Risques liés aux fumées chirurgicales : état des lieux des connaissances et moyens de prévention au bloc opératoire

Chloé Serveille

▶ **To cite this version:**

Chloé Serveille. Risques liés aux fumées chirurgicales : état des lieux des connaissances et moyens de prévention au bloc opératoire. Sciences pharmaceutiques. 2022. dumas-03641835

HAL Id: dumas-03641835

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03641835

Submitted on 14 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance.

La propriété intellectuelle du document reste entièrement celle du ou des auteurs. Les utilisateurs doivent respecter le droit d'auteur selon la législation en vigueur, et sont soumis aux règles habituelles du bon usage, comme pour les publications sur papier : respect des travaux originaux, citation, interdiction du pillage intellectuel, etc.

Il est mis à disposition de toute personne intéressée par l'intermédiaire de l'archive ouverte DUMAS (Dépôt Universitaire de Mémoires Après Soutenance).

Si vous désirez contacter son ou ses auteurs, nous vous invitons à consulter en ligne les annuaires de l'ordre des médecins, des pharmaciens et des sages-femmes.

Contact à la Bibliothèque universitaire de Médecine Pharmacie de Grenoble :

bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr

UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

UFR DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Année : 2022

RISQUES LIÉS AUX FUMÉES CHIRURGICALES : ÉTAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES ET MOYENS DE PRÉVENTION AU BLOC OPÉRATOIRE

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

SPÉCIALITÉ : PHARMACIE HOSPITALIÈRE GÉNÉRALE

Par Mme Chloé SERVEILLE

[Données à caractère personnel]

THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT À LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Le 04/04/2022

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Président du jury :

M. le Pr Pierrick BEDOUCH, PU-PH

Membres :

Mme le Dr Morgane CESSIECQ, Directrice de thèse

Mme le Dr Claire CHAPUIS, PH

Mme le Dr Christine DEMEILLIERS, MCF

M. le Dr François HALLOUARD, Directeur de thèse

L'UFR de Pharmacie de Grenoble n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.

FACULTÉ DE PHARMACIE Université Grenoble Alpes

ENSEIGNANTS - CHERCHEURS Année 2021 / 2022

Doyen de la Faculté - **Pr. Michel SEVE**
Vice-Doyen Pédagogie - **Mr Pierre CAVAILLES**
Vice-Doyen Recherche – **Pr. Walid RACHIDI**

STATUT	NOM	PRENOM	LABORATOIRE	HDR
MCF	ALDEBERT	DELPHINE	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, TheREx	Oui
PU-PH	ALLENET	BENOIT	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, ThEMAS	Oui
PU	BAKRI	ABDELAZIZ	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS	Oui
CDD	BARDET	JEAN-DIDIER	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, ThEMAS	
MCF	BATANDIER	CECILE	LBFA – INSERM U1055	
PU-PH	BEDOUCH	PIERRICK	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, ThEMAS	Oui
MCF	BELAIDI-CORSAT	ELISE	HP2, Inserm U1042	Oui
MAST	BELLET	BEATRICE	-	
MCF	BOUCHERLE	BENJAMIN	DPM - UMR 5063 CNRS	
PU	BOUMENDJEL	AHCENE	LRB /INSERM U 1039	Oui
MCF	BOURGOIN	SANDRINE	TIMC	
MCF	BRETON	JEAN	LCIB – UMR E3 CEA	Oui
MCF	BRIANCON-MARJOLLET	ANNE	HP2 – INSERM U1042	Oui
PU	BURMEISTER	WILHEM	UVHCI- UMI 3265 EMBL CNRS	Oui
MCU-PH	BUSSER	BENOIT	Institute for Advanced Biosciences, UGA / Inserm U 1209 / CNRS 5309	Oui
Professeur Emérite	CALOP	JEAN		Oui
MCF	CAVAILLES	PIERRE	IAB	
MCU-PH	CHANOINE	SEBASTIEN	CR UGA - INSERM U1209 - CNRS 5309	
AHU	CHEVALIER	SIMON	TIMC IMAG	
MCF	CHOISNARD	LUC	DPM – UMR 5063 CNRS	
MCU-PH	CHOVELON	BENOIT	DPM – UMR 5063 CNRS	
MAST	COMBE	JEROME	-	
PU-PH	CORNET	MURIEL	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, TheREx	Oui
Professeur Emérite	DANEL	VINCENT	-	Oui
Professeur Emérite	DECOUT	JEAN-LUC	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
MCF Emérite	DELETRAZ-DELPORTE	MARTINE	LPSS – EAM 4129 LYON	équiv.
MCF	DEMEILLERS	CHRISTINE	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS	Oui
PU-PH	DROUET	CHRISTIAN	GREPI EA7408	Oui
PU	DROUET	EMMANUEL	IBS – UMR 5075 CEA CNRS HIV & virus persistants Institut de Biologie Structurale	Oui
MCF	DURMORT	CLAIRE	IBS – UMR 5075 CEA CNRS	Oui
PU-PH	FAURE	PATRICE	DPM – UMR5063	Oui
MCF	FAURE-JOYEUX	MARIE	HP2 – INSERM U1042	Oui

Mise à jour le 06/09/2021 Sana HACHANI

STATUT	NOM	PRENOM	LABORATOIRE	HDR
PRCE	FITE	ANDREE	-	
MCU-PH	GARNAUD	CECILE	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, TheReX	
PRAG	GAUCHARD	PIERRE-ALEXIS	-	
MCU-PH	GERMI	RAPHAELE	IBS – UMR 5075 CEA CNRS HIV & virus persistants Institut de Biologie Structurale	Oui
MCF	GEZE	ANNABELLE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
MCF Emérite	GILLY	CATHERINE	DPM – UMR 5063 CNRS	équiv.
PU	GODIN-RIBUOT	DIANE	HP2 – INSERM U1042	Oui
MCF	GONINDARD	CHRISTELLE	LECA – UMR CNRS 5553	
Professeure Emérite	GRILLOT	RENEE	-	Oui
MCF	GUIEU	VALERIE	DPM – UMR 5063 CNRS	
CDD	HENNEBIQUE	AURELIE	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, TheREx	
MCF	HININGER-FAVIER	ISABELLE	LBFA – INSERM U1055	
MCF	KHALEF	NAWEL	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS	
MCF	KOTZKI	SYLVAIN	HP2 – UMR S1042	
MCF	KRIVOBOK	SERGE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
AHU	LEENHARDT	JULIEN	INSERM – U1039	
PU	LENORMAND	JEAN-LUC	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS, TheREx	Oui
PU	MARTIN	DONALD	TIMC-IMAG UMR 5525 CNRS	Oui
PRCE	MATTHYS	LAURENCE	-	
AHU	MINOVES	MELANIE	HP2 – INSERM U1042	
PU	MOINARD	CHRISTOPHE	LBFA - INSERM U1055	Oui
PU-PH	MOSSUZ	PASCAL	IAB – INSERM U1209	Oui
MCF	MOUHAMADOU	BELLO	LECA – UMR 5553 CNRS	Oui
MCF	NICOLLE	EDWIGE	DPM – UMR 5063 CNRS	
MCF	OUKACINE	FARID	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
MCF	PERES	BASILE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
MCF	PEUCHMAUR	MARINE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
PU	PEYRIN	ERIC	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
AHU	PLUCHART	HELENE	TIMC-IMAG – UMR 5525 CNRS, ThEMAS	
PU	RACHIDI	WALID	BGE/BIOMICS/ CEA	Oui
PU	RAVELET	CORINNE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui
PU	RIBUOT	CHRISTOPHE	HP2 – INSERM U1042	Oui
Professeure Emérite	ROUSSEL	ANNE-MARIE	-	Oui
PU-PH	SEVE	MICHEL	TIMC	Oui
MCF	SOUARD	FLORENCE	DPM – UMR 5063 CNRS	Oui

Mise à jour le 06/09/2021 Sana HACHANI

STATUT	NOM	PRENOM	LABORATOIRE	HDR
MCF	SPANO	MONIQUE	IBS – UMR 5075 CEA CNRS	
MCF	TARBOURIECH	NICOLAS	IBS – UMR 5075 CEA CNRS	
CDD	TRUFFOT	AURELIE		
MCF	VANHAVERBEKE	CECILE	DPM – UMR 5063 CNRS	
MCF	WARTHER	DAVID	DPM	
Professeur Emérite	WOUESSIDDJEWE	DENIS	-	Oui

AHU : Assistant Hospitalo-Universitaire

ATER : Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherches

BCI : Biologie du Cancer et de l'Infection
CHU : Centre Hospitalier Universitaire
CIB : Centre d'Innovation en Biologie
CRI : Centre de Recherche INSERM
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
DCE : Doctorants Contractuels Enseignement
DPM : Département de Pharmacochimie Moléculaire
HP2 : Hypoxie Physiopathologie Respiratoire et Cardiovasculaire
IAB : Institute for Advanced Biosciences
IBS : Institut de Biologie Structurale
LAPM : Laboratoire Adaptation et Pathogenèse des Microorganismes
LBFA : Laboratoire Bioénergétique Fondamentale et Appliquée

LCBM : Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux

LCIB : Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologie

LECA : Laboratoire d'Ecologie Alpine
LPSS : Laboratoire Parcours Santé Systémique
LR : Laboratoire des Radio pharmaceutiques
MAST : Maitre de Conférences Associé à Temps Partiel
MCF : Maitre de Conférences des Universités
MCU-PH : Maître de Conférences des Universités et Praticiens Hospitaliers
PAST : Professeur Associé à Temps Partiel
PRAG : Professeur Agrégé
PRCE : Professeur certifié affecté dans l'enseignement
PU : Professeur des Universités
PU-PH : Professeur des Universités et Praticiens Hospitaliers
SyMMES : Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Energie et la Santé
TIMC-IMAG : Laboratoire Technique de l'Imagerie, de la Modélisation
UMR: Unité Mixte de Recherche
UVHCI: Unit of Virus Host Cell Interactions

Mise à jour le 06/09/2021 Sana HACHANI

Remerciements

Monsieur le Pr. Pierrick Bedouch,

Vous me faites l'honneur d'accepter de présider le jury de ma thèse. Je vous remercie de l'intérêt que vous portez à ce travail.

Madame Christine Demeillers,

Vous me faites l'honneur de faire partie du jury de ma thèse et de juger mon travail. Veuillez trouver ici le témoignage de mes remerciements les plus sincères.

Madame le Dr. Claire Chappuis,

Je suis honorée que tu aies accepté de faire partie du jury de ma thèse. Je suis heureuse de pouvoir compter sur ton expertise dans ce domaine.

Madame le Dr. Morgane Cessiecq et Monsieur le Dr. François Hallouard,

Je vous suis infiniment reconnaissante pour votre implication, votre accompagnement et la pertinence de vos remarques. Votre disponibilité et votre aide précieuse ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. De tout cœur, merci.

A mes parents toujours présents, merci pour votre soutien indéfectible et votre amour. Vous m'avez donné bien plus que ce que je n'aurais jamais pu espérer.

A mon frère, pour avoir fait rimer rire et agacement, pour avoir toujours détesté les endives au jambon autant que moi.

A ma sœur, pour tes jolies valeurs qui me rendent si fière, pour avoir toujours accepté la place du milieu dans la voiture.

A mes grands-parents qui, je l'espère, seront fiers. Merci pour tous ces moments précieux ensemble.

A Coraline, pour tous nos souvenirs, pour la force de cette amitié qui atténue la distance, pour tout ce qu'il nous reste à vivre ensemble. En souvenir de toutes ces fois où j'ai trébuché et où tu m'as promis des babouches (que j'attends toujours).

A Philippine, à toi qui sais tout de moi et qui m'aime malgré tout, pour nos aventures ici et ailleurs. En souvenir de tous les seaux qu'on a transporté sur notre tête, de tous les murs qu'on a construits et de tout le riz qu'on a mangé.

A Julien et Florian, pour nos jolies années partagées, pour notre amitié qui prend de la valeur avec le temps. En souvenir de toutes ces grasses matinées qu'on n'a jamais pu faire à cause de Florian.

A Lénaik, pour nos mésaventures et nos histoires à dormir debout, pour avoir su rebondir, pour ta bonne humeur et ton rire communicatif. En souvenir de la fois où on a presque failli faire du chameau dans le désert.

A Apolline, pour ton grain de folie, pour ta présence dans les bons moments et les moins bons, pour tous les légumes d'antan que j'ai failli apprendre à aimer. En souvenir de toutes ces séries qu'on ne finira jamais parce que tu t'es endormie avant le générique.

A Marine, pour nos petits mots sur le frigo et tes petites attentions qui mettent du baume au cœur. En souvenir de notre voisin qui ne ressemblait pas tant à celui de Taylor Swift.

A Élise, pour ton oreille attentive et pour toutes ces séances de sport qui passaient presque vite en ta compagnie. En souvenir de tous ces *wednesdays in english* que tu étais la seule à respecter.

A Géraldine, pour ta douceur et ta gentillesse, pour ta force que j'admire. En souvenir de toutes les fois où tu m'as dit « j'ai envie d'une grosse pinte » et qui sont finalement devenues nos plus beaux moments.

A Florine, pour tous nos rires, pour ta présence, toujours. En souvenir de tous ces films que tu as déjà vus (ah en fait non). En souvenir de la fois où on a cherché le manip radio pendant longtemps.

A Sacha, pour ton côté passionné qui me fascine et m'inspire, pour ton second degré que je ne comprends jamais du premier coup. Même si tu es jaloux de ma dent phosphorescente. Et même si le Revard n'a rien à voir avec la migration des habitants du Var (j'ai vérifié).

A Robin, pour ton talent à raconter les histoires et à me faire rire mieux que personne. Même si au début tu nous faisais un peu peur tout seul à attendre dans la cuisine de Saint Hélène. Même si j'ai failli devenir aveugle une fois à cause de toi. A Alison.

A Marie, pour avoir été ma +1 envers et contre tout. En souvenir de cette soirée où on était trop belles pour le VM et de toutes les autres VM qu'on a connu. En souvenir de toutes ces pasta alla vongole arrosées de spritz, tabernak.

A Louis, pour ta sagesse, pour m'avoir dit de ne jamais baisser les bras, pour tous ces projets qui nous font rêver. En souvenir de ce fou rire sur la plage en Martinique dans ce pantalon rose qui te va mieux qu'à moi.

A Théo le boss, pour m'avoir presque donné le goût de la randonnée (et presque l'envie de revendre mes skis). A Marie, le canari.

A Chados le guidos, pour m'avoir enseigné l'art de cuire le riz à sushis et pour avoir tenu le Liberto d'une main de maître.

A Noé, pour toutes nos discussions (et nos séries de shooters) sans fin (et sans soif), pour ta bienveillance et tes conseils.

A Joseph et ses gros jambons, pour m'avoir enseigné le ski de fond mieux que personne, à Bérengère pour sa recette blanquette qui me permettra peut-être un jour de trouver un mari, à Auguste même si, pour l'instant, il ne rigole pas à mes blagues.

A ma petite Léa, pour tous les « en route les croûtes », pour ton flow sur « la boulette ». A Clément, pour ta conduite sportive.

A ceux de Chambéry que je n'ai pas cité, pour ce premier semestre qui m'a donné envie de figer le temps : Ophélie, Momo, Adri, Marine, Marie Élise (et même Dany Dan's, merci pour la boite)

A Thibault, pour m'avoir laisser croire que je savais danser et pour avoir toujours eu la main si lourde sur le sodabi. Au Onze mondial.

A Margaux (Gomar), pour avoir été mon plus beau binôme. En souvenir de ce décollage intense et de ce prof d'aquagym qui donnait envie de se noyer. En souvenir des quelques phrases de cette thèse écrites sous les palmiers.

A Alexia et Benjamin, pour nos soirées tisanes et potins et pour toutes celles où Ben ne retrouvait plus ses lunettes (ni la sortie de l'internat).

Aux internes de pharmacie dont j'ai croisé le chemin, à celles qui sont maintenant assistantes. Aux externes qui m'ont fait grandir.

Aux équipes qui m'ont accueilli à Chambéry, Saint Etienne, Annecy, Grenoble pour leur investissement dans ma formation, pour leur accompagnement et leur gentillesse.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS 11

LISTE DES TABLEAUX 13

LISTE DES ABREVIATIONS 14

I) Introduction 17

II) Matériels et méthodes 18

III) Principales chirurgies génératrices de fumées 19

1) La laparotomie 19

1- Principe de la laparotomie 19

2- Instruments utilisés en laparotomie 19

2) La cœlioscopie 19

1- Principe de la cœlioscopie 19

2- Instruments utilisés en cœlioscopie 23

3- Avantages et inconvénients de la cœlioscopie par rapport à la laparotomie 25

3) Les énergies utilisées en laparotomie ou en cœlioscopie 28

IV) Les fumées chirurgicales : un risque multiforme 32

1) Composition des fumées chirurgicales 32

2) Généralités sur le risque lié aux fumées chirurgicales 33

3) Risque biologique 35

1- Human papillomavirus (HPV) 35

2- Autres virus 42

3- Cellules tumorales 47

4) Risque chimique et substances cancérigènes 48

5) Risque physique et particules fines 51

6) Altération de la visibilité et allongement du temps opératoire 52

7) Paramètres influant sur la composition des fumées chirurgicales 54

1- Source d'énergie et type d'instrument 54

2- Tissu traité 54

3- Caractéristiques de l'intervention 55

4- Proximité de la source d'émission 56

8) Effets sur la santé 56

9) Comparaison des différents types de fumées.....59

V) Mesures de prévention, protection des soignants et filtration des fumées chirurgicales 62

1) Généralités sur les différents types de filtres 64

2) Généralités sur les moyens de protection et prévention disponibles.....68

1- Ventilation générale 68

2- Port du masque.....72

3- Généralités sur les dispositifs de captage des fumées.....75

4- Information et prévention 77

3) Contexte juridique.....79

4) Recommandations spécifiques dans le contexte COVID 83

1- Existe-t-il un risque de transmission au cours de la chirurgie ?.....83

2- Mesures de précautions recommandées par les sociétés savantes lors des chirurgies réalisées dans le contexte de la pandémie de la COVID-19.....84

3- Efficacité des dispositifs de filtration des fumées dans le risque lié à la COVID 19 88

VI) Dispositifs de filtrations des fumées chirurgicales 89

1) Dispositifs permettant l'amélioration de la visibilité 90

2) Dispositifs de filtration des fumées sans équipement 93

1- Montage artisanal.....93

2- Solution avec aspiration murale 95

3- Solution sans aspiration murale.....97

3) Dispositifs de filtration des fumées branchés avec équipement (aspirateur).....99

VII) Discussion.....109

VIII) Conclusion.....118

IX) Bibliographie 120

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Vue en laparoscopie (à gauche) versus vue en laparotomie (à droite) (5) . 20

Figure 2 Technique de « Veress » (8) 21

Figure 3 Triangulation des trocarts (10) 22

Figure 4 Suivi en direct sur l'écran (10) 22

Figure 5 Les différentes parties du trocart (12) 24

Figure 6 Procédés de chirurgie haute fréquence (21) 29

Figure 7 Récapitulatif des modes de conduction en chirurgie haute fréquence (22) 29

Figure 8 Mode de fonctionnement du LASER (23)..... 30

Figure 9 Principales substances identifiées dans les fumées chirurgicales (25)..... 32

Figure 10 Synthèse des résultats des études sur la détection de l'ARN du SARS-CoV-2 dans des échantillons de sang et de selles de patients atteints de la COVID-19 (52) 47

Figure 11 Classification des substances CMR selon la réglementation européenne (67) 49

Figure 12 Tailles des particules selon l'instrumentation et trajet dans l'arbre pulmonaire (37) 51

Figure 13 Risques envisageables selon la composition des fumées chirurgicales (27) 57

Figure 14 Composition des différents types de fumée (79)..... 61

Figure 15 Mécanismes de filtration et efficacité du filtre (95) 65

Figure 16 Classification des filtres selon la norme NF EN 1822-1 (Janvier 2010) (97) 67

Figure 17 Tableau de classification selon la norme NF EN ISO 14644-1 (98)..... 70

Figure 18 Tableau de classification des filtres selon la norme EN 779 71
Figure 19 UltravisionTM® (Alesi Surgical)(124) 91
Figure 20 Comparaison de la visibilité avec et sans l'UltravisionTM® (125) 91
Figure 21 Taux d'élimination de la fumée avec UltravisionTM® (125) 92
Figure 22 Exemple de montage artisanal (versant aspiration) 94
Figure 23 Filtre Buffalo ® (exemple de son utilisation en laparotomie avec un bistouri électrique) (124) 96
Figure 24 Plumeport activ ® (124) 97
Figure 25 Endosafe® (Smices medical) (131) 98
Figure 26 Capacité d'absorption du système Endosafe® (130) 98
Figure 27 Lina Lapguard® (Kebomed) (132) 99
Figure 28 Visiclear ® (Idimed) (124) 100
Figure 29 Bistouris électriques compatibles avec le Visiclear ® (124) 100
Figure 30 Tubulure, activateur et piège à fluide utilisables avec le Visiclear ® (124) 101
Figure 31 Aspirateur IES 3® (Erbe) 101
Figure 32 Efficacité du filtre ULPA compris dans la capsule filtrante Erbe (135) 102
Figure 33 Composition de la cartouche filtrante du dispositif IES 3® (Erbe) (134) . 103
Figure 34 Airseal ® (AB Medica) 104
Figure 35 Pneumoclear ® (Stryker) (140) 107
Figure 36 Exemples de tubulures compatibles avec le Pneumoclear ® (140) 107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I Avantages et inconvénients de la cœlioscopie versus la laparotomie 28

Tableau II Tableau récapitulatif des différents systèmes d'évacuation des fumées 108

LISTE DES ABREVIATIONS

ACORN : *Australian College of Perioperative Nurses*

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

Am : Arrestance moyenne

APR : Appareils de Protection Respiratoire

ARN : Acide RiboNucléique

BOHS : *British Occupational Hygiene Society*

BPCO : Broncho Pneumopathie Chronique Obstructive

BPV : Virus du Papillome Bovin

BR : Bas Risque

BSGE : *British Society for Gynecological Endoscopy*

CIN : Néoplasies Intra épithéliales Cervicales

CINQ : Comité sur les Infections Nosocomiales du Québec

CLIN : Comité de Lutte contre les Infections Nosocomiales

CMR : Cancérogènes, Mutagènes, Reprotoxiques

CSA : Canadian Standards Association

DGS : Direction Générale de la Santé

DPO : Douleur Post Opératoire

EFB : Efficacité de Filtration Bactérienne

EHPAD : Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes

Em : Efficacité moyenne

EPA : *Efficient Particulate Air*

EPI : Équipement de Protection Individuelle

ERP : Établissements Recevant du Public

EVA : Échelle Visuelle Analogique

FDA : *Food and Drug Administration*

FFP : *Filtering Face Piece*

HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique

HEPA : *High Efficiency Particulate Air*

HF : Haute Fréquence

HPV : *Human PapillomaVirus*

HR : Haut Risque

IADE : Infirmier Anesthésiste Diplômé d'État

IBODE : Infirmiers de Bloc Opératoire Diplômés d'État

IC : Intervalle de Confiance

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

INSPQ : Institut National de Santé Publique du Québec

IST : Infection Sexuellement Transmissible

JAMA : *Journal of the American Medical Association*

LEEP : *Loop Electro Excision Procedure* (excisions électro chirurgicales à l'anse diathermique)

MPPS : *Minimum Particle Penetrating Size*

NIOSH : *National Institute for Occupational Safety and Health*

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OSHA : *Occupational Safety and Health Administration*

PIPAC : Chimiothérapie Intrapéritonéale Pressurisée par Aérosol

RCOG : Royal College of Obstetricians and Gynecologists

RT-PCR : Réaction de Polymérisation en Chaîne par Transcription Inverse

SAGES : *Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons*

SF2H : Société Française d'Hygiène Hospitalière

SRAS CoV 2 : Syndrome Respiratoire Aigu Sévère lié au CoronaVirus 2

ULPA : *Ultra Low Particulate Air*

VEL : Ventilation d'Évacuation Locale

VHB (ou HBV) : Virus de l'Hépatite B

VIH : Virus de l'Immunodéficience Humaine

WIP : *Werkgroep InfectiePreventi*

I) Introduction

Dans le contexte actuel de risque infectieux inédit, la problématique de transmission virale, tous virus confondus, revient sur le devant de la scène. L'émergence en 2020 de la pandémie mondiale liée au nouveau coronavirus, COVID-19, et la fréquence des formes graves ont notamment suscité des questionnements concernant les différents modes de transmission du virus.

