

Fumées chirurgicales - Risques et mesures de prévention

Documents de travail destinés aux spécialistes de sécurité du travail

Fumées chirurgicales - Risques et mesures de prévention

Auteurs

PD Dr Ing. Udo Eickmann (Présidence du groupe de travail)
Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW),
Hambourg (D)

Dr med. Michel Falcy
Institut national de recherche et de sécurité (INRS)
Paris (F)

Dr rer. nat. Inga Fokuhl
Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW),
Hambourg (D)

Dr med. Martin Rügger
Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva)
Lucerne (CH)

Avec la participation de

Martine Bloch
Institut national de recherche et de sécurité (INRS)
Paris (F)

Dr. med. Brigitte Merz
Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva)
Lucerne (CH)

Publication du

Comité international de l'AISS pour la prévention des accidents du
travail et des maladies professionnelles dans le secteur santé
D 22089 Hambourg
Allemagne

Maquette

Susanne Stamer
Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW)
Hambourg (D)

ISSA Prevention Series
ISBN 978-92-843-2194-0
ISSN 1015-8022 No Serie 2058
© IVSS 2011

SOMMAIRE

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Avant-propos | 5 |
| 1 Introduction | 6 |
| 2 Composition et effets des fumées chirurgicales..... | 7 |
| 2.1 Composition qualitative..... | 7 |
| 2.1.1 Composition particulaire | 7 |
| 2.1.2 Polluants organiques | 8 |
| 2.1.3 Polluants inorganiques..... | 9 |
| 2.1.4 Polluants biologiques | 9 |
| 2.2 Dangers des composants des fumées | 10 |
| 2.2.1 Particules | 11 |
| 2.2.2 Polluants chimiques | 11 |
| 2.2.3 Polluants biologiques | 14 |
| 2.3 Effets des fumées chirurgicales..... | 15 |
| 2.3.1 Effets généraux..... | 15 |
| 2.3.2 Effets spécifiques | 16 |
| 2.4 Données chez l'homme | 16 |
| 2.5 Évaluation des données disponibles | 20 |
| 3 Expositions lors d'activités comportant la formation de fumées et évaluation de ces expositions | 21 |
| 3.1 Description des sources d'émission (voir aussi le chapitre 2) | 21 |
| 3.2 Description des paramètres déterminant l'exposition | 21 |
| 3.2.1 Instruments chirurgicaux..... | 22 |
| 3.2.2 Dispositifs de captage des fumées | 24 |
| 3.2.3 Ventilation générale | 25 |
| 3.2.4 Activités..... | 27 |
| 3.2.5 Aspects relatifs à l'organisation du travail..... | 27 |
| 3.2.6 Facteurs individuels | 27 |
| 3.2.7 Mesures d'assurance qualité | 27 |
| 3.3 Description de l'exposition | 28 |
| 3.3.1 Données métrologiques publiées..... | 28 |
| 3.3.2 Autres informations sur l'exposition | 32 |
| 3.4 Évaluation des expositions | 33 |
| 4 Mesures de prévention..... | 35 |
| 4.1 Substitution | 35 |
| 4.2 Mesures de prévention techniques..... | 36 |
| 4.3 Mesures organisationnelles | 39 |
| 4.4 Mesures de protection individuelle | 39 |
| 4.5 Surveillance médicale préventive | 40 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 5 | Information et formation | 40 |
| 6 | Contrôle de l'efficacité des mesures de prévention | 42 |
| 7 | En résumé..... | 43 |
| 8 | Bibliographie | 45 |

Avant-propos

Depuis 1993, l'un des groupes de travail du Comité pour la prévention des risques professionnels dans le secteur santé de l'Association Internationale de la Sécurité Sociale (AISS) consacre ses travaux à divers aspects de la prévention des risques professionnels liés à l'utilisation de produits chimiques et de produits dangereux dans ce secteur.

Le groupe de travail est composé de représentants de la Caisse allemande d'assurance accident du secteur santé (Berufsgenossenschaft Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege – BGW, Dr Inga Fokuhl), de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS, Dr Michel Falcy, Martine Bloch) et de la Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents (Suva, Dr Martin Rügger, Dr Brigitte Merz). Le Dr Udo Eickmann (BGW) est l'animateur du groupe de travail.

Les précédentes publications (sur la sécurité dans l'emploi des cytostatiques, des désinfectants, des gaz anesthésiques, et sur la prévention des risques professionnels dans l'aérosolthérapie par la pentamidine et la ribavirine) s'adressaient avant tout aux préventeurs.

La présente publication s'adresse principalement au personnel des salles d'opération, exposé aux fumées chirurgicales. L'objectif est de faire le point des connaissances sur les risques potentiels liés à ces fumées et, surtout, de présenter les mesures de prévention applicables pour protéger la santé du personnel exposé.

Les auteurs espèrent que cette publication intéressera les publics concernés et contribuera à la prévention des atteintes à la santé pouvant résulter des fumées et des gaz chirurgicaux en salle d'opération.

1 Introduction

Depuis de nombreuses années, des techniques chirurgicales peu invasives, utilisant l'action de la chaleur ou, plus récemment, des ultrasons, sont utilisées pour la résection ou la cautérisation de tissus, ou pour stopper des hémorragies. Elles font appel aux appareils suivants, notamment :

- appareils électrochirurgicaux comme le bistouri électrique à électrode mono- ou bipolaire [(utilisé pour la résection de tumeurs – péritonectomie, par exemple (Andreasson, Anundi et al., 2008), la laparoscopie et d'autres interventions endoscopiques (Ball, 2004)
- lasers comme le laser Excimer en ophtalmologie (ASORN, 2002)
- dispositifs utilisés pour des interventions spécifiques comme le retrait de ciment osseux au moyen d'ultrasons lors de réinterventions sur endoprothèse (Aldinger et al., 2004)

Ces techniques produisent des fumées dont la composition a fait l'objet d'une littérature abondante. En se fondant sur des études *in vitro* et sur quelques essais sur l'animal, on peut penser que ces fumées présentent des dangers pour la santé du personnel au bloc opératoire.

Elles sont constituées d'un mélange de polluants chimiques sous forme de gaz, de vapeurs et de composants particuliers, dont la composition est très variable selon la technique employée, son mode d'utilisation et le type d'intervention. La présence ou l'absence d'effets avérés sous forme de pathologies et d'atteintes à la santé diagnosticables chez le personnel concerné reste, quant à elle, peu documentée. Depuis quelques années, des institutions de prévention comme le NIOSH, aux États-Unis, mènent des études sur l'exposition et sur les mesures de prévention applicables. Rien qu'aux États-Unis, le nombre de salariés exposés dans le secteur santé est estimé à plusieurs centaines de milliers de personnes (Ball, 2004), et il devrait être au moins égal en Europe, où la population est plus nombreuse.

Partant du principe de précaution, qui impose la mise en œuvre de toutes mesures permettant l'élimination ou, au moins, la réduction a priori des risques pour la santé, on présentera les dangers liés aux fumées chirurgicales, en s'appuyant sur les données de la littérature, et l'on exposera les mesures de prévention applicables pour assurer au personnel du bloc opératoire une protection adéquate contre la gêne liée à ces fumées et contre d'éventuels risques pour la santé.

Ce document s'adresse à la fois au personnel concerné (chirurgiens, assistantes de bloc opératoire), aux fonctionnels de sécurité du secteur santé, aux responsables d'établissements hospitaliers et de services de santé et à tous les publics intéressés par ces questions.

2 Composition et effets des fumées chirurgicales

Les fumées générées lors d'une incision chirurgicale ou d'une intervention au laser représentent, aux dires des opérateurs, une gêne olfactive, mais peu se demandent si ces émissions de gaz, de vapeurs ou de particules solides présentent un risque pour la santé.

L'exposition est mixte et complexe : constituants biologiques, cellulaires, aérosols liquides ou solides, gaz. Elle est souvent non négligeable : ainsi, au cours de certaines réductions carcinologiques chirurgicales, la phase de résection de la tumeur, du péritoine pariétal, de multiples viscères, et l'électrocoagulation des nodules tumoraux à la surface du péritoine viscéral peut durer de 2 à 12 heures, réalisant ainsi une exposition prolongée à ces fumées chirurgicales (Sugarbaker, 2003). Cette technique avec électrocoagulation, employée dans la phase préparatoire aux chimiothérapies hyperthermiques, produit une grande quantité de fumées.

Avant d'analyser les risques potentiels liés à ces méthodes, il convient d'étudier la composition qualitative et, si possible, quantitative des fumées chirurgicales.

2.1 Composition qualitative

On verra dans ce qui suit que la composition quantitative des fumées varie notablement selon la technique utilisée et le tissu sur lequel on intervient (Al Sahaf et al., 2007). Une idée peut cependant être donnée de leur composition qualitative.

La vapeur d'eau est le composant principal de ces émissions puisqu'on estime qu'elle peut en représenter jusqu'à 95 % ; la teneur en vapeur d'eau dépend vraisemblablement de la nature des tissus traités. Cette vapeur d'eau sert de véhicule aux autres composants (Al Sahaf et al., 2007).

2.1.1 Composition particulière

La taille des particules formées varie entre plus de 200 micromètres et moins de 10 nanomètres. Le diamètre moyen des particules dépend notamment de l'intensité d'action de l'énergie sur les tissus. Alp, Bijl et al. (2006) indiquent les valeurs suivantes :

- Electrocoagulation → diamètre moyen $d < 0,1 \mu\text{m}$
- Laser (résection de tissu) → diamètre moyen d de l'ordre de $0,3 \mu\text{m}$
- Scalpel à ultrasons → diamètre moyen d de l'ordre de $0,35 - 6,5 \mu\text{m}$.

Cela signifie qu'une part très importante des fumées est susceptible d'être inhalée et de se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Un élément inconnu réside dans la fraction nanoparticulaire, qui n'a certainement pas été suffisamment évaluée et dont on ignore actuellement les effets. Des articles récents tentent de répondre à cette question d'actualité. Andréasson et al. (2008) a mesuré l'émission particulaire lors d'interventions sur carcinose péritonéale ou d'interventions digestives d'autre nature. Lors de prélèvements réalisés au niveau des voies respiratoires, la taille des particules se situait entre 1 et $10 \mu\text{m}$ pour les classiques et $0,02$ à $1 \mu\text{m}$ pour les nanométriques. (Nota : la limite entre particules « classiques » et particules nanométriques correspond, dans la littérature, à un diamètre de $0,1 \mu\text{m}$). Les résultats indiquent une pollution plus importante lors des cautérisations à fort voltage sur carcinoses péritonéales que lors de l'emploi de techniques classiques (ici sur résection de cancer colique). Les niveaux cumulés sont de $9,3 \times 10^6$ particules. $\text{ml}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ contre $4,8 \times 10^5$ particules. $\text{ml}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ pour les prélèvements individuels et $2,6 \times 10^6$ particules. $\text{ml}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ contre $3,9 \times 10^4$ pour les prélèvements d'ambiance. Ces résultats sont confirmés par Brüske-Hohfeld et al. (2008) qui a évalué l'exposition aux particules ultrafines ($0,01$ à $1 \mu\text{m}$) au cours de différentes interventions chirurgicales. L'électrocautérisation et la coagulation des tissus au laser à l'argon sont les techniques les plus polluantes. Ces auteurs ont relevé des concentrations moyennes de $1\ 930$ particules. cm^{-3} avec un maximum de $18\ 300$ lors de la section d'adhérences par électrocautérisation. Les concentrations les plus élevées ont été mesurées lors d'une intervention sur un hémangiome hépatique : moyenne, $12\ 200$ – maximum $490\ 000$ particules. cm^{-3} . L'ablation d'une tumeur rétropéritonéale et l'incision d'une hernie sont à l'origine d'une forte pollution, à l'inverse d'une ablation de vésicule biliaire.

2.1.2 Polluants organiques

De nombreux produits organiques de pyrolyse ont été retrouvés dans ces fumées. Leur liste inclut (de façon non exhaustive) des hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes), de l'acide cyanhydrique (HCN), de l'aldéhyde formique, et naturellement des hydrocarbures polycycliques aromatiques (voir le tableau 1).

Plusieurs auteurs ont essayé de mieux préciser la nature des composants chimiques des fumées liées à des actes chirurgicaux (cf. chapitre 3). L'une de leurs conclusions est que la composition des fumées est très variable, et dépend de la nature de l'intervention et du matériel utilisé.

Al Sahaf et al. (2007) indique cependant toujours la présence d'hydrocarbures, de nitriles, d'acides gras et de phénols. Cet auteur a réalisé des analyses dans diverses conditions d'utilisation et a pu ainsi constater des différences quantitatives dans la composition des fumées.

Tableau 1 : Principaux composés chimiques retrouvés dans les fumées de lasers chirurgicaux (données qualitatives) (Barrett).

| | |
|---------------------|-----------------------------------------|
| Acétonitrile | Éthylène |
| Acétylène | Formaldéhyde |
| Acroléine | Hydrocarbures aromatiques polycycliques |
| Acrylonitrile | Méthane |
| Alkyles benzènes | Monoxyde de carbone |
| Benzène | Phénol |
| Butadiène | Propène |
| Butane | Pyridine |
| Butène | Pyrrôle |
| Crésols | Styrène |
| Cyanure d'hydrogène | Toluène |
| Éthane | Xylènes |

2.1.3 Polluants inorganiques

Comme au cours de toute combustion, on retrouve lors des interventions électrochirurgicales des oxydes de carbone (CO et CO₂), des oxydes de soufre et d'azote, et de l'ammoniac. Ces substances provoquent des irritations des voies respiratoires ou des phénomènes d'hypoxie tissulaire.

2.1.4 Polluants biologiques

Comme il a déjà été indiqué, la vaporisation des tissus par les lasers ou l'électrochirurgie génère des fumées et aérosols qui peuvent contenir de grandes quantités de particules. Il peut s'agir de cellules intactes, de fragments de cellule, de cellules sanguines ou de fragments d'ADN viral.

Des bactéries viables provenant de fumées de laser ont pu être cultivées, il s'agissait de *Bacillus Subtilis*, de *Staphylococcus aureus*, mais également de mycobactéries, dont *Mycobacterium tuberculosis* (Walker, 1990).

