

Le laser de nettoyage de la pierre

Auteurs de cette fiche :

Philippe Bromblet (géologue, ingénieur de recherche au CICRP).

Thomas Vieweger (restaurateur de sculpture)

Sommaire :

- Historique, des premiers essais à la validation de la méthode
- Principe du laser
- La machine laser
- Principe du nettoyage laser : interactions lumière-matière
- Avantages et limites du nettoyage laser
- Le nettoyage laser en pratique
- Références bibliographiques

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. Dès 1921, Albert Einstein a énoncé la théorie de l'émission simulée 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. Malgré des essais fructueux dans les années 70, notamment grâce aux travaux précurseurs de John Asmus qui fut le premier à tester la méthode et à publier des résultats encourageants [1], il fallut 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 au 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 (B.M.I.) avec pour objectif de développer un laser de nettoyage de chantier, mobile, capable de nettoyer la pierre de manière satisfaisante et utilisable sur échafaudage comme en atelier pour un coût raisonnable. Différents types de laser furent testés sur des échantillons de pierre ramenés au laboratoire. Un type de laser et une longueur d'onde particulière furent rapidement sélectionnés comme plus performants en termes de fiabilité, d'efficacité et d'innocuité pour la pierre [2]. Quelques années furent encore nécessaires pour fabriquer un prototype N.L.00 opérationnel sur chantier et tester cet équipement sur différents monuments pour évaluer la qualité du nettoyage obtenu à partir de prélèvements ramenés au laboratoire pour examen et analyse [3]. Parallèlement, plusieurs études furent engagées pour comparer les résultats du nettoyage laser avec d'autres méthodes comme le microsablage ou l'application de compresses [4, 5]. Ces investigations montrèrent que les performances du laser de nettoyage pouvaient être supérieures aux méthodes traditionnelles. A la suite de ces résultats encourageants, le laser de nettoyage fut introduit dès 1993 dans un premier grand chantier de restauration à la cathédrale d'Amiens [6], classé au patrimoine mondial par l'UNESCO. Une première machine de chantier, compactée, fiable et mobile fut commercialisée sous le nom N.L.101 par B.M.Industrie. Des physiciens et des conservateurs anglais qui travaillaient de leur côté pour mettre au point un laser de nettoyage, ont réalisé

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].

Aujourd'hui, de très nombreux portails sculptés prestigieux, sur les grandes cathédrales, les églises ou d'autres monuments ont été nettoyés avec l'aide d'un ou de plusieurs lasers [9] et on peut considérer qu'en France depuis 1995 environ, le nettoyage laser a définitivement intégré la panoplie du restaurateur de sculpture. 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). Depuis, cette réunion s'est déroulée tout les 2 ans dans un pays différent. Le prochain congrès LACONA VII se tiendra du 17 au 21 septembre 2007 à Madrid (Espagne).

Actuellement, deux gammes de laser de nettoyage sont utilisées en France et une dizaine de lasers différents sont disponibles en Europe.

Principe du laser

Le terme laser est ambivalent puisqu'on l'emploie à la fois pour décrire le dispositif, la source qui permet de créer et d'émettre cette lumière particulière et pour nommer le rayon lumineux lui-même.

Le laser repose sur le principe de l'amplification par stimulation de radiations ou pompage optique. Un photon stimulateur (énergie E_2-E_1) excite un ion (à un niveau de base E_1) dont le niveau d'excitation d'énergie augmente jusqu'à la valeur E_2 . Ce niveau est instable et l'ion revient au niveau d'énergie E_1 stable, en émettant un nouveau photon d'énergie E_2-E_1 , 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).