En effet, des données de la littérature mettant en évidence la présence de virus infectants tels que le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) ou le virus du papillome humain (HPV) dans les fumées chirurgicales (1), se pose la question de la transmission du coronavirus par ce biais. Par ailleurs, la détection d'ARN viral dans les selles des patients infectés et l'éventualité d'une aérosolisation du virus au cours de la laparoscopie cristallisent cette menace de transmission à partir de l'abdomen (2).

Cette potentielle libération de particules infectieuses dans les fumées chirurgicales soulève ainsi des inquiétudes quant aux risques pour le personnel du bloc opératoire. La volonté de protéger ces professionnels contre le coronavirus a donc relancé la réflexion sur le traitement des fumées chirurgicales au bloc opératoire et la prévention des risques qu'elles impliquent de manière plus globale.

Cette thèse permet de donner dans un premier temps un aperçu de la littérature existante sur les risques probables et avérés liés aux fumées chirurgicales incluant les risques biologiques de transmission virale mais aussi les risques physico-chimiques auxquels sont exposés les professionnels au bloc opératoire. Ce travail a aussi pour vocation, en deuxième partie, de mettre l'accent sur la diversité des solutions existantes et de nous éclairer sur l'éventuel choix d'une ou plusieurs méthodes de prévention et de protection à mettre à disposition de ces professionnels.

II) Matériels et méthodes

Une revue de la littérature scientifique a été réalisée entre février 2021 et mars 2022 à l'aide de bases de données en ligne telles que PubMed (site de la *National Library of Medicine*), Science Direct ou HAL (hyper articles en ligne) et via des moteurs de recherche : Google et Google Scholar. Des sites officiels d'institutions faisant autorité tels que l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la Haute Autorité de Santé (HAS), l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) ou la Société Française d'Hygiène Hospitalière (SF2H) ont également été consultés.

Cette revue de la littérature a été complétée par les fiches techniques, modes d'emplois, brochures et plaquettes d'informations des dispositifs de traitement des fumées fournis par les fabricants et/ou fournisseurs.

La gestion de la bibliographie a été réalisée à l'aide du logiciel Zotero® (RRCHNM, États Unis, 2006).

III) Principales chirurgies génératrices de fumées

1) La laparotomie

1- Principe de la laparotomie

La laparotomie est un acte chirurgical consistant en l'ouverture de l'abdomen par une incision laissant le passage direct à d'autres actes chirurgicaux sur les organes abdominaux et pelviens. La laparotomie se nomme aussi opération à ventre ouvert (3). C'est la chirurgie historique ou conventionnelle. Le patient est incisé et les berges sont maintenues écartées afin de permettre au chirurgien d'accéder au site opératoire (4).

2- Instruments utilisés en laparotomie

Le chirurgien utilise, au cours de son intervention, différents types d'instruments et accessoires que sont, par exemple, les pinces, les ciseaux de clampage et les écarteurs. Il a, en chirurgie ouverte, une vision directe de la structure anatomique sur laquelle il intervient. En effet, en laparotomie, les instruments sont utilisés classiquement, sans passage à travers un trocart opérateur, levant ainsi la contrainte de conception qui existe en cœlioscopie.

2) La cœlioscopie

1- Principe de la cœlioscopie

La cœlioscopie (ou laparoscopie) est une technique de chirurgie mini invasive consistant à opérer dans la cavité abdominale sans réaliser d'ouverture pariétale large contrairement à la laparotomie.

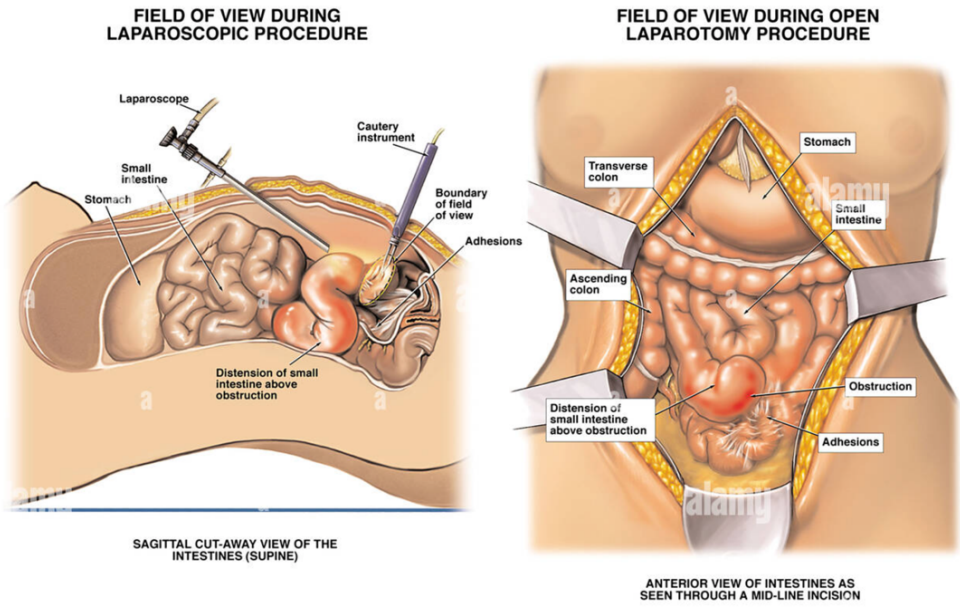


Figure 1 Vue en laparoscopie (à gauche) versus vue en laparotomie (à droite) (5)

Elle est réalisée grâce à plusieurs incisions dans l'abdomen qui permettent d'insérer une caméra et les instruments chirurgicaux. La vision du champ opératoire s'effectue sur un écran grâce à une optique fine (ou endoscope) passée à travers la paroi et reliée à une source de lumière et à une caméra. Il s'agit de la technique de référence pour un grand nombre d'interventions (4,6,7).

La cœlioscopie nécessite l'insufflation d'un gaz dans la cavité péritonéale afin de mettre en tension la paroi abdominale et de créer un espace opératoire appelé le pneumopéritoine.

Une opération sous cœlioscopie comporte donc plusieurs étapes dont la première correspond à la création de ce pneumopéritoine par insufflation de CO_2 et décollement de la paroi abdominale. Pour cela un premier trocart est inséré et relié à l'insufflateur via une tubulure d'insufflation. L'insufflateur régule et contrôle la pression abdominale.

L'introduction du premier trocart permettant l'insufflation peut se faire par l'utilisation de deux techniques différentes (choix opérateur-dépendant).

La technique dite de "Veress" est une méthode fermée consistant à insérer une aiguille de Veress (aussi appelée aiguille de Palmer). Cette aiguille a la particularité d'avoir une extrémité pointue qui se rétracte dès qu'elle a franchi le péritoine afin de ne pas blesser les tissus sous-jacents. Le premier trocart est alors inséré en aveugle.

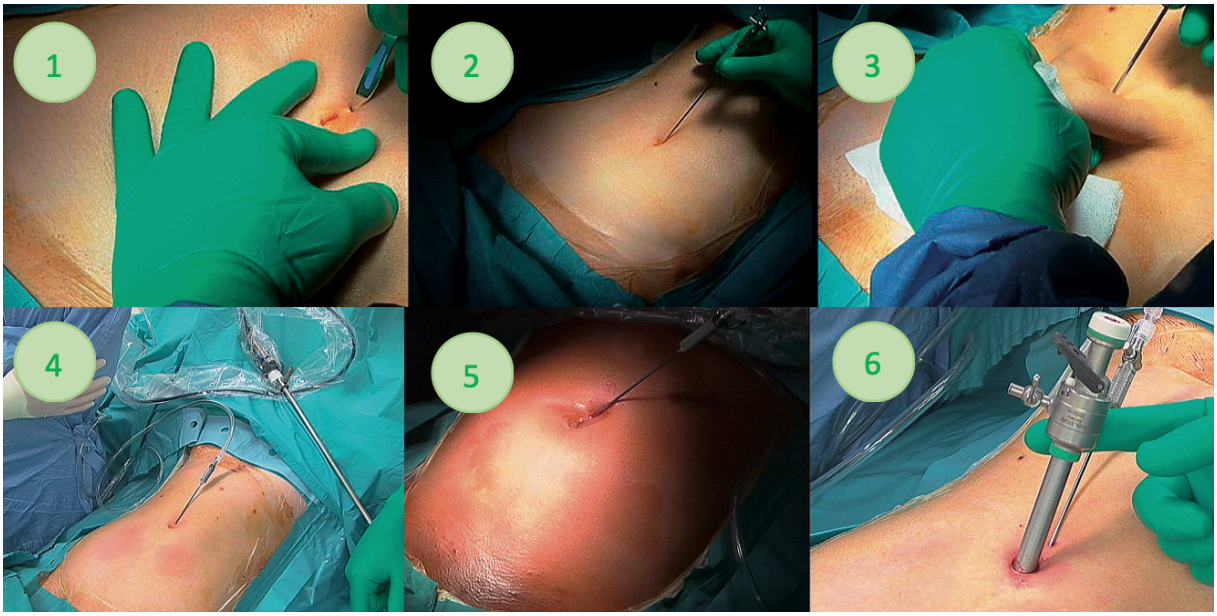


Figure 2 Technique de « Veress » (8)

1 - incision sous ombilicale ; 2 - positionnement de l'aiguille de Veress ; 3 - introduction de l'aiguille de Veress à 90° par rapport à la paroi ; 4 - branchement à l'insufflateur ; 5 - insufflation via l'aiguille de Veress et création du pneumopéritoine ; 6 - introduction à l'aveugle du premier trocart en position sous ombilicale

La deuxième technique ou technique de Hasson plus communément appelée « Open Coelio » nécessite de réaliser une mini incision péri ombilicale afin d'introduire un trocart sous contrôle visuel. L'étanchéité est assurée grâce au ballonnet présent sur le trocart (9).

Une fois le pneumopéritoine créé, un trocart optique est inséré, permettant l'introduction de l'optique vidéo (laparoscope). Sont ensuite mis en place les autres trocarts (trocarts opérateurs) afin d'introduire les instruments de chirurgie (en général 2 à 3 trocarts). A noter que les trocarts opérateurs doivent permettre à l'instrument d'atteindre le site opératoire avec le maximum d'angles d'attaque possible. Ceci est permis grâce à la triangulation des trocarts opérateurs avec le trocart porteur de l'optique et à la triangulation des trocarts opérateurs entre eux.

Figure 3 Triangulation des trocarts (10)

Lors de l'intervention, le chirurgien pourra alors manipuler les instruments à travers la paroi abdominale et suivre ses gestes sur l'écran en direct (11).

Figure 4 Suivi en direct sur l'écran (10)

En laparoscopie, l'insufflateur de pression de CO_2 conventionnel fonctionne en basculant entre l'insufflation de CO_2 pendant environ 3 secondes et le repos pendant 1 seconde pour mesurer la pression avant de réinsuffler l'abdomen pour maintenir la pression définie. Généralement, dans cette situation, des trocarts traditionnels avec des valves unidirectionnelles sont utilisés mais persiste le risque de fuite d'une petite quantité de gaz lors de l'échange d'instruments.

Dans le cas de l'utilisation d'appareils électro-chirurgicaux, il n'est pas rare qu'un robinet de trocart soit ventilé par intermittence pour libérer la fumée chirurgicale dans la pièce afin de maintenir un champ opératoire dégagé. De la même façon, à la fin de l'intervention, le pneumopéritoine sera exsufflé en ouvrant les robinets d'arrêt du trocart permettant la libération de ce gaz/fumée chirurgicale dans la pièce. L'utilisation de dispositifs d'évacuation des fumées pourrait, comme nous le verrons par la suite, permettre d'éviter ou de limiter le rejet des fumées du pneumopéritoine dans la pièce.

2- Instruments utilisés en cœlioscopie

En cœlioscopie, du fait de la contrainte de la paroi fermée, les gestes chirurgicaux sont réalisés à l'aide d'une instrumentation spécifique passée en transpariétale par des trocarts. Le trocart est donc dans ce cas un élément indispensable puisqu'il permet le passage des instruments à travers la paroi de l'abdomen.

Un trocart est composé de plusieurs parties :

- Le mandrin : il s'agit de l'embout permettant de traverser la paroi (avec ou sans lame).

- La chemise : elle correspond à la partie tubulaire par laquelle passe les instruments. Le choix de la taille des trocarts est conditionné par le diamètre des instruments utilisés.
- Le réducteur : il permet d'utiliser des instruments d'une taille inférieure à celle du trocart tout en maintenant l'étanchéité via la valve.
- +/- Le robinet d'exsufflation : il permet de maintenir le pneumopéritoine et d'évacuer les fumées.

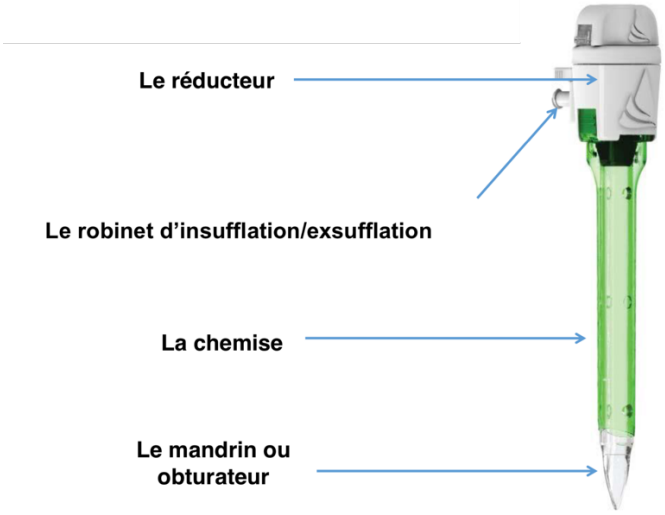


Figure 5 Les différentes parties du trocart (12)

Les instruments chirurgicaux utilisés sont variables : pinces à préhension, ciseaux courbes, porte-aiguille, instruments électro chirurgicaux, écarteurs, pinces à clip, agrafeuses… Ils sont conçus pour permettre d'atteindre le site opératoire par le biais des trocarts opérateurs et doivent servir les différentes fonctions utiles aux opérateurs : palpation, préhension, section, dissection, suture, destruction et hémostase. Ainsi, la longueur des instruments augmente drastiquement, par rapport à ceux dédiés à la chirurgie ouverte.

3- Avantages et inconvénients de la cœlioscopie par rapport à la laparotomie

La chirurgie coelioscopique présente de nombreux avantages parmi lesquels nous pouvons citer une diminution de l'intensité de la douleur postopératoire, des infections des plaies et de la durée du séjour à l'hôpital par rapport à la chirurgie ouverte (13).

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la chirurgie coelioscopique connaît depuis quelques années un essor important. Ses nombreux avantages et ses multiples indications en font la voie d'abord privilégiée en chirurgie au prix d'une courbe d'apprentissage longue et d'un environnement technologique complexe.

Comme mentionné ci-dessus, préférer la cœlioscopie à la laparotomie permettrait une réduction de la douleur postopératoire. En effet, une méta-analyse sur 11 études prospectives randomisées évaluant la douleur post opératoire (DPO) après appendicectomie montre que la laparoscopie diminue la DPO (selon l'échelle visuelle analogique EVA) comparativement à la laparotomie (14). Dans une étude rétrospective de splénectomies, la consommation de morphine est huit fois moindre après cœlioscopie comparée à la laparotomie (15). De la même façon, dans la revue de la littérature réalisée par Perniceni *et al.*, cinq études comparant la douleur post cholécystectomie par cœlioscopie ou laparotomie concluent toutes à une douleur significativement moindre après cœlioscopie en se référant à la consommation de morphine et à l'évaluation sur l'échelle visuelle. La différence moyenne est d'environ 20 mg de morphine consommée et de 20 mm sur l'EVA. Toutefois, il est important de signaler que la douleur après chirurgie cœlioscopique reste non négligeable puisqu'elle est observée dans 12 à 80 % des cas. De plus, ces études randomisées

se heurtent à plusieurs biais et notamment celui de la méthode d'évaluation de la douleur. Quoiqu'il en soit, ces résultats étaient toujours corrélés à une hospitalisation plus courte (16).

De plus, dans le cas d'une cholécystectomie par cœlioscopie, les complications pariétales sont moins fréquentes, la fonction ventilatoire post-opératoire est mieux préservée et la mortalité est aussi basse qu'en laparotomie (16).

Chez les patients traités par cœlioscopie, la reprise du transit est aussi plus précoce, le risque infectieux limité et celui d'occlusion intestinale ou d'éventration diminué. A ceci s'ajoute, un bénéfice esthétique non négligeable pour le patient (17). Au début des années 2000, l'étude de Velanovich montrait d'ailleurs une amélioration de la qualité de vie plus rapide après cœlioscopie (18). La qualité de vie était évaluée par le questionnaire *Medical Outcome Study Short Form 36* ou MOS SF36 qui est un score générique se basant sur des critères tels que la douleur physique, la santé perçue, les relations sociales etc...

Parmi les avantages de la laparoscopie, nous pouvons également citer la possibilité d'explorer des régions de la cavité abdominale très distantes, grâce à l'optique de diamètre réduit et de grande résolution qui favorise une visualisation au plus près des structures anatomiques. Il est également possible d'observer des parties d'une structure anatomique d'ordinaire non visibles en laparotomie, ou nécessitant une incision importante, puisque l'optique peut être positionnée dans les espaces exigus qui l'entourent. De plus, l'écran permet une visualisation simultanée par toute l'équipe du bloc opératoire et donc une anticipation tant au niveau de la survenue des risques que de la préparation du matériel. Néanmoins, la visualisation via un écran situé en face du chirurgien peut aussi être à l'origine d'un désalignement de l'axe œil-main-site

opératoire pouvant altérer l'ergonomie de l'intervention et entrainer davantage de fatigue pour le chirurgien (19).

Par ailleurs, dans une étude qui faisait état des coûts, la laparoscopie était associée à une réduction significative des coûts par rapport à la laparotomie (17). Une autre étude comparant la chirurgie cœlioscopique à la laparotomie pour la résection de tumeurs stromales gastro-intestinales montrait que la procédure par laparotomie était associée à des coûts plus élevés (+34 %). Les auteurs attribuent ceci à la réhabilitation plus rapide en post cœlioscopie, se traduisant par une diminution des coûts d'hospitalisation permettant d'amortir le surcoût de la procédure (20). Dans le contexte actuel de tension hospitalière, l'utilisation de la laparoscopie pourrait donc contribuer à réduire la durée de séjour par rapport à la chirurgie ouverte augmentant ainsi la disponibilité des lits.

Néanmoins, les complications directement en relation avec l'opération par voie coelioscopique sont rares mais possibles. Il ne faut donc pas les négliger. Certaines sont directement liées à la voie d'abord coelioscopique et aux variations anatomiques individuelles pas toujours prévisibles. Parmi ces dernières, peuvent être citées le risque de blessure d'un organe de voisinage (risques de lésions intra abdominales, de plaies viscérales et de plaies vasculaires) lors de la mise en place des trocarts, des troubles respiratoires ou cardiaques liés à une intolérance au gaz, des embolies gazeuses par diffusion du gaz dans la circulation veineuse ou encore des hernies ou incarcérations d'une anse intestinale dans un orifice de trocart.

Tableau I Avantages et inconvénients de la cœlioscopie versus la laparotomie

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
- Diminution de la DPO - Diminution de la durée d'hospitalisation - Diminution du risque infectieux - Reprise précoce du transit - Diminution du risque de complications - Bénéfice esthétique (réduction des cicatrices) - Amélioration de la qualité de vie - Diminution des coûts - Caractère moins invasif - Visualisation au plus près des structures anatomiques	- Risque de blessure d'un organe de voisinage - Intolérance au gaz - Hernies ou incarcérations d'une anse intestinale - Environnement technologique complexe - Apprentissage long - Désalignement de l'axe œil-main-site opératoire - Fatigue du chirurgien

3) Les énergies utilisées en laparotomie ou en cœlioscopie

Au bloc opératoire, différentes énergies sont utilisées et notamment l'électrochirurgie, le laser ou les ultrasons.

L'électrochirurgie, aussi appelée chirurgie à haute fréquence (HF), chirurgie par radiofréquence ou diathermie, est le procédé le plus employé en chirurgie (utilisable en laparotomie et en cœlioscopie). Elle consiste à appliquer une énergie électrique à haute fréquence sur des tissus biologiques pour couper, coaguler, dévitaliser des tissus ou souder par thermo fusion. Nous distinguons les instruments monopolaires et bipolaires.

La technique monopolaire consiste à faire circuler du courant HF en circuit fermé : de l'appareil à l'instrument, à travers le corps du patient jusqu'à l'électrode neutre, et de là jusqu'à l'appareil. L'intensité du courant est la même à tous les points du circuit. Pour la technique bipolaire, le courant passe uniquement dans la zone de tissu délimitée qui se trouve entre les deux pôles (deux électrodes actives) et il ne traverse pas le corps du patient (21).

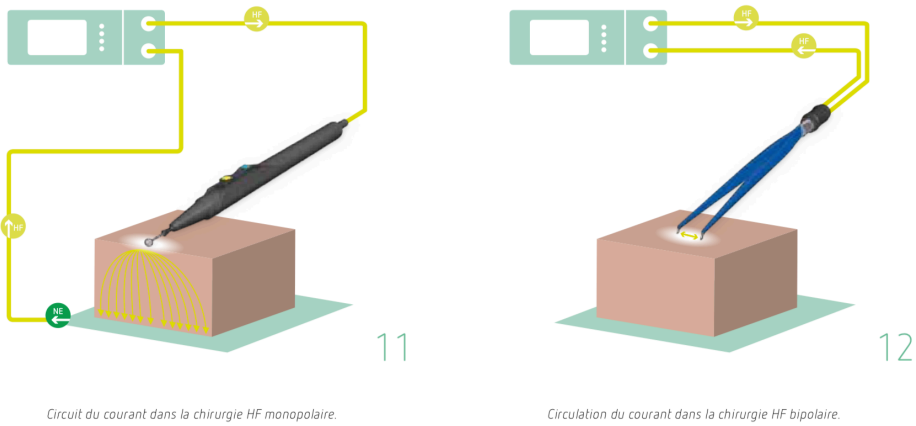


Figure 6 Procédés de chirurgie haute fréquence (21)

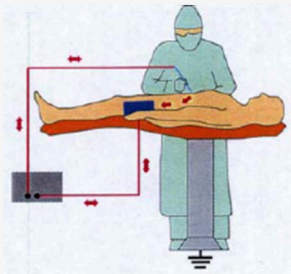
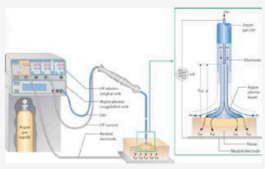
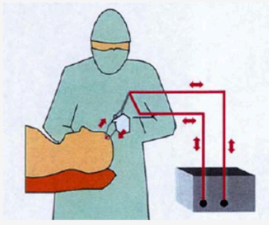
Modes de conduction	**MONOPOLAIRE**		**BIPOLAIRE**
Circuits	Le courant électrique sort par l'**électrode active**, située au niveau du site chirurgical, traverse le **corps du patient** puis, retourne au **générateur** par l'intermédiaire d'une **électrode neutre** (=plaque de retour).		Principe identique mais les **électrodes active et neutre sont intégrées dans un même instrument**. Le courant ne circule que dans la zone tissulaire située entre les 2 électrodes.
Illustrations	**BISTOURI MONOPOLAIRE**	**COAGULATION PAR PLASMA D'ARGON**	
		Ionisation de l'argon à la sortie du cathéter par activation de l'électrode, créant un plasma se dirigeant vers la lésion et conduisant le courant sous forme d'arc électrique. 	
Effets thermiques	Coupe pure ou hémostasée Coagulation douce, forcée ou par étincelage	Coagulation	Coagulation douce ou forcée Coupe bipolaire (peu efficace)

Figure 7 Récapitulatif des modes de conduction en chirurgie haute fréquence (22)

Le L.A.S.E.R (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) utilise un faisceau de photons amplifié et focalisé. Il permet de couper ou coaguler selon le même principe biologique que l'électrochirurgie : le fluide cellulaire est chauffé de manière intensive, ce qui amène la membrane cellulaire à exploser (section) ou à se déshydrater (coagulation), créant des débris sous forme de fumée. Nous distinguons un risque variable selon la nature du laser, sa puissance énergétique et son mode d'utilisation (pulsé ou continu). En Europe, ils sont d'ailleurs classés en 4 classes selon leurs effets nocifs sur l'homme. Les lasers médicaux correspondent dans la majorité des cas à la classe 4 (très dangereux pour les yeux et dangereux pour la peau).

