

Le laser de nettoyage de la pierre et la restauration des sculptures

Philippe Bromblet¹ et Thomas Vieweger²

¹ ingénieur de recherche, Laboratoire de recherche des Monuments historiques, 77420 Champs sur Marne

² restaurateur, Groux s.a., 86170 Blaslay

Ce n'est que depuis une dizaine d'années que le laser est utilisé comme outil de nettoyage dans le domaine du patrimoine et de sa conservation. Le développement de ce nouvel outil a été particulièrement favorisé en France où il a connu l'un de ses plus grands succès. Le texte ci-dessous retrace les étapes de la mise au point de la machine, le suivi scientifique des essais qui ont validé cette nouvelle technique de nettoyage. Les principes de cette méthode très différente des méthodes de nettoyage sont décrits. La place du nettoyage laser dans un chantier de restauration de sculpture en association avec d'autres techniques de nettoyage ainsi que les perspectives de développement de la technique sont aussi présentées.

1. Historique, des premiers essais à la validation de la méthode

Le laser, acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation est une technique qui a vu le jour au milieu du 20^{ème} siècle. Einstein avait plus tôt (1921) énoncé la théorie de l'émission stimulée de radiation qui constitue le principe de base du laser. Mais le premier laser ne fut construit qu'en 1959 par un physicien américain du nom de Maiman. D'abord outil de recherche dans les laboratoires de physique fondamentale, les appareils laser ont à partir des années 1970 été utilisés dans le domaine militaire puis dans le monde industriel comme outil et arme pour percer, souder, guider, nettoyer... Malgré des essais fructueux dans les années 70, notamment grâce aux travaux précurseurs de John Asmus qui fut le premier à tester la faisabilité de la méthode et à publier des résultats encourageants [1], il fallu attendre la fin des années 80 pour que les scientifiques de la conservation du patrimoine se penchent sur la question et envisagent le développement d'une machine laser adapté pour le nettoyage de la pierre.

Le laboratoire de recherche des monuments historiques, basé à Champs sur Marne, a été précurseur en France et en Europe puisque dès 1987, l'un de ses ingénieurs s'associait avec une société fabricante (BMI) avec pour objectif de développer un laser de nettoyage de chantier, mobile, capable de nettoyer la pierre de manière satisfaisante et de travailler sur échafaudage, dans la poussière, le froid, le chaud et avec évidemment un maximum de fiabilité pour un coût raisonnable, c'est à dire abordable pour une entreprise de restauration, un atelier de restauration, souvent réduit à une ou quelques personnes. Les premiers essais furent entrepris pour tester des machines laser sur des pierres encrassées. Différents types de laser étaient alors testés sur des échantillons de pierre ramenés en laboratoire. Un type de laser et une longueur d'onde particulière furent rapidement sélectionnés comme plus performants en terme de fiabilité, d'efficacité et d'innocuité pour la pierre [2]. Quelques années furent encore nécessaires pour fabriquer un prototype NL00 opérationnel sur chantier (photo 1).



Photo 1 : prototype laser Nd YAG pulsé déclenché NL 00 de BMI à l'essai à la cathédrale de Rouen en 1993

Pris en main par les scientifiques de la conservation et par des restaurateurs confirmés, ce prototype traversa le pays dans les années 1992/93 pour un tour de France et des essais grandeur nature sur des sites très différents où

il fut mis à l'épreuve de différents matériaux, différents salissures et dans des mains variées. Cette expérience permit d'une part de faire connaître et apprécier la méthode par les maîtres d'œuvre, les restaurateurs et d'autre part, grâce aux informations que l'on tira des essais, de concevoir la première génération industrielle de laser de nettoyage en tenant compte des problèmes de logistique et de sécurité. Des échantillons systématiquement collectés et ramenés au laboratoire furent examinés et analysés. Les résultats permirent d'évaluer la qualité des nettoyages [3]. D'autres travaux furent engagés pour comparer les résultats du nettoyage laser avec d'autres méthodes comme le microsablage ou l'application de compresses [4]. Ces investigations montrèrent que les performances du laser de nettoyage sont supérieures aux méthodes traditionnelles dans bien des cas. En particulier, le nettoyage laser, contrairement aux autres méthodes, parvenait à éliminer les salissures sans altérer les patines sous-jacentes, même les plus fragiles. Grâce à ces résultats encourageants, le laser de nettoyage fut introduit dès 1992 dans un premier grand chantier de restauration à la cathédrale d'Amiens [5], classé au patrimoine mondial de l'UNESCO. Une première machine de chantier, compactée, fiable et mobile fut commercialisée sous le nom NL101 par BMIndustrie. Les architectes en chef prirent rapidement l'habitude de préconiser la technique et depuis le premier chantier d'Amiens en 1993/94, de très nombreux portails sculptés prestigieux [6], sur les grandes cathédrales, les églises ou d'autres monuments ont été nettoyés avec l'aide d'un ou de plusieurs lasers. Des physiciens et des conservateurs anglais travaillaient de leur côté pour mettre au point un laser de nettoyage et réalisèrent aussi des premiers essais en 1992 [7]. Un groupement européen associant le fabricant de laser Quantel et des sociétés de maçonnerie/pierre de taille et des laboratoires en France et au Portugal menèrent à bien un projet LAMA qui aboutit à la construction de plusieurs machines tandis qu'une thèse d'Université permettait de progresser dans la connaissance des phénomènes et des mécanismes de nettoyage de la pierre [8].