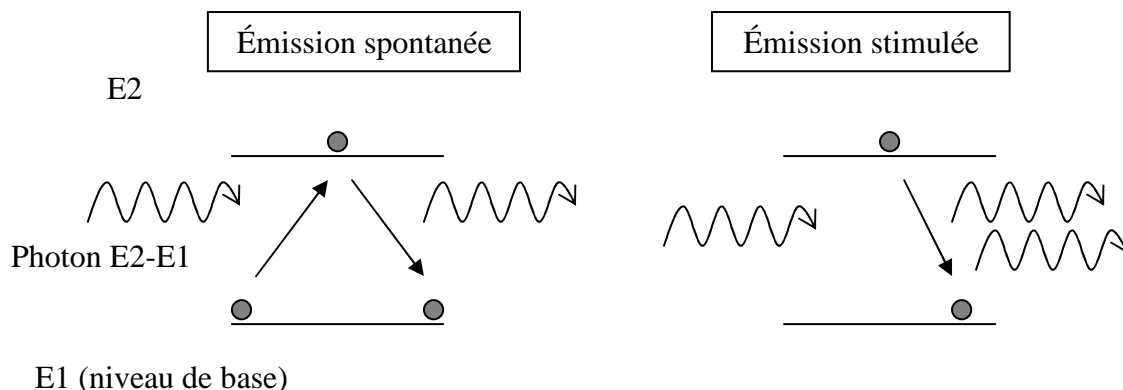


Figure 1 : représentation schématique de l'émission spontanée et de l'émission stimulée (source laser) pour un atome à 2 niveaux, stable et excité.

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).

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 la longueur d'onde de 1064 nanomètres. D'autres lasers destinés à d'autres applications émettent dans le domaine des U.V. ou des rayonnements visibles.

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 de visée, 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 élevée permet d'utiliser le laser comme un faisceau continu que l'on déplace sur la surface à nettoyer.

Quelques chiffres :

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

- énergie d'un pulse ou d'une impulsion $E = 1$ joule
- durée du pulse $T = 10$ nanosecondes ($10 \cdot 10^{-9}$ seconde)
- nombre de tirs par seconde (fréquence) $\nu = 20$ Hertz

On obtient les paramètres :

- la puissance crête $P_c = E/T = 1/10 \cdot 10^{-9} = 108 \text{ W}$ soit 100 MW
- la puissance moyenne $P = E \cdot y = 1 \cdot 20 = 20 \text{ W}$
- la fluence ou densité d'énergie dépend de la surface (diamètre) d'impact, pour un faisceau de surface $s = 1 \text{ cm}^2$, la fluence $F = E/s = 1/1 = 1 \text{ J/cm}^2$. Si l'on défocalise le faisceau à une surface de 2 cm^2 , la fluence diminue ($F = 0.5 \text{ J/cm}^2$).
- toujours pour une surface d'impact de 1 cm^2 , l'éclairement = $P_c/s = 100/1 = 100 \text{ MW/cm}^2$

Les lasers de nettoyage sont constitués de 3 composants principaux : le générateur, le groupe de refroidissement et l'unité laser (qui peut comprendre plusieurs barreaux et lampes flash). En pratique, ces composants forment 2 ou 3 unités mobiles, l'unité laser et le système de refroidissement ou le générateur pouvant être regroupés sur le même bâti ou caddie. Suivant le modèle et sa puissance, le poids total de la machine atteint 100 à plus de 400 kg. 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.

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, pour 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 15 à 20 mm et les vitesses de nettoyage s'en trouvent considérablement augmentées [10].