En 1987 déjà, Byrne et al. (1987) avait étudié la dispersion et la survie de bactéries lors d'une électrocoagulation par laser-CO₂, dans des tubes contenant un milieu nutritif ensemencé avec des *Escherichia Coli* et des *Staphylococcus aureus*. L'intérieur du tube était soumis à une électrocoagulation, et la fumée produite était recueillie. Elle contenait des germes viables, en particulier des staphylocoques.

Des virus infectants tels le VIH (virus de l'immunodéficience humaine), l'HBV (virus de l'hépatite B), le BPV (virus du papillome bovin) et le HPV (virus du papillome humain) ont également pu être mis en évidence dans ces fumées. La nature des microorganismes présents dépend pour une large part des interventions effectuées. Les études les plus nombreuses concernent l'HPV ; l'ADN de ce virus est retrouvé dans un grand nombre d'échantillons de fumées produites lors de l'électrocoagulation de verrues au laser (Garden, 1988 ; Sawchuk, 1989 ; Kashima, 1989 ; Gloster, 1995). Une papillomatose laryngée a même été reconnue comme maladie professionnelle chez une infirmière qui exerçait la fonction d'assistante lors du traitement de papillomatoses (Calero, 2003) (voir aussi le chapitre 2.2).

L'activité biologique de l'ADN détecté dans les fumées est difficile à déterminer car il n'existe pas de test spécifique permettant de l'évaluer. En 1988, Garden a étudié la présence d'ADN de papillomavirus bovin (BPV) et de papillomavirus humain (HPV) dans la fumée de laser CO₂, sans pouvoir établir que cet ADN restait infectant. Il a complété cette étude en inoculant à trois moutons la fumée recueillie lors de l'excision de lésions de condylome bovin par laser CO₂. Sur les trois animaux, deux ont présenté une tumeur caractéristique au point d'inoculation (Garden, 1988 et 2002).

Au cours d'un essai *in vitro*, Johnson et al. (1991) a inoculé du VIH dans des cultures cellulaires. Il a soumis ces cultures à différents appareillages à usage médical produisant des aérosols. Seuls les appareils générant des aérosols « froids » pouvaient transmettre des virus viables. Les fumées générées par des appareils d'électrocoagulation ou lors de résection ne contenaient pas de virus viable. En 1991 toutefois, Baggish (1991) a détecté de l'ADN viral du VIH dans de la fumée produite par un laser CO₂ utilisé sur une culture cellulaire infectée ; l'analyse était réalisée par PCR (polymerase chain reaction). Fletcher et al. (1999) a mis en évidence la présence de cellules viables de mélanome dans des fumées obtenues par électrocautérisation d'un mélanome. Si l'intervention était réalisée à haute puissance (30 W), le nombre de cellules viables était plus faible qu'à 10 W.

2.2 Dangers des composants des fumées

Les fumées chirurgicales peuvent être responsables de signes d'intoxication aiguë à type de céphalées, asthénie, nausée, faiblesse musculaire, et d'irritations des yeux et des voies respiratoires ; ces effets sont dose-

dépendants. Les asthmatiques, en particulier, sont souvent très sensibles à l'inhalation de particules.

De plus, ces fumées peuvent gêner le chirurgien pour visualiser le champ opératoire, et être responsables d'une odeur désagréable souvent décrite comme incommodante par le personnel.

2.2.1 Particules

Les effets des particules sur l'organisme dépendent de leur taille et de leur composition chimique. Les particules de moins de 3 µm sont appelées « fraction alvéolaire » et celles de moins de 10 µm « fraction thoracique ». Les composants de cette taille peuvent pénétrer dans l'arbre bronchique, s'y déposer et causer des dommages cellulaires. Les effets sont variables, de la simple surcharge pulmonaire pour des particules inertes (dioxyde de titane) à des effets irritants locaux (rhinite, bronchite) voire des cancers (nasosinusiens ou broncho-pulmonaires). Une partie peut également passer dans la circulation sanguine et entraîner des effets toxiques généraux (métaux).

Il faut signaler le cas particulier des **nanoparticules**, dont la toxicité pour l'homme est encore mal connue. La plupart des données proviennent d'études réalisées sur cellules ou chez l'animal.

Cependant, il a déjà été démontré que les composantes particulaires ultra-fines de la pollution atmosphérique, émises notamment par les usines et les moteurs diesel, présentent des propriétés toxiques qui sont susceptibles d'avoir des effets néfastes sur la santé humaine (pathologies allergiques respiratoires – rhinite, asthme, bronchite – et troubles cardiovasculaires – notamment chez les personnes fragilisées). Certains composants retrouvés dans les fumées laser sont identiques à ceux présents dans les atmosphères polluées.

Par ailleurs, il a été clairement établi que les particules nanométriques présentent une toxicité différente de celle des mêmes composés sous forme micro ou macroscopique (dioxyde de titane nanométrique, par exemple).

2.2.2 Polluants chimiques

Pour plus de précisions sur la toxicologie des substances citées dans ce qui suit, on se reportera aux « Fiches toxicologiques » de l'INRS ou à la banque de données « GESTIS¹ » de la DGUV² (www.inrs.fr et www.gestis.de). Les effets mentionnés sont décrits à titre d'information et ne se réfèrent pas directement, en règle générale, aux concentrations mesurées en électrochirurgie.

¹ Gefahrstoff-Informationssystem

² Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

Dans la famille des hydrocarbures aromatiques, on retrouve essentiellement trois composés chimiques.

Le **benzène**, classé par le CIRC³ comme cancérogène pour l'homme, peut provoquer des aplasies médullaires et des leucémies. Les expositions aiguës se traduisent par des signes de dépression du système nerveux central : asthénie, ébriété, nausée, vertige, céphalée, narcose ; ces signes surviennent à des concentrations supérieures à celles observées dans les fumées chirurgicales.

Le **toluène** et les **xylènes** ont les mêmes propriétés dépressives sur le système nerveux central. Ils provoquent également des irritations de la peau et des muqueuses oculaire et respiratoire.

Groupe des aldéhydes : qu'il s'agisse du **formaldéhyde**, de l'**acétaldéhyde** ou de l'**acroléine**, ces trois molécules sont des irritants des voies aériennes ; ils agissent à faible concentration et peuvent induire des lésions graves sur les muqueuses bronchiques. Le formaldéhyde est par ailleurs un allergène cutané et respiratoire et un cancérogène naso-sinusien.

Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) : parmi les troubles observés, on peut citer des irritations de l'œil, du nez, de la gorge, de la peau et des voies respiratoires, un état de fatigue, des céphalées, des nausées, des troubles du sommeil... Certains rapports mentionnent des atteintes non malignes du poumon comme la bronchite, l'emphysème, l'asthme.

Un certain nombre d'**hydrocarbures aromatiques polycycliques** (dont le benzo[a]pyrène ou le dibenzo[a,h]anthracène) ont une activité cancérogène reconnue et sont classés substances cancérogènes de catégorie 2 ou, dans certains cas, de catégorie 1B par l'Union Européenne. D'autres composés aromatiques, parmi lesquels certains hétérocycles (benzofluoranthène, par exemple) ou des HAP substitués peuvent également présenter une activité génotoxique.

Crésols : les trois isomères du crésol peuvent provoquer une atteinte du système nerveux, des troubles digestifs et des dermatoses. On peut également observer des lésions hépatiques, rénales ou pulmonaires plus ou moins sévères. Les crésols pénètrent dans l'organisme par voie orale, cutanée ou respiratoire. Après une forte contamination, les sujets présentent rapidement une irritation oculaire avec conjonctivite, des céphalées, une ébriété, des troubles visuels, auditifs ainsi qu'une tachycardie et une dyspnée. Les expositions répétées provoquent, quant à elles, vomissements, perte d'appétit, troubles neurologiques, céphalées, ébriété et dermatoses.

Le phénol : il s'agit d'un irritant des yeux et des muqueuses oculaire et respiratoire. Les expositions chroniques comportent des troubles de la déglutition ainsi que des diarrhées, vomissements, pertes d'appétit,

³ Centre international de Recherche sur le Cancer

céphalées, étourdissements, troubles du comportement, une hématurie, des urines foncées et des rashes cutanés.

HCN : les quantités d'acide cyanhydrique présentes dans les fumées laser ne peuvent pas provoquer d'effets aigus. Une intoxication chronique n'est en revanche pas impossible pour les sujets fréquemment exposés. Celle-ci se manifeste principalement par des céphalées, asthénie, vertiges et palpitations, des nausées, vomissements, gastralgies et perte de poids, des conjonctivites. Enfin des troubles thyroïdiens sont possibles.

CO : les signes des intoxications aiguës débutantes sont très banals : céphalée, vertige, asthénie et quelques troubles digestifs. Les formes les plus sévères peuvent conduire au coma et à la mort ; des séquelles importantes (neurologiques) sont possibles. Le problème de l'intoxication chronique fait l'objet de discussions, elle serait à l'origine d'atteintes vasculaires avec une augmentation du risque d'infarctus du myocarde ; de même certaines infections neurologiques dont la maladie de Parkinson pourraient en être une conséquence.

Le tableau ci dessous résume les effets toxiques généraux des principaux composés habituellement retrouvés dans les fumées laser (d'après Frenette, 2003).

Tableau 2 : Quelques composés chimiques retrouvés dans les fumées chirurgicales et leurs effets sur la santé.

| | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Acétonitrile ¹ | 2,3-Dihydro indène ¹ | 6-Méthyl phénol |
| Acétylène | Éthane | 2-Méthyl propanol |
| Acide palmitique | Éthylbenzène | Monoxyde de carbone |
| Acroléine ¹ | Éthylène | Nitrile benzoïque |
| Acrylonitrile ^{1,3,5} | Formaldéhyde ^{1,2,4,8} | Phénol ^{1,9} |
| Alkyl benzène sulfonate | Furfural ^{1,3,9} | Polypropylène ^{1,8} |
| Benzaldéhyde ¹ | HAP ³ | Pyridine ^{1,11} |
| Benzène ^{1,2,4,9,11} | Indole ¹ | Pyrrole ^{1,11} |
| Butadiène ^{1,3,4,9} | Isobutane | Styrène ¹ |
| Créosote ² | Méthane | Sulfure de carbone ^{1,6,7} |
| m-Crésol ^{1,11} | 3-Méthyl butane | Toluène ^{9,11} |
| Cyanure d'hydrogène ¹ | 2-Méthyl furane | Xylène ¹¹ |
| 1-Décène | | |

- 1- Substances irritantes pour la peau et les voies respiratoires
- 2- Substances soupçonnées d'être cancérogènes chez l'homme
- 3- Cancérogènes avérés chez l'homme
- 4- Substances soupçonnées d'être mutagènes chez l'homme
- 5- Substances soupçonnées d'être mutagènes chez l'animal
- 6- Substances pouvant induire une atteinte spermatique dans l'espèce humaine
- 7- Molécules qui peuvent provoquer à la fois une asphyxie cellulaire et une embryo-fœtotoxicité
- 8- Sensibilisants respiratoires
- 9- Substances tératogènes chez l'animal
- 10- Substances tératogènes chez l'homme
- 11- Substances qui peuvent entraîner une dépression du système nerveux central

Les substances non étiquetées soit sont insuffisamment caractérisées du point de vue toxicologique soit n'ont, à concentration élevée, qu'un effet asphyxiant

Une partie des polluants organiques appartient au groupe hétérogène des « composés organiques volatils » (COV), mélange de substances de diverses familles et qui sont présentes dans l'atmosphère des habitations à des degrés divers.

2.2.3 Polluants biologiques

Il existe très peu d'études qui permettent de se faire une idée des effets biologiques liés à l'inhalation des fumées laser en salle d'opération. Les principaux effets pris en compte, en dehors des effets généraux, sont essentiellement les effets mutagènes et cancérogènes.

2.3 Effets des fumées chirurgicales

2.3.1 Effets généraux

Les effets/symptômes généraux ont été répertoriés par Alp (2006) en se basant sur les composants habituels des fumées laser. Cet inventaire, qui comprend des effets aigus (irritation) et chroniques (cancers), n'est donc pas fondé sur des données épidémiologiques. Il s'agit d'une liste de dangers théoriquement envisageables du fait des composants habituellement présents, comprenant des effets aigus (irritation) et chroniques (cancers).

Tableau 3 : Risques envisageables selon Alp (2006) du fait de la composition des fumées chirurgicales

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Irritation oculaire | Hypoxie, étourdissement |
| Larmoiement | Colique |
| Éternuement | Trouble cardio-vasculaire |
| Irritation de la gorge | Hépatite |
| Altération inflammatoire aiguë ou chronique du tractus respiratoire (bronchites, asthme, emphysème) | Infection par le VIH |
| Céphalée | Dermatose |
| Faiblesse | Anémie |
| Nausée, vomissement | Leucémie |
| Anxiété | Carcinome |

La possibilité d'un effet irritant pour les voies respiratoires est mise en évidence dans deux études expérimentales menées par Baggish et ses collaborateurs (1987, 1988). Dans l'une d'elles, l'instillation dans les alvéoles des particules issues de la vaporisation d'un tissu par un laser CO₂ provoque chez le rat une pneumonie congestive interstitielle, une bronchiolite et de l'emphysème. Lors de l'autre essai, des fumées produites par un laser CO₂ induisent chez le rat des effets irritants sur le poumon. L'effet est moins important lorsque les fumées passent d'abord à travers un système standard d'évacuation. Aucun effet n'est noté (clinique et histologique) lorsque les rats sont soumis à des fumées filtrées par un système à haute performance qui retient les particules jusqu'à 0,1 micron.

Freitag et al. (1987) met également en évidence un effet irritant respiratoire des fumées produites par un laser. Dans cette étude réalisée chez le mouton, la concentration d'exposition est de 0,92 mg de particules.l⁻¹, le diamètre moyen des particules est de 0,54 micron. L'effet irritatif est dans ce cas évalué par analyse des cellules recueillies par lavage broncho-alvéolaire.

2.3.2 Effets spécifiques

Seules la génotoxicité et la cytotoxicité ont été évaluées jusqu'ici de façon spécifique dans le cas des fumées chirurgicales, mais le nombre d'études reste restreint et ne permet pas de conclusion définitive.