Globalement, la technique s'est avérée très performante et on peut considérer qu'en France depuis 1995 environ, elle a intégré la panoplie du restaurateur de sculpture. Le laser de nettoyage est préconisé et utilisé dans les chantiers de restauration des grands monuments, portails sculptés de cathédrales, statues remarquables. En 1995, se tenait à Héraklion en Crète, le premier congrès international sur le laser dans la conservation des œuvres d'art sous l'acronyme LACONA I (LAsEr in the CONservation of Artworks). Cette réunion depuis se déroule tout les 2 ans dans un pays différent (1997, Liverpool – 1999, Florence et 2001, Paris). Le congrès Lacona V se tiendra du 15 au 18 septembre 2003 en Allemagne à Osnabrück près de Brème. Actuellement, deux gammes de laser de nettoyage sont utilisées en France et une dizaine de lasers différents sont disponibles en Europe (tableau 1).

Société	Laser	Type	Énergie maximum (mJ)	Durée d'impulsion (ns)	Fréquence maximum (Hz)
THALES BMI	NL 102/103/201 (NL20, NL220)	bras articulé	400/400/1000	7	20/30/30
LYNTON	PHOENIX	bras articulé	300	6	20
QUANTEL	LASERBLAST 25/50	1 fibre	250/200	10-12	25/50
QUANTEL et JAULARD	LAMA	4 fibres	400	10-12	50 ou 60
	PALLADIO	bras articulé	250/500	6	20
SMARTCLEAN	SMARTCLEAN	fibre	2000	20000	20
LAMBDA SCIENTIFICA SRL	ART LASER	fibre	350	10	33

Tableau 1 : Les lasers de nettoyage de la pierre en Europe

2. Principe et propriétés

Le principe physique du laser est décrit dans de nombreux ouvrages. Le terme laser est ambivalent puisqu'on l'emploie à la fois pour décrire le dispositif ou la source qui permet de créer et d'émettre cette lumière particulière et pour nommer le rayon lumineux lui-même.

2.1. principe du laser

Le laser repose sur le principe de l'amplification par stimulation de radiations ou pompage optique. Un photon stimulateur (énergie E2-E1) excite un ion (à un niveau de base E1) dont le niveau d'excitation d'énergie augmente jusqu'à la valeur E2. Ce niveau est instable et l'ion revient au niveau d'énergie E1 stable, en émettant un nouveau photon d'énergie E2-E1, équivalent à une onde (dualité onde /particule de la lumière) qui va se

propager en phase, selon la même longueur d'onde et la même direction que le photon stimulateur initial (figure 1). Les deux photons vont à leur tour exciter deux autres ions... on obtient ainsi dans la cavité de résonance entre deux miroirs dont l'un est partiellement réfléchissant, un grand nombre de photons ou ondes se propageant en phase, à la même longueur d'onde et dans la même direction. La somme de ces émissions stimulées produit une lumière dite cohérente (une seule longueur d'onde, en phase et directionnelle) de très forte énergie très différente de la lumière « naturelle » émise par une ampoule (filament chauffé) diffuse, de faible énergie et incohérente car constituée d'un grand nombre d'ondes différentes qui se propagent dans toutes les directions. Le rayonnement laser de par le principe de sa production a des propriétés particulières : il est monochromatique (une seule longueur d'onde) et cohérent (toutes les ondes sont en phase dans le temps et l'espace). Le rayonnement est aussi très directionnel, très énergétique et collimaté (faisceau parallèle).

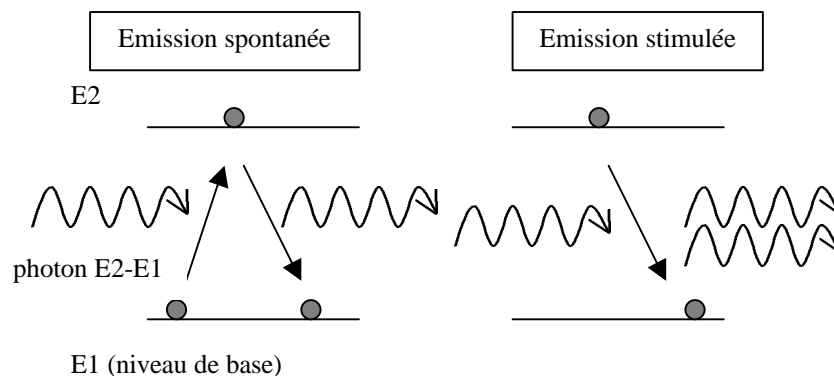


Figure 1 : représentation schématique de l'émission spontanée et de l'émission stimulée (source laser) pour un atome à 2 niveaux, stable et excité (d'après [7]).