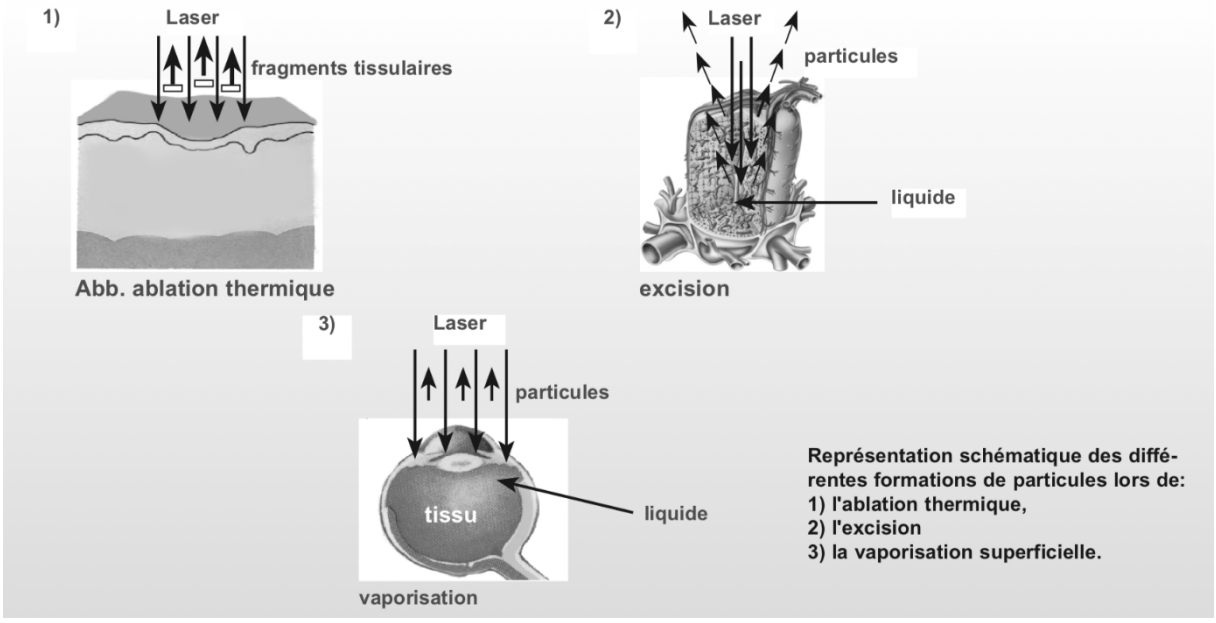


Figure 8 Mode de fonctionnement du LASER (23)

Le développement des bistouris à ultrasons a été amené par le besoin d'une alternative à l'électrochirurgie afin d'améliorer l'efficacité de la dissection cœlioscopique et réduire la morbidité due aux lésions thermiques collatérales. Les bistouris à ultrasons transforment l'électricité en vibrations ultrasonores à haute fréquence (environ 55 kHz) qui seront transmises à la pince située à l'extrémité de l'instrument. Ainsi, à la différence de l'électrochirurgie, l'électricité ne traverse jamais le corps du patient. C'est l'énergie mécanique produite par les vibrations ultrasonores du dispositif qui va entraîner le processus simultané de coupe et de coagulation.

Au contraire de la chirurgie à l'acier froid, les dispositifs énergétiques (électrochirurgie, ultrasons, L.A.S.E.R.) sont connus pour produire de la fumée. Celle-ci provient de la combustion de tissus. Elle se forme sous l'effet de la chaleur d'une source d'énergie lorsque des parties de cellules et de tissus sont volatilisés (4).

IV) Les fumées chirurgicales : un risque multiforme

1) Composition des fumées chirurgicales

Les fumées chirurgicales constituées sous l'effet de la chaleur contiennent des substances diverses (24). La vapeur d'eau en est le composant principal. Elle peut représenter jusqu'à 95% de la fumée émise et sert de véhicule aux autres composants. Par ailleurs, nous retrouvons de nombreux produits organiques issus de la pyrolyse et notamment des hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène), de l'acide cyanhydrique et de l'aldéhyde formique …

Acetonitrile	Furfural (aldehyde)
Acetylene	Hexadecanoic acid
Acroloin	Hydrogen cyanide
Acrylonitrile	Indole (amine)
Alkyl benzene	Isobutene
Benzaldehyde	Methane
Benzene	3-Methyl butenal (aldehyde)
Benzonitrile	6-Methyl indole (amine)
Butadiene	4-Methyl phenol
Butene	2-Methyl propanol (aldehyde)
3-Butenenitrile	Methyl pyrazine
Carbon monoxide	Phenol
Creosol	Propene
1-Decene (hydrocarbon)	2-Propylene nitrile
2,3-Dihydro indene (hydrocarbon)	Pyridine
Ethane	Pyrrole (amine)
Ethene	Styrene
Ethylene	Toluene (hydrocarbon)
Ethyl benzene	1-Undecene (hydrocarbon)
Ethynyl benzene	Xylene
Formaldehyde	

Figure 9 Principales substances identifiées dans les fumées chirurgicales (25)

Parmi les composants, nous retrouvons aussi des polluants inorganiques provoquant des irritations des voies respiratoires : oxydes de carbone, de soufre et d'azote, ammoniac (24).

Enfin, a été mise en évidence la présence de polluants biologiques tels que des cellules intactes, des fragments de cellules, des cellules sanguines, fragments d'ADN viral (de virus tels que le VIH, l'HBV, l'HPV). A noter que 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 (24–26).

La taille des particules formées varie entre 200nm et 10µm. Le diamètre moyen des particules dépend de la nature de l'énergie utilisée sur les tissus. Selon Alp *et al*., les diamètres suivants sont retrouvés (27) :

- Électrocoagulation : <0,1µm
- Laser : 0.3µm
- Scalpel à ultrasons : 0.35 à 6.5µm

2) <u>Généralités sur le risque lié aux fumées chirurgicales</u>

La notion de dangerosité des fumées chirurgicales apparait dans les années 90 aux États Unis (28). En France, les premières prises de conscience se font dans les années 2000. En 2004, la Société Française d'Hygiène Hospitalière (SF2H) émet des recommandations sur la protection contre les effets des fumées chirurgicales et en 2011, le premier document relatif aux fumées chirurgicales destiné aux spécialistes de la sécurité du travail est publié (1,24).

Il existe relativement peu de données sur l'impact réel, en pratique, de ces fumées pour le personnel exposé. En effet, de nombreux auteurs déplorent l'insuffisance de connaissances à ce sujet et l'absence d'étude épidémiologique de grande ampleur sur les dangers pour la santé des opérateurs (24). En 2007, Ulmer *et al.* estiment d'ailleurs

que le lien spécifique entre l'exposition aux fumées et les effets néfastes pour la santé n'est, pour l'heure, pas encore établi (29).

Depuis un certain nombre d'années, les auteurs s'attachent à décrire et comprendre les risques et effets liés à l'exposition aux fumées chirurgicales. Néanmoins, les données retrouvées dans la littérature divergent.

En 1976, Gates *et al.* mettent en place une étude prospective sur 121 700 infirmières. Ils concluent alors sur l'absence de relation significative entre la durée d'exposition et la survenue de carcinomes bronchiques et ne retrouvent même pas de tendance allant dans le sens d'une relation dose-effet dans les groupes les plus exposés (30).

En 2001, une enquête par questionnaire du *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) recense 43.7% de participants décrivant au moins un symptôme qu'ils mettent en relation avec l'exposition à des fumées en salle d'opération dans les 4 semaines précédentes. Par ailleurs, 58.3% déclarent une gêne olfactive liée à la présence des fumées chirurgicales (31).

Pourtant, en 2004, Scott *et al.* réalisent une évaluation quantitative des risques pour la santé du personnel et concluent à un niveau d'exposition ne nécessitant pas la mise en place systématique de moyens de captage local des fumées ni de moyen de protection individuel complémentaire (32).

Ainsi, si, comme nous venons de le voir, certaines études apportent des conclusions rassurantes ne mettant pas en avant de lien entre fumées et altération de l'état de santé, d'autres en dressent un tout autre tableau et décrivent un risque multiforme non négligeable.

3) Risque biologique

La transmission virale lors d'interventions chirurgicales est un risque potentiel pour le personnel du bloc opératoire et en particulier dans le contexte pandémique actuel. En effet, l'ADN viral peut être aérosolisé que ce soit pendant les procédures chirurgicales ouvertes ou laparoscopiques. Il n'existe d'ailleurs actuellement aucune preuve d'un risque moindre dans l'approche mini-invasive en comparaison à la laparotomie (17).

Parmi ces risques de transmission virale, celui lié au papillomavirus reste le plus documenté et le plus décrit dans la littérature.

1- Human papillomavirus (HPV)

a) Physiopathologie de l'HPV : propriétés, pathologies, transmission

Les papillomavirus, appelés *aussi Human Papillomavirus* (HPV) sont une vaste famille de virus à ADN de 55nm de diamètre, non enveloppés, à tropisme épithélial. Nous distinguons les papillomavirus en fonction de leur tropisme (cutané ou muqueux) et de leur oncogénicité (papillomavirus dits à haut risque (HPV HR) dont les lésions ont un risque élevé d'évolution vers un cancer ou à bas risque (HPV BR) entraînant des lésions bénignes) (33).

La transmission des papillomavirus se fait principalement par contact direct de peau à peau ou de muqueuse à muqueuse bien que la transmission par les mains, le linge ou les surfaces contaminées soit également possible, facilitée par sa forte résistance dans le milieu extérieur. L'infection à papillomavirus est d'ailleurs considérée comme l'infection sexuellement transmissible (IST) la plus fréquente. Il est

à noter que, du fait d'un mécanisme de transmission identique, des infections simultanées ou successives par plusieurs espèces d'HPV sont possibles (33–35).

Parmi les HPV BR, nous retrouvons notamment HPV 6 et 11, agents étiologiques des verrues génitales bénignes (condylomes acuminés) et de la papillomatose respiratoire, ainsi que des HPV à tropisme cutané comme HPV2, responsable des verrues plantaires (33–35).

Parmi les HPV-HR les plus fréquents, HPV 16 et 18 sont à l'origine de 70 à 90% des cancers du col de l'utérus selon les pays et de plus de 60% des néoplasies intra épithéliales cervicales de grade 3 (CIN) (33–35).

b) Études sur le risque HPV lié aux fumées et cas cliniques

L'arsenal thérapeutique pour la prise en charge des lésions virales liées à l'HPV comprend le traitement par laser. Lors du traitement laser, les tissus sont échauffés et volatilisés. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence la présence d'ADN d'HPV dans la fumée chirurgicale émise lors du traitement au laser des lésions à papillomavirus.

En 1988, Garden a montré la présence d'ADN de virus du papillome bovin (BPV) et d'HPV dans la fumée de laser, sans pouvoir établir que cet ADN restait infectant. Il a alors complété cette étude en inoculant à trois moutons la fumée recueillie lors de l'excision de lésions de condylome bovin par laser. Sur les trois animaux, deux ont présenté une tumeur caractéristique au point d'inoculation (36).

Ainsi, l'expérimentation animale a permis de montrer que l'ADN de papillomavirus bovin est retrouvé dans les fumées de fibropapillomes bovins traités au laser sous forme de virions et garde un potentiel infectieux. Ces virions sont des particules virales complètes capables de survivre et d'infecter une cellule. Comprenant

l'ADN mais aussi la capside du virus (reconnue par des récepteurs à la surface des cellules), les virions représentent, en théorie, un risque d'infection plus élevé que l'ADN nu (33).

Si Garden *et al*. ont isolé de l'ADN d'HPV dans la fumée chirurgicale issue du traitement par laser de verrues à HPV (36), se pose alors la question, pour l'homme, du risque infectieux lié à ces fumées.

L'usage de plus en plus répandu de l'électrocautérisation et du traitement laser ces dernières années entraîne une exposition croissante des soignants aux fumées chirurgicales. *L'Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) estime d'ailleurs que chaque année, un demi-million de travailleurs sont exposés aux fumées chirurgicales, en faisant un problème de santé publique (37). Une augmentation de la prévalence d'infections à HPV ou de maladies induites par HPV chez le personnel de bloc opératoire après exposition aux fumées n'a pourtant pas été démontrée.

Une revue systématique de la littérature menée en 2019 par Andrex Fow-Lewis *et al.* retrouvent un total de 21 articles traitant de la présence d'HPV dans les fumées chirurgicales et de la prévalence des cas de contaminations et de maladies liées à HPV après exposition du personnel de bloc opératoire à des procédures générant des fumées chirurgicales (38).

- Sur 12 études mesurant directement l'ADN HPV dans les fumées chirurgicales, de l'ADN a été détecté pour 10 d'entre elles et correspondait au sous type d'HPV de la lésion traitée.
- Aucune des études n'a permis de démontrer que les fumées contenaient des agents infectieux métaboliquement actifs.

- 2 études sur les 3 menées ont montré la présence d'ADN HPV dans l'environnement après ablation laser de lésions HPV (mais l'HPV n'a pas été typé).
- 5 études ont été réalisées afin de déterminer si une association entre la contamination par HPV du personnel médical et l'exposition aux fumées chirurgical existait : 2 études n'ont pas retrouvées la présence d'ADN HPV dans les échantillons prélevés chez les opérateurs, 1 étude a retrouvé de l'ADN HPV sur les échantillons prélevés en post opératoire sur les gants des opérateurs mais pas au niveau de leur muqueuse orale et 2 études ont permis la détection d'ADN HPV dans les échantillons nasaux des opérateurs en post opératoire.

  Au cours de la dernière étude (la plus récente) réalisée de 2015 à 2016, Zhou *et al.* ont cherché à savoir si l'ADN de papillomavirus retrouvé dans les fumées pouvait persister dans le nasopharynx des chirurgiens et conduire à une infection symptomatique. Sur 134 chirurgiens exposés aux fumées chirurgicales aux cours d'interventions sur des lésions à HPV et portant des masques chirurgicaux classiques, deux (1.5%) ont présenté des prélèvements nasopharyngés positifs à HPV. Toutefois, il n'a pas été retrouvé de persistance au-delà de 6 mois, ni de développement de maladies à HPV dans les 35 à 43 mois suivants (39).

- 3 études ont tenté d'établir la prévalence des maladies à HPV chez les opérateurs exposés aux fumées chirurgicales :
  - Lobraico *et al.* ont conduit une étude basée sur des questionnaires destinés aux utilisateurs des lasers. Sur 824 participants, 26 ont rapporté des lésions dont 4 sont histologiquement compatibles avec une contamination HPV. Parmi les 26 lésions, 23% étaient rapportées par

des soignants utilisant le laser depuis moins de 5 ans et 77% par des soignants l'utilisant depuis plus de 5 ans (40).

- Dans l'étude de Gloster et Roenigk, nous ne retrouvons pas de différence significative de prévalence de verrues entre les personnes exposées aux fumées et le reste de la population mais néanmoins nous retrouvons une plus forte prévalence de verrues nasopharyngées chez les utilisateurs de lasers par rapport aux autres patients. Aucun lien n'a été retrouvé entre la durée d'exposition et la prévalence des verrues (41).
- L'étude de Kofoed *et al.* est la plus récente : elle montre que le taux de positivité à l'ADN HPV est significativement plus élevé chez les sujets utilisant le laser depuis plus de 5 ans (42).

Par ailleurs, dans la littérature, plusieurs cas d'infections à papillomavirus chez des soignants exposés à la fumée laser ont aussi été décrits (cases report) :

- En 1991 à Oslo, un chirurgien viscéral de 44 ans a développé des lésions laryngées multiples dues à HPV de type 6 et 11 suite au traitement de lésions ano-génitales à HPV. Les auteurs déplorent l'absence de système d'aspiration à la source et l'utilisation de masques inappropriés (33,43,44).
- En 2003 en Allemagne, une infirmière en gynécologie de 28 ans travaillant au bloc dans le cadre d'exérèses laser de condylomes ano génitaux a été sujette à une papillomatose laryngée. Elle ne portait pas de protection respiratoire et la salle ne disposait pas de dispositif de captage adéquat (33,44).
- Un carcinome amygdalien à HPV 16 a été diagnostiqué chez un gynécologue de 53 ans ayant pratiqué au cours de ses 20 ans de carrières plus de 3000

ablations lasers et excisions électro chirurgicales à l'anse diathermique (LEEP) sur des dysplasies du col et lésions vaginales (44).

- De la même façon, un cancer de la base de la langue à HPV16 a été retrouvé chez un gynécologue de 62 ans ayant pratiqué pendant 30 ans des ablations laser et LEEP (44).

Pour ces cas, le lien de causalité est difficile à apprécier car le virus peut rester à l'état latent dans l'organisme pendant plusieurs années après la contamination. Cependant, la localisation laryngée des lésions oriente vers une contamination possible par inhalation des fumées laser contenant des particules infectantes de HPV.

c) <u>Facteurs de risque</u>

Les auteurs s'accordent donc à décrire un risque dépendant de plusieurs facteurs :

- Du type d'HPV : à bas risque ou à haut risque (33)
- De la nature de l'exposition : charge virale élevée ou non, quantité d'ADN sous forme de virions (33)
- De la spécialité médicale et du type de lésions : en effet il existe des lésions plus ou moins à risques. Des études suggèrent qu'il y aurait potentiellement plus de virions libérés lors du traitement de lésions génitales bénignes. D'autre part, les lésions précancéreuses ou cancéreuses seraient peu contagieuses du fait de l'intégration des virus au génome des cellules infectées et de la faible production virale en surface des cellules (33).
    - Concernant les lésions génitales à HPV 6 et 11 : de grandes quantités de virions sont retrouvées dans les verrues génitales en phase proliférative capables d'infecter la muqueuse des voies respiratoires.

    - Concernant les lésions laryngées : elles seraient moins à risque car peu de virus est retrouvé dans ces lésions et la masse de tissu à traiter est moins importante.
    - Concernant les lésions cutanées à HPV 1 : ceux sont les lésions ayant la plus haute concentration virale mais HPV1 ne se développe pas au niveau des muqueuses respiratoires.
    - Concernant les lésions cutanées à HPV2 : de la même façon HPV2 ne se développe pas au niveau des muqueuses respiratoires. De plus, on retrouve une plus basse concentration en virions que pour HPV1.
- De la durée d'exposition (33)
- De la technique d'ablation utilisée : l'électrochirurgie entraîne moins de destruction tissulaire que la chirurgie laser mais libère plus de cellules intactes contenant de l'ADN viral et avec un plus grand potentiel infectieux (33).
- Des réglages du laser : à faible puissance la présence de virus viables dans les fumées est plus probable. De plus, le temps de contact nécessaire étant plus long, la durée d'exposition est majorée. Il est nécessaire d'utiliser le laser à une puissance optimisée pour limiter cette exposition (33).

L'étude de Zhou *et al.* a aussi permis de montrer que le taux de positivité à HPV dans les fumées est directement corrélé à la distance à laquelle est placé le dispositif d'aspiration par rapport au site chirurgical. Plus cette distance augmente, plus nous retrouvons de l'ADN d'HPV. En effet, ces particules d'ADN peuvent circuler à des vitesses élevées et sur des distances pouvant aller jusqu'à 2 m du champ opératoire (39).

2- Autres virus

a) Virus de l'immunodéficience humaine (VIH)

Le VIH est un virus de la famille des rétrovirus d'un diamètre d'environ 100 à 110 nm (45).

Principalement transmis par rapports sexuels, voie percutanée et exposition périnatale, Weiss *et al.* ont aussi montré en 1988 la possibilité de survenue de contaminations par le VIH chez le personnel de bloc au cours de procédures entraînant de fortes aérosolisations de matériel contenant des VIH infectants (46).

Une étude *in vitro* a été menée en 1991 à New York et a montré la présence d'ADN proviral du VIH dans les fumées des lasers CO_2. Toutefois, l'absence de détection d'ADN pro viral au-delà de 28 jours suggérait que l'action du laser pouvait potentiellement altérer l'intégrité du VIH impactant ainsi sa réplication au long terme (47).

Au cours d'un essai *in vitro*, Johnson a inoculé du VIH dans des cultures cellulaires qu'il a soumis 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. Bien que ces expériences montrent que le VIH conserve son caractère infectieux dans les aérosols générés de certaines manières, elles ne quantifient pas le risque de transmission du VIH au personnel par de tels aérosols générés dans la salle d'opération puisque celui-ci est influencé par un certain nombre d'autres paramètres (48).

O. Rutschmann, dans un rapport intitulé « VIH et chirurgie », nous parle du risque global de contamination (toutes voies confondues) pour les chirurgiens. Pour l'ensemble d'une carrière de chirurgien dans un hôpital à prévalence élevée d'infection au VIH, ce risque théorique pourrait s'élever à plus de 5%. Nous n'avons pas retrouvé ce taux de contamination dans des études épidémiologiques. Le risque de transmission du VIH à un sujet exposé dépend du mode d'exposition et de l'inoculum. La très grande majorité des contaminations faisaient suite à une exposition percutanée, plus rarement suite à une exposition muqueuse. A ce jour, aucun cas n'a été décrit par contact avec une peau saine ou par aérosols (49).

b) Virus de l'hépatite B (VHB)

Le virus de l'hépatite B (VHB), virus enveloppé de 42 nm qui appartient à la famille des Hepadnavirus, peut survivre 7 jours dans le sang et ce, même à des conditions acides ou de haute température (50,51).