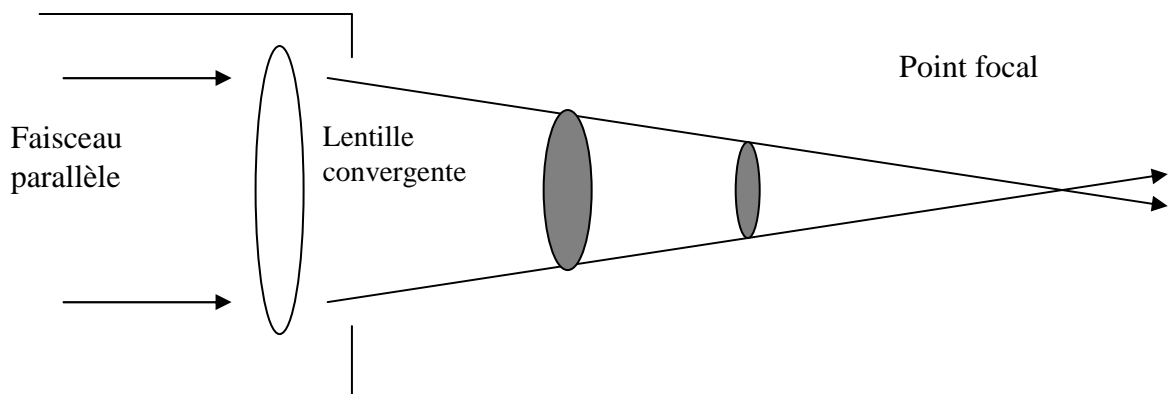


Figure 2 : schéma de focalisation du faisceau laser à travers une lentille convergente placée à l'extrémité de la pièce à main. Le diamètre de l'impact sur la surface augmente lorsqu'on se rapproche de la lentille, d'où une diminution de la densité d'énergie. Au contraire, en augmentant la distance de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

Principe du nettoyage laser : interactions lumière-matière

La pierre encrassée est couverte d'un dépôt de microparticules diverses (cendres volantes et microsuires d'origine automobile ou industrielle, pollens, spores, grains éoliens naturels) cimentées par du gypse. Ces salissures appelées croûtes noires à cause de leur couleur noirâtre, sont caractéristiques des milieux industriels ou urbains pollués. Lors du nettoyage, le rayonnement laser 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). Les mécanismes qui interviennent, d'une durée totale de quelques milliardièmes de seconde, ne sont pas totalement connus. Cependant, on sait que l'ablation des salissures (photoablation) 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 crépitements 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 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 (seuil d'ablation), 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 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, comme il le fait habituellement avec les autres techniques de nettoyage plus traditionnelles (microsablage, application de compresses...).

Enfin, les effets mécaniques sont intensifiés si les salissures contiennent de l'eau. 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.



Avantages et limites du nettoyage laser

Le laser n'utilise 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 1).



Photo 1 : 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. (photo L.R.M.H.).

Auparavant, dans ces cas, il était indispensable de procéder à une pré-consolidation de la pierre avant son nettoyage. Or, cette opération qui consiste à injecter sous et autour de la zone à nettoyer un consolidant de type silicate d'éthyle, est très délicate, fastidieuse et lente. 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 arrêté à tout moment.

Ces avantages rendent l'emploi du laser incontournable pour le nettoyage de sculptures fragilisées par l'altération. C'est un nettoyage de très grande qualité mais lent et coûteux qui ne peut être appliqué tel quel aux parements. Sur les portails sculptés où les surfaces à nettoyer sont considérables, il n'est pas rare que les ateliers de restauration utilisent plusieurs lasers simultanément (jusqu'à 4).

Le laser n'a pas remplacé toutes les méthodes de nettoyage, mais il est venu enrichir la panoplie du restaurateur de sculptures qui dispose actuellement de nombreuses autres techniques de nettoyage : micro sablage, compresse, brossage doux, outillage à main. La nature des salissures, la présence de vestiges de polychromie, de couches de traitement ancien peuvent influencer le choix final [11]. Des essais comparatifs sur des zones-test (photo 2) sont recommandés [12]. Par ailleurs, le nettoyage laser ne peut enlever les recouvrements biologiques (mousses, lichens, algues), les dépôts de poussières meubles, et les taches d'imprégnation (encre graffiti...). Pour ces cas, on aura respectivement recours à un traitement biocide, à un brossage associé à une aspiration et à l'application de solvants dans des compresses.



Photo 2 : essai de nettoyage laser en cours sur un claveau sculpté dans le cadre de l'étude préalable à la restauration du portail nord de l'église Saint Michel de Bordeaux (photo T. Vieweger).

Très tôt, certains ont dénoncé le jaunissement de la pierre qu'entraîne le nettoyage laser. Les expériences semblent confirmer ce jaunissement, dont la cause reste à déterminer. Cependant, les patines des pierres anciennes sous les croûtes noires sont généralement jaunes ou ocre. Le nettoyage laser ne fait 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. Néanmoins, 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 3). 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 [9]. Par ailleurs, des essais de nettoyage ont été réalisés sans provoquer de jaunissement en combinant les émissions simultanées de la fréquence fondamentale dans le proche infrarouge à 1064 nm avec la troisième harmonique dans l'ultraviolet à 355 nm [13].