Ces propriétés de la lumière laser sont exploitées dans différentes applications (relevé topographique, soudure, gravure, visée, microchirurgie, lecture des codes barres...).

Le laser comme toute lumière est une onde électromagnétique, mais monochromatique. Chaque laser se caractérise par une longueur d'onde. Ainsi, le laser de nettoyage des sculptures émet dans le domaine du proche infrarouge au delà du spectre des ondes visibles, exactement à une longueur d'onde de 1064 nanomètres. D'autres lasers destinés à d'autres applications émettent dans le domaine des UV ou des rayonnements visibles.

2.2. la machine laser

Le laser de nettoyage est un laser solide qualifié de Q-Switched Nd YAG ou en français de laser Nd YAG pulsé déclenché. Cette terminologie d'apparence compliquée s'explique aisément. Sa source est un barreau minéral constitué d'un grenat alumineux enrichi en Yttrium (en anglais Yttrium Aluminium Garnet). Cette matrice solide est dopée en ions Néodymium à plusieurs degrés de valence possibles. Ce sont ces ions qui excités par le rayonnement d'une lampe-flash (lampe au xénon, durée d'un flash de l'ordre de la milliseconde) vont passer d'un état stable à plusieurs niveaux d'excitation (pompage optique) et vont produire un ensemble d'ondes monochromatiques cohérentes en revenant cycliquement à des états plus stables. Le laser de nettoyage n'est pas un laser à émission continue de faible énergie comme les lasers qui servent à lire les codes barres aux caisses des supermarchés, mais un laser pulsé déclenché très énergétique : les photons (ou ondes) produits dans la chambre de pompage sont conservés et accumulés jusqu'à un seuil élevé puis libérés de la chambre de pompage sous la forme d'impulsions ou pulses très rapides de l'ordre de 6 à 15 nanosecondes (10^{-9} secondes). L'énergie libérée par chaque pulse est très élevée, de l'ordre d'une dizaine de Joules et la puissance délivrée atteint plusieurs centaines de milliers de Watts. Selon les machines, le laser est capable de libérer de 1 à 15, 20, 30 ou 60 pulses ou tirs par seconde. Cette fréquence de tir relativement rapide permet d'utiliser le laser comme un faisceau continu que l'on déplace sur la surface à nettoyer.

Les lasers de nettoyage sont constitués de 3 composants principaux : le générateur, le système de refroidissement et l'unité laser. En pratique, ces composants forment 2 ou 3 unités mobiles, le système de refroidissement et l'unité laser pouvant être regroupés sur le même bâti. Suivant le modèle et sa puissance, le poids total de la machine atteint 100 à 400kg. Enfin, selon les fabricants, le rayon laser émis est transmis jusqu'à la pièce à main à gâchette que tient l'opérateur par un bras articulé muni de miroirs ou par un réseau de fibres

optiques. En fonction de la lentille placée à l'extrémité de la pièce à main, le faisceau peut être parallèle (collimaté), convergent ou divergent, avec des distances de focalisation courtes ou longues.

Quelques chiffres :

Pour un laser de nettoyage (rappel, longueur d'onde $\lambda = 1064$ nm) et les conditions suivantes :

- énergie d'un pulse ou d'une impulsion $E = 1$ joule,
- durée du pulse $T = 10$ nanosecondes,
- nombre de tirs par seconde (fréquence) $\mathcal{V} = 20$ Hertz

On obtient les paramètres :

- la puissance crête $P_c = E/T = 1/10 \cdot 10^{-9} = 10^8$ W soit 100 MW
- la puissance moyenne $P = E \cdot \mathcal{V} = 1 \cdot 20 = 20$ W
- la fluence ou densité d'énergie dépend de la surface (diamètre) d'impact, pour un faisceau de surface $s = 1$ cm², la fluence $F = E/s = 1/1 = 1$ J/cm², si l'on défocalise le faisceau par exemple à une surface de 2 cm², la fluence diminue ($F = 0.5$ J/cm²)
- toujours pour une surface d'impact de 1 cm², l'éclairement = $P_c/s = 100/1 = 100$ MW/cm²

L'opérateur dispose de trois moyens pour régler la machine et optimiser le nettoyage :

- un bouton de réglage de l'énergie par pulse (potentiomètre)
- un bouton de réglage de la fréquence des tirs (diviseur de fréquence)

Enfin, à une énergie de pulse donnée, il est possible de modifier la densité d'énergie en avançant ou en reculant la pièce à main. Ainsi, dans la configuration schématisée dans la figure 2, avec un faisceau convergent à longue focale, le diamètre d'impact augmente quand on réduit la distance de travail en approchant la pièce à main de la surface à nettoyer. L'énergie du pulse est alors répartie sur une plus grande surface et la densité d'énergie, encore appelée fluence, diminue. Avec les machines les plus puissantes, le diamètre de l'impact du faisceau peut atteindre 15mm et les vitesses de nettoyage s'en trouvent considérablement augmentées [9].