Génotoxicité

Seule la mutagénicité par le test d'Ames (avec et sans activateur) a été évaluée.

Tomita et al. (1981) évalue le potentiel mutagène de fumée produite par un laser au CO₂ opérant sur de la muqueuse de langue de chien. Les condensats sont obtenus par aspiration des fumées à travers un papier filtre, puis dilués par du DMSO. Le mélange obtenu est appliqué sur les souches TA 98 et 100 de Salmonelles utilisées dans le test d'Ames. Le résultat est positif sur TA 98 (avec et sans activation métabolique) et sur TA 100 (avec activation métabolique par S9 mix de foie de rat induit par des polychlorobiphényles).

Gatti et al. (1992) réalise une étude similaire mais en prélevant l'atmosphère générée par un bistouri électrique au cours d'une réduction mammaire. Le condensat recueilli est également testé sur les souches TA 98 et 100 de salmonelles. Une activité mutagène est mise en évidence sur TA 98 en présence d'un activateur métabolique (S9 mix de foie de rat induit à l'Aroclor 1254).

Ces résultats, même positifs, sont malheureusement assez restreints. Ils ne sont pas nécessairement représentatifs de tous les types de fumées produits par les lasers en fonction de leur puissance, des tissus traités et de l'environnement.

Cytotoxicité

La fumée produite dans des conditions expérimentales à partir d'entailles répétitives réalisées par un bistouri électrique à haute fréquence sur du foie de porc a été appliquée à une culture de cellules de carcinome du sein (MCF-7). La culture cellulaire ainsi traitée a vu sa viabilité réduite d'au moins 30 %, ce qui témoigne de la cytotoxicité des fumées. Cet essai effectué dans des conditions particulières (sous atmosphère d'hélium) n'est pas nécessairement représentatif des fumées générées dans les salles d'opération (Hensman, 1998).

2.4 Données chez l'homme

On a vu dans ce qui précède (chapitre 2) quels dangers peuvent comporter pour la santé les fumées et particules en salle d'opération. La littérature comporte de très nombreuses données toxicologiques sur ce thème (cf. chapitre 8). Cependant, ces données reposent principalement sur des études *in vitro*, et sur un petit nombre d'études sur l'animal. Les conclusions tirées de

ces sources en ce qui concerne les risques pour le personnel exposé semblent plausibles et sont corroborées par des données issues de la médecine environnementale. Cela vaut tant pour les effets des particules (par comparaison avec les poussières fines) et leur infectiosité potentielle, que pour les propriétés toxicologiques des différentes substances nocives dont la présence a pu être établie dans les fumées de salle d'opération.

Il existe relativement peu de données, en revanche, sur l'impact réel, en pratique, de ces dangers pour le personnel exposé. En dehors de cas isolés de papillomes laryngés probablement contractés en milieu de travail chez le personnel exposé aux fumées de laser, il n'existe guère d'études épidémiologiques ayant permis d'établir à une échelle plus large si les dangers établis sur la base des données de laboratoire se manifestent effectivement dans des proportions détectables chez les personnes concernées. Divers auteurs soulignent l'insuffisance des connaissances en la matière :

„a specific link between exposure to surgical smoke and adverse health effects to perioperative personnel has not been made” (Ulmer, 2008)

„the long term effects of surgical smoke on surgeons and theatre personnel have not been determined“ (Al Sahaf et al., 2007)

„further research using authentic surgical conditions rather than laboratory simulations may produce more convincing findings to assist regulatory agencies such as the OSHA“ (Bigony, 2007)

„many surgeons and OR personnel argue that they have been exposed to surgical smoke for years with no ill effects“ (Barrett, 2003)

D'autres ont tenté de pallier le manque de données en procédant à une évaluation de risques [Scott, 2004]. À partir des connaissances toxicologiques théoriques sur les substances, d'une part, et de la nature et de l'importance des expositions, d'autre part, ils ont procédé à une évaluation quantitative des risques pour la santé du personnel.

On reviendra donc ici sur les quelques études qui se sont attachées, sur le terrain, à valider les connaissances théoriques des risques, en recherchant la présence effective de gênes ou de pathologies liées aux fumées de salle d'opération chez le personnel. Il s'agit notamment d'études comportant des descriptions de cas et des données épidémiologiques.

Hallmo (1991) a décrit le cas d'un chirurgien présentant un papillome pharyngé, exposé régulièrement et de façon prolongée à des fumées de laser lors de l'exérèse de verrues anogénitales, et pour lequel aucune autre possibilité de contact avec le virus n'a pu être établie. Une papillomatose

laryngée a également été reconnue comme maladie professionnelle chez une infirmière qui assistait les opérateurs lors du traitement de papillomatoses (Calero, 2003). Dans ce cas également, aucune autre possibilité de contact n'a pu être identifiée.

Dans une enquête par questionnaire adressé à 4 200 membres de la société américaine de médecine laser et de la société américaine de chirurgie dermatologique, Gloster et Roenigk (1995) notent que, comparés à la population de la région d'Olmsted (Minnesota) et aux patients traités pour des verrues entre 1988 et 1992 à la Mayo Clinic, les 570 médecins ayant répondu à l'enquête ne présentent pas un taux notablement accru de modifications cutanées de ce type (5,4 % contre 4,9 %, $p = 0,569$). Selon des sources plus anciennes, en effet, les valeurs indiquées pour la fréquence des verrues dans la population vont de 2,8 à 5 % (Beutner, 1991). Elles ne diffèrent donc pas notablement des données fournies par Gloster. Toutefois, chez les dermatologues ayant une activité chirurgicale, 58 % des verrues se situaient aux mains, 26 % au visage et 13 % dans la sphère nasopharyngée. Or chez les patients traités à la Mayo Clinic, la répartition observée était différente, les verrues touchant principalement la plante des pieds ou la sphère anogénitale.

L'étude de Gloster montre en outre que le respect de certaines mesures de prévention (captage des fumées, gants, masques, protection oculaire, blouses spéciales) n'avait pas d'influence sur la fréquence des verrues chez les chirurgiens. Il n'a pas non plus été démontré d'effet cumulatif du type augmentation de l'incidence des verrues en fonction de la durée d'utilisation d'un laser au CO₂. Bien que l'étude de Gloster présente quelques faiblesses (faible taux de réponse, notamment), elle permet de conclure que, pour le personnel médical exposé, un faible risque pour la santé lié notamment à l'inhalation de particules infectieuses ne peut être exclu.

Une enquête par questionnaire plus simple et plus restreinte a été menée par le NIOSH en 2001 (King, McCullough, 2006). Elle portait sur une clinique de 687 lits à Dunedin (Floride). 48 questionnaires (80 % des questionnaires distribués) ont été renvoyés, 43,7 % des participants ont fait état d'au moins un symptôme qu'ils mettaient en relation avec l'exposition à des fumées en salle d'opération dans les quatre semaines précédentes. Par ordre de fréquence décroissante, il s'agissait des symptômes suivants (plusieurs réponses possibles) : maux de tête (16,7 %), sensation de brûlure au niveau du nez et du pharynx (12,5 %), rhinites (12,5 %), irritations oculaires (10,4 %), toux (10,4 %) et autres troubles touchant principalement les voies respiratoires (8,4 %). Vingt-huit personnes au total (58,3 %) indiquaient être gênées par l'odeur des fumées. De plus, les personnes passant 50 % ou plus de leur temps à proximité immédiate de la salle d'opération signalaient plus de symptômes que les autres.

La seule étude prospective publiée à ce jour sur la question des atteintes à la santé liées aux fumées de salle d'opération est celle de Gates et al. (2007). Les auteurs ont étudié une population de 121 700 infirmières (Nurse Health

Study) recrutées à partir de 1976 et ayant fait l'objet d'examen périodiques, en recherchant une association éventuelle entre l'exposition aux fumées de salle d'opération et la survenue d'un carcinome bronchique. Le nombre d'années d'activité en salle d'opération avant 1984 était pris en compte comme élément d'appréciation de l'exposition aux fumées chirurgicales. Tous les cas de carcinome bronchique survenus avant la clôture de l'étude en 2000 ont été comptabilisés. En tenant compte d'une série de facteurs de confusion (âge, tabagisme actif ou passif, IMC, facteurs diététiques, activité physique), cinq groupes ont été définis. L'utilisation de différents modèles épidémiologiques n'a pas mis en évidence de relation significative entre la durée de l'exposition aux fumées en salle d'opération et la survenue de carcinomes bronchiques, ni même de tendance allant dans le sens d'une relation dose-effet dans les groupes les plus exposés. Le groupe le plus longtemps exposé présentait au contraire un risque relatif significativement plus faible de carcinome bronchique, pour lequel les auteurs n'avaient d'ailleurs pas d'explication convaincante.

Ces quelques données épidémiologiques ne sont pas de nature à lever les doutes et réserves exprimés ci-dessus quant à la pertinence clinique des données principalement expérimentales établissant l'existence de dangers pour la santé liés aux fumées de salle d'opération. Il n'est donc pas surprenant que, bien que le problème soit connu de la plupart des intéressés, les mesures de prévention ne soient ni appliquées de façon conséquente ni exigées par la réglementation, même si diverses recommandations ont pu être publiées, principalement par des organismes ou fédérations professionnelles ne dépendant pas des pouvoirs publics.

Dans une enquête réalisée par Internet en 2007 aux États-Unis et au Canada auprès du personnel de salle d'opération (presque exclusivement des assistants), on a pu montrer que lors de l'utilisation de bistouris électriques, entre 8 et 59 % des opérateurs utilisaient un dispositif de captage spécifique et, dans 17 à 67 % des cas, le système de captage mural équipant la salle d'opération. Les différences de pourcentage tiennent aux différences dans l'utilisation des appareils selon le type d'intervention (le plus souvent exérèse de condylomes, plus rarement retrait de lésions cutanées malignes (bistouri électrique) ou dans le cadre d'interventions sous laparoscopie (laser)). L'enquête a montré en outre que lors de l'utilisation de bistouris électriques, dans 80 à 90 % des cas, les opérateurs portaient non pas les masques antiparticulaires contre les pathogènes aéroportés (type N95, certifiés en Amérique) mais de simples masques chirurgicaux non certifiés. Ces différences dans la fréquence d'utilisation des dispositifs de protection reflètent le degré de perception individuelle des risques et indiquent, selon les auteurs, que la plupart des personnels exposés sont insuffisamment protégés (Edwards, 2008).

Une étude de Spearmann et al. (2007), similaire quant aux données obtenues mais plus réservée dans l'interprétation, est fondée sur 169 questionnaires

adressés à des chirurgiens, des spécialistes ayant une activité chirurgicale et des infirmières chefs de bloc opératoire du Wessex (Grande-Bretagne) dans le but d'avoir un aperçu de la sensibilisation au problème des risques pour la santé liés aux fumées au bloc opératoire, d'une part, et des mesures de prévention mises en œuvre, d'autre part. Sur 111 répondants au total, 97 % indiquaient utiliser fréquemment ou toujours la diathermie au bloc opératoire. Seuls 51 % des chirurgiens considéraient que les fumées pouvaient être dangereuses pour la santé contre 78 % des spécialistes ayant une activité chirurgicale et 91 % des infirmières chefs. Dans ces groupes, 60, 58 et 64 % des réponses indiquaient que les mesures de prévention mises en œuvre étaient insuffisantes. 43 % des chirurgiens et 70 % des spécialistes ayant une activité chirurgicale avaient l'habitude de capter les fumées, la majorité d'entre eux en utilisant les installations d'aspiration murales. Des mesures de protection supplémentaires (masques spéciaux, principalement) n'étaient appliquées que par 7 % des chirurgiens et 20 % des spécialistes ayant une activité chirurgicale. Les auteurs concluent notamment : « knowledge of the dangers of surgical smoke is limited, but is a cause for concern amongst staff exposed to surgical smoke in theatres » (la connaissance des dangers des fumées chirurgicales est limitée mais représente une source de préoccupation pour le personnel des salles d'opération).

2.5 Évaluation des données disponibles

Les données présentées au chapitre 2 montrent que l'on dispose indubitablement de connaissances toxicologiques sur les dangers liés aux fumées de salles d'opération, fondées sur des études *in vitro* et des essais sur l'animal, ainsi que sur la toxicité de leurs composants principaux, mais leurs effets sur le personnel exposé n'ont pas encore été correctement évalués. De ce fait, les personnes exposées sont peu enclines à tenir compte des données disponibles et à mettre en œuvre des mesures de prévention. Cette attitude attentiste est favorisée dans bien des cas par l'absence de consignes précises émanant des institutions de prévention. La question, en définitive, est de savoir si des mesures de réduction d'un risque pour la santé des travailleurs ne doivent être prises que lorsque l'on dispose de données scientifiques suffisantes et cohérentes, en particulier de résultats d'études épidémiologiques, ou s'il ne faut pas privilégier une démarche proactive, conforme au principe de précaution. Une telle démarche, qui représente un effort plus grand qu'une démarche *a posteriori*, pose toutefois des problèmes de coûts et de mise en adéquation des mesures. Il s'agit donc, en dernier ressort, d'un processus de gestion du risque, qui peut être apprécié différemment selon les pays.

Il est toutefois certain que l'exposition aux fumées au bloc opératoire peut comporter des risques sérieux pour la santé, comme l'attestent les données toxicologiques. On verra donc dans ce qui suit quelles sont les mesures applicables pour réduire ces risques. Elles pourront être mises en œuvre en tenant compte des réglementations nationales applicables.

3 Expositions lors d'activités comportant la formation de fumées et évaluation de ces expositions

On a vu dans les précédents chapitres que diverses activités médicales donnent lieu à l'émission de polluants gazeux ou particulaires qui peuvent constituer un risque pour le personnel du bloc opératoire.

Comme indiqué en introduction, pour les seuls États-Unis, le nombre de personnes concernées dans le secteur santé est évalué à plusieurs centaines de milliers (Ball, 2004). En Europe, où la population est plus nombreuse, les chiffres doivent être au moins équivalents.

3.1 Description des sources d'émission (voir aussi le chapitre 2)

L'intensité du dégagement de substances et la composition des phases gazeuse et solide dépendent de la nature de la source d'énergie, de la nature du tissu traité et de la durée et de l'ampleur de l'intervention.

