator and/or the environment. Laser cleaning allows total or selective elimination of black weathering crusts, from the stone surface without damaging effects. The interaction between the laser and the black crusts produces locally a high temperature rise leading to rapid vaporization of the pollutant layer. Atoms present in these gases ionize, separate and form a plasma. Sudden expansion of the resulting gas ensures separation of the pollution layer and its elimination. The plasma produced during cleaning is characterized by optical radiation (UV, visible, IR) emission, which does not usually cause a specific risk to the operator's eyes. On the other hand, laser radiation can be partially or even totally reflected by the material cleaned. This reflection represents a certain risk that can cause irreversible eye injuries. Wearing personal protection equipment (PPE) is therefore essential. However, absorption saturation effects have been observed in some PPE, making it temporarily transparent to laser radiation, and this makes its protection unreliable at high level. Extreme vigilance should therefore be maintained in relation to PPE selection.

- Laser cleaning
- Building
- Laser radiation
- Optical radiation
- Eye
- Personal protection
- Efficiency

ÉVALUATION ET PRÉVENTION DES RISQUES OPTIQUES INDUITS PAR LE NETTOYAGE LASER DES BÂTIMENTS

Le nettoyage de bâtiments à l'aide d'un laser Nd:YAG déclenché est un procédé relativement récent. En effet, des entreprises de ravalement s'intéressent à cette technique depuis le début des années 1990 pour remplacer des procédés traditionnels qui utilisent souvent des produits trop abrasifs pour les matériaux ou des produits chimiques dangereux pour l'opérateur et/ou l'environnement. Le nettoyage laser permet d'éliminer de la surface de la pierre, totalement ou de façon sélective, les salissures minérales produites par la pollution de l'air, sans l'endommager. L'interaction laser - salissures à éliminer induit une forte élévation locale de température entraînant une vaporisation rapide de la couche de polluant. Les atomes présents dans ces gaz s'ionisent, se dissocient et forment un plasma. La détente brutale du gaz ainsi créé entraîne la dissociation de la couche de pollution et son élimination. Le plasma créé lors du nettoyage a pour propriété d'émettre un rayonnement optique (UV, visible, IR) qui en général ne présente pas de risque oculaire particulier pour l'opérateur. En revanche, le rayonnement laser peut être partiellement, voire totalement, réfléchi par le matériau nettoyé. Ces réflexions présentent un risque certain pouvant alors entraîner des lésions oculaires irréversibles. Le port d'équipement de protection individuelle (EPI) s'impose donc. Toutefois, des effets de saturation d'absorption ont été observés dans certains EPI, les rendant temporairement transparents au rayonnement laser, ce qui rend leur protection illusoire à haut niveau. Il convient donc d'être très vigilant quant au choix de ces EPI.

1. INTRODUCTION

Les lasers sont utilisés dans des domaines d'applications très divers. Ils sont largement employés dans l'industrie et les télécommunications, mais aussi en médecine (diagnostics de l'insuffisance cardiaque et respiratoire, en dermatologie, cancérologie, odontologie), en chirurgie (oculaire et plastique, neurochirurgie) et dans les instituts cosmétiques (épilation, activation à la

repousse des cheveux...). Or, depuis le début des années 1990, les entreprises de ravalement de bâtiments, en particulier des monuments historiques, s'intéressent aux techniques utilisant des lasers impulsionsnels pour remplacer les procédés traditionnels de nettoyage de surfaces salies par la pollution atmosphérique, tels que le sablage, les jets haute pression ou des pâtes chimiques. En effet, ces procédés utilisent des particules souvent trop abrasives pour les matériaux, en particulier pour la

pierre calcaire, ou des produits chimiques dangereux pour les opérateurs et/ou l'environnement. Les lasers utilisés pour ces travaux de rénovation sont classiquement des lasers Nd:YAG (rayonnement infrarouge à 1064 nm), pulsés (durée d'impulsion variant de 10 à 100 nanosecondes), de puissance de l'ordre de 10 à 30 W environ, et capables de délivrer 15 à 60 impulsions par seconde (fréquence de tir 15 à 60 Hertz). La puissance crête délivrée par ce type de laser est très élevée, elle est de l'ordre de 10 à 100 MW.

Les salissures qui recouvrent les bâtiments proviennent de la pollution de l'air et des systèmes de chauffage urbain. Elles sont constituées de micro-particules telles que cendres, microsuies issues du trafic automobile et des rejets industriels, pollens et spores, cimentées par du sulfate de calcium (gypse). Appelées communément croûtes noires en raison de leur couleur noirâtre, elles sont caractéristiques des milieux industriels et urbains.

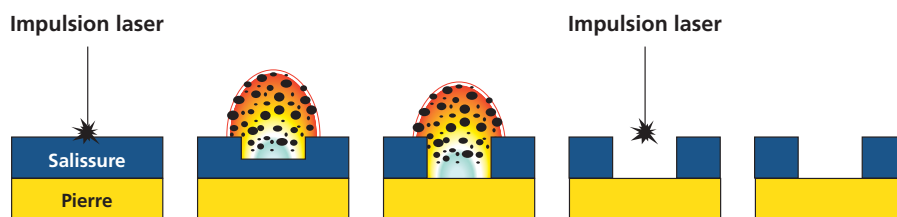
1.1 PRINCIPES DU NETTOYAGE LASER DES BÂTIMENTS

Le nettoyage laser consiste donc à éliminer ces salissures minérales de la surface de la pierre en faisant interagir le faisceau laser et les croûtes noires. Le rayonnement laser (infrarouge) est fortement absorbé par la couche de salissures noirâtres, alors que le support (pierre), qui est généralement de couleur claire, le réfléchit. Il s'agit donc d'un phénomène d'ablation sélective qui repose sur la différence des propriétés optiques des couches de salissure et du support.

La *Figure 1* présente la chronologie du phénomène. Dans ces conditions, la densité d'énergie du faisceau laser doit être supérieure au seuil d'ablation des salissures et inférieure au seuil de dommage de la pierre. En conséquence, l'énergie transportée par chaque impulsion laser est rapidement absorbée par la couche de pollution qui s'échauffe quasi instantanément ; cela provoque des modifications de son état. Elle passe rapidement de l'état solide à l'état gazeux. De plus, les atomes présents dans ce gaz vont ensuite s'ioniser et se dissocier, formant ainsi un plasma. La détente brutale du gaz ainsi créé entraîne la dissociation de la couche de pollution et son élimination. Si celle-ci est trop importante, l'opération devra être répétée

FIGURE 1

Schéma chronologique du processus de nettoyage laser
Chronological diagram of laser cleaning process



plusieurs fois. Enfin, lorsque le support est parfaitement nettoyé, aucune interaction n'est possible : le nettoyage s'arrête. La bibliographie relative au nettoyage laser est importante, les références [1 à 5] en donnent un aperçu.

1.2 RISQUES INDUITS PAR LE NETTOYAGE LASER

Les matériaux de construction sont généralement peu absorbants à la longueur d'onde du faisceau laser (typiquement 1064 nm). Ce faisceau peut donc, dans certains cas, être partiellement réfléchi. L'intensité de cette réflexion dépend des propriétés optiques du matériau, de son état de surface, de la nature et de la quantité de salissures qui le recouvrent. Cette réflexion est maximale lorsque la pierre est parfaitement nettoyée ; elle peut donc constituer un risque pour les yeux des opérateurs. De même, le plasma créé lors d'une opération de nettoyage a pour propriété d'émettre un rayonnement optique dangereux pour les yeux des opérateurs. En effet, les lasers utilisés par ces procédés de nettoyage sont, selon la norme NF EN 60825-1 [6] et l'amendement 2 à la norme IEC 60825-1⁽¹⁾ [7], des lasers de classe 4. Il s'agit de lasers dont la vision directe du faisceau ou de ses réflexions (spéculaires ou diffuses), sont susceptibles de provoquer des dommages oculaires et cutanés. Ce sont des lasers dont l'utilisation exige des précautions extrêmes. Dans la gamme de longueur d'onde d'émission de ces appareils (1064 nm),

(1) Cet amendement est applicable dans les 27 pays membres du CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) à partir du 1er janvier 2004.