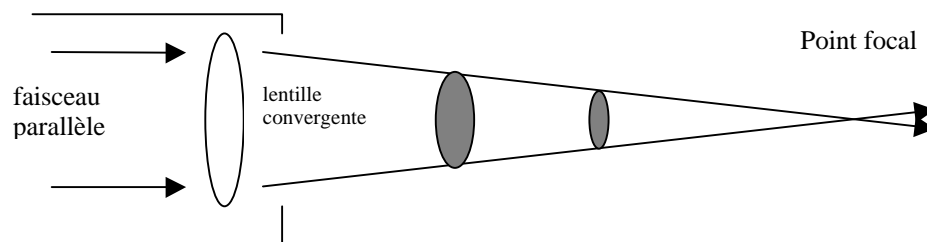


Figure 2 : schéma de focalisation du faisceau laser à travers une lentille convergente placée à l'extrémité de la pièce à main. Le diamètre de l'impact sur la surface augmente lorsqu'on se rapproche de la lentille, d'où une diminution de la densité d'énergie. Au contraire, en augmentant la distance de travail, on se rapproche du point de focalisation, le diamètre de l'impact tend vers un minimum et la densité d'énergie augmente.

2.3. principe du nettoyage laser : interactions lumière-matière

La matière que l'on cherche à éliminer au cours d'une opération de nettoyage est constituée d'un dépôt de microparticules diverses (cendres volantes et des microsuires d'origine automobile ou industrielle, et des pollens, spores, grains éoliens naturels) cimentées par du sulfate de calcium. Ces salissures qui sont communément appelées croûtes noires à cause de leur couleur noirâtre, sont caractéristiques des milieux industriels ou urbains pollués.

Le nettoyage consiste à éliminer de la surface de la pierre ces salissures minérales en faisant interagir le rayon laser et la croûte noire. Lors du nettoyage, le rayonnement laser, onde infrarouge de forte énergie, est fortement absorbé par ces salissures superficielles de teinte sombre (alors que le support pierre, généralement clair, blanc à jaunâtre, aura plutôt tendance à le réfléchir). Le processus de nettoyage correspond à une photoablation. Les mécanismes qui interviennent, d'une durée totale de quelques milliardièmes de seconde, ne sont pas encore totalement connus. Cependant, on sait que l'ablation des salissures résulte d'une combinaison d'interactions thermiques et mécaniques entre le rayonnement absorbé et la matière [7].

Interaction thermique

Cette interaction provoque à la surface du matériau une rapide élévation de température très localisée et très brève qui conduit à sa fusion et à sa vaporisation pour aboutir finalement à la création d'un plasma (gaz ionisé

neutre) dans lequel la température atteint plusieurs milliers de degrés. Les modèles physiques et les tentatives de mesure indiquent que le support ne subit pas d'échauffement notable. Aucune phase minérale de haute température n'a été décelée sur une surface nettoyée. Il a été montré en particulier que le nettoyage du plâtre, dont le composé principal est le gypse, stable jusqu'à une centaine de degrés, n'entraîne pas sa destruction et la formation d'hémihydrate ou d'anhydrite.

Interaction mécanique

La formation puis la détente brutale du plasma formé sous l'effet du tir laser, produisent des ondes de choc mécaniques et des ondes acoustiques qui se propagent dans le matériau, le fragmentent et provoquent l'éjection de particules de tailles variées. L'impact du rayon laser sur la salissure produit en effet un crépitement caractéristique.

Dans les conditions de fonctionnement optimal des lasers de nettoyage, les parts respectives des effets thermiques et mécaniques dépendent de plusieurs paramètres tel que la durée des impulsions, la nature des matériaux, la présence d'eau ...

Les impulsions longues, de l'ordre de la microseconde, favorisent les interactions thermiques et inversement les impulsions courtes, de l'ordre de la picoseconde favorisent les interactions mécaniques.

Les différences de propriétés (optiques, mécaniques, thermiques...) entre les salissures et leur support constituent un paramètre fondamental pour l'efficacité et la qualité du processus d'ablation. Les réglages qui permettent d'éliminer les salissures sont, au-dessous d'un certain seuil, inopérants sur le support pierre ainsi que sur les patines, beaucoup plus compacts et réfléchissants. On parle ainsi du caractère sélectif et autolimitatif du nettoyage laser. Néanmoins, dans certains cas, par exemple pour éliminer certains traitements anciens, clairs et denses, les conditions d'un nettoyage autolimitatif ne sont pas réunies et comme pour d'autres méthodes (microsablage...) c'est alors le restaurateur qui grâce à son expérience et à son adresse, parvient à enlever la couche indésirable sans altérer la pierre support.