Lors de l'utilisation du laser, on trouve dans la littérature des valeurs types pour les émissions de particules qui peuvent atteindre quelque $120 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ pour une densité de puissance du laser de $7,2 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$, les interventions sur des tissus adipeux étant celles qui provoquent les émissions les plus importantes, suivies par les interventions sur tissu hépatique. C'est, selon les auteurs, lors des interventions sur les tissus cutanés que les émissions de particules sont les plus faibles (Wäsche, Wagner et al., 1993).

Le taux de vaporisation global, incluant également l'émission de composants gazeux, est encore plus élevé [200 à $600 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ lors de l'utilisation du laser (Wäsche, Albrecht et al., 1995)].

3.2 Description des paramètres déterminant l'exposition

Les activités du secteur santé au cours desquelles il se forme des fumées chirurgicales peuvent varier, à un même poste de travail, d'une intervention à l'autre, et dépendent d'une série de paramètres organisationnels et techniques susceptibles d'accroître ou de réduire l'exposition des opérateurs. On sait que les concentrations atmosphériques varient tant sur le court terme, au cours d'une journée, qu'à plus long terme (sur une période d'un mois ou d'un an) pour ce qui est des valeurs pondérées sur la durée d'un poste de travail (Rappaport, 1998, par exemple).

On présentera dans ce qui suit les déterminants pouvant agir sur l'exposition des salariés aux fumées chirurgicales.

3.2.1 Instruments chirurgicaux

Les fumées chirurgicales résultent comme on le sait de l'énergie thermique agissant sur divers types de tissus et pouvant provoquer des brunissements des tissus, incisions et coagulations, brûlures et vaporisations (VDI Sonderband, 1998). Le transfert d'énergie au tissu peut se faire par ondes optiques (laser) ou par courant électrique (appareils électrochirurgicaux), mais aussi par ultrasons.

a) Laser

Les applications du laser en médecine dépendent d'une part des indications médicales (énergie/intensité à utiliser selon le type de tissu, notamment) et d'autre part de facteurs techniques tels que les propriétés optiques du tissu à traiter, c'est-à-dire de ses propriétés de réflexion, absorption, dispersion, transmission, etc. Divers types de lasers sont utilisés. Le tableau suivant donne un aperçu des principaux d'entre eux (d'après le document INRS ED 5009, 2004).

Tableau 4 : Lasers à usage médical (d'après le document INRS ED 5009 (2004))

| Matériau actif | Longueur d'onde (en nanomètres) | Régime : continu ou pulsé | Cadence des impulsions | Énergie ou puissance | Utilisation |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Excimères | 190 à 350, 248, 308 | pulsé | 1 à 400 Hz | qqes joules | angioplastie, ophtalmologie |
| Vapeurs métalliques (or) plasma | 511 et 578 Or : 628 | Pulsé | 10 kHz | 5 à 20 W | dermatologie, chirurgie plastique, photothérapie |
| Hélium - Néon | 632 | Continu | | 0,1 à 50 mW | acupuncture, médecine sportive et esthétique, rhumatologie |
| Argon krypton (plasma) | 488 - 515 - 647 - 976 | Continu | | 0,1 à 20 W | dermatologie, pompage de laser à colorant, ophtalmologie, photocoagulation, chirurgie plastique |
| Monoxyde de carbone CO | 5 300 | Continu | | 1 à 20 W | ORL, gynécologie, dermatologie, odontologie |
| Dioxyde de carbone CO ₂ | 10 600 | pulsé - continu | 10 kHz | 100 J à 100 W | cardio-vasculaire, ORL, dermatologie, gynécologie, chirurgie plastique, gastrologie, odontologie |
| Yag - Erbium | 2 930 | Pulsé | quelques Hz | 10 J.cm ² | dermatologie, effets combinés des lasers CO ₂ et excimères, ophtalmologie |
| Yag doublé avec cristal de Kr | 532 | pulsé - continu | 1 à 50 Hz | 1 à 120 W | Dermatologie |
| Rubis | 694 | Pulsé | quelques Hz | 10 ou 50 mJ | photolithritie, dermatologie, destruction des calculs rénaux |
| Diodes lasers | 850 | pulsé - continu | | quelques W | ophtalmologie, angioplastie |
| Yag - Néodyme doublé avec cristal KDP, KTP | 1 064 532 (doublé en fréquence) | pulsé - continu | 1 à 50 Hz | 1 à 60 W | ORL, gynécologie, urologie, neurologie, chirurgie générale, odontologie, ophtalmologie, dermatologie |
| Titane saphir | 700 à 1 070 - Double : 350 à 535 | pulsé - continu | 1 à 50 kHz | quelques mJ - 1 W | Photothérapie |
| Yag - Holmium | 2 100 | Pulsé | 1 à 5 Hz | 0,5 à 100 J.cm ⁻² | lithotritie |
| Colorants | 320 à 1 200 surtout: 504 et 630 | pulsé - continu | | quelques W | photolithritie, photothérapie, dermatologie, photochimiothérapie, photocoagulation |

L'action du laser sur les tissus dépend de la **nature** du laser (cf. tableau 4), de sa **densité de puissance** (puissance/surface) ou **densité d'énergie** (énergie/surface) et de son **mode** d'utilisation (pulsé ou continu). En Europe, les lasers sont classés, en fonction de leurs effets nocifs sur l'homme, de la classe 1 (sans danger) à la classe 4 (très dangereux pour les yeux et dangereux pour la peau, y compris en cas de rayonnement diffusé, à quoi s'ajoute un risque d'incendie et d'explosion). Les lasers médicaux correspondent dans la plupart des applications à la classe 4 (pour la définition des classes de lasers, voir la norme NF EN 60825-1).

b) Appareils électrochirurgicaux (electro surgical units – ESU)

Les interventions électrochirurgicales utilisent des appareils à courant haute fréquence (>300 kHz) dont la puissance va de quelques watts à plusieurs centaines de watts. L'énergie passe par des électrodes monopolaires, une électrode neutre de grande surface étant placée au contact du patient pour permettre l'écoulement du courant. Dans le cas des électrodes bipolaires, le courant ne passe qu'entre les deux pôles, disposés à proximité l'un de l'autre. L'énergie thermique aux points où la densité de l'énergie électrique est élevée a divers effets en fonction de l'intensité du courant, de la tension choisie et de la fréquence du courant, ainsi que de la forme de l'électrode employée : dessèchement du tissu, coagulation, éventuellement carbonisation superficielle liée à la décharge d'étincelles par l'électrode positionnée juste au-dessus du tissu, ou incision obtenue au moyen d'électrodes de petite taille permettant, par vaporisation explosive des liquides de la cellule, une exérèse du tissu et une coagulation des bords de l'incision.

c) autres appareils (pour ré-intervention sur endoprothèse, par exemple)

Le retrait du ciment osseux en matériau synthétique (en général résine acrylique à base de méthacrylate de méthyle) de la cavité médullaire des os longs, par exemple lors du remplacement d'une prothèse de hanche, peut se faire au moyen de dispositifs à ultrasons.

3.2.2 Dispositifs de captage des fumées

L'un des principaux facteurs influant sur le dégagement de fumées est le captage des émissions à la source. Grâce à cette mesure, une grande partie des vapeurs, gaz ou particules ne parviennent pas dans la zone respiratoire de l'opérateur. Il existe différents types de dispositifs de captage localisé :

- Captage intégré aux pièces à main des lasers ou ESU
Les constructeurs d'appareils laser ou d'ESU proposent des dispositifs d'aspiration intégrés aux pièces à main des appareils. Cette conception permet que l'orifice de captage se trouve toujours à la même distance de la source de fumées.
- Dispositifs de captage muraux, stationnaires

Dans ce type de configuration, les gaz captés ne sont pas rejetés dans l'air du local, mais évacués à l'extérieur par un système d'aspiration central. Ils doivent auparavant être épurés par filtrage, pour éviter une contamination du système. Leur débit d'aspiration est toutefois nettement plus faible que celui des dispositifs de captage indépendants.

– Dispositifs de captage indépendants

Il s'agit le plus souvent de dispositifs mobiles dont la buse d'aspiration est séparée du laser ou de la pièce à main de l'ESU. Dans ce cas, le système d'aspiration localisée doit pouvoir suivre la pièce à main. Les gaz captés doivent en outre être suffisamment filtrés, dans l'unité mobile, pour que l'air puisse être rejeté dans l'atmosphère du local. Les dispositifs de captage mobiles ont un débit d'aspiration nettement plus élevé que les dispositifs stationnaires.

Les principaux facteurs influant sur le dégagement de gaz et, donc, sur l'exposition des opérateurs sont les suivants, dans le cas des dispositifs d'aspiration localisés :

- Débit d'aspiration ($\text{litres}\cdot\text{minute}^{-1}$) :
l'efficacité du captage augmente avec le débit d'aspiration.
- Vitesse d'air à l'orifice de captage de la buse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) :
l'efficacité du captage augmente avec la vitesse d'air. À débit égal, toutefois, la vitesse d'air diminue en fonction de l'augmentation du carré du diamètre de l'orifice de captage.
- Distance entre l'orifice d'aspiration et la source d'émission :
la vitesse d'air lors du captage diminue en fonction du carré de cette distance.
- Capacité de filtration spécifique pour les substances à filtrer :
les filtres utilisés doivent retenir les gaz, vapeurs et particules, ce qu'ils ne font que jusqu'à un degré donné.
- Mode et taux de recyclage de l'air :
l'air recyclé n'est pas totalement exempt de fumées ; le taux de recyclage influe donc sur la concentration de polluants dans l'air du local.

On voit bien que les facteurs influant sur l'efficacité du captage (vitesse d'air, débit d'aspiration et diamètre de la buse de captage, par exemple) ne sont pas indépendants les uns des autres et que chacun d'eux doit être optimisé en fonction des contraintes d'utilisation propres à chaque cas. Pour plus d'informations sur ce point, on se reportera au chapitre 4.2.

3.2.3 Ventilation générale

Les gaz qui ne sont pas captés à la source lors d'une intervention se répartissent dans l'air du local. La ventilation du local dilue les polluants et les

transporte hors de la zone respiratoire des opérateurs. Les paramètres suivants influent sur le niveau d'exposition du personnel :

- Type de système de ventilation (naturelle ou mécanique) et apport d'air frais dans la zone de travail.
L'efficacité de la ventilation aux postes de travail a une influence considérable sur l'exposition. La ventilation naturelle n'est généralement pas suffisante, seule une ventilation mécanique permet, dans les zones où sont pratiqués des soins médicaux, d'assurer le renouvellement d'air nécessaire pour éliminer les polluants de la zone respiratoire des opérateurs et des patients.
- Type de flux d'air (flux laminaire en partie haute, orifices de ventilation en partie basse, par exemple), orientation des flux (ventilation descendante ou ascendante).
- Les fumées chirurgicales se forment lors de processus thermiques, elles sont chaudes et ont donc tendance à monter. Si le flux d'air est dirigé du haut vers le bas, comme c'est le cas pour un plafond à flux laminaire, les fumées, du fait de leur température, perturbent l'efficacité de la ventilation.
- Taux de ré-introduction de l'air dans la zone de travail.
- En cas de recyclage de l'air, les fumées chirurgicales non éliminées de l'air extrait sont réintroduites dans le local, ce qui augmente l'exposition du personnel.
- Nature et efficacité des filtres à air.
 - Les particules et les gaz/vapeurs contenus dans les fumées exigent des méthodes de filtration différentes. L'efficacité des éléments de filtration doit être adaptée.
 - Pour filtrer les substances/particules en suspension, on utilise généralement des filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter), qui se caractérisent par un pouvoir de rétention pouvant atteindre 99,995 %, y compris dans le cas de particules de taille critique (0,1-0,3 μm) (cf. norme NF EN 1822-1:1998).
 - Les considérations relatives aux effets de particules encore plus fines (particules ultrafines, ou nanoparticules) ont conduit à utiliser des filtres encore plus performants, les filtres ULPA (Ultra Low Penetration Air Filter), dont le pouvoir de rétention est 1 000 fois supérieur à celui des filtres HEPA.
 - L'élimination des gaz/vapeurs contenus dans l'air nécessite l'utilisation de filtres au charbon actif capables d'adsorber les molécules de gaz ou de vapeurs. C'est le seul moyen d'éliminer les gaz très odorants, en particulier, lorsque l'air extrait est réintroduit en partie ou totalement dans la zone de travail.

3.2.4 Activités

La nature et l'importance des interventions, ainsi que les parties du corps ou tissus concernés, sont des paramètres importants de l'exposition aux fumées chirurgicales. Les paramètres décrits au point 3.2.1 déterminent le choix du laser ou de l'appareil électrochirurgical qui sera utilisé. La durée de l'intervention a une incidence sur la durée totale de l'exposition, et la durée de fonctionnement de l'appareil responsable des émissions détermine la quantité totale de fumées émises. Le mode de fonctionnement de l'appareil (pulsé ou continu) a une forte incidence sur la quantité de fumées dégagées, de même que le type d'intervention : les interventions endoscopiques n'ont pas les mêmes conséquences en termes d'exposition que les interventions sur des parties externes du corps. Enfin, une personne se tenant à proximité immédiate de la source d'émission sera plus exposée qu'une personne se tenant à distance dans le local.

3.2.5 Aspects relatifs à l'organisation du travail

En plus des paramètres déjà cités, le nombre d'interventions par unité de temps (poste de travail, jour, etc.) doit être pris en compte dans l'évaluation de l'exposition.

L'évaluation globale de l'exposition doit en outre intégrer l'ensemble des facteurs chimiques présents (du fait d'opérations de désinfection, de stérilisation ou de nettoyage, de l'usage d'anesthésiques, etc.).

3.2.6 Facteurs individuels

Les paramètres précédents sont pour la plupart faciles à déterminer et à mesurer. Ce n'est pas le cas des paramètres liés à des facteurs individuels qui peuvent en outre varier dans le temps. Il s'agit par exemple de :

- la qualification de l'opérateur pour l'intervention,
- l'expérience du personnel dans son ensemble quant à l'intervention pratiquée,
- certains facteurs exclusivement individuels tels que la technique de travail, la propreté, la fatigue éventuelle, etc.,
- certains facteurs spécifiques liés au patient (adiposité, étendue de la tumeur, par exemple).