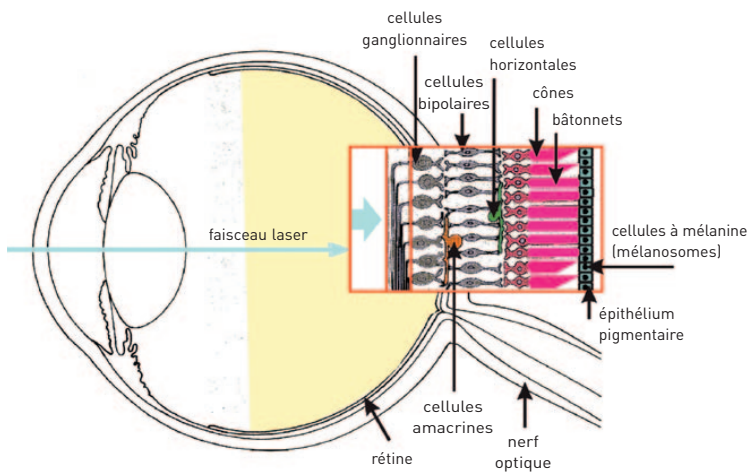
le risque prépondérant concerne les lésions irréversibles de la rétine s'accompagnant d'une perte de la vision dans la région affectée. C'est pourquoi, dans la présente étude, seul le risque oculaire a été étudié.

Lorsqu'un faisceau laser atteint la cornée, il est transmis par les milieux oculaires (humeur aqueuse, cristallin et corps vitré) à la rétine qui l'absorbe. La rétine est une structure complexe composée de différents tissus (cf. *Figure 2*). En effet, le faisceau laser doit tout d'abord traverser plusieurs couches de cellules nerveuses (cellules ganglionnaires, amacrines, bipolaires et horizontales) avant d'atteindre la couche des photorécepteurs (cônes et bâtonnets), qui absorbe une faible quantité de rayonnement, et, enfin, le faisceau laser est absorbé par l'épithélium pigmentaire rétinien. L'épithélium pigmentaire rétinien est une structure chargée de pigments noir-brunâtre (mélanine) qui absorbent la lumière ayant traversé la rétine et s'opposent à sa réflexion. L'énergie, ainsi absorbée, produit un échauffement local et une brûlure de l'épithélium pigmentaire rétinien. Cette brûlure endommage les photorécepteurs adjacents et peut, selon l'importance de l'exposition, s'étendre aux autres couches de la rétine. L'épithélium pigmentaire rétinien peut se reformer par division des cellules demeurées intactes alors que les cellules nerveuses ne se divisent pas. Les cônes et les bâtonnets, dont les corps cellulaires sont lésés, dégénèrent et meurent. À cet endroit, la fonction visuelle est définitivement perdue.

De plus, le plasma créé lors du nettoyage a pour propriété d'émettre un rayonnement optique (ultraviolet, visible et infrarouge) susceptible d'être dangereux pour les yeux des opérateurs. Les effets nocifs de ce type de rayonnement

FIGURE 2

Structure de la rétine Retina structure



sont d'ordre thermique ou photochimique, et la nature et le siège des lésions dépendent essentiellement de sa longueur d'onde, de son intensité et de la durée d'exposition.

Toute exposition aiguë au rayonnement ultraviolet de longueur d'onde inférieure à 280 nm est susceptible de provoquer une inflammation de la cornée et de la conjonctive (kérato-conjonctivite). La symptomatologie de cette affection est bien connue : impression de sable dans les yeux, larmolements et photophobie. L'invalidité oculaire varie de 6 à 24 heures. En revanche, une exposition répétée au rayonnement ultraviolet de longueur d'onde supérieure à 280 nm peut entraîner des opacifications du cristallin (cataracte).

Contrairement au rayonnement laser, les effets du rayonnement visible et infrarouge, de longueur d'onde inférieure à 1 500 nm, sont d'ordre photochimique et non thermique. En effet, ce type de rayonnement entraîne une dégénérescence des photorécepteurs sensibles au bleu, pouvant aller jusqu'à leur destruction. Cette affection résulte d'une exposition chronique au domaine bleu du spectre visible. Enfin, une exposition répétée au rayonnement infrarouge, de longueur d'onde supérieure à 1 500 nm, peut aussi conduire à des opacifications du cristallin.

Une première analyse bibliographique confirme que l'utilisation de telles techniques de nettoyage est susceptible

d'induire des risques oculaires et montre, qu'aujourd'hui, il n'existe que très peu d'éléments exploitables pour les évaluer. En effet, si de nombreuses études ont été consacrées à l'amélioration des performances de ces procédés de nettoyage, seules ont été conduites des études sur les risques liés à des utilisations médicales ou industrielles des lasers [8].

L'objectif de l'étude présentée ici est de vérifier :

- que dans des conditions normales d'utilisation d'un laser industriel de nettoyage, les risques précités existent et, dans l'affirmative, les évaluer,
- l'efficacité de certains équipements de protection individuelle contre les lasers afin de permettre le choix de protecteurs adaptés.

Pour ce faire, le flux réfléchi par 11 matériaux, appartenant aux grandes classes de matériaux de construction susceptibles d'être nettoyés par laser, a été mesuré dans différentes conditions expérimentales. À partir des valeurs maximales des flux mesurés, les expositions énergétiques, au niveau des yeux des opérateurs ont ensuite été évaluées et comparées aux Expositions Maximales Permissibles (EMP) recommandées par la norme NF EN 60825-1 [6] et l'amendement 2 à la norme IEC 60825-1 [7].

De plus, le rayonnement optique émis par le plasma formé lors du nettoyage de deux échantillons, l'un

constitué de croûtes noires dues à la pollution atmosphérique, l'autre recouvert de peinture noire mate, a été relevé entre 200 et 700 nm. L'exposition énergétique des opérateurs a ensuite été calculée puis comparée aux limites d'exposition recommandées par l'International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [9, 10].

Enfin, l'efficacité de neufs équipements de protection individuelle contre les lasers Nd:YAG à 1 064 nm a été vérifiée, afin de permettre le choix des protecteurs les mieux adaptés au nettoyage laser, tant du point de vue des risques associés à la réflexion du faisceau laser que de ceux dus au rayonnement optique émis par le plasma.

2. RISQUES ASSOCIÉS À LA RÉTRODIFFUSION DU FAISCEAU LASER SUR LES MATÉRIAUX PROPRES

Lors d'une opération de nettoyage, l'opérateur est exposé au faisceau laser rétrodiffusé par les parties propres du matériau. Selon l'état de surface de ce dernier et sa rugosité, cette réflexion peut être diffuse et/ou spéculaire. De plus, pour certaines positions de la torche laser par rapport à la surface du matériau et de l'opérateur par rapport à la torche laser, le flux rétrodiffusé peut être important et entraîner des lésions oculaires irréversibles.

Afin de vérifier si un tel risque existe, le flux réfléchi par 11 matériaux a été mesuré pour différentes conditions d'incidence et d'émergence du faisceau. À partir des valeurs maximales des flux mesurés dans ces différentes conditions expérimentales, l'exposition énergétique des yeux des opérateurs a ensuite été déduite et un indice de risque a été calculé. Ce dernier est défini par le rapport de l'exposition énergétique des yeux des opérateurs à l'Exposition Maximale Permissible, recommandée par la norme NF EN 60825-1 [6] et l'amendement 2 à la norme IEC 60825-1 [7]. Un indice de risque supérieur à l'unité signifie qu'il existe un risque pour les yeux des opérateurs.

2.1 MATÉRIAUX D'ESSAIS

L'objectif était de disposer de matériaux représentatifs de ceux utilisés pour la construction et ayant des caractéristiques de surfaces variées, susceptibles de conduire à des réflexions et à des diffusions de la lumière très différentes. Compte tenu du nombre et de la diversité de ces matériaux, tant du point de vue de leur nature que de leur état de surface et de leur couleur, leur choix a été confié au Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux (LERM), situé à Arles. Les matériaux sélectionnés par ce laboratoire sont présentés dans le *Tableau 1* et la *Figure 3*. Il s'agit de deux types de béton, deux types de calcaire, un granit, deux types de marbre dont un servant de référence (marbre poli, repère 11 du *Tableau 1*). Ils correspondent aux grandes classes de matériaux de construction susceptibles d'être nettoyés par laser.

2.2 LASER UTILISÉ POUR LES ESSAIS

Le choix du laser, ainsi que le réglage de ses paramètres, ont été conditionnés par les objectifs présentés ci-dessus, à savoir réaliser des mesures dans des conditions aussi proches que possible de la réalité. Le laser choisi est donc un laser industriel commercialisé pour le nettoyage des monuments historiques. Il s'agit d'un laser Nd:YAG déclenché (longueur d'onde : 1064 nm), puissance 10 W, durée d'impulsion de 25 nanosecondes. Il a été utilisé dans des conditions de tir correspondant à une fluence de 1 J/cm² et une fréquence de tirs de 10 Hz.