L'hypothèse selon laquelle il pouvait être présent dans les fumées chirurgicales avait été émise mais, avant 2014, le VHB n'avait encore jamais été détecté dans une forme aérosolisée. L'étude observationnelle de Kwak *et al.* réalisée entre octobre 2014 et février 2015 en Corée portait sur la détection du virus de l'hépatite B dans les fumées chirurgicales lors d'une intervention par laparoscopie ou par robot chirurgical d'une durée de plus d'une heure chez 11 patients positifs à l'antigène de surface de l'hépatite B en préopératoire. L'ADN du virus a été isolé dans la fumée chirurgicale recueillie dans 10 des 11 cas. Il s'agit de la première étude rapportant l'isolement du VHB dans les fumées chirurgicales laparoscopiques. Les auteurs ont conclu que ces données préliminaires soulevaient la possibilité d'une transmission aérienne du virus de l'hépatite B (51,52).

c) *COVID 19*

Le virus SRAS CoV 2 (syndrome respiratoire aigu sévère lié au coronavirus 2) est un virus à ARN mesurant 0,06 à 0,14µm. Ce virus, responsable de la pandémie de la COVID 19, reste infectieux 2 à 3h dans l'air et jusqu'à 9 jours sur les surfaces lisses non poreuses (53).

À l'heure où la pandémie de Covid-19 continue de se propager à travers le monde, les connaissances sur ses modes de transmission sont fondamentales pour adapter les mesures de prévention et de protection sanitaires. Plusieurs études ont évalué la présence d'ARN viral détecté par RT PCR dans des échantillons cliniques de nature différente, issus des voies respiratoires supérieures (nasopharynx, salive) et inférieures (crachats, liquide broncho-alvéolaire, biopsie bronchique).

Selon l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), le SARS-CoV-2 se transmet entre les personnes par les gouttelettes (postillons) émises lors de la toux, les éternuements ou la parole par un sujet infecté et qui peuvent atteindre la bouche, le nez ou les yeux d'une personne à proximité immédiate (1 à 2 m) et être inhalées. La quantité de gouttelettes émises est variable selon les personnes et les circonstances (effort physique, chant…). Les contacts étroits avec une personne infectée sont considérés comme le principal mode de transmission de la maladie (54).

Néanmoins, les plus petites gouttelettes peuvent rester en suspension dans l'air plus longtemps et être retrouvées à une distance plus importante. Plusieurs épisodes de transmission survenus dans des espaces clos ont permis d'évoquer la possibilité d'une transmission par aérosols possiblement infectieux accumulés dans un local. En effet, l'ARN viral du SARS-CoV-2 a été détecté dans des prélèvements d'air de locaux

abritant des patients infectés par le virus soulignant ainsi la persistance au minimum du génome du virus voire du virus entier sous forme de fines particules en suspension dans l'air. L'expérimentation de Fears *et al.* suggère que l'infectiosité du SARS-CoV2 peut se maintenir plusieurs heures dans des aérosols en milieu clos (55). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a d'ailleurs reconnu qu'un tel mode de transmission ne peut être exclu, notamment dans certains endroits fermés (56).

Dans son avis du 24 avril 2020 concernant les mesures d'aération et les systèmes de ventilation/climatisation, le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) recommandait un renforcement de l'aération des locaux et de la maintenance des systèmes de ventilation/climatisation (en particulier de leurs filtres) dans les établissements recevant du public (ERP), hôpitaux et établissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD). Le 7 juillet 2020, la Direction générale de la santé (DGS) saisit l'HCSP au sujet de l'actualisation scientifique des données portant sur la part de la transmission du virus SARS-CoV-2 par aérosols et la mise à jour éventuelle des préconisations sanitaires. Afin de répondre à cette saisine, le HCSP réactive le groupe de travail « Grippe, coronavirus, infections respiratoires émergentes » composé d'experts afin d'étudier la mise en œuvre d'éventuelles mesures supplémentaires en tenant compte des différents modes de transmission du virus. Ce groupe de travail, en s'appuyant sur une analyse des données, des publications et de la documentation disponible ainsi que sur la réalisation d'auditions d'experts représentants de sociétés savantes, a rendu un avis le 23 juillet 2020 : « Une transmission aéroportée du virus SARS-CoV-2 doit être envisagée dans les espaces clos, notamment mal aérés et insuffisamment ventilés, et dans des rassemblements en extérieur » (56).

Le Comité sur les Infections Nosocomiales du Québec (CINQ) de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) a quant à lui émis un avis sur la réalisation des chirurgies dans le contexte de la pandémie de COVID-19. Celui-ci comporte des directives pour les chirurgies à haut risque de générer des aérosols infectieux de COVID-19 (57). Parmi ces chirurgies à risque sont citées les chirurgies laparoscopiques nécessitant la création d'un pneumopéritoine artificiel et, dans la majorité des cas, l'utilisation de l'électrocautérisation. Le rapport émis par le CINQ reconnait ces fumées comme une éventuelle « source d'exposition des professionnels de la santé à des aérosols potentiellement infectieux ». Cependant, aucune donnée de contamination par aérosolisation du coronavirus lors de laparoscopies n'a été rapportée jusqu'à présent, en faisant un risque purement théorique.

Par ailleurs, pour information, une transmission fécale/orale serait également possible, tout comme elle l'était pour les précédents coronavirus, SARS-CoV et MERS-CoV, qui donnaient alors lieu à des symptômes digestifs. Plusieurs études ont permis la détection de la présence d'ARN du virus SARS-CoV-2 dans des échantillons de sang ou de selles (58–60).

Auteur, année, pays [ref]	Type d'études/ population ciblée/ test diagnostique	n patients	n échantillons de sang / selles	Nombre d'échantillons positifs à l'ARN SARS-CoV-2, n (%)
Wang, 2020 [19] Chine	Étude observationnelle Patients atteints de la COVID-19 avec signes cliniques, radiologiques/ confirmation par test diagnostique (RT-PRC)	205	307 /153	Sang: 3 (1 %) Selles : 44 (29 %) Virus vivant détecté dans 2 échantillons de selles
Chen, 2020, [18] Chine	Étude rétrospective Patients atteints de la COVID-19 avec manifestation clinique (pneumonie) modérée à sévère/ confirmation par test diagnostique (RT-PCR)	57	57 /28	Sang: 6 (10,5 %) • 6 cas sévères • 0 cas modéré Selles : 11 (39 %) • 8 cas sévères • 3 cas modérés
Zhang, 2020, [20] Chine	Étude observationnelle Patients atteints de la COVID-19 après traitement médical / confirmation par tests diagnostiques (RT-PCR et test ELISA)	15	15	Sang: 6 (40 %) • 2 cas sévères Sérum : 4 (40 %) (4 des 6 patients avec un résultat positif dans le sang) Selles: 4 (27 %) • aucun cas sévères

ARN : acide ribonucléïque, RT-PC : *reverse transcriptional polymerase chain reaction*, ELISA : *Enzyme Linked ImmunoSorbent Assay*

Figure 10 Synthèse des résultats des études sur la détection de l'ARN du SARS-CoV-2 dans des échantillons de sang et de selles de patients atteints de la COVID-19 (52)

3- Cellules tumorales

La présence de cellules tumorales dans les fumées a été rapportée par certains auteurs mais des interrogations subsistent concernant leur viabilité. En 1998, une grande quantité de débris cellulaires a été retrouvée dans le panache qu'il soit produit par un instrument à ultrasons ou un instrument d'électrochirurgie lors de leur utilisation sur un tissu cancéreux. Cependant, aucune cellule viable n'a été isolée et aucune croissance cellulaire in vitro ne s'est produite : la tumeur cautérisée a produit des cellules carbonisées et des fragments de tissus (61).

En revanche, une étude de 1999 réalisée sur des cellules de mélanome de souris montre que la fumée issue de l'électrocoagulation contient des cellules viables et pouvant être cultivées. Cette libération de cellules malignes pourrait expliquer l'apparition de métastases portuaires sur des sites éloignés de la dissection

chirurgicale ou n'ayant jamais été en contact direct avec la tumeur (62). Une autre étude semble également indiquer que les cellules malignes peuvent être aérosolisées pendant la laparoscopie. Toutefois les auteurs soulignent le fait qu'il est peu probable que l'aérosolisation des cellules tumorales puisse contribuer de manière significative à la survenue d'une métastase (63). Les auteurs sont néanmoins en accord avec le fait que des précautions devraient être prises afin de diminuer les risques de contact direct du personnel avec les cellules émanant d'une source tumorale.

Compte tenu de l'incertitude sur le niveau de risque, des investigations plus poussées sont nécessaires afin de confirmer dans quelle mesure l'exposition à des cellules tumorales présentes dans les fumées chirurgicales est néfaste pour la santé du personnel des salles d'opération (64).

4) Risque chimique et substances cancérigènes

Au-delà des polluants biologiques, les fumées contiennent des polluants organiques (en particulier des hydrocarbures aromatiques qui donnent l'odeur aux fumées comme le benzène et le toluène, de l'acide cyanhydrique, de l'aldéhyde formique et des hydrocarbures aromatiques polycycliques) ainsi que des polluants inorganiques (comme du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac) (65).

Ces produits chimiques sont tous connus pour être nocifs pour santé (27). Certains sont classés parmi les substances CMR (cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques) (66), raison pour laquelle le niveau d'exposition doit demeurer le plus faible possible.

Cancérogènes	Mutagènes	Toxiques pour la reproduction
Catégorie 1A : Substances dont le potentiel cancérigène pour l'être humain est avéré.	**Catégorie 1A** : Substances dont la capacité d'induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains est avérée (données épidémiologiques)	**Catégorie 1A** : Substances dont la toxicité pour la reproduction humaine est avérée.
Catégorie 1B : Substances dont le potentiel cancérogène pour l'être humain est supposé (données animales).	**Catégorie 1B** : Substances dont la capacité d'induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains est supposée (test *in vivo* sur des cellules de mammifères).	**Catégorie 1B** : Substances présumées toxiques pour la reproduction humaine.
Catégorie 2 : Substances suspectées d'être cancérogènes pour l'homme.	**Catégorie 2** : Substances préoccupantes du fait qu'elles pourraient induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains.	**Catégorie 2** : Substances suspectées d'être toxiques pour la reproduction humaine.

Figure 11 Classification des substances CMR selon la réglementation européenne (67)

Prenons l'exemple du benzène. Classé cancérogène de catégorie 1A et mutagène sur les cellules germinales de catégorie 1B selon le règlement CLP (en anglais : Classification, Labelling, Packaging), les signes attribuables à des expositions aiguës ne surviennent qu'à des concentrations très supérieures à celles observées dans les fumées chirurgicales (65).

En revanche, certains produits seraient susceptibles de présenter un risque pour la santé, même à faible dose. Par exemple, le toluène et les xylènes (ayant des propriétés dépressives sur le système nerveux central et provoquant des irritations de la peau et des muqueuses oculaires et respiratoires) ou encore les aldéhydes (irritants des voies aériennes) agissent à faible concentration et peuvent induire des lésions graves sur les muqueuses oculaires et bronchiques (65). De la même manière, bien que les quantités minimes d'acide cyanhydrique présentes dans les fumées ne puissent pas provoquer d'effets aigus, une intoxication chronique n'est, en outre, pas

impossible pour les sujets fréquemment exposés. Celle-ci se manifeste principalement par des céphalées, une asthénie, des vertiges et palpitations, des nausées, vomissements, gastralgies et une perte de poids, ou encore des conjonctivites (1,65).

Cependant, il existe un certain nombre de facteurs de confusion rendant difficile l'obtention de résultats statistiquement fiables pour imputer les effets sanitaires aux fumées chirurgicales. De façon générale, comme l'évoque J.Sillière dans sa thèse en 2014, il est difficile de savoir si ces manifestations sont entièrement dues aux fumées puisque toutes les opérations provoquant des fumées chirurgicales se font avec l'utilisation de gaz anesthésiques qui peuvent provoquer les mêmes effets (céphalées, asthénie, nausées, irritation des yeux et des voies respiratoires…) (65).

En 2004, E. Scott et son équipe ont réalisé une évaluation quantitative des risques pour la santé du personnel. Leur conclusion était que le niveau de composés organiques volatils retrouvés en salles d'opération était relativement bas, voire indétectable et qu'il n'était donc pas nécessaire de mettre en place des protections supplémentaires (32).

A contrario, la littérature souligne que le risque de cancer lié à l'exposition à la fumée chirurgicale n'est pas négligeable. Une étude a ainsi estimé que le risque de cancer sur 70 ans lié à l'exposition aux composés aromatiques polycycliques de la fumée pour le chirurgien était 117 fois plus élevé que pour une personne exposée à des niveaux sans danger (68).

5) Risque physique et particules fines

Via les fumées, le personnel est également exposé à des nanoparticules, dont la toxicité chez l'homme est encore très peu connue et documentée (1). Les effets des particules dépendent de leur taille et de leur densité (69). Celle-ci conditionne leur trajet dans l'arbre bronchique et donc leur toxicité. Les particules de diamètre compris entre 10 et 100 nm se déposent ainsi majoritairement au niveau des alvéoles pulmonaires, dans une proportion nettement supérieure à celle des particules micrométriques. Les particules plus petites, quant à elles, se déposent principalement dans les voies aériennes supérieures et, dans une moindre mesure, dans la région trachéo-bronchique (70).

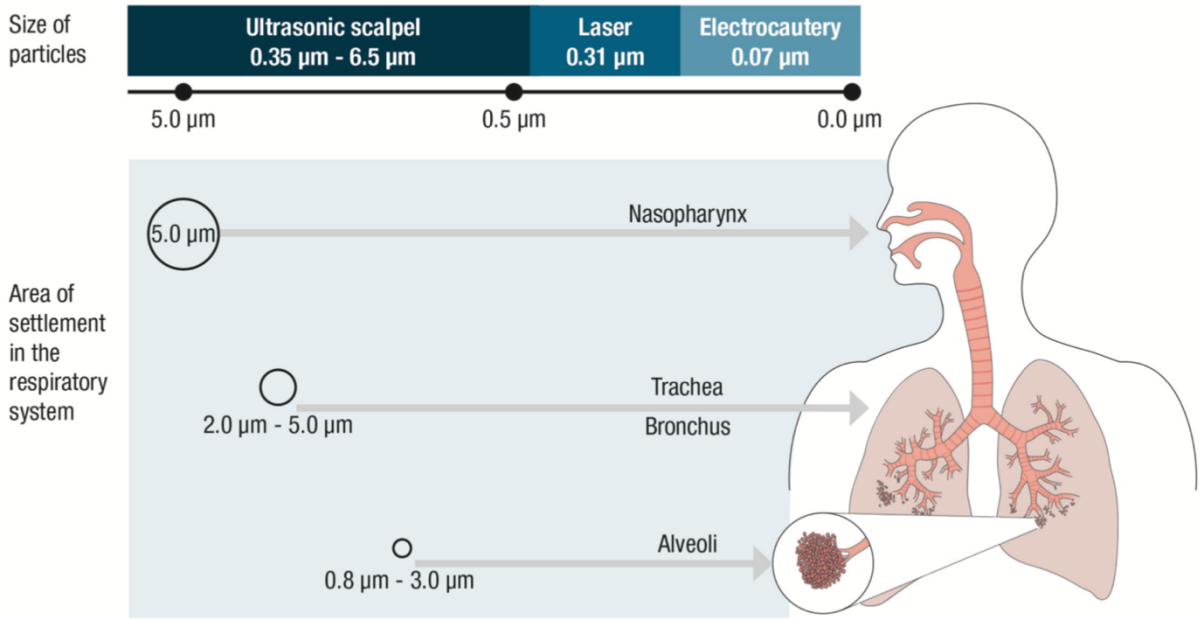


Figure 12 Tailles des particules selon l'instrumentation et trajet dans l'arbre pulmonaire (37)

Bien que la plupart des données concernant les nanoparticules proviennent d'études *in vitro* ou chez l'animal, certaines laissent suspecter la possibilité de survenue d'effets inflammatoires, respiratoires, cardiovasculaires ou neurologiques

(71–73). En effet, certains composants retrouvés dans les fumées laser sont identiques à ceux présents dans les atmosphères polluées. Ces particules ultrafines, composants de la pollution atmosphérique, sont connues pour avoir 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) (1).

6) Altération de la visibilité et allongement du temps opératoire

Plusieurs études suggèrent que l'altération de la visibilité, lors des interventions endoscopiques notamment, représente un problème majeur au bloc opératoire car elle peut conduire à un allongement du temps opératoire et par la même occasion à un allongement de l'exposition du personnel aux fumées chirurgicales (37).

En 2018, une revue systématique de la littérature (n = 66) a démontré une association robuste entre le temps opératoire prolongé et les complications dans les spécialités chirurgicales (74). En effet, 80% des études incluses ont rapporté une association statistiquement significative. L'augmentation de la durée opératoire entraînerait une multiplication par 2 de la probabilité de complications.

De la même façon, dans une étude de Daley *et al.* en 2015, les procédures plus longues que la durée opératoire prévue (c'est à dire IC> 95% du temps opératoire attendu) avaient un plus grand risque de complications, alors que les procédures plus courtes que prévues avaient un risque plus faible de complications post opératoires (75).

Par exemple, une étude rétrospective réalisée entre 2012 et 2016 par Chacon *et al.* a notamment montré que l'augmentation de la durée opératoire était associée à

une augmentation linéaire du risque de mortalité et de complications infectieuses après une hépatectomie (76). Il a également été montré qu'un temps opératoire prolongé peut augmenter le risque d'infections du site opératoire, ces dernières représentant une cause majeure de morbi-mortalité et d'augmentation des dépenses de santé (74).

Des durées opératoires plus longues peuvent également signifier une augmentation de la fatigue de l'équipe à l'origine de davantage d'erreurs techniques, même s'il existe encore peu de preuves pour éclairer la question de l'effet de la fatigue sur la performance chirurgicale (77). Ceci représente donc une source d'insécurité dans le geste opératoire et donc de risque pour le patient (74).

En laparoscopie, la création d'espaces clos fait de la production de fumée un problème plus important. Les particules en aérosol peuvent tout particulièrement altérer la visibilité en se déposant sur la lentille du laparoscope ou en restant en suspension. Un arrêt temporaire de l'intervention jusqu'à évacuation ou le retrait de l'optique cœlioscopique de la cavité corporelle pour nettoyage peuvent parfois être nécessaires, prolongeant d'autant la durée d'intervention.

En 2006, l'étude de Weld *et al.* a permis de montrer l'altération de la visibilité associée à la production de fumée par différents instruments chirurgicaux. Ils ont ainsi mis en évidence qu'une fumée composée de petites particules en haute concentration restait en suspension dans l'air plus longtemps, ce qui augmentait donc l'obstruction du champ opératoire. Les grosses particules ont, pour leur part, probablement peu ou aucune influence sur la visibilité en raison de leur tendance à sédimenter rapidement. La fumée des instruments monopolaires étant 721 fois plus concentrée en petites particules que celle d'instruments bipolaires ou ultrasoniques, ceci expliquerait la différence d'altération de la visibilité selon l'instrument utilisé. Néanmoins, du fait de la

température émise inférieure, la fumée produite par les bistouris ultrasoniques a plus de chance de contenir des cellules viables (4,78).

7) Paramètres influant sur la composition des fumées chirurgicales

1- Source d'énergie et type d'instrument

Plusieurs paramètres influencent l'exposition aux fumées chirurgicales (24,79) et notamment la source d'énergie. Il peut s'agir d'appareils électro chirurgicaux ou de lasers. La fumée produite par l'irradiation laser est relativement froide par rapport à la fumée d'électrocautérisation. Ceci conditionne le risque biologique puisque les panaches à basse température devraient contenir plus de matières infectieuses que les panaches à haute température (80). En revanche, il a été démontré que la fumée générée par électrocoagulation contient plus de particules que la fumée d'une irradiation au laser et environ 4 fois le nombre de particules de fumée générée par ultrason (25,81). Le choix des instruments influe donc sur la nature et la composition des fumées.

2- Tissu traité

La quantité de fumée émise dépend aussi de la nature du tissu traité et de la pathologie. Les interventions émettant le plus de particules sont celles sur les tissus adipeux et hépatiques alors que les interventions sur les tissus cutanés sont celles produisant l'émission la plus faible de particules. En effet, il a été démontré que la fumée émanant des tissus riches en graisse contiennent 17 à 23 fois plus de matières particulaires que celles des tissus maigres (82). La composition des fumées et la concentration des composés ayant des effets sur la santé sont donc variables. Bon

nombre de ces composés sont considérés comme dangereux pour la santé humaine notamment lorsqu'ils sont à des niveaux supérieurs aux limites d'exposition aiguë recommandées fixées par les organisations nationales de santé (65).

3- Caractéristiques de l'intervention

La durée, l'ampleur de l'intervention (notamment le nombre de coupes/coagulations/ablations réalisées) et par extension la durée de fonctionnement de l'appareil responsable des émissions détermine la quantité totale de fumée émise (1).

D'autres facteurs tels que le type de procédure, la technique du chirurgien ou la puissance utilisée ont aussi leur rôle à jouer. En effet, une intervention endoscopique n'aura pas les mêmes conséquences en termes d'exposition aux fumées qu'une laparotomie. Après avoir utilisé un équipement électrique/à ultrasons pendant 10 min, la concentration de particules de fumée est plus élevée pendant la laparoscopie par rapport à la chirurgie ouverte. Yeo *et al.* attribuent ceci à la concentration d'aérosols dans la cavité abdominale due à une circulation d'air réduite dans un pneumopéritoine. Si les opérateurs sont peu exposés aux fumées chirurgicales durant l'intervention, les aérosols peuvent être libérés lors de l'ouverture des valves du trocart ou de la création d'incisions abdominales (13). A noter que pour le patient, l'accumulation des fumées chirurgicales dans l'abdomen peut entraîner une toxicité directe avec un passage de monoxyde de carbone dans la circulation sanguine, une augmentation de la carboxyhémoglobine, une toxicité directe sur le péritoine ou une diffusion de cellules cancéreuses susceptibles d'engendrer des métastases (37).

Ainsi, plusieurs études suggèrent que le risque de contamination des soignants serait plus important pour la laparoscopie que pour la laparotomie. Pourtant, d'autres auteurs ont fait l'hypothèse contraire : du fait de la nature fermée du champ opératoire (par rapport à la laparotomie) le risque de contamination serait moindre et, a contrario, en chirurgie ouverte, les opérateurs seraient particulièrement exposés aux fumées chirurgicales (53).

4- Proximité de la source d'émission

La quantité de particules émises et donc la concentration dans l'air dépend aussi de la distance par rapport à la source d'émission. L'exposition sera en effet plus importante à proximité directe de la source d'émission. Ceci explique l'importance du positionnement des dispositifs de captage éventuels. L'aspiration des fumées au plus près du site chirurgical permet de réduire de 62 % à 99 % l'émission de particules dans l'environnement opératoire en fonction de l'angle d'utilisation du bistouri et du débit d'aspiration (83). En permettant la diminution de la concentration des matières particulaires retrouvées dans les fumées et en réduisant l'exposition, ces dispositifs constituent donc un facteur protecteur. Ces facteurs protecteurs sont variés et nous les évoquerons plus précisément ultérieurement.

8) Effets sur la santé

Certaines interventions peuvent durer de 2 à 12h, pouvant ainsi entraîner une exposition prolongée aux fumées chirurgicales. Le mécanisme évoqué serait une augmentation de l'inflammation systémique et du stress oxydatif liée à la pénétration de particules ultrafines dans les bronchioles et les alvéoles, généralement définies comme des particules de 0,1 µm (72). Ces particules sont alors susceptibles, une fois

inhalées, de causer de potentiels dommages cellulaires à l'origine d'un certain nombre de maladies respiratoires (emphysème, asthme, bronchite chronique, hypoxie, lésions nasopharyngées, irritation du nez et de la gorge) et cardiovasculaire (insuffisance cardiaque congestive notamment) (27).

Concernant les signes aigus dont les fumées chirurgicales sont responsables, ils sont à type de céphalées, asthénie, nausées ou vomissement, irritation des yeux et des voies respiratoires (1,27). Alp *et al.* fournissent une liste de dangers théoriquement envisageables du fait des composants habituellement présents, comprenant des effets aigus et chroniques (27).