3.2.7 Mesures d'assurance qualité

Enfin, l'incidence des mesures d'assurance qualité sur les matériels mis en œuvre ne doit pas être oubliée. Il s'agit en particulier des mesures de contrôle et de maintenance périodiques des appareils, mais aussi des dispositifs de captage et de ventilation. Le changement des filtres, notamment, est essentiel pour que la performance des systèmes de captage soit préservée.

3.3 Description de l'exposition

Les fumées chirurgicales sont des mélanges d'un grand nombre de substances sous forme de gaz, de vapeurs et de composants particulaires (cf. chapitre 2). Les analyses ont permis d'identifier les substances les plus diverses, principalement des hydrocarbures, nitriles, acides gras et phénols. Parmi ces substances, le formaldéhyde, l'acroléine, les mélanges de benzène, toluène, éthylbenzène, xylène et hydrocarbures aromatiques polycycliques sont les plus importants (cf. chapitre 2). À cela s'ajoutent les résidus de cellules du tissu traité et, le cas échéant, des restes d'ADN viral (Gloster, Roenigk, 1995).

Ces multiples composants forment un mélange difficile à mesurer, constitué de produits présents sous des formes diverses. Il n'est donc pas surprenant que l'on ne dispose que de très peu d'informations quantitatives sur les expositions aux fumées chirurgicales.

3.3.1 Données métrologiques publiées

a) Lasers

Les premières données sur les expositions par inhalation lors des applications médicales du laser datent des années 1970. Dans leur étude sur l'identification d'ADN de papillomavirus humains (HPV) dans les fumées de lasers au CO₂, Kashima et al. (1991) citent les travaux de Mihashi et al. (1975), qui ont pu établir la présence de fragments de cellules et de produits de combustion dans les fumées de lasers. Dans le cas de patients présentant une « recurrent respiratory laryngeal papillomatosis » (RRP, papillomatose laryngée récurrente) traitée par laser au CO₂, Kashima et al. ont montré que 17 des 22 échantillons d'air prélevés dans l'air expiré par les patients contenaient de l'ADN d'HPV, alors que pour les témoins (patients sans RRP), les échantillons ne contenaient pas d'ADN d'HPV. Ils confirmaient ainsi des études de Garden et al. (1988) qui ont établi la présence d'ADN de PV bovin et humain dans les fumées de laser lors du traitement de verrues. Les auteurs n'ont cependant pas pu quantifier l'exposition biologique, ni évaluer les risques.

Dans d'autres applications laser également, il faut s'attendre à un dégagement de particules inhalables dont l'activité biologique n'est pas connue. Taravella et al. (2001) ont pu le vérifier lors de l'utilisation de lasers Excimer en ophtalmologie. Ils ont trouvé dans les échantillons d'air quelques rares particules ayant un diamètre géométrique moyen de 0,22 µm +/- 0,056 µm. Ils n'ont pas pu quantifier et évaluer l'exposition.

Wäsche et al. (VDI-Sonderband, 1998) ont étudié les phénomènes en jeu et les produits de pyrolyse lors du traitement laser de tissus humains. Ils ont décrit avec précision l'interaction entre l'énergie du laser et les cellules ; ils ont analysé les fumées et établi un grand nombre de chromatogrammes des produits de pyrolyse pour les tissus les plus variés, en identifiant les

composants volatils et particulaires. Lors de l'utilisation de laser au CO₂, ils ont établi que la vaporisation des tissus hépatique, musculaire et adipeux se situait, pour des densités de puissance de 0,1 à 10 kW.cm⁻² environ, autour de 17,5 mg.min⁻¹.(puissance du laser en W)⁻¹. La puissance du laser était de 10, 20 ou 40 watts. La répartition des diamètres des particules dans les fumées a également été enregistrée, ce qui a permis de montrer que la majeure partie des particules avaient un diamètre inférieur à 1 µm et, pour une part non négligeable d'entre elles, inférieur à 100 nm.

Binding et Wäsche (1998) ont réalisé des mesures lors d'une simulation de l'utilisation de lasers au bloc opératoire. Il s'agissait d'une intervention sur le foie avec un laser au CO₂ (puissance = 20 W, diamètre du rayon 0,6-1,2 mm, temps d'activité du laser = 5 min), d'une durée de 30 minutes. Les résultats ont montré des concentrations d'aérosols alvéolaires de 3 à 8 mg.m⁻³ dans la zone respiratoire du chirurgien.

La mesure des composés organiques volatils émis pendant 5 min (temps d'activité du laser) au poste de travail du chirurgien a donné les valeurs présentées dans le tableau 5. On notera que les densités de puissance les plus faibles donnent lieu à des concentrations de COV plus élevées, les valeurs restant toutefois peu élevées dans l'ensemble (l'ordre de grandeur des µg.m⁻³ correspond à celui des ppb).

Tableau 5 : Concentrations de divers COV au poste de travail du chirurgien (Source : Binding et Wäsche, 1998)

| Nom | Densité de puissance 4 kW.cm ⁻² environ Concentration atmosphérique [µg.m ⁻³] | Densité de puissance 0,3 kW.cm ⁻² environ Concentration atmosphérique [µg.m ⁻³] |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| n-Butanal | 43 ± 8 | 91 ± 25 |
| 2-Butanone | 12 ± 2 | 14 ± 3 |
| 3-Méthylbutanal | 80 ± 16 | 203 ± 19 |
| 2-2-Méthylbutanal | 69 ± 4 | 138 ± 11 |
| Benzène | 60 ± 5 | 64 ± 4 |
| Pyrrôle + Pyridine | 34 ± 4 | 52 ± 7 |
| Toluène | 23 ± 9 | 41 ± 15 |
| Éthylbenzène | 7 ± 1 | 5 ± 3 |
| Styrène | 9 ± 3 | 3 ± 1 |

b) Appareils électrochirurgicaux (ESU)

Barrett et Garber (2003) signalent, dans une revue de la littérature, des expositions élevées à l'acrylonitrile (1,0 – 1,6 ppm) et à l'acide cyanhydrique (10 ppm environ) lors d'interventions laparoscopiques (Wu, Luttmann et al., 1997). Ils font également état de concentrations extrêmement élevées de benzène (jusqu'à 7,4 mg.m⁻³ dans l'air du bloc opératoire). Mais il n'est pas précisé s'il s'agit d'expositions de courte ou très courte durée ou de valeurs pondérées sur la durée d'un poste, qui pourraient être comparées aux valeurs limites d'exposition au poste de travail.

Les auteurs signalent également une exposition à des polluants particuliers (0,4 à 9,4 mg.m⁻³ dans l'air du bloc opératoire) lors d'une intervention électrochirurgicale de réduction mammaire.

Le NIOSH a mené dans divers établissements hospitaliers des États-Unis des études de l'exposition lors d'interventions électrochirurgicales (King, McCullough, 2006 a,b,c). L'activité des intervenants était documentée pendant plusieurs jours et l'on mesurait les composés volatils et les polluants particuliers. Les résultats étaient similaires dans tous les établissements :

- Pour les composés volatils, seuls le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le toluène ont été trouvés à des concentrations significatives.
- Les concentrations de ces composés étaient cependant toujours largement inférieures aux valeurs limites d'exposition professionnelle en vigueur aux États-Unis.

Les travaux du NIOSH sont bien documentés, mais ne comportent aucune précision sur les facteurs déterminant l'exposition, si bien que les concentrations atmosphériques indiquées ne peuvent pas être mises en relation avec les mesures de protection mises en œuvre (captage, ventilation des locaux).

Hollmann et al. (2004) ont effectué des mesures à proximité immédiate (à 2 cm environ) des points d'intervention par un appareil électrochirurgical et ont pu établir la présence de différents polluants (cf. tableau 6). Les valeurs ainsi mesurées représentent les concentrations d'exposition maximales possibles (correspondant au cas le plus défavorable), car les polluants captés à ce niveau ne se sont pas encore dilués dans l'air ambiant.

Tableau 6 : Constituants des fumées émises lors de l'utilisation de bistouris électriques, concentrations de ces constituants (établies par calcul) et valeurs limites d'exposition (lorsqu'elles existent) (Source : Hollmann et al., 2004)

| N° CAS | Substance | Formule | Limite de détection [ppm V] | Concentration [ppm V] | Valeur limite d'exposition [ppm V] Suisse 2001 |
|-----------|-------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| 100-80-1 | 1-Méthyl-3-vinylbenzène | C ₉ H ₁₀ | 0,3 | 12 | nd |
| 106-99-0 | 1,3-Butadiène | C ₄ H ₆ | 0,016 | 1,5 | 5,0 |
| 107-12-0 | Propionitrile | C ₃ H ₅ N | 1,1 | 18 | nd |
| 108-88-3 | Toluène | C ₇ H ₈ | 0,2 | 17 | 50 |
| 556-64-9 | Thiocyanate de méthyle | CH ₃ SCN | 0,4 | 22 | nd |
| 592-76-7 | 1-Heptène | C ₇ H ₁₄ | 0,1 | 8,5 | nd |
| 74-85-1 | Éthylène | C ₂ H ₄ | 0,00007 | 0,065 | 10000 |
| 7664-41-7 | Ammoniac | NH ₃ | 0,00007 | 0,12 | 20 |
| 872-05-9 | 1-Décène | C ₁₀ H ₂₀ | 0,8 | 190 | nd |
| 98-01-1 | 2-Furaldéhyde | C ₅ H ₄ O ₂ | 0,2 | 24 | 2 |
| 115-11-7 | Méthylpropène | C ₄ H ₈ | 0,02 | 7,2 | nd |

nd : non disponible

CAS = n° du Chemical Abstracts Service

Moot et al. (2007) ont étudié, eux aussi, les composés organiques volatils dans les fumées lors d'interventions électrochirurgicales et ont trouvé, directement au point d'émission, de l'acide cyanhydrique (3-51 ppm), de l'acétylène (2-8 ppm) et du 1,3-butadiène (0,15-0,69 ppm).

Barrett et Garber (2003) ont constaté que le monoxyde de carbone était l'un des principaux composants des fumées chirurgicales, pouvant atteindre des concentrations de plusieurs centaines de ppm lors d'interventions dans des cavités péritonéales.

Brüske-Hohlfeld et al. (2008) ont constaté, lors d'opérations au laser et au scalpel à ultrasons, la formation de nanoparticules et de particules plus grosses (< 1 µm) résultant de l'apport d'énergie. Les pics de concentration dépassaient 100 000 particules.cm⁻³.

c) Autres appareils

La mesure en conditions expérimentales des produits de pyrolyse formés lors du retrait de ciment osseux du fémur (Aldinger, Kleine, Goebel et al. (2001) a montré que la concentration de méthacrylate de méthyle (MMA) dans les échantillons d'air prélevés dans la zone respiratoire des intervenants pouvait atteindre jusqu'à 20 mg.m⁻³. Dans le panache de fumée ascendant, les concentrations de MMA pouvaient atteindre jusqu'à 140 mg.m⁻³. La mesure gravimétrique de la masse des particules de fumée récupérées sur un filtre en fibres de verre a donné une valeur de 76,89 mg en 7 minutes, ce qui

correspond à un taux d'émission de particules d'environ 11 mg.min^{-1} . Le niveau d'émission de MMA mesuré peut cependant s'expliquer par le fait que l'expérimentation a porté sur des os de cadavres dans lesquels le ciment osseux n'avait été introduit que lors de la préparation du test. On peut supposer qu'il contenait plus de MMA qu'un ciment en place depuis des années.

L'analyse chromatographique en phase gazeuse et la spectrométrie de masse des produits de pyrolyse volatils ont permis de démontrer, dans ce cas précis, la présence de quelques composants seulement : dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, acrylate de méthyle, méthacrylate de méthyle et diméthyl-p-toluidine.

3.3.2 *Autres informations sur l'exposition*

Comparées aux données sur le dégagement de substances lors des interventions citées, les données métrologiques sur l'exposition des personnes sont rares et très incomplètes. Cela incite à appliquer des méthodes alternatives, non métrologiques, de détermination de l'exposition, permettant de mieux exploiter les informations métrologiques dont on dispose. La modélisation de l'exposition, à partir des données sur les sources de polluants, les techniques mises en œuvre, la configuration des locaux et l'organisation du travail, devrait permettre d'évaluer l'exposition du personnel en fonction des variations des différents paramètres (DIN EN 689, 1995 ; TRGS 400, 2008 ; TRGS 402, 2008 ; Eickmann, 2008).

Binding et Wäsche (1998) ont établi par calcul que lors d'une intervention sur le foie au moyen d'un laser au CO_2 (puissance 30 W, durées d'utilisation du laser 5 min et 30 minutes) dans une salle d'opération de 100 m^3 , pour un renouvellement d'air de $19.\text{h}^{-1}$, la **concentration de toluène** pouvait atteindre $3,5 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$ (pic de concentration) pour 5 minutes d'utilisation. Au bout de 30 minutes, toutes choses égales par ailleurs, la concentration moyenne de toluène atteignait quelque $4,5 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$.

Si l'on considère que l'exposition du chirurgien est plus élevée du fait de sa proximité vis-à-vis de la source de polluants, et qu'on applique par conséquent un modèle d'exposition à deux zones (Nicas, 1996), on obtient pour lui un pic d'exposition de $25,5 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$ et une exposition moyenne sur la durée de l'intervention de $4,4 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$, pour une durée d'utilisation du laser de 5 minutes. Pour une durée d'utilisation du laser de 30 minutes, le pic d'exposition pour le chirurgien est de $26,4 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$ et l'exposition moyenne au toluène pendant la durée de l'intervention est de $25,98 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$. Le faible écart entre le pic d'exposition ($26,4 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$) et l'exposition moyenne ($25,98 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$) sur une durée d'exposition relativement longue s'explique par le fait qu'un taux de renouvellement d'air élevé, au bloc opératoire, assure en quelques minutes des conditions d'exposition stables dans lesquelles le pic se rapproche rapidement de la valeur moyenne. L'exposition du chirurgien est

près de 6,1 fois plus élevée que l'exposition moyenne du reste du personnel du bloc.