2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental de la mesure du flux « rétrodiffusé » par les différents matériaux est présenté à la *Figure 4*. Il se compose d'une platine goniométrique sur laquelle est fixée la torche laser, d'un porte-échantillon solidaire de la partie centrale de la platine goniométrique et d'un bras orientable supportant le dispositif de mesure ; ceci permet de maintenir constante la distance échantillon - dispositif de mesure.

Les conditions d'essais (paramètres laser) sont celles d'une utilisation normale du matériel de nettoyage, en particulier :

- la distance de mesure (150 mm), qui correspond à la distance séparant nor-

FIGURE 3

Aspect des matériaux testés Aspect of tested materials



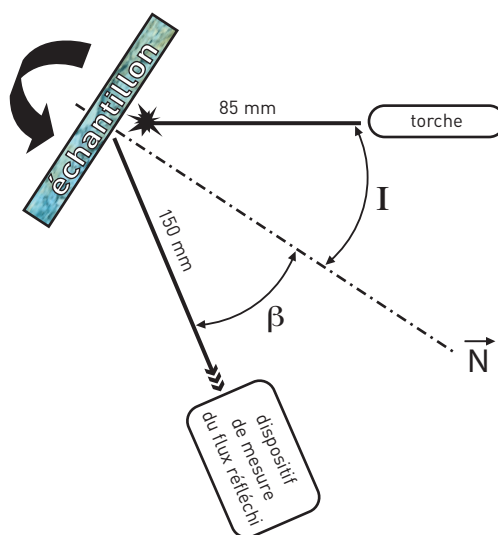
TABLEAU 1

Liste des matériaux testés List of tested materials

Type de matériau	Repère
Ciment banché	1
Ciment moulé	2
Calcaire suboolithique et graveleux	3
Calcaire estailade	4
Granit du Tarn 'SILVERSTAR'	5
Marbre	6 à 10
Marbre funéraire poli	11

FIGURE 4

Schéma du montage expérimental Diagram of experimental set-up



Paramètres du laser :

- Fréquence de tir : 10 Hz
 - Énergie par impulsion : 0,2 Joule
 - Dimension de la tache focale sur l'échantillon (à $I = 0^\circ$) : 4 mm
- Exposition énergétique :
1,6 Joule/cm² à $I = 0^\circ$
 ≈ 1 Joule/cm² à $I = 45^\circ$

I : angle d'incidence torche laser par rapport à la normale à l'échantillon.

β : angle d'émergence.

malement les yeux de l'opérateur du matériel en cours de nettoyage,

- la position de la torche laser par rapport à l'échantillon (85 mm).

Dans ces conditions, la dimension

de la tache focale sur l'échantillon varie de 4 mm, pour un angle d'incidence $I = 0^\circ$, à 5,7 mm pour $I = 45^\circ$ dans le plan de rotation, et elle est constante et égale à 4 mm dans le plan vertical.

La *Figure 5* représente le dispositif de mesure. Il est constitué de deux lentilles de diamètre 38 mm et de distance focale 150 mm. L'angle d'ouverture correspondant à ce dispositif a pour valeur $\alpha_e = 13^\circ$ ou $\alpha_p = 14,4^\circ$ selon que la tache focale est respectivement considérée comme une source ponctuelle ou prise égale à 4 mm. Cet angle est défini par les expressions suivantes :

$$\alpha_e = 2 \cdot \arctan((D-d)/2L)$$

$$\text{et } \alpha_p = 2 \cdot \arctan(D/2L)$$

où :

D : diamètre des lentilles,
L : distance échantillon-lentilles,
d : diamètre de la tache laser sur l'échantillon.

Afin de simplifier les calculs, la tache focale a été assimilée à une source ponctuelle, ce qui a pour conséquence de surévaluer légèrement l'énergie mesurée dans un demi-angle d'ouverture de $7,2^\circ$. Cette hypothèse est acceptable car elle va dans le sens de la sécurité.

Un jeu de filtres "gris" atténuateurs est placé entre la deuxième lentille et la photodiode afin de ne pas saturer cette dernière tout en gardant une sensibilité suffisante dans la gamme 0 – 15 mJ. La photodiode utilisée est un modèle silicium rapide large bande, elle a été préalablement étalonnée par rapport à un mesureur de puissance calibré. La *Figure 6* présente la courbe d'étalonnage. Sur cette courbe, la tension prise en compte est la tension crête fournie par la photodiode.

2.4 MÉTHODE D'ÉVALUATION DU RISQUE OCULAIRE

2.4.1 Calcul de l'exposition énergétique des yeux de l'opérateur (H_{yeux})

Afin de vérifier si le faisceau laser rétrodiffusé par les matériaux nettoyés présente un danger, l'exposition énergétique possible des yeux de l'opérateur, situés à 150 mm du matériau en cours de nettoyage, est comparée aux Expositions maximales permises (EMP) recommandées par la norme NF EN 60825-1 [6] et l'amendement 2 à la norme IEC 60825-1 [7]. La quantité H_{yeux} , correspondant à une taille pupillaire de 7 mm, est déterminée en fonction des caractéristiques optiques et dimensionnelles du dispositif de mesures (cf. *Figure 5*) et des valeurs d'énergie mesurées. Si on fait l'hypothèse que l'énergie est constante sur les 38 mm

FIGURE 5

Schéma du dispositif de mesure
Measuring device

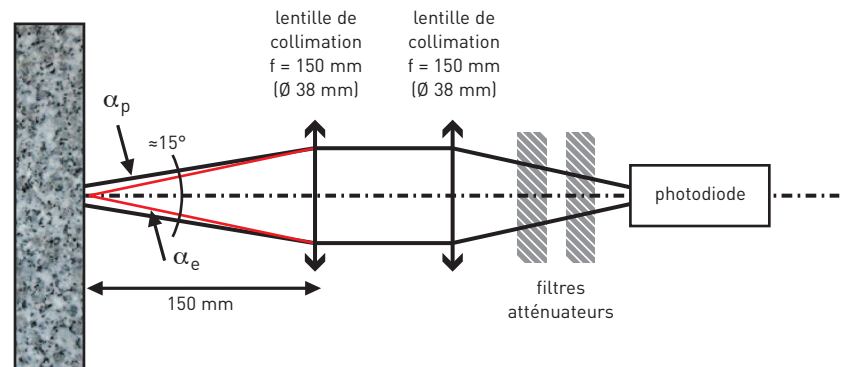
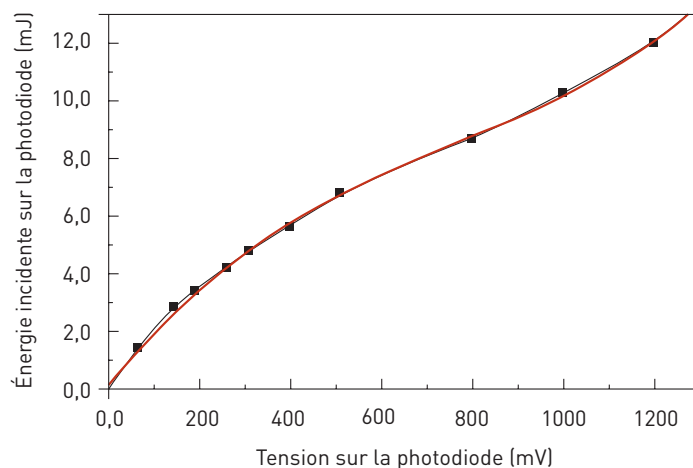


FIGURE 6

Courbe d'étalonnage de la photodiode
Photodiode calibration curve



d'ouverture des lentilles, H_{yeux} a pour expression :

$$H_{yeux} = \frac{Q_p}{(\pi R_L^2) K} \text{ avec } Q_p = Q_0 \frac{R_p^2}{R_L^2}$$

où :

Q_0 : énergie rétrodiffusée mesurée par le dispositif de mesure,

R_L : rayon des lentilles du dispositif de mesure (19 mm),

Q_p : énergie traversant une pupille de 7 mm de diamètre ($R_p = 3,5$ mm)

$$K = \frac{(ON_L)^2}{(ON_{FMH})^2} \quad (1)$$

où :

ON_L : angle d'ouverture de la lentille à 150 mm ($14,4^\circ$),

ON_{FMH} : angle à mi-hauteur du lobe d'énergie rayonnante.

K est un facteur correctif qui tient compte de l'uniformité de l'énergie dans l'indicatrice de rétrodiffusion du matériau (valeur de l'angle d'ouverture de la lentille par rapport à la largeur de l'indicatrice).