Enfin, les effets mécaniques sont intensifiés si les salissures contiennent de l'eau. En effet, la vaporisation explosive de l'eau sous l'effet du laser augmente le taux d'éjection de particules. C'est la raison pour laquelle généralement les restaurateurs humectent les salissures en pulvérisant de l'eau lorsqu'ils utilisent un laser de nettoyage.

3. Caractéristiques du nettoyage laser

Avant la mise au point des lasers de nettoyage, les restaurateurs disposaient de méthodes déjà très performantes pour nettoyer la pierre. Le laser n'a pas remplacé toutes ces méthodes, mais il est apparu comme un nouvel outil dans la panoplie du restaurateur, outil qui dans certains cas bien définis, s'avère plus performant.

3.1. Les avantages et limites du nettoyage laser

Dans ces niches, le laser est devenu irremplaçable car les résultats auxquels on parvient sont indiscutablement supérieurs aux résultats que permettent d'atteindre les techniques traditionnelles telles que le micro-sablage, l'application de compresses ou la projection d'eau et le brossage doux. En particulier, le laser présente par rapport aux autres méthodes, l'avantage de n'utiliser que de l'énergie lumineuse, sans eau (nébulisation, compresses), sans produits chimiques (bases, acides, complexants...), sans particules abrasives (micro-abrasion) et sans pression.

Sur des surfaces fragiles, écaillées, pulvérulentes, prêtes à tomber, il est ainsi possible de nettoyer des croûtes noires indurées sans aucun risque (photo 2). Auparavant, dans ces cas, il fallait procéder à une pré-consolidation de la pierre avant son nettoyage. Cette préconsolidation était une opération très délicate, fastidieuse, lente qui consistait à injecter sous et autour de la zone à nettoyer, un produit consolidant. Par ailleurs, le nettoyage laser est une méthode très sélective, capable d'éliminer une couche très fine suffisamment différente de son support.

Le résultat peut être examiné au fur et à mesure de l'opération et le nettoyage peut être arrêté à tout moment.

Le nettoyage laser n'est pas une méthode universelle et se révèle inapte à enlever les recouvrements biologiques (mousses, lichens, algues), les dépôts de poussières meubles, et les taches d'imprégnation (encre graffiti...). Pour ces cas, on aura recours à un traitement biocide, à un brossage associé à une aspiration et à l'application de solvants dans des compresses.

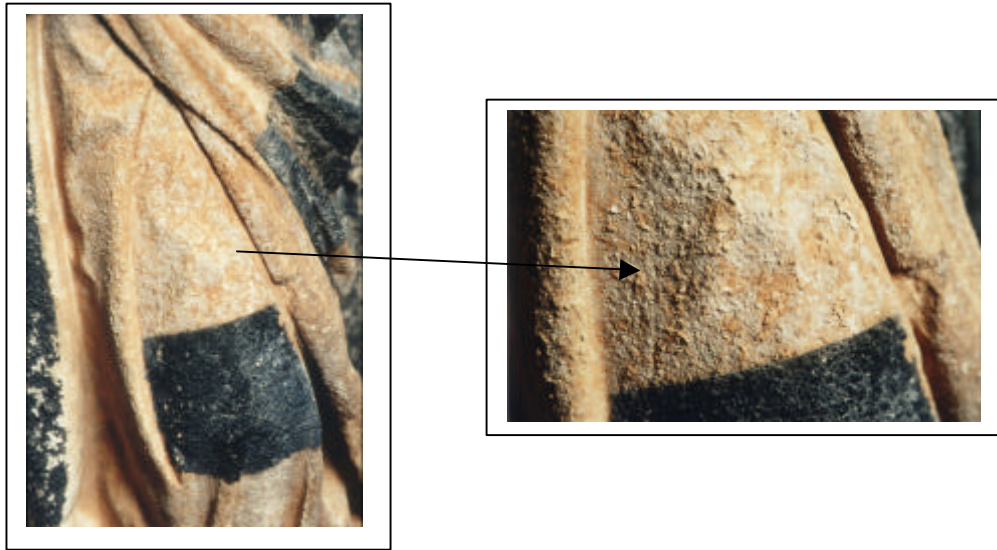


Photo 2 : nettoyage laser d'une sculpture (statuaire, portail nord de l'église Saint Michel de Bordeaux) couverte d'une croûte noire indurée mais à l'épiderme rendu très fragile par l'altération. On note en particulier de fines écailles de pierre soulevées. Avec le laser, un nettoyage de grande qualité, respectueux de la surface sculptée est possible sans consolidation préalable.