D'après les données disponibles sur le dégagement de substances lors de la chirurgie laser (Wäsche, Albrecht, 1995), l'exposition du personnel du bloc opératoire aux **polluants particulaires** est sans doute nettement plus préoccupante. Si on part, à titre indicatif, du fait que la puissance thermique du laser ou de l'ESU est entièrement utilisée pour vaporiser du matériel cellulaire et que le pourcentage d'aérosols dans l'émission atteint les 13 % indiqués par Wäsche et Albrecht, on obtient une exposition particulaire moyenne du chirurgien de $1,6 \text{ mg.m}^{-3}$ environ pendant la durée de l'intervention (durée d'utilisation du laser 5 minutes, puissance 20 W, durée de l'intervention 30 minutes, salle d'opération 110 m^3 , ventilation $2000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ environ). Dans les mêmes conditions, on peut prévoir que le pic d'exposition de courte durée serait de $10,6 \text{ mg.m}^{-3}$. Un doublement de la durée d'utilisation du laser (à 10 minutes) augmente la concentration moyenne dans l'air à $3,5 \text{ mg.m}^{-3}$, mais le pic de concentration ne passe qu'à 11 mg.m^{-3} .

La puissance thermique des appareils d'électrochirurgie peut être nettement plus élevée que dans l'exemple présenté. Toutefois, elle n'est qu'en partie utilisée pour vaporiser du matériel cellulaire. On observe surtout d'autres effets (échauffement, brunissement et coagulation du tissu, carbonisation).

3.4 Évaluation des expositions

Comme indiqué, les informations sur l'exposition individuelle aux fumées chirurgicales sont incomplètes, dans l'ensemble. Elles permettent néanmoins de formuler quelques remarques générales :

- Évaluation des composants gazeux

L'exposition à des gaz ou vapeurs est relativement faible lors de l'utilisation de méthodes laser ou électrochirurgicales dans des salles d'opération modernes. Si une gêne olfactive peut être ressentie, les valeurs limites d'exposition à des substances comme le toluène, la butanone ou l'éthylbenzène sont loin d'être atteintes (cf. tableau 7). Les fumées contiennent cependant des substances volatiles classées CMR (benzène, par exemple). Comme pour les produits de pyrolyse comparables (fumée de tabac, par exemple), la règle générale de maintien de l'exposition à un niveau aussi faible que possible doit être respectée.

Tableau 7 : Valeurs limites de concentration de certains composants des fumées chirurgicales
 (source : banque de données GESTIS : « Internationale Grenzwerte für chemische Substanzen » ; www.dguv.de/ifa/de/gestis/limit_values/index.jsp, consultée le 05/07/2010)

| Pays | Valeur moyenne par poste/valeur pour une exposition de courte durée en [mg.m ⁻³] | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|
| | Toluène | Butanone | Éthylbenzène |
| D | 190/760 | 600/600 | 440/880 |
| F | 192/384 | 600/900 | 88,4/442 |
| CH | 190/760 | 590/590 | 435/435 |
| USA/NIOSH | 375/560 | 590/885 | 435/545 |

- Évaluation des composants particuliers
 Le personnel est exposé principalement à des particules très fines (nanoparticules). Les concentrations atmosphériques sont de quelques mg.m⁻³, pour les processus décrits ici, ce qui pose, d'un simple point de vue quantitatif, un problème d'exposition des voies respiratoires (valeur limite d'exposition aux poussières totales en Allemagne : fraction alvéolaire = 3 mg.m⁻³, fraction inhalable = 10 mg.m⁻³). Valeur limite européenne pour les poussières ultrafines = 40 µg.m⁻³). Des mesures de protection adéquates doivent donc être prises.
- Évaluation des nanoparticules
 Il n'est pas possible, actuellement, d'évaluer l'exposition aux particules ultrafines. Elles peuvent notamment pénétrer dans l'organisme par toute la surface du corps, en plus des voies d'absorption habituelles des substances (on parle de « translocation »), ce qui signifie que même une exposition à de très petites quantités de substances ne peut pas, à l'heure actuelle, être considérée comme inoffensive.
- Évaluation des composants biologiques
 Il paraît certain que des cellules ou des éléments de cellules biologiquement actifs sont diffusés dans l'air au cours des interventions électrochirurgicales ou laser. Il n'est cependant pas possible de se prononcer sur l'aspect quantitatif de l'exposition correspondante. Il convient donc d'éviter le dégagement de fumées.
- Évaluation de la gêne olfactive
 Les produits de pyrolyse des tissus humains dégagent des odeurs très désagréables, souvent ressenties comme écœurantes.

4 Mesures de prévention

Pour éviter l'exposition aux fumées chirurgicales, il convient de recourir aux mesures classiques de prévention mises en œuvre par exemple dans l'industrie pour prévenir ou réduire l'exposition. Bon nombre de ces mesures ont déjà été décrites au point 3.2 relatif aux paramètres déterminant l'exposition. En milieu de soins comme dans les autres secteurs, la hiérarchie des mesures fixée par la directive européenne sur la prévention des risques professionnels doit être respectée pour le choix des mesures de prévention :

- I Élimination du danger (substitution)
- II Mesures de prévention collectives (capotage de la source de risques, aspiration localisée)
- III Mesures de prévention organisationnelles (maintien à distance de la source de risque)
- IV Port d'équipements de protection individuelle (masques, etc.)

On résumera dans ce qui suit les recommandations de divers groupes d'experts en matière de réduction de l'exposition aux fumées chirurgicales, et on présentera les recommandations de l'INRS, de la Suva et de la BGW (sources : Ball, 2005, 2001 ; Barrett et al., 2003 ; Frenette, 2003 ; NIOSH, 1999 ; TRGS 525, 1998).

4.1 Substitution

Le choix de la méthode de traitement relève de la liberté et de la responsabilité du praticien, et du bénéfice attendu pour le patient. Il se limite en outre aux méthodes maîtrisées par l'opérateur. Il faut cependant tenir compte des risques d'exposition du personnel lors du choix du mode opératoire. Il importe donc de définir, en amont du traitement, les critères qui peuvent constituer des facteurs critiques en cas de recours à l'électrochirurgie ou au laser. Il peut s'agir notamment des éléments suivants :

- Risques biologiques particuliers (bactériens ou viraux).
- Locaux insuffisamment équipés (absence de ventilation, par exemple).

Rapportées à la multitude d'applications des techniques d'intervention décrites, les possibilités de substitution sont forcément peu nombreuses. S'il n'est pas possible de proposer des méthodes alternatives présentant les mêmes avantages d'un point de vue médical et entraînant une moindre exposition du personnel, il faut recourir à des mesures de prévention collectives, organisationnelles, et de protection individuelle.

4.2 Mesures de prévention techniques

Techniquement, le captage à la source des fumées chirurgicales est la mesure de prévention la plus efficace. D'autres méthodes qui permettraient d'éloigner les opérateurs du point d'émission des fumées (interventions commandées à distance, par exemple) sont imaginables, mais n'existent pas, en pratique.

À ce jour, les normes techniques (osha.gov/SLTC/laserelectrosurgeryplume/standards.html aux États-Unis, CEI/TR 60825-8 : 2006, par exemple) ne comportent que des objectifs généraux de prévention, et non des exigences précises en matière de captage des fumées. On peut toutefois formuler les recommandations suivantes :

a) Systèmes de captage des fumées chirurgicales

Si la quantité de fumée est faible, il est possible d'utiliser un appareil d'aspiration adapté, en y ajoutant un filtre à usage unique, pour éliminer la fumée du champ opératoire (EN 60601 et Ball, 2005). Le filtre ajouté doit être de nature à empêcher la contamination et la corrosion des conduits du système de captage. Les systèmes de captage mural classiques ne sont généralement pas assez puissants pour aspirer de grandes quantités de fumées. Il est conseillé de préférer les dispositifs de captage mobiles, qui peuvent avoir une puissance d'aspiration plus de vingt fois supérieure. Alors que la puissance de captage des systèmes d'aspiration chirurgicaux ne dépasse pas $100 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, celle des systèmes autonomes est de l'ordre du $\text{m}^3\text{min}^{-1}$ (cf. point b).

b) Dispositifs mobiles de captage des fumées

Des dispositifs de captage individuels sont proposés par les fabricants de matériels laser ou électrochirurgicaux. Ils peuvent être soit intégrés à la pièce à main de l'appareil, soit indépendants. Ils sont généralement constitués des éléments suivants :

- appareil d'aspiration proprement dit
- système de filtre pour polluants particulaires et gaz/vapeurs
- flexible relié à la pièce à main ou à un conduit d'aspiration
- pièce à main ou tube d'aspiration.

L'appareil de captage doit offrir une puissance d'aspiration suffisante en service. On considère que $0,5$ à $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (soit 100 à $150 \text{ pieds}\cdot\text{minute}^{-1}$) est une vitesse d'aspiration suffisante à l'entrée de la buse (NIOSH, 1998). Pour un diamètre de buse de 20 mm , cela correspond à un débit d'air de $0,6$ à $0,9 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, pour un conduit d'aspiration de 100 mm de diamètre environ, soit 15 à $20 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Comme pour un aspirateur, la puissance d'aspiration est assurée grâce à une turbine en rotation, et dépend de la résistance à l'écoulement du conduit d'aspiration et du système de filtrage. En cas de colmatage du conduit, la puissance d'aspiration peut être fortement diminuée.

Lors du choix de l'appareil, il est conseillé de tenir compte du niveau sonore de l'appareil, qui peut être lié au moteur lui-même, mais aussi au processus d'aspiration.

Dans les systèmes de captage classique avec recyclage d'air, le **système de filtration** doit permettre de réduire la concentration de particules, mais aussi de gaz et de vapeurs. Or si la littérature recommande des dispositifs de captage équipés de filtres à charbon actif et de filtres ULPA (Ultra Low Penetration Air) (Ball, 2005), ces recommandations ne se sont pas encore imposées dans les normes. La publication du NIOSH de 1998 recommande des filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air) mais n'impose pas de filtre au charbon actif. Le rapport technique CEI/TR 60825-8:2006 recommande des filtres ULPA, qui offrent un coefficient de rétention d'au moins 99,999 % pour des tailles de particules d'au moins 0,1 µm. Cette exigence correspond à l'évaluation de l'exposition proposée au point 3.4, selon laquelle le risque provient notamment des polluants particulaires. Toutefois, les recommandations du NIOSH (1998) ne tenaient pas compte de l'exposition aux particules ultrafines, de dimensions nanométriques. Une évaluation définitive des risques liés à l'exposition à cette fraction de particules est aujourd'hui encore impossible, en l'absence de connaissances toxicologiques suffisantes dans ce domaine.

Cependant, si des fumées chirurgicales se dégagent fréquemment dans des locaux mal ventilés, comme les cabinets de ville ou les salles de consultation ambulatoire, qui ne disposent que d'une ventilation naturelle, il est recommandé, compte tenu de la gêne olfactive et du dégagement de produits de pyrolyse sous forme de gaz et de vapeurs, d'utiliser des filtres au charbon actif au niveau du système d'aspiration.

Les filtres amovibles doivent être régulièrement contrôlés et remplacés conformément aux recommandations du fabricant. Comme les filtres à particules peuvent être chargés de cellules ou de fragments de cellules biologiquement actifs, le changement de filtre devrait être assuré en respectant les exigences minimales d'hygiène (Ball, 2004). Celles-ci incluent au minimum le port de gants médicaux jetables, et le stockage des filtres usagés dans des sacs en plastique en vue de leur élimination en tant que déchet. Dans le cadre de la gestion des déchets, il convient de décider, à partir de l'évaluation des opérations effectuées, si les filtres doivent être traités comme des déchets non spécifiques ou comme des déchets dangereux, éventuellement infectieux. En Allemagne par exemple, la catégorie de déchets AS 15 02 02 comprend les matériaux d'aspiration et de filtration (y compris les filtres à huile), les chiffons et les vêtements de protection souillés par des produits dangereux.

Le **flexible et la buse d'aspiration**, ainsi que la pièce à main, augmentent la résistance et réduisent la puissance d'aspiration. Leur longueur et leur forme doivent donc être adaptées à l'usage prévu. L'efficacité de captage d'un dispositif d'aspiration des fumées est d'autant plus grande que la buse peut

être proche (à moins de 5 cm) du point de formation de la fumée. Cela plaide pour l'utilisation d'une pièce à main à captage intégré, ce qui est d'ailleurs conforme aux règles de l'art dans l'utilisation du laser. Cependant, cela peut nuire à la maniabilité de la pièce à main et à l'acceptabilité du captage pour le chirurgien.

c) Systèmes de ventilation mécanique

Les salles de traitement médical disposent généralement d'une ventilation mécanique conforme à la réglementation nationale et répondant aux exigences d'hygiène applicables à ces locaux (norme DIN 1946, partie 4, par exemple en Allemagne). Au bloc opératoire, les installations de ventilation doivent réduire le nombre de germes et de particules présents dans l'air de la salle d'opération, tout en éliminant la chaleur dégagée et les émissions de produits dangereux. Ce résultat peut être obtenu par divers systèmes de soufflage et d'extraction d'air, par exemple par l'apport d'air en partie haute et l'extraction en partie basse, ou par un plafond à flux laminaire placé au-dessus du champ opératoire et garantissant un écoulement d'air de haut en bas sans turbulence. Ce type de système fait appel à d'importants volumes d'air, de l'ordre de 1 000 à 2 000 m³.h⁻¹ d'air neuf, ce qui correspond à un renouvellement d'air de 10 à 20 par heure.

Un tel débit élimine rapidement du local de faibles quantités de fumées, et on n'observe pas d'accumulation notable de fumées dans les zones de travail.