FIGURE 7

Ciment banché (repère 1 du Tableau I)
Benched cement rendering (table I, ref. 1)

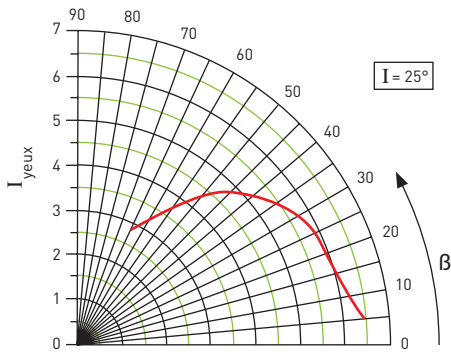


FIGURE 8

Ciment moulé (repère 2 du Tableau I)
Cast cement rendering (table I, ref. 2)

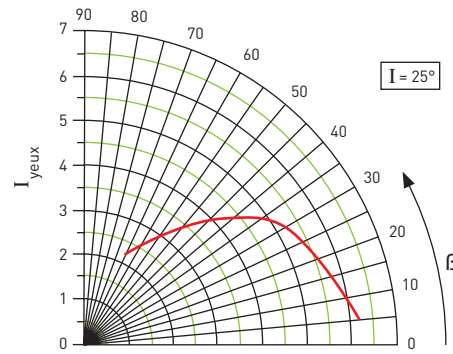


FIGURE 9

Calcaire suboolithique (repère 3 du Tableau I)
Suboolithic limestone (table I, ref. 3)

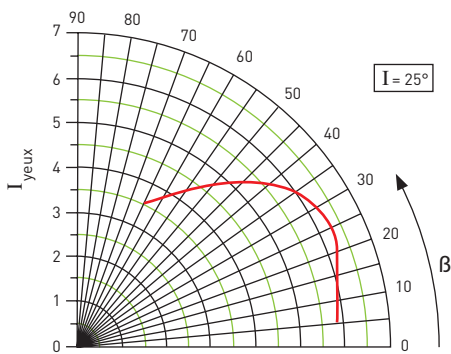


FIGURE 10

Calcaire estailade (repère 4 du Tableau I)
Estailade limestone (table I, ref. 4)

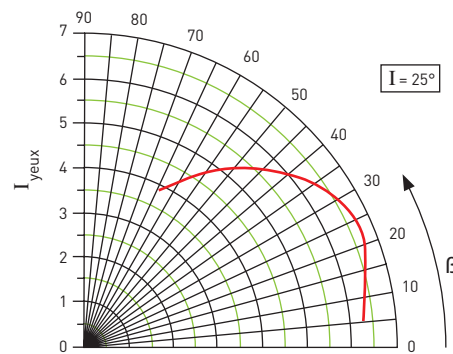
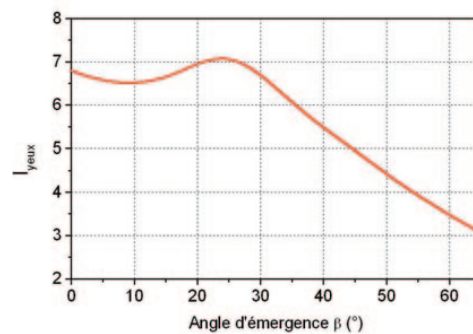
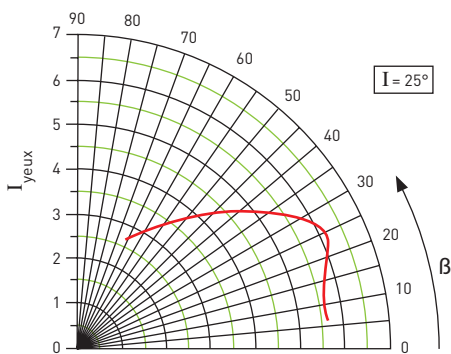


FIGURE 11

Granit du Tarn (repère 5 du Tableau I) - Tarn granite (table I, ref. 5)



Variation de l'indice de risque I_{yeux} en fonction de l'angle d'émergence β ,
pour un angle d'incidence $I=25^\circ$ correspondant aux matériaux granuleux et diffusants
Risk index I_{yeux} variation w.r.t. β for $I=25^\circ$, concerning granular and diffusing materials

2.4.2 Détermination de l'Exposition Maximale Permises des yeux (EMP_{yeux})

Selon la norme NF EN 60825-1 [6] et l'amendement 2 à la norme IEC 60825-1 [7], les EMP aux lasers de longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 10^6 nm, à impulsions répétitives, doivent être déterminées en utilisant la plus restrictive des trois prescriptions données ci-dessous :

- **Prescription 1** : L'exposition à une seule impulsion dans un train d'impulsions ne doit pas dépasser l'EMP pour une impulsion unique (EMP_{unique}),
- **Prescription 2** : L'exposition moyenne pour un train d'impulsions de durée T ne doit pas dépasser l'EMP pour une impulsion unique de durée T ($EMP_{T/unique}$). Habituellement, pour une exposition accidentelle à ce type de laser, on prend $T = 10$ s, sauf mention contraire [11].
- **Prescription 3** : L'exposition à une impulsion quelconque comprise dans un train d'impulsions ne doit pas excéder l'EMP pour une impulsion unique multipliée par le facteur correctif C_5 :

$$EMP_{train} = EMP_{unique} \times C_5$$

où :

EMP_{train} : EMP à une impulsion quelconque comprise dans le train d'impulsions,

EMP_{unique} : EMP à une impulsion unique (cf. prescription 1),

$$C_5 = N^{-1/4},$$

N : nombre total d'impulsions prévu durant le temps d'exposition.

Compte tenu des caractéristiques du laser utilisé et des conditions d'essais décrites aux paragraphes 2.2 et 2.3, et tout calcul fait, les EMP correspondant aux trois prescriptions ci-dessus sont les suivantes :

- $EMP_{unique} = 0,9 \text{ J.m}^{-2}$
- $EMP_{T/unique} = 9109 \text{ J.m}^{-2}$
- $EMP_{Train} = EMP_{unique} \cdot 0,316 = 0,28 \text{ J.m}^{-2}$

En conclusion, l' EMP_{yeux} à prendre en compte, pour évaluer le risque oculaire associé à une opération de nettoyage laser correspondant aux conditions d'essais décrites au paragraphe 2, est celle définie par la plus restrictive des trois prescriptions présentées ci-dessus, il s'agit de :

$$EMP_{yeux} = 0,28 \text{ J.m}^{-2}$$

2.4.3 Définition de l'indice de risque oculaire (I_{yeux})

Afin de mettre en évidence et de quantifier le risque oculaire induit par le nettoyage laser, l'exposition énergétique des yeux des opérateurs a été comparée à l'Exposition Maximale Permises EMP_{yeux} définie précédemment. Pour ce faire, un indice de risque I_{yeux} a été défini comme suit :

$$I_{yeux} = \frac{H_{yeux}}{EMP_{yeux}}$$

Ainsi, un indice supérieur à l'unité signifie que l' EMP_{yeux} est dépassée et qu'il existe un risque pour les yeux des opérateurs.

2.5 RÉSULTATS

Le flux rétrodiffusé par les onze matériaux d'essai, repérés dans le *Tableau I*, a été mesuré selon la méthode décrite § 2.3, pour différentes conditions d'incidence et d'émergence du faisceau laser, caractérisées par les couples I, β (définis à la *Figure 4*). Compte tenu de la très faible influence de l'angle d'incidence I sur le taux de lumière rétrodiffusée par les matériaux diffusants, les échantillons d'essais (cf. *Tableau I*) ont été classés en deux catégories selon leur état de surface et leur rugosité. À chacune d'elles, les conditions expérimentales suivantes ont été appliquées :

- matériaux granuleux et diffusants (repères 1 à 5 du *Tableau I*), angle d'incidence du faisceau laser constant $I = 25^\circ$, angle d'émergence β variable entre 0° et 65° ,
- matériaux non granuleux et spéculaires (repères 6 à 11 du *Tableau I*), angles d'incidence et d'émergence variables, I de 11° à 45° et β de -10° à 65° .

2.5.1 Résultats relatifs aux matériaux granuleux et diffusants

Les *Figures 7 à 11* présentent les indices de risque oculaire I_{yeux} , déterminés selon la méthode décrite au § 2.4, en fonction de l'angle d'émergence β , pour un angle d'incidence du faisceau laser $I = 25^\circ$.

2.5.2 Résultats relatifs aux matériaux non granuleux et spéculaires

Les variations de l'indice de risque oculaire I_{yeux} , déterminé selon la méthode

décrite au § 2.4, sont présentées, en fonction des angles d'incidence I et d'émergence β du faisceau laser, aux *Figures 12 à 17*, page suivante. Pour des raisons de lisibilité, les indices sont repérés en coordonnées cartésiennes et non polaires comme précédemment.