3.2. Importance des règles de sécurité

Le nettoyage laser nécessite le respect absolu de certaines règles de sécurité. Les lasers sont classés en 4 classes de sécurité selon la valeur de leur limite d'émission accessible (LEA) en Watt, qui correspond à leur émission maximale. Les lasers de nettoyage se rangent dans la classe 4, celle des lasers les plus dangereux, avec une LEA supérieure à 500 MW. Pour donner une idée du danger que présente le laser, il faut savoir qu'un éblouissement solaire (qu'il ne faut pas prolonger) équivaut à une émission de 10 W/cm^2 . Le laser de nettoyage a un niveau d'émission maximal de 10^{10} W/cm^2 , soit un milliard de fois plus fort que le soleil ! il est évident qu'une telle énergie, si elle est captée par l'œil sans protection entraîne la destruction irréversible de la rétine !

Des règles de sécurité ont été définies sur les chantiers de nettoyage. Le restaurateur qui manie le laser ainsi que toutes les personnes qui travaillent dans le chantier portent des lunettes spéciales filtrantes (photo 3). Aucun objet réfléchissant n'est présent sur l'aire. L'aire de nettoyage est fermée. Le fonctionnement du laser est signalée par des lampes clignotantes rouges... .



Photo 3 : essai de nettoyage laser en cours sur un claveau sculpté (étude préalable à la restauration du portail nord de l'église Saint Michel de Bordeaux).

Grâce aux respects de ces règles, à ce jour, aucun accident n'a été signalé sur les chantiers laser. Par ailleurs, comme pour toute opération de nettoyage, le restaurateur porte un masque anti poussière pour éviter d'avaler ou d'inhaler de fines particules dangereuses pour sa santé. Dans le même ordre d'idée, mais aussi pour éviter que les salissures ne se re-déposent à proximité, un aspirateur puissant est souvent braqué vers la zone en cours de nettoyage.

Enfin, comme la plupart des autres techniques, le nettoyage laser ne peut se pratiquer en période très froide (le circuit de refroidissement craint le gel) ou trop chaude (l'électronique ne peut être maintenue à des températures acceptables).

4. La situation actuelle et les perspectives du nettoyage laser

Le laser de nettoyage a fait définitivement ses preuves. Plusieurs ateliers de restauration se sont munis de cet outil et une vingtaine de machines fonctionnent et circulent en France pour la restauration des monuments ou dans des ateliers pour nettoyer des statues ou des éléments sculptés. Le nettoyage laser est cantonné aux sculptures, en particulier à la statuaire. C'est un nettoyage de très grande qualité mais lent et coûteux qui, au même titre que le microsablage, ne peut être appliqué tel quel aux parements. Sur les portails sculptés, il n'est pas rare que les ateliers de restauration utilisent plusieurs lasers simultanément (jusqu'à 4). Malgré son succès, le laser a ses opposants. On l'accuse d'un nettoyage trop uniforme, « trop propre », trop parfait. Certains ont surtout dénoncé le jaunissement de la pierre qu'entraîne le nettoyage laser. Les expériences rigoureuses semblent confirmer ce jaunissement, dont la cause reste à déterminer. Cependant, les patines des pierres anciennes sous les croûtes noires sont généralement jaunes ou ocrés. Le laser a donc été accusé de jaunir des pierres alors qu'il ne fait en réalité qu'intensifier une teinte jaune préexistante qui correspond à des patines sous-jacentes dont la préservation est un gage de la qualité du nettoyage réalisé. Certains architectes ont mis au point des procédures de nettoyage complexes dans lesquelles le nettoyage associe laser et compresse dans le but d'éliminer partiellement le jaune laser (photo 4). Le laser est alors utilisé pour ses performances, son respect exceptionnel de l'épiderme de la pierre, tandis que l'application de compresses permet d'atténuer le jaunissement qui lui est reproché [6].



Photo 4 : atténuation de la teinte jaune, après nettoyage laser, par application de compresses d'eau dans la partie basse de l'image

Le laser de nettoyage de la pierre est principalement utilisé en Europe. La situation est très inégale. La France fait figure de pionnière et rares sont les pays qui ont suivi son exemple en adoptant la technique avec autant de facilité. En général, le nettoyage laser rencontre plus de réticence et en Italie, Allemagne, Espagne, Autriche, Angleterre, Belgique, les chantiers laser sont très peu nombreux. Les autres pays ne font appel à cette technique que très exceptionnellement sinon jamais.

Plusieurs essais ont été faits pour développer des lasers capables de nettoyer des grandes surfaces, telles que des façades en pierre de taille et leur décor. On a songé notamment à utiliser le laser Nd YAG pour décaper certains traitements anciens comme les silicates alcalins qui ont été appliqués en protection ou en peinture sur les façades

depuis le 19^{ième} siècle et qui se révèlent très difficiles à éliminer maintenant que l'on veut retrouver la pierre originelle. Si les possibilités techniques existent, le coût de la recherche et des machines qui pourraient être utilisées rend pour le moment irréaliste et impraticable le nettoyage des façades par laser. Il faut néanmoins signaler que la société Quantel a réussi à nettoyer le bâtiment de l'hôtel de ville de Rotterdam au moyen de 2 machines emportées sur nacelle.