La situation est différente lors d'interventions comportant l'électrocoagulation d'importantes quantités de tissus. Les performances des systèmes de ventilation utilisés au bloc opératoire sont de 20 à 40 fois supérieures à celles des dispositifs de captage mobiles, compte tenu des volumes d'air neuf indiqués ci-dessus. Les dispositifs mobiles ne peuvent donc avoir une incidence notable sur le système de ventilation générale du local. Cependant, l'air extrait de la salle d'opération est généralement recyclé et rejeté dans les couloirs et locaux adjacents (salle d'induction et salle de transfert), et les gaz se diffusent dans ces locaux. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la gêne olfactive liée aux fumées chirurgicales se ressent dans l'ensemble du bloc opératoire.

d) Captage des fumées lors d'interventions sous endoscopie

Le captage des fumées des cavités corporelles lors d'interventions sous endoscopie, par exemple, présente des difficultés techniques. Ces fumées ne constituent pas un problème de médecine du travail pour la personne pratiquant l'intervention, mais ont surtout pour inconvénient de constituer une gêne visuelle pour le chirurgien ; ce point ne sera pas traité plus avant ici.

4.3 Mesures organisationnelles

Il convient, par des mesures d'organisation du travail telles que l'établissement de plannings de travail optimisés, d'éviter d'exposer inutilement le personnel à des fumées chirurgicales.

Le personnel du bloc opératoire est plus enclin à se protéger des fumées chirurgicales s'il est informé des mécanismes de formation des fumées, des dangers qu'elles présentent et des mesures de prévention applicables. Lors de **formations régulières à la prévention**, ces thèmes doivent donc être traités en précisant l'incidence des différents déterminants de l'exposition. Certains constructeurs de dispositifs de captage des fumées fournissent des supports de formation qui peuvent être utilisés à cette fin.

Les formations à la prévention doivent être assurées avant la prise de poste, en cas de modification importante des modes opératoires, et à intervalles réguliers (une fois par an, par exemple). Elles doivent naturellement respecter la réglementation nationale, qui peut notamment exiger la tenue d'un registre des formations.

4.4 Mesures de protection individuelle

a) lors d'interventions chirurgicales

Lorsque le captage et la ventilation du local sont satisfaisants, il n'est pas nécessaire de recourir à des équipements de protection individuelle spécifiques. Ce sont, dans ce cas, les exigences en matière d'hygiène lors des gestes chirurgicaux qui déterminent les mesures de protection individuelle nécessaires pour le personnel.

Le masque chirurgical est une mesure d'hygiène qui n'assure pas une protection adéquate contre les gaz ou vapeurs. Il ne retient pas non plus les particules les plus fines qui peuvent se former lors de processus de pyrolyse, ni les agents biologiques (virus, fragments de cellules).

Les mesures de protection individuelle contre les agents chimiques et/ou biologiques doivent être conformes, en Europe, à la directive EPI et à ses exigences, y compris en ce qui concerne l'établissement de la preuve du respect de la norme technique (Directive EPI 89/686/CEE).

Les masques de classe FFP2 au minimum offrent une protection adaptée contre les composants particulaires des fumées chirurgicales. Ils ne protègent pas, toutefois, contre la fraction nanométrique de ces composants particulaires. Les gaz et vapeurs ne peuvent être retenus que par des filtres au charbon actif adaptés.

b) lors des opérations de maintenance

Les filtres à particules des dispositifs de captage pouvant être chargés de cellules et fragments de cellules biologiquement actifs, ou de bactéries et de

virus, le changement de filtre devrait se faire en respectant les exigences minimales d'hygiène qui prévoient, notamment, le port de gants à usage unique.

4.5 Surveillance médicale préventive

La médecine du travail ne dispose à l'heure actuelle que de très peu de critères applicables à la surveillance médicale préventive lors des activités présentées ici. On a vu qu'il n'existait pratiquement pas de données sur des pathologies liées aux fumées en salle d'opération, et il semble peu probable que cela change. Aucune surveillance médicale préventive visant à un dépistage des maladies dues aux fumées de salle d'opération n'est donc envisageable.

Aucun programme de prévention spécifique pour les personnes exposées aux fumées chirurgicales n'est, à notre connaissance, appliqué en routine.

Cependant, des examens périodiques de médecine du travail existent dans de nombreux pays, et il semble judicieux d'en profiter pour assurer une surveillance du personnel exposé aux fumées et dépister d'éventuels problèmes, afin de pouvoir intervenir de façon appropriée. Il semble également judicieux d'identifier les personnes ayant une prédisposition individuelle (déficience du système immunitaire, par exemple, ou antécédents de pathologie respiratoire) et de faire en sorte qu'elles ne soient pas exposées aux fumées de salle d'opération. Cet examen médical préventif pourrait se limiter à une anamnèse, un bilan clinique et, éventuellement, des examens de laboratoire et une spirométrie. Les données recueillies sur l'exposition doivent être conservées dans le dossier médical.

Il est probable que, lors des visites médicales d'embauche et de contrôle habituellement pratiquées dans la plupart des institutions du Secteur santé, l'exposition aux fumées de salle d'opération est évoquée. Telle est, dans l'état actuel des connaissances, la démarche que l'on pourrait préconiser.

5 Information et formation

Les techniques chirurgicales décrites dans ce qui précède ne sont mises en œuvre que par des spécialistes parfaitement informés des avantages et inconvénients thérapeutiques et techniques de ces méthodes. C'est à ces spécialistes qu'il incombe, en raison de leurs savoirs spécifiques, d'informer des dangers éventuels les autres personnes présentes lors des interventions, de telle sorte que les conditions de sécurité requises soient assurées pour tout le personnel concerné. Cependant, les fumées chirurgicales ne constituent qu'un risque parmi d'autres, liés notamment aux agents infectieux,

aux matériels électriques, aux objets pointus ou coupants, ou encore aux agents chimiques (désinfectants, médicaments, anesthésiques, etc.).

Aux termes de la Directive cadre 89/391/CEE, tout salarié doit bénéficier, au moment de la prise de poste, en cas de changement de poste, de modification des équipements de travail ou d'introduction de nouvelles technologies, d'une formation adaptée à la sécurité et à la santé au travail, sous forme d'informations et de consignes correspondant à son poste de travail et à ses missions.

Les modalités pratiques de ces formations, les mises à jour périodiques et la tenue des registres de formation doivent être conformes aux dispositions nationales applicables aux appareils médicaux ou aux agents chimiques, notamment.

Les formations à la prévention sont indissociables, en pratique, des procédures normales de concertation au sein de l'équipe d'intervention ; en effet, dans le cas des techniques laser et électrochirurgicales, les mesures de prévention sont généralement intégrées aux modes opératoires.

Les aspects suivants, par exemple, peuvent faire partie d'une formation à la protection contre les fumées chirurgicales :

- Propriétés dangereuses des produits de pyrolyse formés.
- Autres dangers liés aux techniques mises en œuvre.
- Détail des procédures mises en œuvre.
- Paramètres influant sur l'exposition aux fumées chirurgicales (facteurs déterminant l'exposition).
- Mesures de prévention applicables tant localement (dispositifs d'extraction, notamment) qu'au niveau de l'ensemble des locaux (ventilation générale).
- Nettoyage et entretien/maintenance des appareils utilisés.
- Évaluation des dangers : dans quelles conditions les mesures prises sont-elles considérées comme suffisantes pour la protection des opérateurs ?

Diverses sources – parmi les publications citées au chapitre 8, notamment – peuvent être consultées pour bâtir des formations structurées. On citera par exemple les documents suivants :

- Informations des fabricants de matériels médicaux.
- Évaluations des dangers et description des mesures de prévention applicables publiées par le NIOSH, l'ASORN, etc.
- Fiches techniques sur les lasers (document de l'AUVA sur les lasers, par exemple : Merkblatt M140).

6 Contrôle de l'efficacité des mesures de prévention

Un contrôle régulier des mesures de prévention mises en œuvre contribue à l'amélioration de la prévention. Il convient de vérifier à intervalles réguliers l'efficacité des mesures prises (dispositifs de captage, installations de ventilation) et le comportement des salariés.

- Les appareils utilisés doivent être en bon état. Les opérations de maintenance effectuées sur les appareils qui, en tant qu'appareils médicaux, doivent souvent répondre à des exigences de sécurité et de fonctionnement spécifiques, doivent être conformes aux indications du constructeur et à la réglementation nationale.
- La ventilation mécanique doit être conforme à la réglementation nationale. En France, par exemple, la norme AFNOR EN 1946-4 s'applique en milieu hospitalier et dans le secteur santé (préservation de la puissance des systèmes de captage, changement des filtres, exigences en matière d'hygiène, etc.).
- La maintenance des dispositifs de captage localisé (Local Exhaust Ventilation – LEV) doit être conforme aux indications du constructeur et à la réglementation nationale. Cela vaut également pour la préservation de la puissance d'aspiration nominale, le changement des filtres ainsi que les mesures nécessaires au respect des normes en matière d'hygiène.
- Les équipements de protection individuelle (EPI) doivent être maintenus en bon état, en particulier les masques de protection utilisés afin de réduire l'exposition aux produits de pyrolyse. En Europe, les EPI doivent être conformes à la directive 89/686/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux équipements de protection individuelle et à la directive 89/656/CEE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de protection individuelle. Les masques de protection doivent être changés après chaque utilisation (s'il s'agit de masques jetables) ou bien à intervalles réguliers selon les indications du constructeur.
- Formation régulière des opérateurs (médecins et assistant(e)s, personnel infirmier, techniciens) conformément au chapitre 5. L'objectif est de maintenir la qualité des mesures organisationnelles de réduction de l'exposition aux produits de pyrolyse.
- La conduite de mesurages individuels dans la zone respiratoire des salariés fournit habituellement (dans l'industrie, par exemple) les éléments nécessaires pour apprécier l'efficacité des mesures de prévention mises

en œuvre aux différents postes de travail. En ce qui concerne les produits de pyrolyse formés lors des actes chirurgicaux, cependant, une telle démarche n'apporterait pas d'élément d'appréciation, car il n'existe pas de valeur de référence fondée sur des données médicales ou techniques qui permettrait d'évaluer les mélanges formés, et il n'a pas été possible, à ce jour, de définir une composante pouvant servir d'indicateur de l'exposition. Le même problème se pose d'ailleurs pour les données biométriologiques.

Il convient de vérifier également à intervalles réguliers si l'évaluation des risques, qui permet de décider des mesures à prendre, est toujours valide et correspond bien aux conditions réelles aux postes de travail.

7 En résumé

Depuis l'introduction des usages médicaux du laser et des techniques électrochirurgicales, l'exposition aux produits de pyrolyse formés lors des interventions (fumées chirurgicales) est un sujet de préoccupation et d'étude.

Les fumées chirurgicales constituent un mélange de substances extrêmement diverses, présentes à l'état de gaz, de vapeurs et d'aérosols liquides ou solides, et pouvant présenter (presque) tous les effets possibles des produits dangereux, locaux ou systémiques, réversibles ou irréversibles. La décomposition thermique des tissus se traduit principalement par une forte odeur qui provoque chez les opérateurs une gêne olfactive pouvant aller jusqu'au dégoût. Enfin, il est établi que les fumées chirurgicales peuvent contenir des éléments biologiquement actifs (cellules, fragments de cellules, virus, etc.).

La composition et l'intensité des émissions dépendent de la technique de traitement utilisée et des tissus traités, et peuvent varier considérablement en fonction des divers facteurs influant sur le dégagement de fumées.

Les principaux facteurs influant sur l'exposition sont les paramètres électriques (puissance, intensité de courant, fréquence), les caractéristiques du procédé (type et forme d'électrode, type de laser), le mode de fonctionnement de l'appareil (continu, pulsé), le tissu traité (tissu adipeux, musculaire, organe, etc.) et les caractéristiques du local (dimensions, mode de ventilation, intensité de la ventilation).

Dans les zones où sont pratiquées les interventions chirurgicales, l'exposition des opérateurs se situe bien en deçà des valeurs limites d'exposition, si l'on considère chacune des substances présentes. Cependant, on a affaire à un mélange de produits de pyrolyse ; il est donc impératif de réduire l'exposition dans toute la mesure du possible, car bon nombre de composants des fumées possèdent des propriétés cancérigènes, mutagènes ou tératogènes.

Sur la base de ce constat, les principales mesures de prévention applicables peuvent être résumées comme suit :

- Les lasers, appareils électrochirurgicaux et autres dispositifs médicaux dont l'utilisation s'accompagne d'un dégagement intense de fumées chirurgicales ne devraient être utilisés que dans des zones de travail dotées d'un système de ventilation (blocs opératoires, par exemple), en particulier lorsqu'il faut s'attendre à la présence de fragments de tissus infectieux ou de cellules tumorales.
- Pour la protection des opérateurs, les fumées émises devraient dans toute la mesure du possible être captées à la source.
- Si l'air extrait par aspiration localisée est rejeté, après filtration, dans la zone de travail (à condition que celle-ci soit correctement ventilée), la filtration doit être assurée au minimum au moyen d'un filtre HEPA.
- Les dangers inhérents aux particules ultrafines (nanoparticules) émises lors des processus de pyrolyse soulèvent la question de savoir s'il ne serait pas préférable d'utiliser des filtres ULPA dans les systèmes de captage des fumées. L'absence de données médicales et toxicologiques sur les effets des nanoparticules ne permet pas, toutefois, de préconiser à titre général l'utilisation de filtres ULPA.
- L'utilisation de filtres au charbon actif dans les zones correctement ventilées des blocs opératoires ne paraît pas justifiée. Toutefois, si des fumées chirurgicales se dégagent dans des zones mal ventilées (cabinets de consultation n'ayant qu'une ventilation naturelle, par exemple, ou salles de consultation ambulatoire), il peut être nécessaire, dans certains cas, d'utiliser des dispositifs de captage mobiles équipés de filtres au charbon actif, ne serait-ce que pour tenir compte de la gêne olfactive.
- Il n'apparaît pas nécessaire, dans l'état actuel des connaissances, d'instaurer une surveillance médicale préventive spéciale pour les personnes exposées aux fumées chirurgicales. Le dossier médical doit comporter des éléments permettant de tracer les expositions.
- Il va de soi que tous les salariés doivent être informés des dangers inhérents aux fumées chirurgicales et des mesures de prévention applicables dans les zones où sont pratiquées les interventions.