De ces figures, il ressort que, quel que soit le matériau nettoyé et quels que soient les angles d'incidence (I) et d'émergence (β) du faisceau laser, les indices de risques (I_{yeux}) sont toujours supérieurs à l'unité. Ils varient respectivement de 2,7 à 17,5 pour les matériaux repérés 1 à 5 dans le *Tableau I* et de 4,7 à 125,4 pour les matériaux repérés 6 à 11 de ce même tableau. En conséquence, le nettoyage de matériau de construction, du même type que ceux décrits dans le *Tableau I*, réalisé dans des conditions semblables à celles décrites aux § 2.1 à 2.3, présente un risque potentiel pour les yeux des opérateurs.

De plus, les courbes correspondant aux matériaux (ciment, calcaire), repérés 1 à 4 dans le *Tableau I* (cf. *Figures 7 à 10*), ne comportent pas de composante spéculaire ; ces matériaux sont donc diffusants. En revanche, les marbres (repères 6 à 11) ont un comportement très différent vis-à-vis du rayonnement laser. Il sont essentiellement spéculaires. Les courbes qui leur correspondent (cf. *Figures 11 à 17*), permettent de déterminer les angles d'incidence et d'émergence maximaux (I_{max} et β_{max}) pour lesquels l'indice de risque oculaire ($I_{yeuxmax}$) est maximal. Toutefois, la *Figure 11* correspondant au granit du Tarn (repère 5 du *Tableau I*), montre qu'il existe une direction privilégiée dans la rétrodiffusion de ce matériau. Il peut donc être considéré comme un matériau diffusant-spéculaire.

REMARQUE

L'énergie rétrodiffusée par les différents matériaux indiqués dans le *Tableau I* et mesurée à l'aide du dispositif décrit à la *Figure 4*, est en réalité une énergie moyenne maximale relevée dans un angle de $14,4^\circ$. Cette situation peut conduire à sous-évaluer le risque oculaire correspondant. Cette fonction d'appareil introduit donc, pour le type de laser utilisé, un facteur de sécurité dans l'évaluation de l'exposition énergétique H_{yeux} des opérateurs, dont la valeur dépend de l'état de surface du matériau. Ce facteur sera maximal pour des matériaux très spéculaires tels que le granit poli (repère 11 du *Tableau I*).

FIGURE 12

Marbre 6 (repère 6 du *tableau 1*) - Marble 6 (table I, ref. 6)

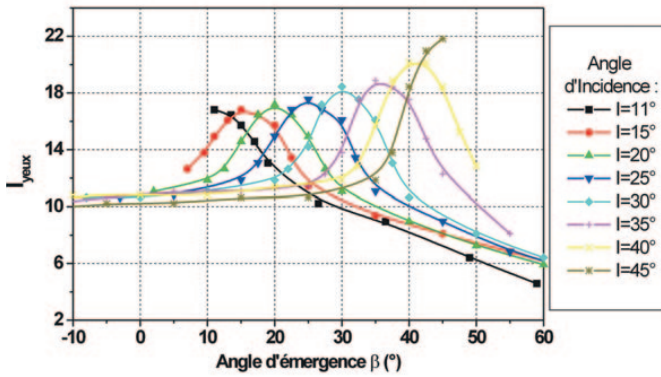


FIGURE 13

Marbre 7 (repère 7 du *tableau 1*) - Marble 7 (table I, ref. 7)

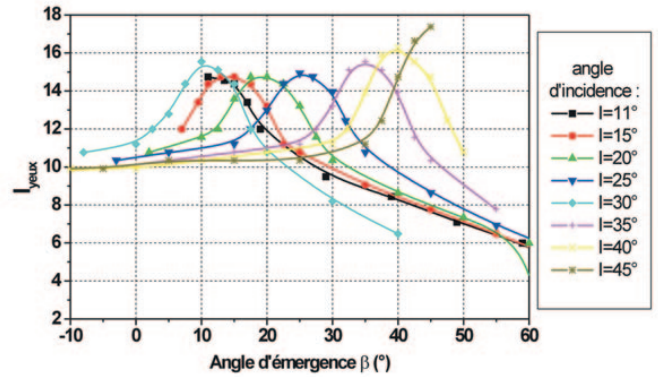


FIGURE 14

Marbre 8 (repère 8 du *tableau 1*) - Marble 8 (table I, ref. 8)

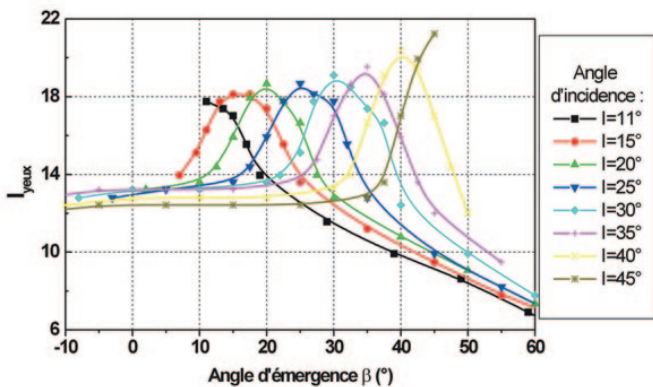


FIGURE 15

Marbre 9 (repère 9 du *tableau 1*) - Marble 9 (table I, ref. 9)

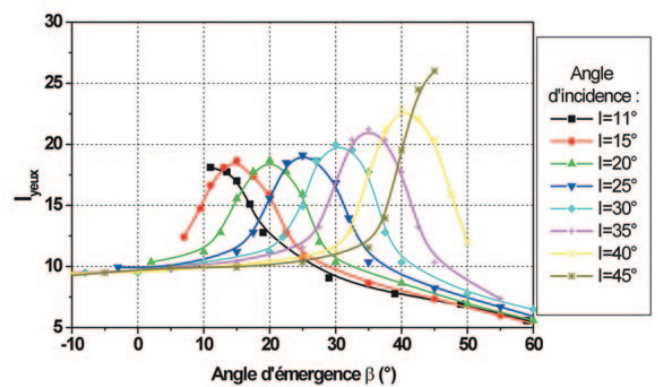


FIGURE 16

Marbre 10 (repère 10 du *tableau 1*) - Marble 10 (table I, ref. 10)

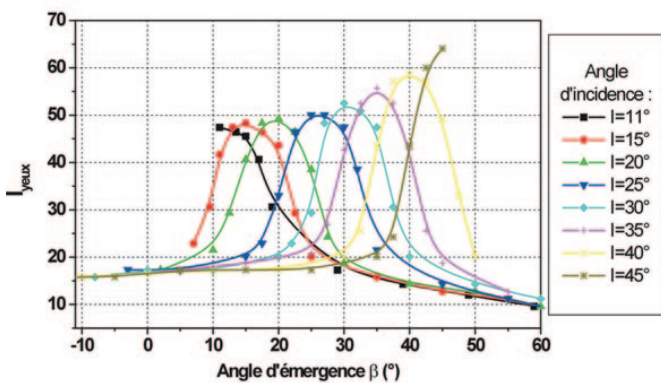
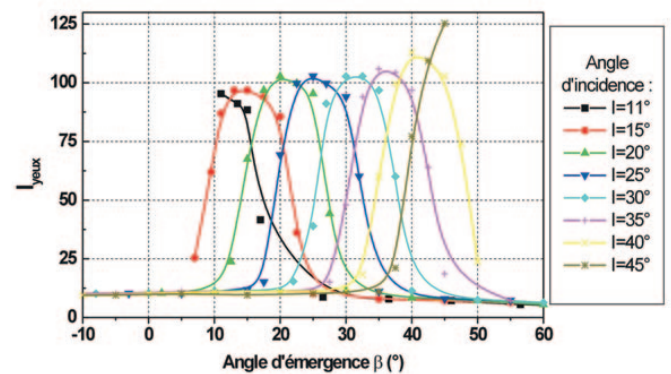


FIGURE 17

Marbre poli 11 (repère 11 du *tableau 1*) - Polished marble 11 (table I, ref. 11)



Variation de l'indice de risque I_{yeux} en fonction de l'angle d'incidence I
 et de l'angle d'émergence β correspondant aux matériaux non granuleux et spéculaires
 Risk index I_{eyes} variation w.r.t. angles of incidence I and emergence β for non granular and specular materials

Le *Tableau II* rassemble les différentes valeurs de l'exposition énergétique maximale des yeux (H_{yeuxmax}) et des indices de risque oculaire maximal (I_{yeuxmax}) observés pour chaque matériau essayé, ainsi qu'une qualification optique traduisant leur comportement vis-à-vis du rayonnement laser (D : diffusant, S : spéculaire et S+D : spéculaire-diffusant).

Ce tableau vérifie que le risque oculaire est lié à l'état de surface et à la rugosité des matériaux. En effet, plus leur composante spéculaire est importante, plus le risque est grand.