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

Figure 13 Risques envisageables selon la composition des fumées chirurgicales (27)

L'effet irritant sur les voies respiratoires a d'ailleurs été mis en évidence à plusieurs reprises notamment chez le mouton par Freitag *et al.* en 1987 ou chez le rat par Baggish *et al*. en 1987 et 1988. Dans leurs études, l'exposition aux particules contenues dans les fumées d'un laser CO_2 induisait chez le rat des effets secondaires tels qu'une pneumonie congestive interstitielle, une bronchiolite, de l'emphysème ou des effets irritants sur le poumon (24).

Toutefois, de nombreux auteurs décrient l'insuffisance de connaissance sur l'impact réel en pratique sur la santé du personnel exposé (24). C'est la raison pour laquelle un certain nombre d'études se sont attachées à rechercher la présence réelle de pathologies ou gênes engendrées par l'exposition aux fumées chirurgicales chez le personnel du bloc opératoire.

Outre les études déjà mentionnées montrant des pathologies à HPV chez des chirurgiens et infirmières exposées, une enquête menée par le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) en 2001 montrait que 43.7% des participants rapportaient au moins 1 symptôme qu'ils attribuent à l'exposition aux fumées. Il est d'ailleurs intéressant de noter que les personnes les plus exposées (c'est-à-dire passant 50% ou plus de leur temps à proximité immédiate de la salle d'opération) étaient aussi celles présentant le plus de symptômes (31). Parmi ces symptômes les plus fréquents étaient les maux de tête, la sensation de brûlure au niveau du nez et du pharynx, les rhinites, les irritations oculaires et la toux.

Si, en 1976, Gates *et al.* ont cherché à étudier le lien entre durée d'exposition aux fumées chirurgicales et survenue de carcinomes bronchiques sans parvenir à établir de lien significatif ni même de tendance (30), plus récemment, des chercheurs ont recherché l'incidence de la BPCO chez plus de 75 000 infirmières américaines ayant travaillé au bloc opératoire dans leur carrière. Ils ont constaté que le risque de développer une BPCO était 69 % plus élevé chez les infirmières ayant une expérience en salle d'opération de 15 ans ou plus (HR 1,69 ; IC à 95 % 1,25-2,28) par rapport aux infirmières qui n'avaient jamais travaillé dans une salle d'opération et avaient un poste administratif ou jamais travaillé au bloc opératoire en 1982 (84).

D’autres effets sur la santé peuvent être cités : anémie, anxiété, carcinome, leucémie, dysfonctionnement cardiovasculaire, irritation de la peau, hépatite, allergies…

Dans une étude descriptive réalisée en Turquie entre avril et juin 2015 interrogeant des infirmières et des médecins sur leur exposition aux fumées, les principales plaintes concernaient par ordre de fréquence : des maux de tête, de la toux, des larmoiements, des brûlures de la gorge. Les infirmières et médecins signalent également d’autres symptômes : des nausées, une somnolence, des vertiges, des éternuements, une rhinite ainsi que d’autres symptômes tels qu’une agitation nerveuse, des infections des voies respiratoires, des myalgies, dermatite, conjonctivite, anémie, maladie cardiovasculaire, lésion nasopharyngée, douleur abdominale, vomissements… (85).

9) Comparaison des différents types de fumées

La comparaison des différents types de fumées peut aider à renforcer les connaissances actuelles sur le danger de la fumée chirurgicale. En effet, la population générale est confrontée à plusieurs autres formes de fumées dont les effets pour la santé sont mieux connus.

Selon Hill *et al.* en 2012, l’exposition à la fumée chirurgicale du personnel de la salle d’opération serait équivalente en termes d’effets à ceux du tabagisme passif (86). La comparaison des effets mutagènes et toxiques de la fumée chirurgicale avec ceux de la fumée de cigarette est assez parlante. Les effets néfastes sur la santé de la fumée de tabac sont bien documentés et méritent d'être comparés à ceux de la fumée chirurgicale. Les études s’y étant intéressées ont montré que la fumée libérée par l'électrocautérisation d’1g de tissu équivalait à 6 cigarettes (87). Une autre étude a été

menée pour déterminer la quantité moyenne de fumée chirurgicale produite quotidiennement, qui a été enregistrée comme étant l'équivalent mutagène d'environ 27 à 30 cigarettes (86). Néanmoins il convient de noter que la dilution de la fumée dans l'environnement n'a pas été prise en compte : en réalité, l'individu n'inhale pas toute la fumée de cigarette et la fumée chirurgicale à la même concentration.

Par ailleurs, comme pour la fumée chirurgicale, il y a eu une prise de conscience croissante des effets nocifs de la fumée de cuisson. Il a été rapporté que les fumées produites lors de la cuisson de la viande contiennent des composés d'hydrocarbures mutagènes et cancérigènes, qui sont produits lorsque des matières riches en protéines sont chauffées à une température élevée. Des études ont montré qu'une exposition fréquente aux fumées produites par la cuisson de la viande augmente le risque de symptômes respiratoires chroniques et aigus ainsi que de cancer du poumon (88,89). Une étude a déterminé que les risques de développer un cancer du poumon étaient 8,3 fois plus élevés pour ceux qui n'utilisaient pas d'extracteur de fumées pendant la cuisson par rapport à ceux qui en utilisaient (90). Cette comparaison pourrait nourrir l'argumentaire en faveur de l'utilisation de dispositifs de filtration des fumées au bloc opératoire pour limiter l'exposition des professionnels de santé.

La revue de littérature publiée dans le JAMA (Journal of the American Medical Association) en 2019 recense la composition et les effets sur la santé des différents types de fumées dans le tableau suivant (79).

Type of Smoke	Particle Size, µm	Composition	Hazards
Surgical smoke			
Electrocautery	0.007-0.42[53]	Many toxic, mutagenic, and carcinogenic compounds, such as those described in the Box and Table 1; infectious virions[28,53]	Unknown, higher levels of PM and VOCs[35,37]
Laser irradiation	0.1-0.8[53]	Many toxic, mutagenic, and carcinogenic compounds, such as those described in the Box and Table 1; viable cells, bacteriophages, and viruses[28,29]	Unknown, potentially higher risk of infectious transmission[29]
Ultrasonic scalpel	0.35-6.5[53]	Many toxic, mutagenic, and carcinogenic compounds such as those described in the Box and Table 1; blood and tissue particles[28,30,53]	Unknown, potentially higher risk of cancer transmission[30]
Tobacco smoke (firsthand and secondhand)	0.02-2[54]	Ammonia, acrolein, carbon monoxide, formaldehyde, hydrogen cyanide, nicotine, nitrogen oxides, phenol, sulfur dioxide[42]	Lung cancer, pulmonary disease
Cooking smoke	0.006-10[55]	PAHs, HCAs, saturated and unsaturated fatty acids, hydrocarbons, alcohols, ketones, aldehydes[44,55]	Pulmonary irritation, lung cancer[47]
Wood burning	0.3-20; average 0.05[56]	Carbon monoxide, nitric oxide, nitric dioxide, benzene, benzo[a]pyrene[56]	Asthma, pneumonia, low birth weight[49,51]
City air pollution	Contains PM (<10) and UFP (<2.5); particles 0.3-0.65 make up largest mass contribution[57]	Ozone, nitrogen oxides, carbon monoxide, VOCs, PAHs, organic and elemental carbon, ammonium, nitrate, chlorine, and nickel[58]	

Abbreviations: HCA indicates heterocyclic amines; PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons; PM, particulate matter; UFP, ultrafine particles; VOC, volatile organic compounds.

Figure 14 Composition des différents types de fumée (79)

V) Mesures de prévention, protection des soignants et filtration des fumées chirurgicales

La gestion des risques chimiques est un enjeu important au sein des structures de soins car les travailleurs sont exposés à une variété importante de produits chimiques susceptibles de présenter des risques pour la santé. Si les risques concernant les patients sont bien pris en compte et relativement bien maitrisés, le risque pour le personnel demeure trop peu identifié et priorisé (65). Identifier les dangers et les sources d'exposition est un axe essentiel de la protection des professionnels de santé. Les fumées en font partie.

L'identification et l'estimation des risques de survenue d'effets sur la santé des travailleurs est une obligation réglementaire pour l'employeur. Par exemple, concernant le risque chimique, l'article R4412-5 du code du travail (91) évoque le fait que l'employeur se doit « *d'évaluer les risques encourus pour la santé et la sécurité des travailleurs pour toute activité susceptible de présenter un risque d'exposition à des agents chimiques dangereux* ». Par ailleurs, il impose que « *l'employeur définisse et applique les mesures de prévention visant à supprimer ou à réduire au minimum le risque d'exposition à des agents chimiques dangereux ».* Ceci est largement applicable au risque multiforme lié aux fumées chirurgicales pour les personnels soignants exposés.

Cependant, au début des années 2000 et malgré les différentes réformes et le plan Santé Travail de 2005 (92) visant à renforcer les actions de prévention, la perception de ce risque par le personnel du bloc opératoire et leurs connaissances à ce propos demeuraient trop limitées. Dans une étude de Spearmann *et al.* en 2007,

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. Les mesures de prévention alors mises en œuvre étaient insuffisantes. En effet, 43% des chirurgiens et 70% des spécialistes ayant une activité chirurgicale avaient l'habitude de capter les fumées et seule une minorité d'entre eux appliquait des mesures de protection supplémentaires (93).

L'absence de consignes précises émanant des institutions de prévention accentue ce manque de consensus concernant les mesures mises en place au sein des établissements de santé pour la protection du personnel. Le processus de gestion des risques pourrait donc être mis en place de façon différente selon les pays avec des réglementations nationales variables (24).

Selon l'INRS, la prévention des risques liés à l'inhalation de gaz, vapeurs, poussières, polluants ou aérosols doit s'appuyer en premier lieu sur des mesures de protection collective, lorsqu'elles sont possibles (captage, ventilation et filtration de l'air). Le port d'un équipement de protection individuelle (EPI) adapté complète ces mesures s'il persiste un risque résiduel. En milieu de soins comme dans les autres secteurs, la directive européenne 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail, impose de « *prendre des mesures de protection collective par priorité à des mesures de protection individuelle* » (1).

1) Généralités sur les différents types de filtres

La filtration de l'air correspond au traitement de l'air destiné à éliminer les suspensions (94). Les filtres comportent généralement un média filtrant qui est présenté, à la manière d'un écran, à l'écoulement de l'air à épurer.

L'efficacité d'un filtre nous donne la proportion de particules filtrées, en pourcentage, en fonction du diamètre des particules. Par exemple, les filtres ULPA filtrent 99.9995% des particules de taille supérieure à 0,1µm.

Le taux de pénétration correspond au pourcentage de ces particules passant à travers le filtre. Dans le cas d'un filtre ayant une efficacité de 95% pour une certaine taille de particules, le taux de pénétration sera donc de 5%.

En outre, un filtre ne capture pas que les particules d'une taille supérieure à la taille de la maille de son média filtrant (aussi appelée *mesh size*). D'autres mécanismes complémentaires de filtration permettent d'arrêter des particules d'une taille inférieure. En effet, c'est en entrant en contact avec les fibres des médias des filtres à air que les particules contenues dans l'air sont arrêtées. L'efficacité d'un filtre est donc le résultat de 5 mécanismes qui interagissent (95) :

- Le tamisage : il correspond au blocage d'une particule entre deux fibres trop proches pour la laisser passer.
- L'interception : il correspond au blocage d'une particule par une fibre se trouvant sur son trajet.
- L'impaction inertielle : la particule se détache du flux par inertie et entre en collision avec une fibre du filtre.

- L’attraction électrostatique : il s’agit de la liaison des particules aux fibres lorsqu’elles sont chargées.
- La diffusion : les petites particules interagissent avec les molécules de gaz et, soumises au mouvement brownien, rencontrent les fibres.

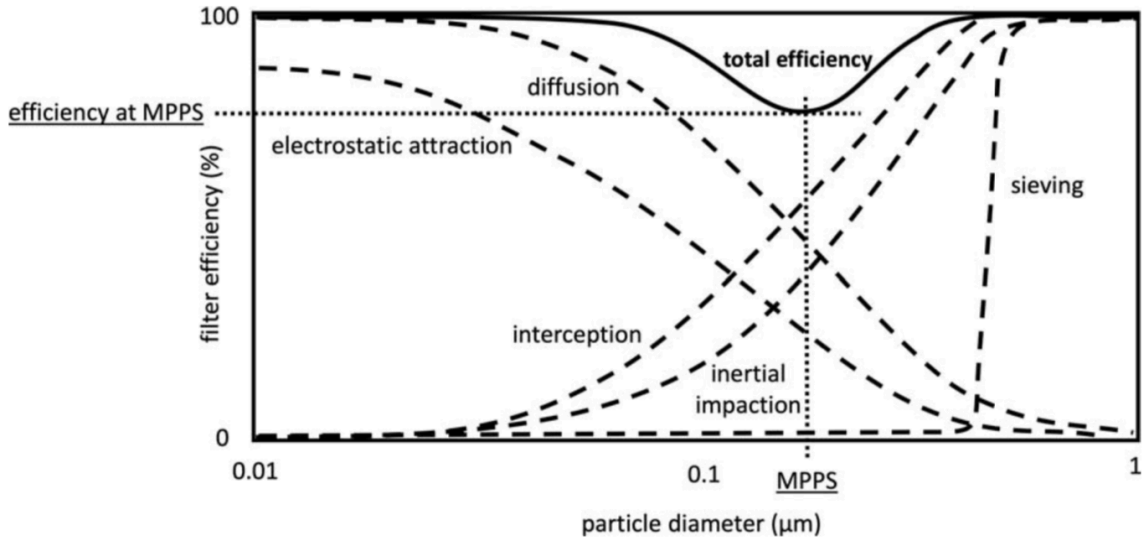


Figure 15 Mécanismes de filtration et efficacité du filtre (95)

A noter que, dans le cadre de la filtration de l’air, s’ajoute à ces mécanismes de filtration en profondeur, un mécanisme de filtration de surface. Ce mécanisme correspond à la filtration par gâteaux : les particules sont retenues principalement à la surface d'un média filtrant et forment une couche de poussière qui augmente l'efficacité ou la finesse des poussières retenues. Au fur et à mesure que la filtration se poursuit, un gâteau s'accumule sur les médias poreux. Ce gâteau a une structure de pore complexe déterminée par la nature des particules de poussière. La structure élimine les particules supplémentaires par simple mécanisme de tamisage (96).

L’importance des différents mécanismes de filtrations dépend de la charge électrique, de la nature hydrophile/lipophile ainsi que de la taille de la particule. Pour

les particules de plus gros diamètre, les principaux mécanismes impliqués sont le tamisage, l'interception et l'impaction inertielle. Les deux derniers mécanismes sont plus efficaces face aux particules de plus petite taille. La pluralité des mécanismes permet une filtration efficace pour un large panel de particules de tailles variables (95).

Les filtres sont divisés en classes selon leur efficacité. La norme européenne EN1822 impose la détermination du MPPS (*minimum particle penetrating size*) et l'efficacité correspondante. Le MPPS est la dimension de la particule la plus pénétrante et se situe pour la plupart des filtres haute efficacité entre 0,1 et 0,3µm. La nouvelle norme ISO 29463 (harmonisant les normes européennes et américaines) se base aussi sur la détermination du MPPS. On distingue ainsi 3 groupes (95) :

- Filtre EPA (*efficient particulate air filters*)
- Filtre HEPA (*high efficiency particulate air filters*) : efficacité >99.95% au MPPS
- Filtre ULPA (*ultra-low particulate air filters*) : efficacité > 99.9995% au MPPS

	Groupe de filtre	Dénomination	Classe de filtre	Valeur globale à la MPPS (a)		Valeur locale à la MPPS	
				Efficacité (b)	Pénétration (d)	Efficacité (c)	Pénétration (d)
EPA	E	Filtre à air à Haute Efficacité (HE)	E10	≥ 85%	≤ 15%	- (e)	- (e)
			E11	≥ 95%	≤ 5%	- (e)	- (e)
			E12	≥ 99,5%	≤ 0,5	- (e)	- (e)
HEPA	H	Filtre à air à Très Haute Efficacité (THE)	H13	≥ 99,95%	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25%
			H14	≥ 99,995%	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025%
ULPA	U	Filtre à air à très faible pénétration	U15	≥ 99,9995%	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025%
			U16	≥ 99,99995%	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025%
			U17	≥ 99,999995%	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001%

a) **MPPS (Most Penetrating Particule Size) :** dimension de la particule pour laquelle le minimum d'efficacité spectrale se produit.
b) **Efficacité globale :** efficacité moyennée sur l'ensemble de la surface frontale de passage d'un élément filtrant, dans des conditions données de fonctionnement du filtre (correspond au rendement R du filtre).
c) **Efficacité locale :** efficacité en un point spécifique de l'élément filtrant, dans des conditions données de fonctionnement du filtre.
d) **Pénétration (P) :** rapport de la concentration en particules émergentes sur la concentration en particules incidentes (P = 1 - R)
Des valeurs de pénétration locale inférieures à celles indiquées dans le tableau peuvent être convenues entre l'acheteur et le fournisseur.
e) **Les filtres EPA (E10, E11, E12)** ne peuvent et ne doivent pas être soumis à un essai d'étanchéité à des fins de classification selon la norme NF EN 1822.

Figure 16 Classification des filtres selon la norme NF EN 1822-1 (Janvier 2010) (97)

A noter que la taille de la particule à filtrer ne correspond pas nécessairement au diamètre du virus. La transmission respiratoire des maladies virales est médiée par des gouttelettes d'aérosol. Leur taille est plus grande que le virion et, pour ce qui concerne notre sujet, varie en fonction de la source d'énergie utilisée pour la dissection (95).

2) Généralités sur les moyens de protection et prévention disponibles

1- Ventilation générale

Les salles propres, comme les blocs opératoires, sont conçues pour permettre de maîtriser le niveau de contamination. La norme NFS 90-351 de 2013 (Établissements de santé - Zones à environnement maîtrisé - Exigences relatives à la maîtrise de la contamination aéroportée) précise les exigences de sécurité sanitaire pour la conception, la construction, l'exploitation, la maintenance, le contrôle et l'utilisation des installations de traitement et de maîtrise de la qualité de l'air dans les établissements de santé (98). Elle met notamment en avant la classification suivant le niveau de risques des zones dans les blocs opératoires et son influence sur les principes de traitement de l'air. En effet, dans le cadre de la lutte contre les infections nosocomiales, en hygiène hospitalière, la qualité de l'air est un élément majeur à prendre en compte puisqu'elle doit permettre de protéger le champ opératoire et d'assurer le confort de l'équipe chirurgicale. Dans ces environnements contrôlés, l'objectif est de maîtriser la contamination aéroportée vis-à-vis du patient et/ou du personnel et/ou du produit et la contamination microbiologique et/ou particulaire et/ou chimique généré par l'activité.

Ainsi, il existe 4 niveaux de zones à risques en fonction du risque d'infection :

- Zone à risque 4 : très haut risque infectieux (orthopédie, ophtalmologie, grands brûlés, greffes, neurologie, cardiologie...)
- Zone à risque 3 : haut risque infectieux (obstétrique, réanimation, digestif…)
- Zone à risque 2 : risque infectieux moyen (endoscopie, salle de réveil…)
- Zone à risque 1 : risque nul (chambre d'hospitalisation standard…)

La norme définit ensuite des niveaux de performance à atteindre en fonction des zones à risque et conduit à mettre en place des équipements appropriés afin d'atteindre les objectifs fixés en termes de propreté.

De cette façon, pour les zones de classe 3 et 4, il est recommandé un flux d'air unidirectionnel c'est-à-dire un flux d'air, horizontal ou vertical, maîtrisé, traversant l'ensemble d'un plan de coupe d'une zone propre, possédant une vitesse régulière et des filets à peu près parallèles. Ce régime d'écoulement de l'air a pour effet l'évacuation dirigée des particules de la zone propre. En effet, l'air est soufflé par un seul système permettant une diffusion uniforme et l'élimination rapide des éventuels contaminants par un balayage permanent de l'air filtré. Il est à distinguer du flux d'air non unidirectionnel où l'air soufflé dans la zone propre se mélange à l'air déjà présent, ce qui entraîne une dilution des bio contaminants puis leur élimination à l'extérieur du bloc opératoire.

Selon la norme NS S 90-351, il est recommandé de mettre en place un traitement de l'air dans un bloc opératoire permettant d'atteindre une contamination particulaire au moins équivalente à ISO 7 (accord total de la SF2H) et assurant : apport d'air neuf, filtration, surpression, renouvellement de l'air, régime de distribution. Pour préserver la santé et la sécurité des patients et des personnels présents au bloc opératoire, il convient donc de renouveler l'air du bloc opératoire par apport d'air neuf de 6 volumes/heures au minimum.

Numéro de classification	Concentrations maximales admissibles (particules/m^3 d'air) en particules de taille égale ou supérieure à celles données ci-dessous					
ISO	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
Classe ISO 1	10	2				
Classe ISO 2	100	24	10	4		
Classe ISO 3	1 000	237	102	35	8	
Classe ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
Classe ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
Classe ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
Classe ISO 7				352 000	83 200	2 930
Classe ISO 8				3 520 000	832 000	29 300
Classe ISO 9				35 200 000	8 320 000	293 000
NOTE À cause des incertitudes dues au mesurage, les concentrations sont données avec au plus 3 chiffres significatifs.						

Figure 17 Tableau de classification selon la norme NF EN ISO 14644-1 (98)

Pour la filtration de l'air, les filtres de ventilation générale doivent être conformes aux normes NF EN 779. Cette norme impose une efficacité de filtration moyenne pour chaque classe de filtration (G1, G2, G3, G4, M5, M6, F7, F8 et F9) ainsi qu'une efficacité de filtration minimum à partir de la classe de filtration F7. Pour les qualités de filtration G2, G3 et G4, le test est effectué avec un aérosol pulvérisant des particules synthétiques grossières. La différence entre le poids des particules émises et le poids retenu par le filtre donne l'arrestance moyenne (Am) exprimé en % (rendement gravimétrique). Pour les qualités de filtration comprise entre M5 et F9, le test est effectué avec un aérosol pulvérisant des particules d'environ 0,4µm. L'efficacité moyenne (Em) du filtre est calculée selon la capacité qu'a le filtre à arrêter ces particules de 0,4µm et est exprimé en % (efficacité opacimétrique).

Classification des filtres à air					
Groupe	Classe	Chute de pression finale (test) Pa	Arrestance moyenne (Am) de la poussière synthétique %	Efficacité moyenne (Em) avec les particules de 0,4 µm %	Efficacité minimale avec les particules de 0,4 µm
Grosses particules	G1	250	50≤Am<65	–	–
	G2	250	65≤Am<65	–	–
	G3	250	80≤Am<65	–	–
	G4	250	90≤Am<65	–	–
Particules moyennes	M5	450	450	40≤Em<60	–
	M6	450	450	60≤Em<80	–
Particules fines	F7	450	450	80≤Em<90	35
	F8	450	450	90≤Em<95	55
	F9	450	450	95≤Em	70

Figure 18 Tableau de classification des filtres selon la norme EN 779

Les installations de traitement de l'air comprennent plusieurs sous-ensembles techniques : centrales, caissons, châssis, étages de filtrations, réseaux aérauliques...