Le laser serait l'outil idéal pour nettoyer les polychromies, les peintures murales... s'il ne modifiait pas la couleur de nombreux pigments anciens. Des recherches sont en cours dans les laboratoires pour comprendre les mécanismes de ces décolorations en espérant pouvoir un jour y remédier. D'autres lasers sont testés à des longueurs d'onde différentes dans l'ultra violet ou dans le visible, ou avec des impulsions de durée plus courtes, de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} s). En attendant, il faut au moins réaliser des essais ponctuels préalables avant de se lancer dans le nettoyage d'une couche de peinture.

Par ailleurs, le laser ayant séduit les restaurateurs et architectes œuvrant sur les monuments historiques, les conservateurs dans les musées, les responsables et les intervenants sur des collections testent maintenant ce nouvel outil de nettoyage sur une grande variété de matériaux et d'objets, textile, photographie, peintures de chevalet, dorures, ivoires sculptés, papier, plumes...là aussi, d'autres types de laser peuvent s'avérer mieux adaptés et plus performants que le Nd YAG utilisé pour le nettoyage des croûtes noires sur la pierre.

5. le nettoyage au rayon laser et la restauration de la sculpture en pierre

Le nettoyage, y compris le nettoyage laser, n'est qu'une des opérations qui constituent la restauration d'une œuvre sculptée. Dans un chantier de restauration programmé, le protocole d'intervention est défini dans le cadre d'une étude préalable à la restauration. Il doit répondre à l'ensemble des problèmes posés en proposant des techniques et méthodes pour stopper les altérations, enrayer leurs causes et garantir la conservation future pour pérenniser l'objet et/ou le monument.

5.1. les différentes interventions de restauration

Un chantier de restauration de sculpture, par exemple un portail de cathédrale, s'articule en plusieurs phases suivant cet ordre :

- Traitement biocide et brossage,
- Préconsolidation,
- différentes étapes de Nettoyage,
- Traitement des vestiges de polychromies,
- Dessalement,
- Consolidation,
- Collages et réparations,
- Réalisation de microragrégés et solins,
- Protection (biominéralisation, hydrofugation)

L'élimination des encroûtements noirs et indurés est menée généralement au début du chantier de restauration. Elle est précédée par un dépoussiérage qui permet de confirmer et d'affiner le diagnostic qui a été fait préalablement quant à l'état de conservation de la sculpture

Dans le cadre du chapitre de nettoyage, plusieurs méthodes sont à la disposition du restaurateur : laser, microsablage, compresse, brossage doux, outillage à main. Des essais (photo 4) sont nécessaires pour sélectionner une méthode et valider un résultat de nettoyage [10].

L'utilisation de ces différents procédés est à choisir seul ou en couplage en fonction du constat sur site et de la morphologie des altérations et concrétions qui affectent la pierre. Ainsi la présence de vestiges de polychromie ou l'existence de couches de traitement ancien et/ou d'autres paramètres peuvent influencer le choix [11].

Le laser n'est pas une méthode complète de restauration. Il constitue uniquement une technique de nettoyage, qui n'est pas universelle, mais qui possède par contre certains avantages considérables dans des cas précis : il permet d'intervenir avec succès en assurant la conservation et le respect total de l'épiderme d'origine sur des surfaces fragilisées, écaillées et désagrégées, mais couvertes de croûtes dures ou pour l'élimination des coulures de ciments etc. . Ces résultats sont impossible à obtenir en utilisant des techniques mécaniques comme par exemple le microsablage.

Avec la technologie laser, il est possible d'atteindre une qualité de nettoyage exceptionnelle même sur des surfaces extrêmement fragiles avec ou sans préconsolidation. Ceci permet d'attendre la fin du nettoyage pour opérer un choix, quant aux techniques et traitements à utiliser pour une conservation et une restauration optimale de la sculpture.

Seul un restaurateur expérimenté et formé dans le domaine du laser de nettoyage peut garantir un bon résultat de nettoyage, en accord avec la déontologie de la conservation. C'est lui seul qui, avec un geste contrôlé et une attention et observation permanentes, oriente l'avancement et le choix du nettoyage en adaptant les différentes paramètres (énergie, fréquence, distance, focalisation..) en fonction des états de surface et des inconnues sous-jacentes.

L'utilisation du laser sur un chantier monumental nécessite le respect d'un certain nombre de conditions de sécurité. En particulier à cause des risques de cécité, il est impératif que le laser soit utilisé dans une enceinte fermée non accessible aux tiers (photo 5). Il faut construire une armature adaptée à l'échafaudage. Celle-ci sera tendue d'une bâche noire ne laissant pas passer le rayon laser. Les ouvertures fenêtres, portes etc. sont également à calfeutrer. Un détecteur de présence signalera l'arrivée d'une personne étrangère au chantier et arrêtera les machines. Les utilisateurs du laser seront eux-mêmes protégés par des lunettes spéciales homologuées destinées à couper la longueur d'onde spécifique du rayon laser et à protéger l'œil.