À partir de la valeur maximale des I_{yeuxmax} du *Tableau II*, il est possible de déterminer l'absorption minimale des équipements de protection à utiliser. Cette absorption est caractérisée par sa densité optique DO qui se définit comme suit :

$$DO = \log_{10} \left\{ \text{MAX} \left[I_{\text{yeuxmax}} \right] \right\} = 2,1$$

Il est donc impératif que les opérateurs, ou toute personne se trouvant à proximité du poste de travail, soient équipés d'équipement de protection contre la réflexion du faisceau laser, de densité optique au minimum égale à 2,1. Toutefois, pour le type de laser utilisé, il est recommandé d'utiliser des équipements de protection de $DO=6$ afin de se protéger de la vision directe accidentelle du faisceau laser.

3. RISQUES OCULAIRES ASSOCIÉS AU RAYONNEMENT ÉMIS PAR LE PLASMA

Lors du nettoyage d'une surface polluée, une fraction de l'énergie incidente est absorbée par la couche de salissures. Cette énergie est alors partiellement relaxée sous forme d'un plasma qui a la propriété d'émettre un rayonnement optique. Afin de vérifier si une exposition prolongée à ce rayonnement est dangereuse pour les opérateurs, le rayonnement optique émis a été mesuré entre 200 et 700 nm. Compte tenu de la non-stationnarité et de la courte durée du phénomène (quelques fractions de seconde), il n'a pas été possible d'effectuer des relevés spectraux. C'est pourquoi, des photorécepteurs calibrés pour différentes bandes de longueurs d'onde ont été utilisés. Ce sont :

- Pour les mesures dans le visible : un optomètre associé à une sonde silicium large

TABLEAU II

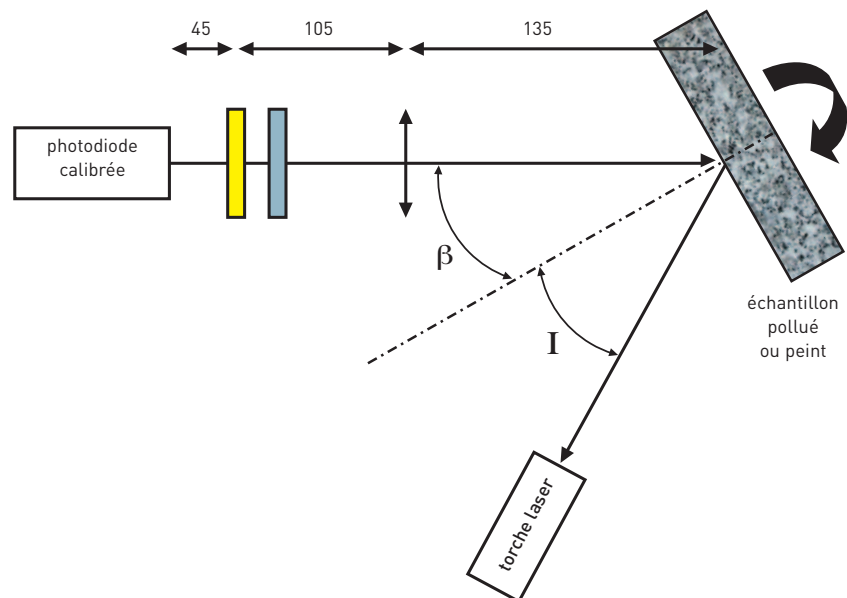
Indice de risque oculaire maximal et exposition énergétique maximale calculés correspondant aux différents matériaux essayés
Maximum ocular risk index and maximum radiant exposure calculated for different tested materials

Référence	K*	Type de réflexion D : Diffusant S : Spéculaire	Indice de risque Maximum I_{yeuxmax}	Exposition énergétique H (J/m ²)	Exposition maximale permise (J/m ²)
Béton 1	1	D	6,5	1,8	0,28
Ciment 2	1	D	8,0	2,2	
Calcaire 3	1	D	13,0	3,6	
Calcaire granuleux 4	1	D	17,7	5,0	
Granit 5	1	D	7,5	2,1	
Marbre 6	1	D+S	21,8	6,1	
Marbre 7	1	D+S	17,4	4,9	
Marbre 8	1	D+S	21,3	6,0	
Marbre 9	1	D+S	26,0	7,3	
Marbre 10	1,44	S	64,1	18,0	
Marbre 11	1,70	S	125,4	35,1	

* K : facteur correctif mentionné dans la relation (1) § 2.4 p.11.

FIGURE 18

Schéma du dispositif de mesure
Diagram of measuring apparatus



bande (300-1100 nm), équipé d'un filtre KG3. Ce filtre permet de supprimer le domaine de longueurs d'onde 700-1100 nm qui contient la longueur d'onde du laser.

- Pour des mesures dans l'ultraviolet : un optomètre associé à des sondes spécifiques UVA, UVB et UVC.

Ces matériels ont permis d'évaluer l'éclairement énergétique reçu par l'opérateur, dans les domaines du rayonnement optique compris entre 200 et 700 nm. Afin d'essayer deux configurations de salissures très absorbantes, les

mesures ont été réalisées au cours du nettoyage de deux types d'échantillon :

- l'un constitué de "croûtes noires" fournies par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques de Champs-sur-Marne (LRMH) et prélevées sur la cathédrale de Saint-Denis. Ces croûtes ont été fixées sur un support linéaire PVC permettant une translation facile par rapport au faisceau laser incident,
- l'autre étant une brique rouge revêtue de plusieurs couches de peinture noire mate.

3.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental est représenté à la *Figure 18*. Il se compose d'une platine goniométrique comportant une partie fixe sur laquelle est fixée la torche laser, une partie mobile supportant le système de mesure (lentille éventuelle + filtres + photodiodes calibrées). Sur l'axe de rotation du goniomètre est fixé un rail de guidage permettant un déplacement transversal du porte-échantillon. L'ensemble de mesure est recouvert d'un tissu noir opaque afin de minimiser le bruit de fond induit par la lumière ambiante. À chaque mesure, ce bruit ambiant est relevé et son importance relative par rapport au signal à mesurer vérifiée.

Les photodiodes ont été reliées à un optomètre Gigahertz-Optik P9170. Les mesures ont été réalisées en mode continu afin de disposer de temps d'intégration de l'ordre de la seconde. En effet, le laser de nettoyage travaille à une fréquence de tir de 10 Hz, soit une période de 100 ms. Donc, pour 10 tirs consécutifs, un temps d'intégration de 10,5 périodes (1,5 s) est nécessaire. La demi-période supplémentaire permet d'être sûr d'avoir les 10 impulsions dans le temps d'intégration. L'énergie par impulsion mesurée (Φ impulsion / plasma - mesuré) est alors égale à :

$$\Phi_{\text{impulsion / plasma-mesuré}} = \frac{P_{\text{mesuré}} - P_{\text{bruit}}}{N_{\text{tir}}}$$

Cette énergie s'exprime en nanojoules et correspond à l'énergie du plasma mesuré à l'aide d'une lentille de diamètre 40 mm, de focale 75 mm, et placée à une distance de 135 mm de l'échantillon, soit un demi-angle d'ouverture de $\arctan(20/135) = 8,5^\circ$.

Les sondes utilisées sont les suivantes : une sonde large bande calibrée en longueur d'onde (ref. : PD-9306-1) et trois sondes UV correspondant aux trois bandes UV habituelles : UVA (ref. : 3717-2), UVB (ref. : 3702-2) et UVC (ref. : 3703-2).

3.2 MÉTHODE D'ÉVALUATION DES RISQUES

Afin de vérifier si le rayonnement émis par le plasma présente un risque, les expositions énergétiques (H_{UV} , H_{UVA} , $H_{VISIBLE}$) de l'opérateur dans les différents domaines de longueur d'onde, ont été comparées aux limites d'exposition recommandées par l'International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [8, 9]. Le

TABLEAU III

Méthode de calcul de l'exposition énergétique et limites d'exposition recommandées par l'ICNIRP [8, 9]

Radiant exposure calculation method and exposure limits recommended by ICNIRP [8, 9]

Effets du rayonnement	Bande (nm)	Exposition énergétiques calculées	Limite d'exposition EL
Peau Erythèmes, effets cancérogènes	200-400	$H_{UV} = \sum_{200}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \Delta\lambda \cdot t$	30 J.m ⁻²
Yeux Kératites, conjonctivites	200-400	$H_{UV} = \sum_{200}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \Delta\lambda \cdot t$	30 J.m ⁻²
Yeux Cataractes	315-400	$H_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot t$	10 ⁴ J.m ⁻²
Yeux Lésions rétinienne par effet photochimique	300-700	$H_{VISIBLE} = \sum_{300}^{700} E_{\lambda} \cdot B_{\lambda} \Delta\lambda \cdot t$ pour t > 104s	10 ⁴ W.m ⁻²

TABLEAU IV

Expositions énergétiques des opérateurs, relatives au rayonnement optique émis par le plasma.