- Un premier étage de filtration est placé en amont de la centrale de traitement d'air et permet de maintenir l'état hygiénique de cette dernière. L'efficacité minimale requise est M6, recommandée F7.
- Un second étage de filtration en sortie de centrale permet de maintenir l'état de propreté du réseau de distribution d'air et de prolonger la vie des filtres terminaux. L'efficacité minimale recommandée requise est F9.
- Un étage de filtration terminale se situe au point de soufflage dans la zone à environnement maîtrisé et permet d'amener l'air à un niveau de propreté cohérent avec la classe de risque. Des filtres d'efficacité minimale H14 sont généralement utilisés pour les zones à risque 3 et 4 et E10 pour les zones à risque 2.
- Une filtration terminale sur l'air repris au niveau des grilles d'extraction permet de maintenir le réseau de reprise et d'extraction propre (filtration d'efficacité minimale M6 selon la norme NF EN 779).

- Un étage de filtration moléculaire et chimique notamment au moyen de filtres à charbon actif peut être utilisé pour améliorer la qualité de l'air par exemple pour la lutte contre les odeurs liées à l'usage de bistouris électriques.

L'existence d'un système de ventilation générale permet notamment d'emmener les particules non captées à la source hors de la zone respiratoire des opérateurs. Le niveau d'exposition du personnel dépend alors de plusieurs facteurs dont la nature et l'efficacité des filtres à air. Les différentes particules contenues dans les fumées exigent selon les caractéristiques qui leurs sont propres des méthodes de filtration différentes : filtres HEPA pour les particules en suspension et filtres ULPA pour les particules ultrafines ou nanoparticules.

Le caractère infectieux des fumées laparoscopiques dépend de leur concentration. Les systèmes de ventilation permettent une dilution de la charge virale par aspiration et filtration. Le renouvellement d'air de la pièce concourt à empêcher la stagnation des fumées (24). Néanmoins, malgré un renouvellement d'air complet 10 à 20 fois par heure, les personnels les plus proches de la source restent très exposés aux fumées chirurgicales (99).

2- Port du masque

Le port de masque est recommandé pour les personnels exposés aux fumées chirurgicales. La SF2H préconise notamment de porter un masque chirurgical dès l'entrée en salle d'opération et pendant tout le séjour du patient en salle d'intervention (accord simple) (100).

Deux grandes catégories de masques sont à distinguer :

- Les masques médicaux
- Les appareils de protection respiratoire (APR)

Les masques médicaux sont des dispositifs médicaux qui relèvent de la directive européenne 90/385/CEE du 20 juin 1990 et répondent à la norme européenne EN 14683. Cette norme les classe selon 4 types :

  - I et IR : 95% d'efficacité de filtration bactérienne (EFB)
  - II et IIR : 98% d'efficacité de filtration bactérienne

Les types IR et IIR sont dits « résistants à la projection ».

Les masques médicaux sont destinés à éviter la projection vers l'entourage des gouttelettes émises par celui qui porte le masque. Il protège également celui qui le porte contre les projections de gouttelettes émises par une personne en vis-à-vis. En revanche, il ne protège pas contre l'inhalation de très petites particules en suspension dans l'air (101,102). Ils ne sont donc pas adaptés à la prévention de la transmission aérienne de fines gouttelettes (< 5µm, dites gouttelettes de Pflügge) d'agents infectieux comme la tuberculose, la rougeole, la varicelle, et d'autres agents viraux (103). Depuis le milieu des années 80, une succession de menaces sanitaires (tuberculose, SRAS, bioterrorisme, pandémie grippale) conduisent les scientifiques à mener des études sur les moyens de protection respiratoire destinés aux soignants et autres travailleurs exposés à des bio aérosols notamment lors d'actes comme les endoscopies bronchiques, les soins dentaires ou la chirurgie au laser. Parmi les premières études menées sur l'efficacité des masques chirurgicaux, celle de Chen et Willeke en 1992 suggère qu'ils ne sont pas en mesure de capturer les aérosols de taille submicronique émis par exemple lors de l'utilisation de lasers chirurgicaux ou de

bistouris électriques (104). En 2008, une étude de l'université de Minneapolis conclut qu'ils ne doivent donc pas être considérés comme des appareils de protection respiratoire (105).

Ces appareils de protection respiratoire (APR), quant à eux, répondent à des exigences relevant de la directive européenne 89/686/CEE (marquage CE). Il s'agit d'équipements de protections individuels (EPI) conformes à la norme NF EN 149 de 2001. Ils permettent à la fois la protection contre :

- Les particules en suspension dans l'air
- L'inhalation d'agents infectieux transmissibles par voie aérienne ou gouttelettes

Les APR sont classés selon trois catégories de masques FFP (*Filtering Face Piece*) selon leur efficacité. Ce niveau de protection est estimé en fonction de l'efficacité du filtre et de la fuite au visage. Ainsi, en considérant des aérosols de particules de diamètre médian de 0,6 µm :

  - FFP1 : 78% des particules arrêtées
  - FFP2 : 92% de particules arrêtées
  - FFP3 : 98% des particules arrêtées

Bien que les essais soient effectués avec un aérosol sans activité biologique, nous pouvons considérer que les résultats sont applicables aux aérosols biologiques, car ceux-ci se comportent sur le plan physique de manière similaire aux aérosols des essais (106,107). En revanche, il faut retenir que les masques FFP ne protègent pas contre les gaz et les vapeurs.

De plus, si le port de ce type de masque, à la différence des masques médicaux, permet la protection contre l'inhalation de très petites particules en suspension dans l'air, il est aussi plus contraignant. Pourtant, une utilisation correcte est une condition

sine qua non à une bonne protection individuelle et une prévention du risque de transmission des infections nosocomiales. Il est donc nécessaire de choisir un APR à la fois efficace pour protéger la personne qui le porte et suffisamment confortable pour être porté sur de longues périodes. Les facteurs limitant la tolérance au port des appareils de protection respiratoire sont essentiellement la résistance respiratoire et la chaleur à l'intérieur du masque (inconfort thermique) (103). La présence d'une soupape (ou valve expiratoire) est un bon moyen de réduire la résistance lors de l'expiration et ainsi d'améliorer le confort de l'utilisateur. Cette valve ne laisse passer l'air qu'au moment de l'expiration et se ferme lors de l'inspiration. Elle ne permet donc pas la pénétration des particules à l'intérieur du masque. L'efficacité pour le porteur est donc identique à celle apportée par un masque sans soupape. En revanche, l'air expiré par le porteur à travers la soupape est susceptible de contaminer l'environnement extérieur (101,102).

En 2007, dans l'enquête réalisée par Edwards, dans 80 à 90% des cas, lors de l'utilisation d'un bistouri électrique, les opérateurs portent de simples masques chirurgicaux. Cependant au Pays-Bas, le *Werkgroep Infectiepreventie* (WIP) recommande le port d'un masque respiratoire de type FFP2 en l'absence d'aspiration à la source de la fumée de laser voire de masques respiratoires à haute pression (108)

3- Généralités sur les dispositifs de captage des fumées

Afin de pallier au dégagement de fumées chirurgicales et d'éviter d'atteindre une concentration exposant les professionnels, l'une des solutions est leur captage à la source. Pour cela l'utilisation de dispositifs de captage permet, en éliminant la fumée du champ opératoire, de limiter la quantité de vapeurs, gaz ou particules atteignant les

voies respiratoires des personnes exposées. Pourtant en 2007, une enquête réalisée au Canada et aux États Unis montrait que seuls 8 à 59% des utilisateurs de bistouris électriques avaient recours à des dispositifs de captage (109).

Ces dispositifs sont de plusieurs types :

- Les dispositifs muraux permettant une évacuation des gaz captés vers l'extérieur via un système d'aspiration centrale
- Les dispositifs mobiles indépendants pour lesquels l'air aspiré par la buse est filtré dans l'unité mobile
- Les dispositifs de captage intégrés aux lasers ou instruments électro chirurgicaux.

Dans ce dernier cas de figure, l'orifice de captage se trouve à proximité directe de la source des fumées. Or il a été montré que l'efficacité du dispositif est d'autant plus grande que l'orifice de la buse est proche du point de formation de la fumée (1). Ceci en fait des dispositifs de choix (en plus de leur puissance d'aspiration supérieure permettant d'aspirer de plus grandes quantités de fumées que les systèmes muraux classiques).

Si la distance entre l'orifice d'aspiration et la source d'émission est un facteur déterminant de l'efficacité du dispositif de captage, plusieurs paramètres jouant sur l'efficacité doivent aussi être pris en compte comme par exemple le débit d'aspiration, le diamètre de l'orifice de captage, la vitesse d'air à l'orifice de captage de la buse, la capacité de filtration… (24). A noter que cette capacité de filtration impacte principalement les émissions à la sortie du système d'aspiration et de ce fait la pollution environnementale et l'impact des rejets hospitaliers.

4- Information et prévention

A ce jour, en France, aucun programme de prévention spécifique n'est appliqué en routine. Aucune surveillance médicale préventive n'est mise en place visant spécifiquement le dépistage des maladies liées aux fumées chirurgicales.

Pourtant, un personnel formé et informé est plus enclin à appliquer les recommandations émises. De nombreuses études ont d'ailleurs démontré qu'une meilleure éducation à ce sujet était nécessaire pour sensibiliser aux dangers potentiels de la fumée chirurgicale et pour éveiller les consciences concernant le manque de mesures de protection (110,111).

Les études suivantes montrent chez le personnel des connaissances partielles sur les moyens de protection, une mauvaise évaluation des risques (notamment une sous-estimation de ce dernier) et une mauvaise adaptation des moyens de protection liée à un manque d'information.

Des questionnaires adressés aux chirurgiens, chefs de cliniques spécialisés et infirmières de bloc de 14 hôpitaux de la région de Wessex (UK) en 2007 ont permis de dresser l'état des lieux suivants : parmi les chirurgiens, 51% estiment que le panache de fumée est nocif, contre 78% des chefs de cliniques et 91% des infirmières de bloc. Seuls 26% des personnes interrogées estiment que des précautions adéquates existent actuellement. Quelques-uns avaient entendu parler des événements indésirables mais les connaissances à propos des dangers liés à la fumée chirurgicale restent limitées. Les chirurgiens et les infirmières demeuraient alors incertains des risques, estimant que davantage de moyens devraient être mis en place pour améliorer la protection, mais que la technologie n'était pas mise à leur disposition. En effet, à l'époque, certains avaient déjà soulevé cette question, mais n'avaient trouvé aucun soutien de la part de la direction de l'hôpital ou des services de santé au travail.

Néanmoins, d'autre part, parmi les chefs de cliniques, le peu d'entre eux ayant l'expérience de l'utilisation des dispositifs d'évacuation des fumées en avaient un avis négatif déclarant qu'ils étaient coûteux et encombrants. Cette enquête suggère que malgré des connaissances insuffisantes à ce sujet, l'exposition aux fumées reste une source d'inquiétude pour le personnel du bloc opératoire. Une plus grande sensibilisation aux dangers et aux solutions disponibles pour évacuer et filtrer les fumées pourrait conduire à une plus grande adoption de ces dernières par le personnel (93).

En effet, en 2016, dans une enquête en ligne chez les professionnels de santé exposés en routine, seulement 47 % des répondants déclarent « toujours utiliser l'aspiration » pendant les procédures au laser et 14% pendant l'électrochirurgie. Plusieurs raisons à cette non utilisation sont citées : le fait que ces solutions n'étaient pas fournies par l'employeur, que l'exposition à la fumée était « minime » et que l'utilisation de l'aspiration locale ne faisait pas partie du protocole de l'établissement. Une grande partie des répondants a d'ailleurs souligné le fait qu'ils ne savaient pas pourquoi cette aspiration locale des fumées n'était pas utilisée et qu'ils n'avaient aucun contrôle sur la décision de l'utiliser ou non. A l'issue de cette étude, les auteurs ont donc conclu que la décision d'utiliser un système d'aspiration des fumées ne devrait pas être prise à la discrétion d'un praticien individuel lorsque d'autres (par exemple, le personnel d'anesthésie, les infirmières) sont aussi exposés à la fumée chirurgicale (112).

La Directive cadre 89/391/CEE (113) impose que tout salarié puisse bénéficier dès que nécessaire d'une formation adaptée à la sécurité et à la santé au travail sous forme d'informations et de consignes concernant son poste de travail et ses missions. Parmi ces informations, devraient figurer les risques liés aux fumées et produits de

pyrolyse, les paramètres influant sur l'exposition à ces fumées, les mesures de prévention pouvant être mises en œuvre ou encore les recommandations concernant l'entretien et la maintenance des dispositifs utilisés au bloc opératoire.

En effet, la maintenance des appareils et notamment de la ventilation générale et des dispositifs de captage est un point essentiel dans la prévention de l'exposition puisqu'elle permet d'assurer la qualité de leurs performances. Le contrôle et changement des filtres doit se faire régulièrement et selon les recommandations du fabricant. C'est un facteur d'une importance cruciale puisque l'efficacité d'un filtre saturé est largement diminuée (1).

Dans l'état actuel des connaissances, la démarche préconisée pourrait consister en l'identification des personnes à risque (antécédents de pathologie respiratoire par exemple) afin de limiter leur exposition. A noter qu'il convient de prendre en compte le nombre d'interventions par unité de temps dans l'évaluation de l'exposition mais aussi la nature et la concentration des fumées émises en lien avec le type de chirurgie et le type d'instruments utilisés (1).

3) Contexte juridique

Une réglementation en matière de protection au travail existe dans de nombreux pays occidentaux. L'aspiration des fumées chirurgicales est d'ailleurs obligatoire au Canada, aux États Unis et au Danemark (114).

En effet, au Canada, la CSA (*Canadian Standards Association*) a publié une norme détaillée pour l'évacuation des fumées. Le document identifie les risques liés à la fumée chirurgicale et fournit des détails significatifs sur l'importance d'évacuer et de

filtrer les fumées générées (115). La norme Z305.13-13 donne des directives à propos de l'installation, l'utilisation et l'entretien des dispositifs de traitement des fumées chirurgicales et stipule également que tout établissement de santé au Canada où des interventions chirurgicales génèrent des fumées doit informer de leur nocivité et des risques pour la santé des soignants.

Aux États-Unis, quatre états ont adopté une loi, propre à chacun d'eux, sur le traitement et l'évacuation des fumées chirurgicales : l'Oregon, le Colorado, Rhode Island et le Kentucky. Dans ces états, il est désormais obligatoire pour les établissements de santé de s'équiper et d'utiliser un système d'évacuation lors d'interventions générant les fumées chirurgicale (116).

De la même manière, dans les pays Nordiques, la version traduite des directives explique que les études sur les fumées émises par les lasers et les appareils de diathermie (électrocoagulation) montrent que « des mesures doivent être prises pour éliminer ces fumées » (117).

En Allemagne, la directive TRGS 525 stipule de réserver l'utilisation des dispositifs produisant des fumées aux salles équipées d'installations de ventilation afin de limiter l'exposition du personnel et éventuellement d'utiliser des systèmes d'aspiration locaux supplémentaires lorsque la situation le nécessite (aspiration insuffisante des fumées). La recirculation de l'air aspiré n'est d'ailleurs autorisée qu'en cas d'utilisation d'un filtre HEPA en plus du filtre à charbon. Les Équipements de Protection Individuel (EPI) tels que des masques FFP2 doivent être utilisés lorsque l'environnement et les dispositifs présents ne permettent pas d'éliminer efficacement les fumées chirurgicales. Elle mentionne aussi l'importance de la formation et de l'information du personnel exposé quant à ce risque (116).

En Australie, l'ACORN recommande que tout soit mis en œuvre pour minimiser l'exposition aux fumées (118).

Au Royaume Uni, le BOHS (*British Occupational Hygiene Society*) a développé un document de référence sur la fumée chirurgicale destiné aux responsables du système de santé national. Ce document reconnait les effets nocifs de la fumée chirurgicale et préconise l'utilisation d'une ventilation d'évacuation locale (VEL) pour évacuer et filtrer la fumée : « Les salles d'opération possèdent généralement des niveaux élevés de ventilation générale. Cela n'empêche toutefois pas l'élimination des fumées dans la pièce. Une ventilation d'évacuation locale (VEL) doit être installée pour résoudre ce problème. L'irritation connue, les autres propriétés dangereuses des contaminants et les préoccupations permanentes sur les effets chroniques permettent de conclure qu'une VEL doit être considérée comme une mesure de prévention obligatoire ». Le document indique également que le système d'évacuation des fumées doit avoir une capacité d'extraction minimale de 22 litres/minutes pour capturer efficacement les fumées. Il indique que toute personne subissant des symptômes respiratoires doit contacter le service de protection contre les risques professionnels (117).

En France, selon la loi n°91-1414 du 3 décembre 1991, l'employeur a pour obligation d'assurer la santé physique et mentale des travailleurs : « il appartient ainsi à l'employeur de tenir compte de l'évolution des techniques pour adapter continuellement les mesures qu'il adopte ». Des textes réglementaires européens et français existent pour guider les employeurs dans la mise en pratique de ces obligations et la mise en place d'une évaluation des risques professionnels. Des sanctions sont prévues par le code du travail et décrites à l'article R. 4741-1 en cas de

non-respect par l'employeur de ses obligations en termes d'évaluation des risques. Ainsi, l'employeur se doit d'identifier les dangers et de réaliser régulièrement l'inventaire et l'estimation des risques de survenue d'effets sur la santé et la sécurité des salariés en faisant l'étude des conditions de manipulation et d'exposition (65).

Il n'existe pas, à ce jour, de loi spécifique relative à la protection du personnel de bloc opératoire face aux risques liés aux fumées. Aucun référentiel français ne traite spécifiquement de ce sujet. Toutefois, même si le terme « fumées chirurgicales » n'est pas mentionné explicitement, certaines obligations réglementaires sont précisées dans le Code du Travail, introduites par le décret N°2008-244 du 7 mars 2008. En effet, il est mentionné à l'article R4222-1 dudit code que : « Dans les locaux fermés où les travailleurs sont appelés à séjourner, l'air est renouvelé de façon à :

- Maintenir un état de pureté de l'atmosphère propre à préserver la santé des travailleurs ;
- Éviter les élévations exagérées de température, les odeurs désagréables et les condensations. »

Par ailleurs, l'article R4222-12 du même code mentionne que « les émissions sous forme de gaz, aérosols, de particules […] qui seraient gênantes ou dangereuses pour la santé des travailleurs doivent être supprimées […] lorsque les techniques de production les permettent. À défaut, elles doivent être captées au fur et à mesure de leur production, au plus près de leur source d'émission et aussi efficacement que possible » (116).

4) Recommandations spécifiques dans le contexte COVID

1- Existe-t-il un risque de transmission au cours de la chirurgie ?

Alors que la pandémie de COVID-19 continue de se propager dans le monde à un rythme alarmant, il est inévitable qu'un nombre croissant de patients COVID-19 nécessite une intervention chirurgicale. Se pose alors la question du risque de transmission.

Le mode exact de transmission du SARS-CoV-2 n'est pas encore bien établi et la possibilité d'une transmission par voie aérienne opportuniste ne peut être exclue dans certaines conditions, comme par exemple avec de fines gouttelettes de sécrétions respiratoires infectées aérosolisées.

En 2020, les résultats de Fears *et al.* obtenus en laboratoire grâce à l'utilisation de nébuliseurs suggèrent un caractère infectieux et une intégrité du virion conservés jusqu'à 16 heures dans des aérosols de taille respirable. Dans leur expérience, les virions aéroportés pendant 10 min ou 16h étaient similaires en forme et en apparence générale aux virions examinés dans des échantillons d'inoculum viral prélevés avant l'aérosolisation. Ceci est compatible avec la conservation de sa capacité de réplication et suggère la persistance d'un potentiel infectieux après un vieillissement à long terme en suspension d'aérosol. Ils ont également comparé la persistance du potentiel infectieux des aérosols à court terme des 3 coronavirus (SARS-CoV-2, SARS-CoV et MERS-CoV) montrant ainsi que celle-ci est largement supérieure pour le SARS-CoV-2. La mesure quantitative de l'infectiosité virale aéroportée associée à l'évaluation de la morphologie du virion les amènent à suggérer que le SRAS-CoV-2 peut être viable en tant qu'agent pathogène aéroporté (55).

Trois études réalisées en Chine portant quant à elles sur la détection de l'ARN du SARS-CoV-2 dans divers échantillons biologiques de patients atteints de la COVID-19 ont été publiées en février et mars 2020. Dans toutes les études, la présence d'ARN du virus SARS-CoV-2 a été détectée dans des échantillons de sang et/ou de selles. Le pourcentage d'échantillons de sang positifs varie entre 1 % et 40 % alors que dans les échantillons de selles, cette proportion varie entre 19 % et 40 %. Néanmoins, il convient de noter que la détection de l'ARN du virus dans des échantillons biologiques ne permet pas de conclure sur le potentiel infectieux. Aucune transmission de la maladie par cette voie n'a été documentée (58–60). Veziant *et al.* dans un article publié en 2020, affirment qu'aucune contamination des soignants par le SRAS-CoV-2 lors d'une laparoscopie a été rapporté (53).

Les preuves disponibles ne permettent donc pas de déterminer si les fumées chirurgicales peuvent être un vecteur de transmission du SARS-CoV-2 en chirurgie par laparoscopie ou lors de la réalisation d'actes de chirurgie abdomino-pelvienne (52,119).

2- Mesures de précautions recommandées par les sociétés savantes lors des chirurgies réalisées dans le contexte de la pandémie de la COVID-19

Dans le contexte actuel de pandémie mondiale à nouveau coronavirus sont publiés pléthore de conseils et d'opinions de la part des sociétés savantes chirurgicales, notamment en ce qui concerne le risque lié aux fumées, domaine assez controversé. Nombreux sont ceux prônant le principe de précaution à l'heure où les propriétés d'aérosolisation de ce virus restent mal connues. En effet, l'effet délétère de l'aérosolisation du virus n'est actuellement pas quantifié. Nous sommes à ce jour dans

une situation sans précédent, où les recommandations sont actualisées au jour le jour. A ce stade, il apparait donc comme plus prudent de maximiser les précautions peropératoires.

De fait, au-delà de la problématique des fumées chirurgicales, des précautions globales doivent être mises en place au bloc opératoire dans l'objectif de diminuer le risque de transmission.

- Utiliser une salle d'opération désignée pour les patients COVID 19, mettre en place des circuits séparés patients COVID 19/patients non COVID 19
- Réduire le nombre de soignants en salle d'opération, éviter les mouvements ou changements de soignants pendant l'intervention
- Ventiler la salle d'opération (et interrompre la ventilation à pression positive, et ce jusqu'à au moins 20min après la sortie du patient de la salle d'opération)
- Assurer une décontamination entre chaque opération ainsi qu'une gestion appropriée des déchets
- Respecter les mesures générales d'hygiène
- Porter des équipements individuels de protection : ils doivent être utilisés par l'ensemble de l'équipe soignante selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (26,53,120)

Il n'y a pas de données dans la littérature suggérant de remplacer systématiquement, pendant la période de l'épidémie de la Covid-19, la laparotomie par une laparoscopie. Pourtant, parmi les mesures visant à prévenir de la contamination des soignants par le virus SRAS-CoV-2, certains auteurs préconisent de préférer la technique dite fermée de création du pneumopéritoine (53). Ainsi la chirurgie laparoscopique est davantage évoquée par les sociétés savantes.

a) Société de chirurgie gynécologique et pelvienne

« Les recommandations de l'ESGE gardent une place à la laparotomie quand il existe un risque de plaie digestive ou une chirurgie complexe. (…) La cœlioscopie doit rester la voie d'abord de référence toutes les fois que cela est possible par opposition à la laparotomie. Les risques possibles, mais non confirmés, peuvent être prévenus par une technique adéquate. »

« Chez les patientes COVID +, le personnel doit être protégé, masque FFP2 et visière de protection des yeux semblent indispensables. L'intubation est faite avec peu de monde en salle et il ne faut pas ouvrir les portes dans les 5 minutes qui suivent. L'intubation est un moment à risque de contage important et nécessite des protections pour l'anesthésiste qui doit être équipé de lunettes, d'une casaque de protection, de double paire de gants et de masque FFP2. Il faut vérifier les systèmes d'aspiration et en particulier les filtres disponibles sur les systèmes d'aspiration et la protection des personnels qui évacuent les déchets en fin d'intervention. Il est aussi très important de faire une checklist précise des instruments éventuellement nécessaires pour limiter le nombre d'ouverture des portes de la salle d'opération. L'installation est traditionnelle. Ce sont les fumées qui sont dangereuses et pas le CO_2 insufflé initialement. Il faut privilégier les pressions basses entre 8 & 10mmHg. Le chirurgien doit limiter les fuites du pneumopéritoine et leurs conséquences en limitant les productions de fumée et en les aspirant. Les systèmes d'aspiration de fumées doivent comporter des filtres de type ULPA. » (121).

b) Société française de chirurgie oncologique

« En cas de chirurgie endoscopique (cœlioscopie, thoracoscopie, cœlioscopie ou thoracoscopie robot-assistée, endoscopie digestive, gynécologique, ORL, pulmonaire), il existe un risque d'aérosolisation du virus, il faut donc limiter au maximum toute fuite de gaz et protéger le personnel en salle.