Photo 5 : intérieur de l'aire de travail sur un chantier de nettoyage laser (restauration du portail nord de l'église Saint Michel de Bordeaux).

5.2. Coûts et aménagements spécifiques du laser

L'utilisation d'un laser s'accompagne de coûts spécifiques liés à :

- la mise en place et le repli d'une structure de bois,
- la fourniture et pose d'une bâche noire.
- la livraison et mise en place et repli des lasers,
- l'entretien des lasers, matériel électronique et optiques sensible nécessitant une maintenance régulière ainsi qu'un entretien par un ingénieur lasériste (expédition et rapatriement des machines)
- la révision des lasers après travaux.

Les contraintes concernant l'aménagement des échafaudages sont les suivantes : calfeutrement noir des fenêtres et ouvertures, Plancher = 1.50 m avec habillage en contre plaqué, Parapluie sur échafaudage, Moyen de levage = 180 Kg, Sapine = 1.50 x 1.50 m avec accès à tous les niveaux d'échafaudage E.D.F = Mono et triphasé 25 KW/heure

5.3. Importance de l'entretien

Après achèvement d'une restauration, quelle que soit son importance, il est aujourd'hui indispensable de porter une réflexion générale sur le futur entretien (avec une fréquence à définir) du site restauré et de prévoir des visites régulières pour faire un état des lieux, des observations visuelles, d'éventuels prélèvements pour analyses, des couvertures photographiques successives, un dépoussiérage ponctuel et / ou d'autres interventions....

Ces opérations de maintenance et d'entretien régulières après restauration permettent un contrôle de l'évolution de l'état de conservation du site et ménagent la possibilité de ré-intervention rapide avant que ne se développent de nouvelles dégradations importantes qui nécessiteraient à nouveau une lourde campagne de travaux de restauration.

6. Références bibliographiques

- [1] Asmus J.F., Murphy C.G., Munk W.H., Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts, in Wuerker R.F. Ed., Developments in Laser technology II, Proc. SPIE 41, 1973, 19-30.
- [2] Oriol G., Gauffillet J.P., Nettoyage des monuments historiques par désincrustation photonique des salissures, Technologie Industrielle Conservation Restauration du Patrimoine Culturel, Colloque AFTPV/SFIIC, Nice, (1989) 118-125.
- [3] Oriol G., Nettoyage des pierres des monuments français par laser, Mise au point de la méthode et contrôle de l'innocuité. Preservation and restoration of Cultural Heritage, Proc. of the LCP Congress, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (1995) 469-479.
- [4] Vergès-Belmin V., Pichot C. and Oriol G., Elimination de croûtes noires sur marbre et craie : à quel niveau arrêter le nettoyage ? Conservation of stone and other materials : proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress, Paris, ed. by M. J. Thiel, (1993) 534-541.
- [4] Vergès Belmin V., Nettoyage des pierres des monuments français par laser, comparaison avec d'autres méthodes, microsablage et compresse chimique. Preservation and restoration of Cultural Heritage, Proc. of the LCP Congress, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (1995) 4819-490.
- [5] Weeks C., The portail de la Mère Dieu of Amiens Cathedral : its polychromy and conservation, Studies in Conservation 43, (1998) 101-108.
- [6] Bromblet P., Labouré M., Oriol G., sous presse (2002) Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last ten years. Lacona IV. Lasers in the conservation of artworks IV: proceedings of the international conference, Paris, France, September 11-14 2001 / ed. Véronique Vergès-Belmin. - Journal of cultural heritage, ISSN 1296-2074, vol. 1, supplément 1, 2002.
- [7] Cooper M., Laser Cleaning in Conservation, an introduction, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
- [8] Venaille O., (1999), doctorat d'Université d'Orléans.
- [9] Labouré M., Bromblet P., Oriol G., Wiedemann G., Simon Boisson C. (2000) - Assessment of laser cleaning rate on limestones and sandstones . Lacona III. Lasers in the conservation of artworks III : proceedings of the international conference, Florence, Italy, April 26-29 1999 / ed. Renzo Salimbeni and GiorgioBonsanti. - Journal of cultural heritage, vol. 1, supplément 1, 2000, p. 21-27.
- [10] Vergès-Belmin V. et Bromblet P., Le nettoyage de la pierre, dossier technique, Monumental, revue scientifique et technique des monuments historiques, éditions du Patrimoine, centre des monuments nationaux, 2000, 220-273.
- [11] Vergès Belmin V., Restauration de la pierre dans les portails aujourd'hui partiellement polychromés, in: Steyaert D. (Ed), Actes du Colloque "La couleur et la pierre, Rencontres Internationales sur la Polychromie des portails gothiques, Amiens, 12-14 oct. 2000". Agence Régionale du Patrimoine de Picardie, éd. A. et J. Picard, Paris, p 151-162.