Radiant exposure of the operator in relation to the optical radiation emitted by the plasma

Effets du rayonnement	Domaine spectral (nm)	Expositions énergétiques calculées		Limite d'exposition EL
		Brique	Croûtes noires	
Peau Erythèmes, effets cancérogènes	200-400	$H_{UV} = 7,2 \text{ J.m}^{-2}$	$H_{UV} = \text{NM}$	30 J.m ⁻²
Yeux Kératites, conjonctivites	200-400	$H_{UV} = 7,2 \text{ J.m}^{-2}$	$H_{UV} = \text{NM}$	30 J.m ⁻²
Yeux Cataractes	315-400	$H_{UVA} = 4,3 \text{ J.m}^{-2}$	$H_{UVA} = \text{NM}$	10 ⁴ J.m ⁻²
Yeux Lésions rétinienne par effet photochimique	300-700	$H_{VISIBLE} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$	$H_{VISIBLE} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$	10 ⁻² W.m ⁻²

(NM : non mesurable) (NM: not measurable).

Tableau III donne la méthode de calcul des expositions énergétiques et les limites d'exposition correspondantes [8, 9].

Comme il n'a pas été possible d'effectuer des relevés spectraux, les spectres d'action $S(\lambda)$ et $B(\lambda)$ du rayonnement optique, utilisés dans le calcul des expositions énergétiques comme indiqué dans le Tableau III, ont été considérés constants dans les différents domaines de longueurs d'onde et égaux à l'unité. Les expositions énergétiques correspondantes sont de ce fait surévaluées, ce qui va dans le sens de la sécurité.

3.3 RÉSULTATS DES MESURES DE DOSE DU PLASMA ISSU DU NETTOYAGE LASER

À partir des éclairagements énergétiques mesurés dans les différents domaines spectraux, comme indiqué au

§ 3.2, les expositions énergétiques des opérateurs ont été calculées selon la méthode décrite dans le *Tableau III*, pour une distance d'exposition de 100 mm et pour une durée journalière d'exposition de huit heures. Elles sont rassemblées dans le *Tableau IV*.

Ce tableau montre que, quel que soit le domaine spectral considéré, les expositions énergétiques calculées sont toutes très inférieures aux limites d'exposition recommandées par l'ICNIRP [8, 9]. De plus, les hypothèses simplificatrices prises en compte (cf. § 3.2, spectre d'action $S(\lambda)$ et $B(\lambda)$ du rayonnement optique constant et égal à l'unité sur l'ensemble des différents domaines spectraux) ont conduit à surévaluer ces expositions énergétiques. On peut donc raisonnablement conclure que le rayonnement optique émis par le plasma ne présente pas de risque pour les opérateurs.

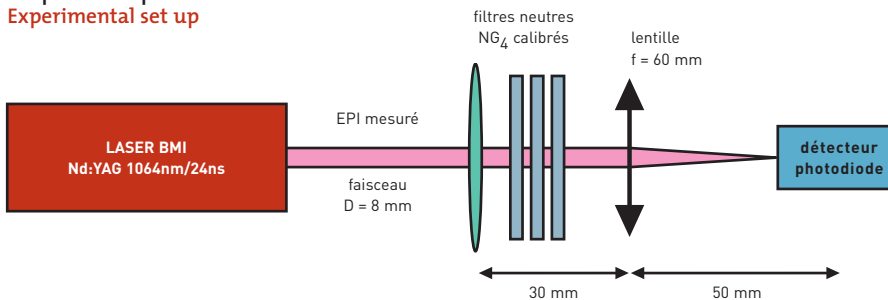
TABLEAU V

Différents EPI étudiés Different PPE studied

Repère	Matériau Constitutif des oculaires	Type d'EPI	Facteur de transmission donné par le fabricant
1	Polycarbonate	Lunettes à branches	10^{-6} , (DO = 6)
2	Verre minéral		10^{-6} , (DO = 6)
3	Polycarbonate		10^{-6} , (DO = 6)
4	Polycarbonate		10^{-6} , (DO = 6)
5	Polycarbonate		10^{-7} , (DO = 7)
6	Verre minéral		10^{-6} , (DO = 6)
7	Verre minéral	Lunette masque	10^{-6} , (DO = 6)
8	Verre minéral	Lunettes à branches	10^{-6} , (DO = 6)
9	Verre minéral	Lunettes à branches	10^{-6} , (DO = 6)

FIGURE 19

Dispositif expérimental Experimental set up



4. PROTECTION OCULAIRE LORS DU NETTOYAGE LASER DE BÂTIMENTS - EFFICACITÉ DES EPI

Les équipements de protection individuelle (EPI) contre les rayonnements laser font l'objet de la norme européenne NF EN 207 [11]. Cette norme définit les exigences relatives à ces EPI, telles que : leur facteur spectral de transmission, leur facteur de transmission dans le visible, leur stabilité au rayonnement laser... ainsi que les méthodes d'essais associées et leur marquage.

Les EPI contre les lasers se présentent sous diverses formes (lunettes avec ou sans coques latérales, lunettes masques...) et utilisent différents principes de limitation de l'énergie transmise : absorption par des colorants organiques dissous dans des polymères (polycarbonate, par exemple) ou des agrégats métalliques dopant un verre minéral, interférences, aluminisation...

Initialement, il était prévu de vérifier l'efficacité des EPI afin de permettre le choix de protecteurs adaptés au nettoyage laser, tant du point de vue des risques associés au laser que de ceux dus au rayonnement optique émis par le plasma. Or, comme il a été montré au § 3.2, malgré les hypothèses simplificatrices prises en compte, conduisant à surévaluer l'exposition énergétique des opérateurs, le rayonnement optique émis par le plasma ne présente aucun risque. Par conséquent, seule l'efficacité des EPI vis-à-vis du rayonnement laser a été étudiée.

Pour ce faire, les facteurs spectraux de transmission de neuf EPI, spécifiquement commercialisés pour la protection contre les lasers Nd:YAG à 1064 nm, tels que ceux utilisés en nettoyage laser de bâtiments, ont été mesurés puis comparés aux valeurs indiquées par les fabricants. Comme ces EPI sont conformes à la norme NF EN 207 [11], leur facteur spectral de transmission doit en principe satisfaire les spécifications de ladite norme.

4.1 DIFFÉRENTS TYPES D'EPI ÉTUDIÉS

Les différents équipements de protection étudiés sont donnés dans le *Tableau V*. Ce sont des lunettes en polycarbonate moulé ou des lunettes équipées d'oculaires minéraux. Ces EPI ont été choisis car ils sont très utilisés en raison de leur faible coût.

4.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les facteurs spectraux de transmission des EPI du *tableau V* ont été mesurés, sous flux élevé, à l'aide du dispositif expérimental décrit à la *Figure 19*.

Le faisceau laser était focalisé sur une photodiode rapide PIN, reliée à un oscilloscope à mémoire, à l'aide d'une lentille plan convexe de 60 mm de focale. Afin de ne pas saturer la photodiode, des filtres neutres NG₄, préalablement étalonnés à la longueur d'onde 1064 nm à l'aide d'un laser Nd:YAG, ont été interposés entre le protecteur à mesurer et la lentille. Les facteurs d'atténuation des filtres utilisés étaient égaux à 4, 10, 12, 13, 400 et 1000 avec une précision de $\pm 5\%$.

Les facteurs spectraux de transmission des EPI ont été déterminés, sous incidence normale, à l'aide d'un laser Nd:YAG déclenché à 1064 nm. Afin de réaliser des mesures sur une surface « étendue » des EPI et non sur un point, le diamètre du faisceau laser a été réglé à 8 mm et les paramètres laser étaient les suivants :

- Énergie par tir : 120 mJ
- Durée d'impulsion : 24 ns

Les paramètres correspondent à une densité d'énergie de 0,24 Jcm⁻² et une densité de puissance de 10 MWcm⁻².