- Favoriser les basses pressions de pneumopéritoine
- Utiliser les trocarts à ballonnet, pour limiter les fuites
- Utiliser des aspirateurs de fumée munis de filtres (HEPA)
- Éviter toute extériorisation de pneumopéritoine ou pneumothorax (fuites aux changements de trocarts, à l'insertion de nouveaux trocarts, à l'exsufflation, fuites vaginales lors de l'hystérectomie voie basse). Il ne faut absolument pas créer de fuite de gaz pour améliorer la visibilité mais aspirer le gaz.
- Exsufflation en fin de cœlioscopie par aspiration. Il est totalement interdit de réaliser l'exsufflation libre.
- Porter des masques type FFP2 pour les chirurgiens, anesthésistes, IADE, IBODE dans la salle ainsi que des lunettes de protection » (122).

c) Au niveau international

La SAGES (*Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons*) recommande de prendre en considération la possibilité d'une contamination du personnel par le virus pendant une intervention chirurgicale ouverte, laparoscopique ou robotique (52). Elle souligne le risque d'aérosolisation pendant la chirurgie laparoscopique, bien que ses directives mises à jour reconnaissent un manque de preuves (13).

Le RCOG (*Royal College of Obstetricians and Gynecologists*) et la BSGE (*British Society for Gynecological Endoscopy*), quant à eux, suggèrent de préférer la laparotomie pour les chirurgies à risque d'atteinte intestinale car les risques de générer des aérosols sont potentiellement plus faibles lors de ce type de procédures (52).

Le regroupement intercollégial d'associations de chirurgies de Grande Bretagne et d'Irlande soulève la nécessité de ne pas négliger le risque de formation d'aérosols et de transmission d'agents infectieux au cours des laparotomies : « Le niveau de risque n'a pas été clairement établi et il est possible que le niveau d'équipement de protection individuelle à déployer soit important. » (52).

3- Efficacité des dispositifs de filtration des fumées dans le risque lié à la COVID 19

En 2021, une recherche bibliographique a été réalisée par A.Louguet *et al.* afin d'étudier les données d'efficacité des dispositifs d'aspiration des fumées chirurgicales vis à vis du SARS-CoV 2. Sur 19 résultats PubMed et 419 résultats Google Scholar, aucune donnée d'efficacité ni étude pratique sur le sujet n'ont été retrouvées. La littérature (PubMed : 112 ; Google Scholar : 883) demeure hésitante sur la présence de SARS-CoV-2 dans les fumées chirurgicales. Certes aucun cas n'a pour l'instant été rapporté, mais cette hypothèse n'est pas réfutée d'où un recours à ces dispositifs recommandé par certaines sociétés savantes (123).

VI) Dispositifs de filtrations des fumées chirurgicales

Comme mentionné précédemment, la protection contre les fumées chirurgicales peut donc également être assurée par une capture des fumées à proximité de la source d'émission. Celle-ci permet de minimiser l'exposition des professionnels de santé aux contaminants potentiels et maintenir un environnement plus sûr, tout en gardant en tête que la capacité d'élimination des particules est, par conception, limitée à l'efficacité et à la taille des filtres des dispositifs de captage (26).

Malgré des tests montrant une réduction jusqu'à 99 % de la fumée chirurgicale grâce à l'utilisation de ces systèmes d'évacuation, l'étude de Seipp *et al.* soulignait certaines limites à leur utilisation dont un bruit excessif (83). Ce bruit, mais aussi le coût élevé, les problèmes liés à la maintenance de l'équipement, le caractère encombrant des appareils représentent autant de freins à l'utilisation d'appareils d'extraction de fumée dans les salles d'opération (26).

Nous détaillerons dans cette partie un certain nombre de dispositifs disponibles sur le marché et contribuant au traitement des fumées chirurgicales au bloc opératoire. Elle ne constitue en aucun cas une liste exhaustive de ces dispositifs mais permet de donner une idée des différentes solutions existantes et pouvant être proposées au personnel de la salle d'opération.

Il convient de distinguer différents types de dispositifs de traitement des fumées : certains sont uniquement destinés à l'amélioration de la visibilité alors que d'autres permettent une protection du personnel grâce à l'évacuation et à la filtration de ces fumées.

Ces derniers peuvent être classés de la façon suivante :

- Les dispositifs de filtration de fumée sans équipement (c'est-à-dire sans aspirateur)
    - Nécessitant une aspiration active donc leur branchement sur le vide mural (dépression permettant l'aspiration des fumées)
    - Ne nécessitant pas d'aspiration (donc non connectés au vide mural) et fonctionnant de façon autonome grâce au passage passif des fumées à travers le filtre
- Les dispositifs de filtration de fumée avec équipement : il s'agit alors d'un ensemble de tubulures avec filtre reliées au trocart en cœlioscopie ou au bistouri en laparotomie et branchées sur un aspirateur. A noter que cet aspirateur peut aussi dans certains cas faire office d'insufflateur (exemple : Pneumoclear®).

1) <u>Dispositifs permettant l'amélioration de la visibilité</u>

Comme nous avons déjà eu l'occasion de l'évoquer, la libération de fumées au cours d'interventions chirurgicales conduit à une altération de la visibilité, problématique majeure impactant notamment le temps opératoire. Des dispositifs sont conçus pour palier à ce problème, améliorer la visibilité et donc les conditions de travail des chirurgiens.

Le système UltravisionTM® (Alesi Surgical) élimine la fumée et les particules produites pendant les procédures électro chirurgicales, afin d'aider à maintenir un champ visuel clair.

Figure 19 UltravisionTM® (Alesi Surgical)(124)

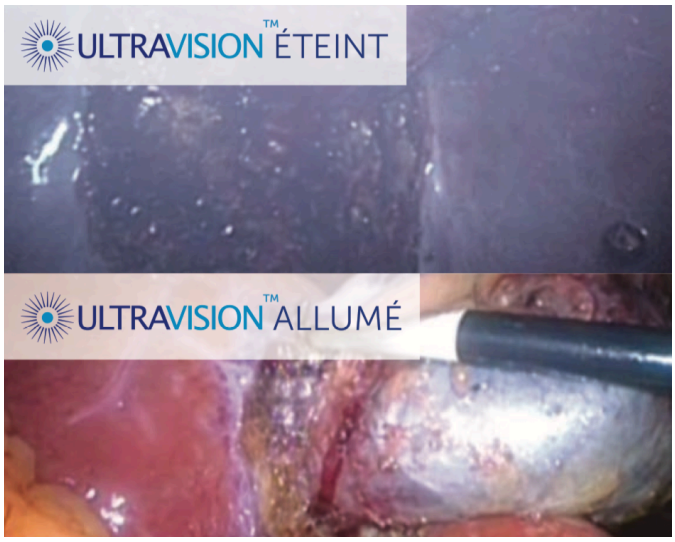


Figure 20 Comparaison de la visibilité avec et sans l'UltravisionTM® (125)

Actif tout au long de la chirurgie, le système empêche l'accumulation de fumée. Pour cela, il émet des ions négatifs qui vont entrer en collision avec les particules crées lors de l'utilisation d'outils électro-chirurgicaux. Celles-ci vont donc être provisoirement chargées en ions négatifs (ionisation) et être attirées sur les tissus du patient en raison de la charge électrostatique. Les particules vont ainsi précipiter dans la cavité péritonéale au fur et à mesure qu'elles se créent.

Ainsi l'UltravisionTM® permet d'obtenir les résultats suivants (126) :

- Aucune pause durant la cœlioscopie dans 77% des procédures et donc une réduction de la durée des interventions chirurgicales

- Aucun nettoyage de la caméra dans 85% des procédures
- 0% de fumées chirurgicales dans le bloc opératoire contribuant ainsi à l'amélioration de la sécurité du personnel
- 34% de réduction de la consommation de CO_2 : ceci aboutit à une diminution des coûts.
- Aucun échange de gaz : il maintient un pneumopéritoine constant et permet d'effectuer des interventions à basse pression
- Une efficacité et des résultats chirurgicaux améliorés : il permet d'optimiser la précision et la concentration chirurgicale

De plus, la fonctionnalité du système n'est pas limitée par la taille des particules (26).

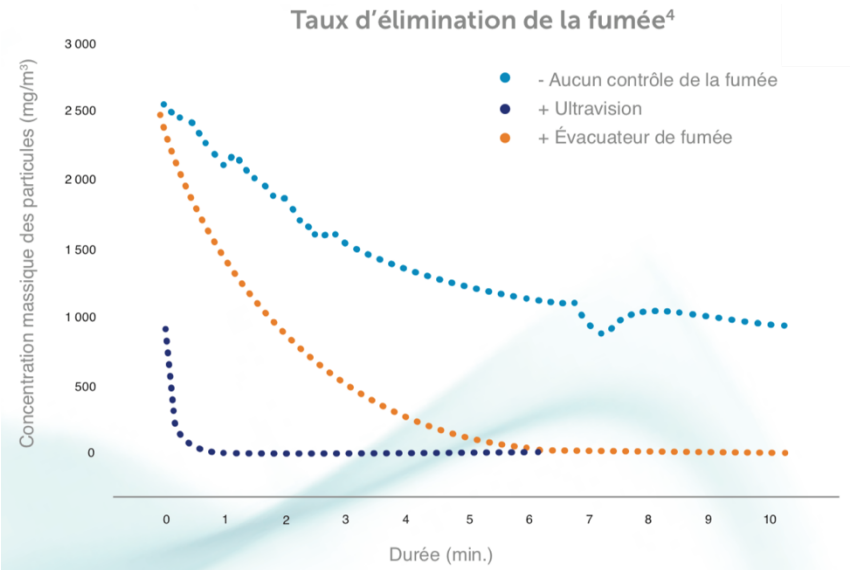


Figure 21 Taux d'élimination de la fumée avec UltravisionTM® (125)

2) Dispositifs de filtration des fumées sans équipement

1- Montage artisanal

L'essor rapide de la COVID 19 et la possibilité de sa transmission via les fumées chirurgicales a entrainé une remise en question soudaine de nos pratiques de traitement des fumées chirurgicales et a nécessité de redoubler d'effort et d'inventivité pour palier à l'absence de dispositif efficace référencé dans la majorité des CHU. Est alors née au CHU de Nice l'idée d'un montage artisanal élaboré à partir de tubulures d'insufflation et comprenant un filtre afin de créer un circuit fermé d'exsufflation en cœlioscopie et de limiter l'exposition aux fumées chirurgicales. Pour rappel, la chirurgie laparoscopique nécessite la création et le maintien d'un pneumopéritoine efficace. Le risque d'un effet aérosol à la faveur de fuites de gaz (via le trocart) ou au moment de l'exsufflation est permanent. De plus, du fait du faible remplacement du pneumopéritoine, l'aérosol formé pourrait contenir une concentration élevée de virus en suspension (53).

Cette solution, bien que fastidieuse à mettre en place, représente une alternative peu coûteuse et rapidement disponible permettant d'éviter l'exposition du personnel aux fumées à l'exsufflation du pneumopéritoine.

Pour la réalisation de ce montage, un robinet 3 voies est branché sur le trocart insufflateur et relié à 2 tubulures d'insufflation :

- L'une branchée sur l'insufflateur *(non visualisable sur la figure 21)*
- L'autre branchée sur un bocal d'aspiration. Sur cette tubulure, sont retrouvés le filtre ainsi qu'une valve automatique d'aspiration contrôlée aussi appelée stop vide

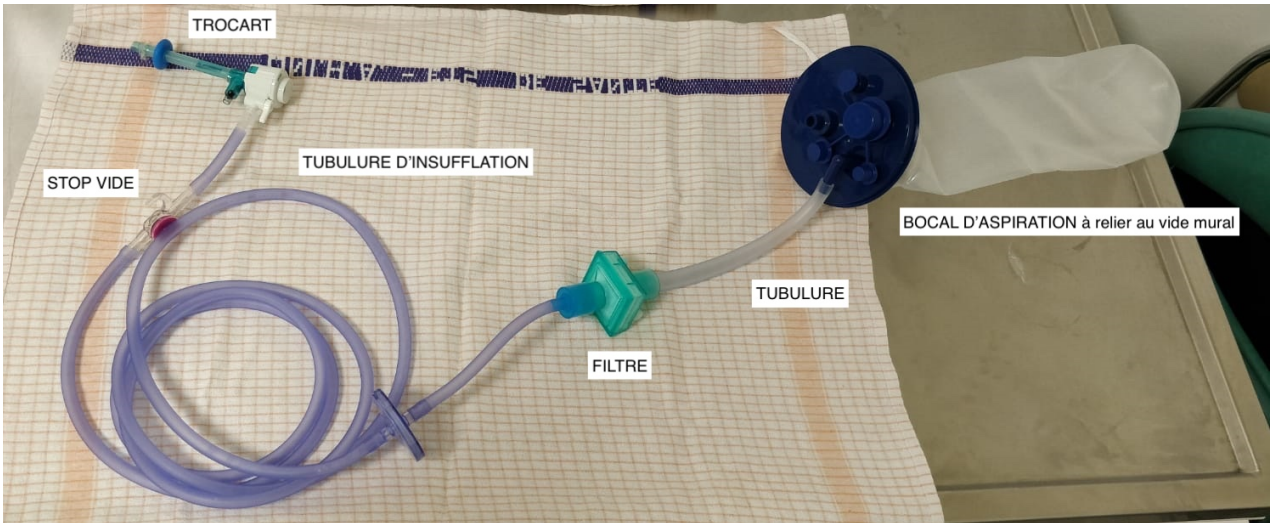


Figure 22 Exemple de montage artisanal (versant aspiration)

Le bocal d'aspiration est un bocal de recueil relié, par le biais de tubulures, d'une part au vide mural et d'autre part au patient. Il est majoritairement destiné à accueillir les liquides biologiques aspirés au cours de certaines interventions (aspiration bronchique, drainage ...). Le vide médical (aussi appelé vide chirurgical selon son utilisation) est un fluide médical (au sens de la norme NF EN 737-3). Il est toujours produit sur site à partir d'une centrale de vide dont le fonctionnement repose sur un minimum de 3 pompes. Le vide médical est ensuite distribué dans l'hôpital par l'intermédiaire d'un réseau permettant de fournir un débit à une pression négative (communément appelé aspiration). L'accès à ce vide mural se matérialise par le biais de prises disponibles dans les services de soins ainsi qu'au bloc opératoire. Sur ces prises où sont branchées les tubulures, nous retrouvons un régulateur de vide muni d'un dispositif anti-refoulement et d'un filtre antibactérien. Le régulateur de vide permet de mesurer et régler le niveau de dépression grâce à un manomètre. Le filtre du régulateur de vide et ceux retrouvés sur les tubulures contribuent à protéger le réseau de distribution d'une contamination biologique. Ce risque ne peut être négligé que ce

soit dans le cadre de l'aspiration des fumées chirurgicales ou des liquides biologiques (127).

Le filtre utilisé dans le cas de ce montage artisanal est un filtre patient anesthésie HEPA (ici le Sterivent Mini® commercialisé par Medtronic). Il permet une filtration bactérienne avec une efficacité supérieure à 99,9999% et une filtration virale avec une efficacité supérieure à 99,999%. Ainsi il a été validé contre le virus de l'hépatite C (VHC), le VIH de type 1 et *Mycobacterium tuberculosis* et pour la filtration des protéines naturelles allergéniques de latex et les prions (128).

2- Solution avec aspiration murale

La plupart des évacuateurs de fumée actuellement disponibles sur le marché utilisent une combinaison d'aspiration et de filtration mécanique pour l'élimination de la fumée. En l'absence d'équipement, cette aspiration est réalisée, comme pour le montage artisanal, grâce au vide médical.

Pour se faire, il est possible d'utiliser des filtres vendus séparément qui peuvent être reliés à une tubulure branchée :

- Sur le trocart en cœlioscopie (tubulure Plumeport SEO® Conmed)
- Directement à la tubulure d'aspiration du bistouri électrique en laparotomie (bistouri Plumepen ultra® Conmed)

C'est le cas du filtre dit « journalier » aussi appelé filtre Buffalo® commercialisé notamment par Péters surgical et Idimed. Ce filtre ULPA est prévu pour une utilisation journalière sauf en cas d'usure visible pouvant nécessiter un changement précoce. L'utilisation avec un piège à fluide (vendu séparément) permet d'éviter l'humidification du filtre.

Figure 23 Filtre Buffalo ® (exemple de son utilisation en laparotomie avec un bistouri électrique) (124)

Une autre alternative est disponible sur le marché. Il s'agit de la tubulure Plumeport activ® (Conmed) avec filtre (ULPA et charbon) et piège à liquides intégrés. Cette tubulure stérile se connecte (compatibilité Luer lock) au robinet du trocart et au bocal d'aspiration (donc au vide médical). Elle comprend une valve de réglage du débit (utilisable à une main) permettant de diminuer ou d'augmenter le niveau d'aspiration selon la quantité de fumée générée. Lors du réglage du débit, il est important de prendre en compte le risque de diminution du volume du pneumopéritoine lors de l'évacuation prolongée de la fumée par le robinet de trocart. D'après la fiche technique du produit, la capacité de débit de ce filtre est supérieure de 50% à celles des filtres laparoscopiques « passifs » concurrents (c'est-à-dire nécessitant une aspiration active pour fonctionner). Toutefois, parmi les inconvénients de la tubulure Plumeport activ®, peut être citée la capacité limitée de son filtre (saturé en 4h) nécessitant son remplacement fréquent (129).

Figure 24 Plumeport activ ® (124)

3- Solution sans aspiration murale

Par opposition aux dispositifs nécessitant une aspiration active assurée par le branchement au vide médical, certains dispositifs se basent sur un système d'aspiration passive.

L'Endosafe® (commercialisé par Smices) par exemple se présente sous la forme d'une capsule filtrante jetable non stérile reliée au trocart par le biais de tubulures stériles à usage unique. Malgré l'avantage que peut représenter sa connectivité Luer Lock®, il convient de noter que ce dispositif n'est adapté que pour une utilisation en cœlioscopie (il ne peut être relié à des bistouris). La capsule comprend un filtre ULPA associé à un filtre à charbon actif (permettant une efficacité optimale sur les composants organiques volatils). Le piège à eau intégré permet quant à lui de capter la vapeur d'eau. Ce dispositif permet une évacuation automatique des fumées lorsque le générateur fonctionne grâce au boitier Hubsafe® (130).

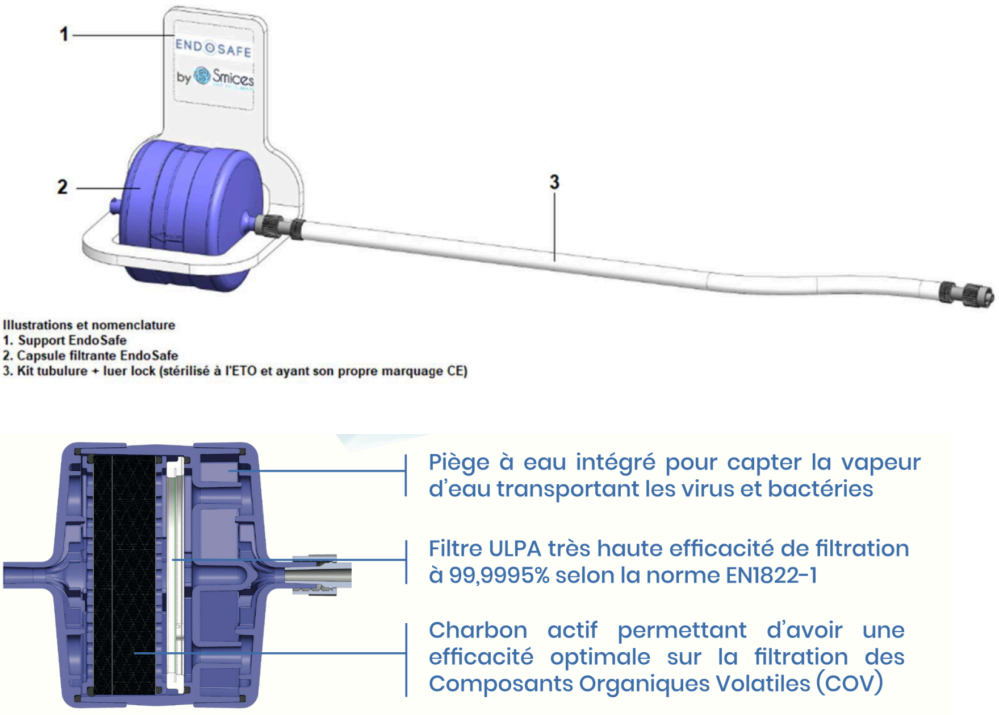


Figure 25 Endosafe® (Smices medical) (131)

Le système Endosafe® peut être qualifié de dispositif à usage unique. En effet, il ne peut être utilisé que pour une seule et même intervention pour une durée n'excédant pas les 8h (130).

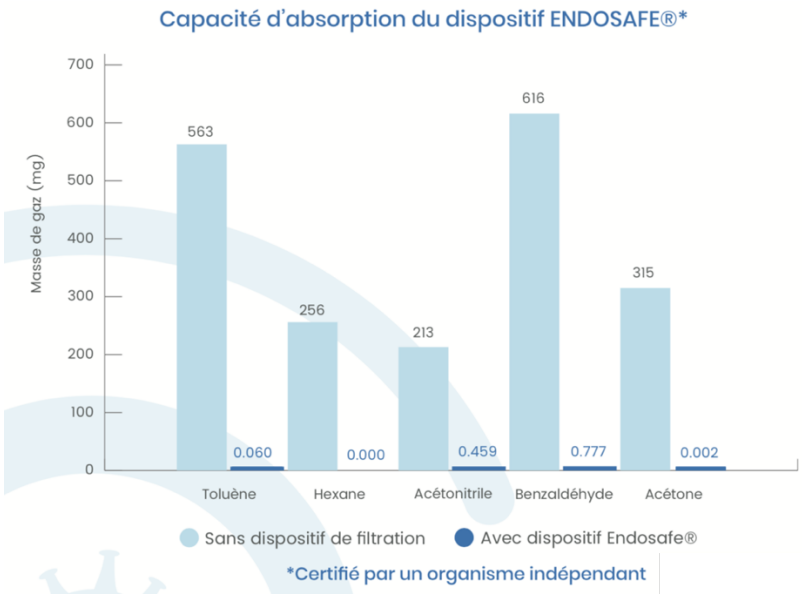


Figure 26 Capacité d'absorption du système Endosafe® (130)

Quant au Lina Lapguard® (commercialisé par Kebomed), il s'agit d'une tubulure à usage unique avec filtre intégré (ULPA et charbon). Reliée au trocart, elle est utilisée en cœlioscopie. Le clamp à roulette présent sur la tubulure permet un contrôle du débit de gaz (132).