8 Bibliographie

AFNOR EN 689 ; Atmosphères des lieux de travail - Conseils pour l'évaluation de l'exposition aux agents chimiques aux fins de comparaison avec des valeurs limites et stratégie de mesurage (1995)

Al Sahaf O.S. ; Vega-Carrascal I. ; Cunningham F.O. ; McGrath J.P. ; Bloomfield F.J. ; Chemical composition of smoke produced by high-frequency electro-surgery. *Ir J Med Sci* (2007). DOI 10.1007/s11845-007-0068-0. 176: 229-232

Albrecht H. ; Wäsche W. ; Meier T. ; Weber L. ; Evaluation of potential health hazards caused by laser produced during medical treatment. In: Proceedings of the 3rd EUREKA Industrial Laser Safety (1995) (info.tuwien.ac.at/ift/safety/refs/alb95.htm)

Aldinger P.R. ; Kleine H. ; Goebel A. ; Eickmann U. ; Breusch S.J. ; Schadstoffemissionen bei der Entfernung von Knochenzement mit Ultraschallgeräten in der Revisionsendoprothetik. *Biomed. Technik* (2001) 46: 287-289

Alp E. ; Bijl D. ; Bleichrodt R.P. ; Hansson B. ; Voss A. ; Surgical smoke and infection control. *Journal of Hospital Infection* (2006) 62: 1-5

American Society of Ophthalmic Registered Nurses (ASORN) ; Recommended Practices for Laser Refractive Surgery. Kendall/Hunt Publishing Company, 405 C Westmark Drive Dubuque IOWA 5 2002

Andreasson S.N. ; Anundi H. ; Sahlberg B. ; Ericsson C.-G. ; Wälinder R. ; Enlund G. ; Pahlman L. ; Mahteme H. ; Peritonectomy with high voltage electrocautery generates higher levels of ultrafine smoke particles. *Eur J Surg Oncol* (2008).DOI: 10.1016/j.ejso.2008.09.002

AUVA Merkblatt M 140 ; Medizinische Anwendung des Lasers. Sicherheitsinformationen der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt. Sicherheit Kompakt. HUB – M 140 – 0706 aktualisierte Auflage

Baggish M. ; Baltoyannis P. ; Sze E. ; Protection of the rat lung from the harmful effects of laser smoke. *Lasers Surg Med.* (1988) 8,3: 248-53

Baggish M. ; Elbakry M. ; The effects of laser smoke on the lungs of rats. *Am J Obstet Gynecol.* (1987) 156,5: 1260-5

Baggish M. ; Presence of human immunodeficiency virus DNA in laser smoke. *Laser Surg Med.* (1991) 11: 197-203

Ball K. ; Controlling Surgical Smoke: A Team Approach. Information Booklet (2004). IC Medical Inc. 2002 W. Quail Avenue, Phoenix, AZ 85027

Ball K. ; The hazards of surgical smoke Part 1. *AANA Journal Course* (2001). 69,2: 125-132

Barret W.L. ; Garber S.M. ; Surgical smoke – a review of the literature. Is this just a lot of hot air? *Surg Endosc* (2003). DOI: 10.1007/s00464-002-8584-5. 17: 979-987

Beutner K.R. ; Becker T.M. ; Stone K.M. ; Epidemiology of human papillomavirus infections. *Dermatol. Clin.* 9 (1991) 2: 211-218

- Bigony L.** ; Risks Associated with Exposure to Surgical Smoke Plume: A Review of the Literature. *AORN Journal* 86 (2007) 6, 1013–1020
- Binding U.** ; Wäsche W. ; Sicherheits- und Schutzmaßnahmen gegen Abbrandprodukte beim Einsatz medizinischer Laser: *Angewandte Lasermedizin – 15. Erg. Lfg.* (1998) 12: 1-14. II-4.10. Berlin, Müller, Springer-Verlag
- Bruske-Hohlfeld I.** ; Preissler G. ; Jauch K.W. ; Pitz M. ; Nowak D. ; Peters A. ; Wichmann H.E. ; Surgical smoke and ultrafine particles. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* (2008) 3: 31. DOI: 10.1186/1745-6673-3-31
- Byrne P.O.** ; Sisson P.R. ; Oliver P.D. et Ingham R. ; Carbon dioxide laser irradiation of bacterial targets in vitro. *Journal of Hospital Infection* (1987) 9,3: 265-273
- Calero L.** ; Brusis T. ; Larynxpapillomatose – erstmalige Anerkennung als Berufskrankheit bei einer OP-Schwester. *Laryngo-Rhino-Oto* (2003) 82: 790-793
- CEI/TR 60825-8:2006** : Sécurité des appareils à laser – Guide pour l'application en sécurité de rayonnement laser à l'homme
- DIN 1946 Teil 4** ; Raumluftechnik –Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens. Dezember (2008). Beuth-Verlag, Berlin
- Directive 89/656/CEE** du Conseil, du 30 novembre 1989, concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de protection individuelle (troisième directive particulière au sens de l'article 16 paragraphe 1 de la directive 89/391/CEE) *Journal officiel* n° L 393 du 30/12/1989 p. 0018 - 0028
- Directive 89/686/CEE** du Conseil, du 21 décembre 1989, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux équipements de protection individuelle *Journal officiel* n° L 399 du 30/12/1989 p. 0018 - 0038
- Edwards B.E.** ; Reiman R.E. ; Results of a Survey on Current Surgical Smoke Control Practices. *AORN Journal* (2008) 87,4: 739-749
- Eickmann U.** ; Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. *ecomed Medizin* (2008), Landsberg/Lech
- Fletcher J.N.** ; Mew D. ; DesCoteaux J.G. ; Dissemination of melanoma cells within electrocautery plume. *Am J Surg* (1999). 178,1: 57-59
- Freitag L.** ; Chapman G.A. ; Sielczak M. ; Ahmed A. ; Russin D. ; Laser smoke effect on the bronchial system. *Lasers Surg Med* (1987). 7,3: 283-8
- Frenette Y.** ; Les fumées chirurgicales. Connaissez-vous les risques? *Travail et Santé* (2003), 19,4: 34-36
- Garden J.M.** ; O'Bannion M.K. ; Bakus A.D. ; Olson C. ; Viral disease transmitted by laser-generated plume (Aerosol). *Arch Dermatol* (2002). 138: 1303-1307
- Garden J.M.** ; O'Bannion M.K. ; Shelnitz L.S. ; Pinski K.S. ; Bakus A.D. ; Reichmann M.E. ; Sundberg J.P. ; Papillomavirus in the vapor of carbon dioxide laser-treated verrucae: *JAMA* (1988). 259,8: 1199-1202

Gates M.A. ; Feskanich D. ; Speizer F.E. ; Hankinson S.E. ; Operating room nursing and lung cancer risk in a cohort of female registered nurses. *Scand J Work Environ Health* (2007). 33,2: 140-7

Gatti J.E. ; Bryant C.J. ; Noone R.B. ; Murphy J.B. ; The mutagenicity of electrocautery smoke. *Plastic and reconstructive surgery* (1992). 89,5: 781-786

Gloster H.M. ; Roenigk R.K. ; Risk of acquiring human papillomavirus from the plume produced by the carbon dioxide laser in the treatment of warts. *Journal of the American Academy of Dermatology* (1995). 32,3: 436-441

Gonzalez-Bayon L. ; Gonzalez-Moreno S. ; Ortega-Pérez G. ; Safety considerations for operating room personnel during hyperthermic intraoperative intraperitoneal chemotherapy perfusion. *Eur J Surg Oncol* (2006). 32,6: 619-24

Hallmo P. ; Naess O. ; Laryngeal papillomatosis with human papillomavirus DNA contracted by a laser surgeon. *Eur Arch Otorhinolaryngol* (1991). 248,7: 425-427

Hensman C. ; Newman E.L. ; Shimi S.M. ; Cuschieri A. ; Cytotoxicity of electro-surgical smoke produced in an anoxic environment. *Am J Surg* (1998). 175,3: 240-241

Hollmann R. ; Hort C.E. ; Kammer E. ; Naegele M. ; Sigrist M.W. et Meuli-Simmen C. ; Smoke in the Operating Theater: An Unregarded Source of Danger. *Plastic and Reconstructive Surgery* (2004). 114,2: 458-463

INRS "Le point des connaissances sur les lasers". ED 5009, Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2e édition, Paris 2004, téléchargeable sur le site www.inrs.fr

Johnson GK ; Robinson WS ; Human immunodeficiency virus-1 (HIV-1) in the vapors of surgical power instruments. *J Med Virol.* (1991). 33: 47-50

Kashima H.K. ; Kessis T. ; Mounts P. ; Shah K. ; Polymerase chain reaction identification of human papillomavirus DNA in CO₂ laser plume from recurrent respiratory papillomatosis. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery* (1991). 104,2: 191-195

King B. ; McCullough J. ; Health Hazard Evaluation Report. HETA ,#2000-0402-3021 Inova Fairfax Hospital Falls Church, Virginia. November 2006 (2006a)

King B. ; McCullough J. ; Health Hazard Evaluation Report. HETA ,#2001-0066-3019 Morton Plant Hospital Dunedin, Florida. October 2006 (2006b)

King B. ; McCullough J. ; Health Hazard Evaluation Report. HETA ,#2001-0030-3020 Carolinas Medical Center Charlotte, North Carolina. November 2006 (2006c)

Mihashi S. ; Jako G.J. ; Incze J. ; Strong M.S. ; Vaughn C.W. ; Laser surgery in otolaryngology. Interaction of CO₂ laser and soft tissue. *Ann NY Acad Sci* (1975) 267: 263-294

Moot A.R. ; Ledingham K.M. ; Wilson P.F. ; Senthilmohan S.T. ; Lewis D.R. ; Roake J. ; Allardyce R. ; Composition of volatile organic compounds in diathermy plume as detected by selected ion flow tube mass spectrometry. *ANZ J. Sur.* (2007) 77: 20-23

Nicas M. ; Estimating Exposure Intensity in an Imperfectly Mixed Room. AIHA Journal (1996) 57: 542-550

NIOSH 1996 ; Control of smoke from laser/electrical surgical procedures. NIOSH Hazard Controls. HC 11. DHHS (NIOSH) Publication 96-128. Cincinnati: NIOSH (1996): 2 p

NIOSH1998 ; Control of Smoke From Laser/Electric Surgical Procedures. DHHS (NIOSH) Publication No. 96-128

prEN 60601-2-22 de 2007-01-00, CEI 60601-2-22, Ed. 3 : Appareils électromédicaux - Partie 2-22 : Règles particulières pour la sécurité de base et les performances essentielles des appareils chirurgicaux, esthétiques, thérapeutiques et de diagnostic à laser / Attention: Prévu pour remplacer EN 60601-2-22 (1996-01)

Rappaport S.M. ; Assessment of long-term exposure to toxic substances in air. Review. Ann. Occup. Hyg. (1991). 35,1: 61-121

Sagar P.M. ; Meagher A. ; Sobczak S. ; Wolff B.G. ; Chemical composition and potential hazards of electrocautery smoke. Br J Surg (1996). 83,12: 1792

Sawchuk W.S. ; Weber P.J. ; Lowy D.R. ; Dzubow L.M. ; Infectious papillomavirus in the vapor of warts treated with carbon dioxide laser or electrocoagulation: detection and protection. J Am Acad Dermatol (1989). 21,1: 41-9

Scott E. ; Beswick A. ; Wakefield K. ; The Hazards of Diathermy Plume. Part 1: The Literature Search. British Journal of Perioperative Nursing 14 (2004) 9, 409-414. Part 2: Producing Quantified Data. British Journal of Perioperative Nursing 14 (2004) 10, 452-456

Spearmann J. ; Tsavellas G. ; Nichols P.: Current attitudes and practices towards diathermy smoke . Ann R Coll Surg Engl (2007) ; 89: 162 - 165

Sugarbaker P.H. ; Peritonectomy procedures. Surg Oncol Clin N Am (2003). 12,3: 703-27

Taravella M.J. ; Viega J. ; Luiszer F. ; Drexler J. ; Blackburn P. ; Hovland P. ; Repine J.E. Respirable particles in the excimer laser plume. Elsevier Science Inc. (2001). PII S0886-3350(00)00813-0

Tomita Y. ; Mihashi S. ; Nagata K. ; Ueda S. ; Hirano M. ; Hirohata T. ; Mutagenicity of smoke condensates induced by CO₂-laser irradiation and electrocauterization. Mutation Research (1981). 89,2: 145-149

TRGS 400 ; Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 400, Stand Januar 2008 ; erhältlich unter www.baua.de. (traduction en anglais des TRGS 400: Technical Rules for Hazardous Substances, Risk Assessment for Activities involving Hazardous Substances, sur le site baua.de)

TRGS 402 ; Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition. Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 402, Stand Juni 2008 ; erhältlich unter www.baua.de

TRGS 525 ; Umgang mit Gefahrstoffen in Einrichtungen zur humanmedizinischen Versorgung. Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 525, Stand Mai 1998 ; erhältlich unter www.baua.de

VDI-Sonderband ; Bewertung von Abbrandprodukten bei der medizinischen Laseranwendung. Sonderband – Laser in der Materialbearbeitung. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien (1998), Graf-Recke-Str. 84, 40239 Düsseldorf

Walker B. ; High efficiency filtration removes hazards from laser surgery. Br J Theatre Nurs (1990). 27,6: 10-12

Wäsche W. ; Albrecht H. ; Investigation of the distribution of aerosols and VOC in plume produced during laser treatment under OR conditions. SPIE 2624 (1995) 270-275

Wäsche W. ; Albrecht H.J. ; Müller G.J. ; Assessment of the risk potential of pyrolysis products in plume produced during laser treatment under OR conditions. SPIE Proceedings (1995). 2323: 455-463

Wäsche W. ; Wagner G. ; Albrecht H. ; Müller G. ; Analyse der luftgetragenen Abbrandprodukte bei der Laser- und Hochfrequenz-Chirurgie *in* Minimale Invasive Medizin. MEDTECH (1993). Ecomed Verlagsgesellschaft mbH & Co.KG, Landsberg. 4,4: 35-39

Wu J.S. ; Luttman D.R. ; Meininger T.A. ; Soper N.J. ; Production and systemic absorption of toxic byproducts of tissue combustion during laparoscopic surgery. Surg Endosc (1997). 11: 1075-1079