Photo 3 : atténuation de la teinte jaune, après nettoyage laser, par application de compresses d'eau dans la partie basse de l'image, restauration du portail central de la façade ouest de la cathédrale Notre Dame de Paris (photo M. Labouré).

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 ou avec des impulsions de durée plus courtes, de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} seconde). En attendant, il faut au moins réaliser des essais ponctuels préalables avant de se lancer dans le nettoyage d'une couche de peinture.

Le nettoyage laser en pratique

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.

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 de fonctionnement acceptables).

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 (L.E.A.) 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 équivaut à une émission de 10 W/cm². Le laser de nettoyage a un niveau d'émission maximal de 1010 W/cm², soit un milliard de fois plus fort que le soleil ! Une telle énergie peut causer la destruction irréversible de la rétine si elle est captée par l'oeil sans protection !

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 homologuées qui "coupent" la longueur d'onde 1064 nm (photo 2). Aucun objet réfléchissant n'est présent sur l'aire. Le laser est utilisé dans une enceinte fermée non accessible aux tiers (photo 4). Il faut construire une armature adaptée à l'échafaudage. Celle-ci sera tendue d'une bâche noire ou recouverte de panneaux de bois. 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. Le fonctionnement du laser est signalé par des lampes clignotantes rouges...



Photo 4 : intérieur de l'aire de travail sur un chantier de nettoyage laser, restauration du portail nord de l'église Saint Michel de Bordeaux (photo T. Vieweger).

Par ailleurs, comme pour toute opération de nettoyage, le restaurateur porte un masque anti-poussière pour éviter d'avalier 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 redéposent à proximité, un aspirateur puissant est souvent braqué vers la zone en cours de nettoyage.

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, p. 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, p. 118-125.
- [3] Oriol G., "Nettoyage des pierres des monuments français par laser, Mise au point de la méthode et contrôle de l'innocuité.", in *Preservation and restoration of Cultural Heritage*, Proc. of the LCP Congress, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1995, p. 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 ?", in *Conservation of stone and other materials : proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress*, Paris, éd. par M. J. Thiel, 1993, p. 534-541.
- [5] Vergès Belmin V., "Nettoyage des pierres des monuments français par laser, comparaison avec d'autres méthodes, microsablage et compresse chimique.", in *Preservation and restoration of Cultural Heritage*, Proc. of the LCP Congress, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1995, p. 481-490.
- [6] Weeks C., "The portail de la Mère Dieu of Amiens Cathedral : its polychromy and conservation", in *Studies in Conservation volume 43*, 1998, p. 101-108.

[7] Cooper M., *Laser Cleaning in Conservation, an introduction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.

[8] Venaille O., *Etude du traitement de matériaux de construction par ablation laser. Caractérisation et interprétation de l'interaction laser-matériau*. Doctorat de l'Université d'Orléans, 1997, 173 p.

[9] Bromblet P., Labouré M., Oriol G. (2003) "Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last ten years.", in *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*, vol. 4, supplément 1, p. 17-26.

[10] Labouré M., Bromblet P., Oriol G., Wiedemann G., Simon Boisson C., "Assessment of laser cleaning rate on limestones and sandstones.", in *Lacona III. Lasers in the conservation of artworks III : proceedings of the international conference*, Florence, Italy, April 26-29 1999 / ed. Renzo Salimbeni and Giorgio Bonsanti - *Journal of cultural heritage*, vol. 1, supplément 1, 2000, p. 21-27.

[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, 2002, p. 151-162.

[12] 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, p. 220-273.

[13] Pouli P., Zafiropoulos V., Fotakis C., "The combination of ultraviolet and infrared laser radiation for the removal of unwanted encrustation from stonework; a novel laser cleaning methodology", in *Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone*, Stockholm, Sweden, org. by ICOMOS Sweden, edited by Daniel Kwiatkowski and Runo Löfvendahl, 2004, p. 315-321.