Le facteur spectral de transmission T_λ d'un EPI est défini par le rapport du flux qu'il transmet Φ_{Transmis} au flux incident Φ_{Incident} , soit :

$$T_\lambda = \frac{\Phi_{\text{Transmis}}}{\Phi_{\text{Incident}}}$$

La transmission des EPI est habituellement caractérisée par leur densité optique DO ; elle a pour expression :

$$DO = \log_{10} \frac{1}{T_\lambda}$$

TABLEAU VI

Facteurs spectraux de transmission donnés par les fabricants $T_{\lambda, \text{Fabricant}}$ et mesurés $T_{\lambda, \text{Mesuré}}$ et densités optiques données par les fabricants $DO_{\text{Fabricant}}$ et mesurées $DO_{\text{Mesuré}}$ pour différents EPI
Spectral transmittance quoted by manufacturers $T_{\lambda, \text{Fabricant}}$ and measured $T_{\lambda, \text{Mesuré}}$.
Optical densities quoted by manufacturers $DO_{\text{Fabricant}}$ and measured $DO_{\text{Mesuré}}$ for different PPE.

Repère	Matériau Constitutif des oculaires	$DO_{\text{Fabricant}}$	$T_{\lambda, \text{Fabricant}}$	$DO_{\text{Mesuré}}$	$T_{\lambda, \text{Mesuré}}$
1	Polycarbonate	6	10^{-6}	7,1	$0,83 \cdot 10^{-7}$
2	Verre	6	10^{-6}	6,7	$0,20 \cdot 10^{-6}$
3	Polycarbonate	6	10^{-6}	0,7	$2,00 \cdot 10^{-2}$
4	Polycarbonate	6	10^{-6}	1,9	$1,25 \cdot 10^{-2}$
5	Polycarbonate	7	10^{-7}	7,2	$0,66 \cdot 10^{-7}$
6	Verre	6	10^{-6}	6,5	$3,30 \cdot 10^{-6}$
7	Verre	6	10^{-6}	6,5	$3,30 \cdot 10^{-6}$
8	Verre	6	10^{-6}	7,8	$0,15 \cdot 10^{-6}$
9	Verre	6	10^{-6}	7,4	$0,40 \cdot 10^{-7}$

4.3 RÉSULTATS

Les facteurs spectraux de transmission T_{λ} , ainsi que les densités optiques DO des différents EPI étudiés (cf. *Tableau V*) ont été déterminés selon la méthode décrite au § 4.2. Ils sont présentés dans le *Tableau VI*.

De ce tableau, il ressort que les facteurs spectraux de transmission mesurés sont supérieurs à ceux donnés par les fabricants à l'exception de ceux correspondant aux EPI repérés 3 et 4 dans le *Tableau V*. En effet, ces lunettes de protection présentent des facteurs spectraux de transmission très supérieurs à ceux donnés par les fabricants ($2,00 \cdot 10^{-2}$ et $1,25 \cdot 10^{-2}$ au lieu de 10^{-6}), ce qui peut entraîner des situations dangereuses pour des opérateurs qui pensent être convenablement protégés.

Ce phénomène de saturation d'absorption est connu, il a notamment fait l'objet d'une étude spécifique [12]. Dans ces conditions, le matériau constituant les oculaires peut être assimilé à un matériau de type absorbant saturable. Celui-ci reste absorbant tant que certains niveaux électroniques ne sont pas saturés. En effet, à faible flux, le taux de dés-excitation est supérieur au taux de peuplement des niveaux électroniques. En revanche, sous flux élevé, les niveaux électroniques se peuplent plus vite qu'ils ne se vident, ils finissent donc par se saturer et le matériau devient transparent. Après l'impulsion laser, les niveaux électroniques saturés se désexcitent et le matériau retrouve alors ses qualités d'absorption initiales.

Dans la présente étude, les EPI concernés sont équipés d'oculaires en matière organique (polycarbonate). Or, dans l'étude [12], ce phénomène a été observé pour des oculaires minéraux (saturation dans le visible à 532 nm) et organiques (saturation dans l'infrarouge à 1064 nm). La nature du matériau constitutif des oculaires ne peut donc être incriminée seule. Ces phénomènes de saturation d'absorption surviennent pour des longueurs d'onde absorbées par le matériau et pour des densités de puissance élevées.

Les EPI étudiés sont tous basés sur des phénomènes d'absorption et non de réflexion des longueurs d'onde laser. Cela entraîne des effets thermiques dans les matériaux ; en particulier tous les oculaires en polycarbonate ont été partiellement détruits après quelques secondes d'irradiation.

Les opérateurs doivent donc être particulièrement vigilants dans le choix des EPI contre les lasers.

5. CONCLUSIONS

La présente étude a mis en évidence que, lors d'opérations de nettoyage laser, quel que soit le type de matériau, l'énergie laser rétrodiffusée par la partie propre du matériau nettoyé, présente un danger certain pour les yeux des opérateurs. Par conséquent, le port d'équipements de protection adaptés s'impose. Toutefois, des effets de saturation d'absorption ont été observés pour certains

types de protecteurs individuels, en particulier les EPI en matière organique à colorant dissous. Les opérateurs doivent donc être particulièrement vigilants dans le choix d'équipements de protection individuelle contre les lasers. En revanche, le rayonnement optique émis par le plasma ne présente pas de risque spécifique pour les opérateurs.

Ces résultats conduisent donc à imposer les règles de sécurité suivantes :

- Port de lunettes de protection adaptées obligatoire pour l'opérateur et son entourage direct,
- Définition d'une zone de sécurité fermée et interdite d'accès à toute personne non habilitée, et surtout non munie de lunettes de protection,
- Formation de l'opérateur sur les dangers induits par le laser et plus particulièrement à la manipulation de la torche laser.

REMARQUE IMPORTANTE

Compte tenu de la quantité de poussières émises par ce procédé (de l'ordre de 200 mg/m^3), de la taille des particules (les particules fines, $D < 3 \mu\text{m}$, représentent 20 à 30 % des poussières totales émises [14]), du nombre d'éléments chimiques qui les composent (Pb, Cr, Ni, Fe et Mn) et de leurs toxicités intrinsèques respectives, l'inhalation de ces poussières peut donc être suspectée d'être dangereuse pour la santé des opérateurs.

Reçu le : 09/02/2004

Accepté le : 18/02/2004

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ASMUS JF., SERACINI M. and ZETLER MJ – *Surface morphology of laser-cleaned stone*, Lithoclastia, 1 (1976) pp23-45.
- [2] VERGES-BELMIN V., PICHOT C. and ORIAL G. – *Elimination des croûtes noires sur marbre et craie; à quel niveau arrêter le nettoyage ? Conservation of Stone and other Materials*, Thiel, MJ (ed), Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress, Paris 29 juin – 1^{er} juillet 1993 p. 534-541.
- [3] COOPER MI, EMMONY DC. and LARSON JH – *Characterisation of laser cleaning of limestone*, Optics and Laser Technology, 27 (1) (1995), p. 69-73.
- [4] WILSON J. and HAWKES JFB – *Optoelectronics : An Introduction*, Prentice-Hall International (1983), p. 254-261.
- [5] TAM AC, LEUNG WP, ZAPKA W and ZIEMLICH W – *Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates*, Journal of Applied Physics, 71 (7) (1992), p. 3515-3523.
- [6] NF EN 60825-1 – *Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : classification des matériels – Prescriptions et guide de l'utilisateur*. AFNOR, PARIS, juillet 1994, 112 p.
- [7] IEC 60825-1 – *Amendement 2. Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : classification des matériels – Prescriptions et guide de l'utilisateur*. IEC, GENEVE, janvier 2001, 68 p.
- [8] VERGÈS-BELMIN V. et all. – *A review of health hazards linked to the use of lasers for stone cleaning*. In proceedings : 4^e congrès sur l'utilisation des lasers en conservation d'œuvre d'art. Paris, septembre 2001.
- [9] ICNIRP. *Guidelines on UV radiation exposure limits*. Health Physics, 1996, 71 (6), p. 978.
- [10] ICNIRP. *Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3 µm)*. Health Physics, 1997, 73 (3), p. 539-554.
- [11] Schulmeister K. – *Review of current topics in laser safety*. Report OEFSZ-G – 0003, Austrian Research Centers, Siebersdorf, Autriche, novembre 2000, 56 p.
- [12] NF EN 207 – *Protection individuelle de l'œil – Filtres et protecteurs de l'œil contre les rayonnements lasers*. AFNOR, Paris, décembre 1998, 19 p.
- [13] SALSI S., CNOCKAERT J.-C., MAYER A., ANDRÉ J.-C., BRUN A., GEORGES P., – *Équipement de protection contre les lasers. Comportement non linéaire induit par des flux lumineux élevés*, INRS, Cahiers des Notes Documentaires, ND 2075, Paris, 1998, p. 129-137.
- [14] FEELY J. N., WILLIAMS S. – *An initial study into the particulates emitted during the laser ablation of sulphation crusts*. Journal of cultural Heritage, 1, supplement 1, 2000, p. 65-70.