Figure 27 Lina Lapguard® (Kebomed) (132)

3) Dispositifs de filtration des fumées branchés avec équipement (aspirateur)

Outre les dispositifs dont l'action repose sur l'aspiration murale ou sur un système d'aspiration passive, il existe, comme mentionné précédemment, des dispositifs dits « avec équipement ». Ils se divisent en deux groupes :

- Les aspirateurs simples nécessitant d'être associés à un insufflateur indépendant classique (par exemple, le Visiclear® ou l'IES 3®)
- Les dispositifs insufflateurs incluant un système d'aspiration de fumées (comme l'Airseal® ou le Pneumoclear®).

Le Visiclear® (commercialisé par Idimed) est un dispositif d'aspiration des fumées (sans insufflateur) équipé d'un système de déclenchement automatique de l'aspiration à l'utilisation de l'énergie. Ce dispositif d'activation automatique appelé EZ Link contribue à prolonger la durée de vie du filtre (18 à 35h d'utilisation). Il peut être utilisé

en cœlioscopie lorsqu'il est utilisé avec les tubulures PlumePort SEO ® (reliées au trocart) ou en chirurgie ouverte lorsqu'il est directement relié aux bistouris électriques Plume Pen Pro®, Plume Pen Elite® ou Plume Pen Ultra®. D'après la fiche technique, il permet d'éliminer 90% des fumées chirurgicales. Considéré comme l'un des aspirateurs de fumée les plus silencieux du marché (124), il est équipé d'un filtre permettant une filtration en 4 étapes : pré filtre avec absorbeur de liquide (5mL), charbon actif, filtre ULPA et post filtre pour les particules fines de carbone. L'ajout d'un piège à fluide ViroSafe® permet d'éviter la saturation du filtre par la vapeur d'eau et donc d'aider à maintenir l'intégrité du système de filtration et à prolonger la durée de vie du filtre. Néanmoins, il convient de noter que l'évacuation prolongée de la fumée conduit à un risque de diminution du volume du pneumopéritoine (124,133).

Figure 28 Visiclear ® (Idimed) (124)

Figure 29 Bistouris électriques compatibles avec le Visiclear ® (124)

Figure 30 Tubulure, activateur et piège à fluide utilisables avec le Visiclear ® (124)

Le système d'aspiration IES 3® (commercialisé par la société Erbe) permet aussi de réduire la concentration de fumées au sein du bloc.

Figure 31 Aspirateur IES 3® (Erbe) (134)

Ses différents modes de fonctionnement permettent une utilisation variée :

- En chirurgie ouverte grâce au mode OPEN en y associant des manches de bistouris à usage unique avec aspiration

- En chirurgie laparoscopique grâce au mode LAP lorsqu'il est combiné à une tubulure d'aspiration à connecter au trocart. Dans ce cas, la puissance d'aspiration devra être diminuée afin d'éviter une perte trop importante du pneumopéritoine et empêcher une consommation excessive de CO_2.

L'aspirateur peut être activé de différentes manières : automatiquement à l'activation du générateur lorsqu'il est couplé au générateur Erbe VIO®, grâce à un dispositif d'activation automatique se branchant sur tous les appareils d'électrochirurgie ou enfin par l'intermédiaire d'une pédale dans le cadre d'utilisations du laser et d'ultrasons (134).

Il fonctionne avec une cartouche filtrante à 5 niveaux dont le premier correspond à un filtre ULPA-15 (selon EN 1822-3 :2011 et EN 1822-5 :2011 et satisfaisant les exigences de la norme ISO 16571) qui retient 99,9995% de toutes les particules de 0,1µm. Les particules inferieures à 0,1µm et celles supérieures à 0,3µm sont piégées avec une efficacité encore plus élevée que 99.9995 % par des mécanismes physiques comme l'effet de diffusion, l'effet de barrière et l'effet de tamisage (135).

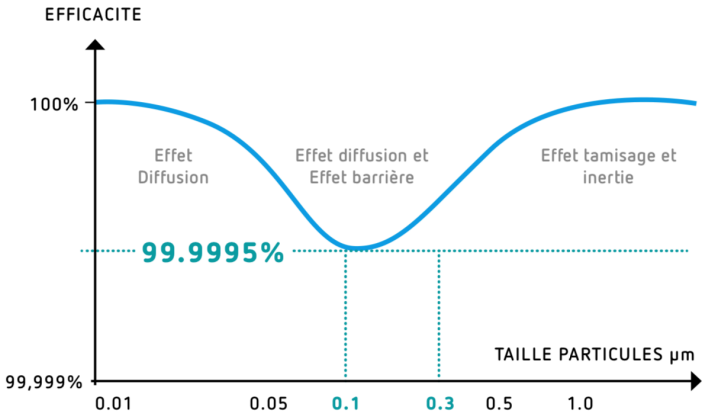


Figure 32 Efficacité du filtre ULPA compris dans la capsule filtrante Erbe (135)

La cartouche filtrante peut être protégée de la pénétration de liquides et de la contamination par des particules plus grossières par l'utilisation d'un préfiltre et d'un piège à eau. A noter que cette cartouche filtrante présente une durée de vie limitée et doit être changée pour conserver une bonne efficacité. Pour une utilisation normale, la fréquence de changement de filtre est estimée à 2 fois par an (134).

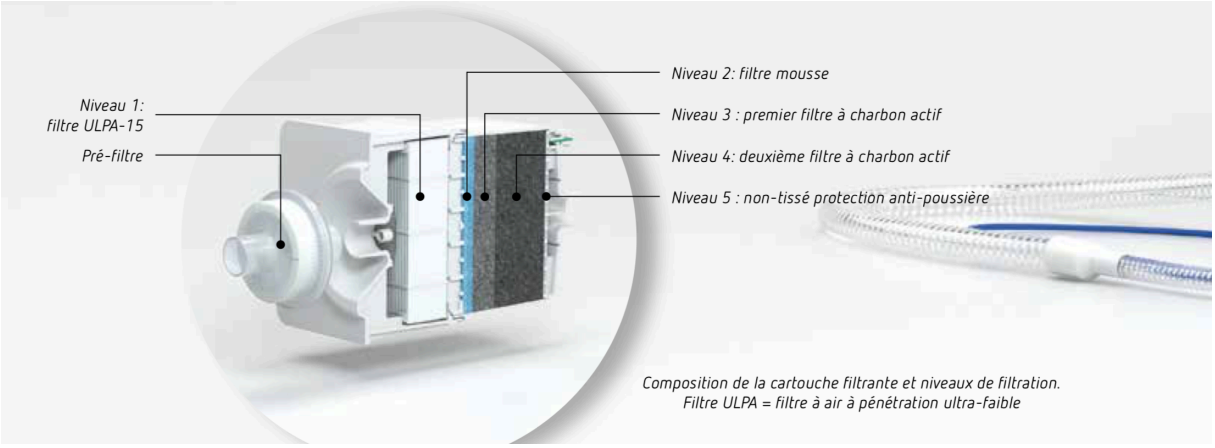


Figure 33 Composition de la cartouche filtrante du dispositif IES 3® (Erbe) (134)

Concernant le confort d'utilisation, selon des données internes Erbe (évaluation sommative II), 91% des personnes interrogées estiment que le dispositif est agréable et silencieux. A 60% de la puissance d'aspiration, l'émission sonore est inférieure ou égale à 49dB(A). Ce dispositif peut également être considéré comme peu encombrant car il peut être intégré au poste de travail VIO® 3 pour les établissements utilisant le générateur Erbe VIO® (134).

L’insufflateur Airseal® (commercialisé par la société française AB Medica et fabriqué par Conmed) est l'un des premiers systèmes d'insufflation sophistiqués. Ce dispositif médical de classe IIa a été commercialisé pour la première fois en France en mars 2012, après avoir obtenu l’agrément FDA en mars 2011. Il est destiné à un usage au cours des procédures endoscopiques diagnostiques et/ou thérapeutiques pour distendre la cavité péritonéale en la remplissant de gaz, pour établir et maintenir une voie d’entrée pour les instruments endoscopiques et pour évacuer les fumées chirurgicales.

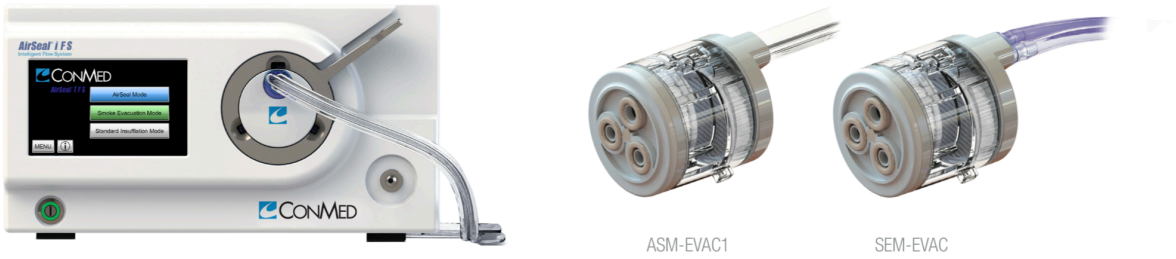


Figure 34 Airseal ® (AB Medica) (117)

Ce dispositif d’insufflation peut être utilisé selon trois modes :

- Mode Insufflation standard

- Mode Évacuation des fumées seul

- Mode Airseal dit « Insufflation supérieure ».

Le premier correspond à un mode d’insufflation classique (c’est-à-dire d’apport de CO_2 permettant la formation du pneumopéritoine) sans évacuation des fumées et utilise une tubulure simple lumière. Les deux autres modes (Airseal® et Évacuation de fumées) combinent l’insufflation à l’évacuation de fumées à travers des tubulures à

filtres ULPA. En mode Airseal®, la tubulure présente trois lumières (contre 2 en mode Évacuation des fumées) :

- La première est utilisée pour l'insufflation du CO_2 afin de créer le pneumopéritoine
- La 2ème permet de faire re-circuler le CO_2 tout en aspirant et filtrant les fumées qui ont tendance à gêner la visibilité
- La troisième permet de contrôler la pression intra-abdominale en direct et de répondre immédiatement à des variations de pression, sans intervention de l'opérateur (117).

Ce mode présente donc l'avantage d'optimiser le débit de gaz afin d'assurer un pneumopéritoine stable et de permettre une laparoscopie basse pression. Opérer à des pressions plus basses permet une réduction du volume du pneumopéritoine et pourrait réduire le risque théorique d'aérosolisation du virus dans l'abdomen. Au-delà de la réduction du volume de particules aérosolisées, l'utilisation de pressions inférieures permettrait une amélioration de la qualité de vie sans impacter l'opération (2). La littérature montre d'ailleurs qu'en assurant un pneumopéritoine stable, l'évacuation continue des fumées et l'accès sans valve à la cavité abdominale, le système Airseal® a permis une réduction du temps d'intervention et donc une augmentation d'efficacité notamment grâce à l'évacuation automatisée de la fumée (sans nécessité de créer une fuite volontaire de CO_2 pour les évacuer) et à l'absence de baisse de pression brutale due à l'aspiration. Trois études ont permis de mettre en évidence une diminution du temps opératoire par l'utilisation du système Airseal® (136–138). Par ailleurs, l'utilisation de ce système permettrait une diminution des douleurs post opératoires. Une étude rétrospective comparant 17 promontofixations cœlioscopiques opérées de façon consécutive avec insufflateur Airseal® et 17

promontofixations cœlioscopiques réalisées avec insufflateur standard, sur une période d'un an, par un unique opérateur a permis de montrer l'impact médico économique de son utilisation. En effet dans cette étude, la douleur postopératoire était moindre chez les patientes du groupe Airseal® avec 40 % de recours aux morphiniques vs 52 % pour le groupe non Airseal® (p >0,05). De plus le séjour hospitalier était plus court dans le groupe Airseal® avec 65 % versus 35 % des patientes aptes à la sortie à j0, et 95 % versus 76 % à j1 (p >0,05) (139).

En revanche, en mode Airseal, le CO_2 insufflé est remis en circulation. Ceci permet de limiter la consommation de CO_2 ainsi que la formation de buée sur la caméra mais peut aussi contribuer à l'augmentation du risque théorique de concentration supplémentaire du virus aérosolisé. Dans leur article, Vigneswaran *et al.* suggèrent donc d'envisager l'utilisation du mode d'évacuation des fumées pour permettre une circulation plus libre du pneumopéritoine (2).

Le Pneumoclear® (de chez STRYKER) est lui aussi un insufflateur de CO_2 destiné à la réalisation d'interventions endoscopiques. De classe IIa, il a obtenu le marquage CE en Janvier 2018 et sa commercialisation a débuté en France en juillet 2018. Il peut être utilisé selon plusieurs modes : soit en tant qu'insufflateur standard grâce à l'utilisation d'une tubulure d'insufflation (tubulure Stryker spécifique de coût plus élevé que les tubulures d'insufflation classiques) soit en tant qu'insufflateur et aspirateur de fumées grâce à une tubulure avec filtre dans les chirurgies émettant plus de fumées. Bien que traditionnellement utilisé pour améliorer la visibilité chirurgicale, ce système a l'avantage supplémentaire de permettre une filtration des aérosols générés. A cet effet, le filtre utilisé est un filtre à cinq couches : une couche d'absorption, un filtre ULPA conçu pour filtrer les particules aussi petites que 0,08 microns jusqu'à 99,98 %

d’efficacité, une barrière d'humidité et deux couches de charbon actif éliminant les polluants, les contaminants, les gaz nocifs et autres impuretés.

Figure 35 Pneumoclear ® (Stryker) (140)

Figure 36 Exemples de tubulures compatibles avec le Pneumoclear ® (140)

A noter qu’il existe par ailleurs des tubulures chauffantes et humidifiantes permettant un préchauffage et une humidification des gaz. Ceci contribue à faciliter le rétablissement postopératoire du patient notamment en réduisant l’incidence de l’hypothermie péri-opératoire, en diminuant le taux d’infection du site opératoire et l’inflammation péritonéale locale…(141–143).

Tableau II Tableau récapitulatif des différents systèmes d'évacuation des fumées

Dispositif	**Fournisseur**	**Dispositif associé**	Fournisseur	**Aspiration**
Filtre Buffalo®	Peters surgical/Idimed	Tubulure Plumeport SEO®	Conmed	Active par aspiration murale
		Bistouri Plumepen®	Conmed	
Tubulure Plumeport activ®	Conmed	N/A	N/A	Active par aspiration murale
Capsule filtrante et tubulure	Smices	N/A	N/A	Passive
Tubulure Lina Lapguard®	Kebomed	N/A	N/A	Passive
Aspirateur Visiclear®	Idimed	Tubulure Plumeport SEO®	Conmed	Active
		Bistouri Plumepen®	Conmed	Active
Aspirateur IES 3®	Erbe	Set de tubulures LAP IES 3	Erbe	Active
		Bistouris de la gamme VIO®	Erbe	
Aspirateur Airseal®	AB Medica (produit par Conmed)	Tubulure à triple lumière ASM-EVAC® en mode Airseal	AB Medica	Active
Aspirateur Pneumoclear®	Stryker	Tubulures PneumoClear® (5 modèles)	Stryker	Active

Dispositif	**Equipement**	**Mode insufflateur**	**Coelioscopie**	**Laparotomie**
Filtre Buffalo®	Non	N/A	Oui	Oui
Tubulure Plumeport activ®	Non	N/A	Oui	Non
Capsule filtrante et tubulure Endosafe®	Non	N/A	Oui	Non
Tubulure Lina Lapguard®	Non	N/A	Oui	Non
Aspirateur Visiclear®	Oui	Non	Oui	Oui
Aspirateur IES 3®	Oui	Non	Oui	Oui
Aspirateur Airseal®	Oui	Oui	Oui	Non
Aspirateur Pneumoclear®	Oui	Oui	Oui	Non

Dispositif	**Activation**	**Fréquence de changement du filtre**	**Qualité du filtre**	**Piège à fluide**
Filtre Buffalo®	Continu avec le vide mural	Journalier	ULPA	Séparé
Tubulure Plumeport activ®	Continu avec le vide mural	Toutes les 4h	ULPA + charbon	Intégré
Capsule filtrante et tubulure Endosafe®	Automatique si boitier Hubsafe®	Toutes les 8h	ULPA + charbon	Intégré
Tubulure Lina Lapguard®	Débit de gaz réglé via clamp à roulette	*Non spécifié*	ULPA + charbon	N/A
Aspirateur Visiclear®	Dispositif d'activation automatique EZ Link	Toutes les 18 à 35h selon le mode	4 couches dont ULPA et charbon	Séparé
Aspirateur IES 3®	A l'activation du générateur, via dispositif d'activation automatique ou	2 fois par an	5 couches dont ULPA et charbon	Séparé
Aspirateur Airseal®	Automatique	Filtre sur la tubulure donc changé à chaque intervention	ULPA	N/A
Aspirateur Pneumoclear®	Automatique	Filtre sur la tubulure donc changé à chaque intervention	5 couches dont ULPA et charbon	N/A

VII) Discussion

Les professionnels du bloc opératoire sont exposés à différents risques professionnels. Par risque professionnel, nous entendons des événements dont l'occurrence met en danger des personnes dans le cadre de leur métier (144). Les fumées chirurgicales font partie des risques professionnels au même titre que les accidents d'exposition au sang ou les agents anesthésiques volatils par exemple.

L'attention portée à la gestion de ces risques s'est accrue sous la pression grandissante des personnels exposés et des pouvoirs publics. Dernièrement, le contexte pandémique de la COVID-19 a ramené sur le devant de la scène la problématique du risque biologique et en particulier l'exposition aux particules virales aérosolisées dans les fumées chirurgicales.

La gestion des risques professionnels s'attache à identifier et à réduire les dangers potentiels qui pèsent sur le personnel de l'hôpital. Elle doit être intégrée à la gestion globale des risques de l'établissement. Pour le soignant, connaître ces risques participe à leur détection, mais aussi à une plus grande implication dans leur prévention (145).

Dans le peu d'études s'attachant à évaluer les connaissances des soignants à propos des risques liés aux fumées chirurgicales ou à l'utilisation en pratique des moyens de prévention disponibles, sont constatés un manque de connaissance des dangers de la fumée chirurgicale et un manque de conformité dans l'évacuation de cette dernière (37). Pourtant, actuellement, environ 80 % des interventions chirurgicales utilisent des dispositifs d'électrochirurgie et génèrent donc des fumées chirurgicales engendrant différents niveaux d'exposition professionnelle (146).

Il apparait comme évident que les personnes travaillant dans les salles d'opération pourraient davantage se protéger des fumées et adapter leurs pratiques de manière à minimiser les risques si elles en connaissaient les mécanismes de production, les risques encourus et les moyens disponibles pour se protéger. Les acteurs de prévention en santé au travail se doivent d'envisager la mise en place de programmes de prévention, de formation et d'information au sein des hôpitaux (33). Même s'il n'existe pas, à ce jour, de loi spécifique relative à la protection du personnel de bloc opératoire face aux risques liés aux fumées, certaines obligations réglementaires sont précisées dans le Code du Travail concernant la qualité de l'air et la protection du personnel. Des recherches supplémentaires devraient être encouragées pour quantifier l'exposition des professionnels de santé, évaluer leurs connaissances et l'efficacité des mesures de protection à leur disposition. Cela nécessite non seulement plus d'investigations et de recherches pour démontrer les effets nocifs de la fumée chirurgicale et analyser le contenu de la fumée, mais aussi des études à long terme sur les limites d'exposition.

Comme nous avons pu le voir, en chirurgie ouverte mais aussi en cœlioscopie, les techniques chirurgicales employées utilisant la chaleur (appareils électro-chirurgicaux, lasers) ou les ultrasons exposent les opérateurs aux fumées produites. Si leur composition quantitative varie notablement selon un grand nombre de paramètres (instruments chirurgicaux, technique chirurgicale, tissu opéré…), nous y retrouvons toujours un mélange complexe de constituants biologiques, cellulaires, d'aérosols liquides ou solides, de gaz et de vapeurs dont la taille leur permet d'être inhalés et de se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Le choix de la technique et de la source d'énergie utilisées, bien que crucial, reste controversé. Certains auteurs suggèrent que le risque de contamination est moindre en laparoscopie du fait de la

nature fermée du champ opératoire (53). Pourtant, plusieurs études montrent un risque plus important par rapport à la laparotomie car, si les opérateurs sont peu exposés aux fumées chirurgicales durant l'intervention, les aérosols sont plus concentrés et peuvent être libérés lors de l'ouverture des valves du trocart par exemple (13). Concernant l'instrumentation, il est important de noter que la fumée générée par électrocoagulation contient plus de particules que la fumée d'une irradiation au laser ou ultrason (25,81) et plus de cellules intactes contenant de l'ADN viral (d'où son grand potentiel infectieux).

Outre l'odeur désagréable et l'altération de la visibilité, inconvénients majeurs (en lien notamment avec l'allongement du temps opératoire) (74–77), les fumées chirurgicales peuvent être à l'origine de signes d'intoxication aiguë à type de céphalées, d'asthénie, de nausées ou encore d'irritations des yeux et des voies respiratoires en lien avec les particules chimiques qu'elles contiennent. D'autres effets secondaires ont été constatés comme des pneumonies congestives interstitielles, des bronchiolites, de l'emphysème mais aussi une augmentation du risque de BPCO chez le personnel exposé (84). Certains auteurs comparent même les effets néfastes des fumées chirurgicales à ceux du tabagisme passif (86).

Il est important de garder en tête que le risque lié aux fumées chirurgicales est un risque multiforme qui inclut des risques biologiques de transmission virale mais aussi des risques physico-chimiques.

Il existe des divergences entre les conclusions des auteurs d'études expérimentales portant sur les risques biologiques liés aux fumées chirurgicales. L'estimation du risque chez l'homme est fondée principalement sur l'extrapolation de nos connaissances issues d'études *in vitro* et sur l'animal et il n'existe pas d'évaluation réelle des effets sur le personnel exposé. Pourtant, malgré les doutes qui persistent

dans la littérature sur le risque infectieux lors d'exposition à des fumées chirurgicales, nous ne pouvons négliger les cas rapportés dans la littérature. Même si le lien de causalité reste difficile à apprécier, les cas décrits d'infection à papillomavirus au niveau laryngé chez des professionnels de santé doivent alerter sur ce risque (33). Néanmoins, le risque lié au papillomavirus reste le mieux documenté et si des études expérimentales suggèrent la présence d'autres virus potentiellement viables dans les fumées chirurgicales comme le VIH ou le VHB, le risque de transmission au personnel soignant est incertain. Bien que le caractère infectieux du VIH dans les aérosols ait été montré (48), à ce jour, aucun cas n'a été décrit (49). De même, actuellement, les preuves disponibles ne permettent pas de déterminer si les fumées chirurgicales peuvent être un vecteur de transmission du VHB (51) ou du SARS-CoV-2 en laparoscopie. Pourtant, des études rapportent la détection de ces virus dans les aérosols (51,55) et ne permettent donc pas d'exclure la possibilité d'une transmission par cette voie (51,56). Enfin, l'aérosolisation potentielle de cellules tumorales représente un risque biologique supplémentaire à prendre en compte et à étudier (64). Compte tenu de l'incertitude sur le niveau de risque, des investigations plus poussées sont nécessaires afin de confirmer dans quelle mesure l'exposition à des microorganismes pathogènes et cellules tumorales présents dans les fumées chirurgicales est néfaste pour la santé du personnel qui œuvre dans les salles d'opération.

Si la toxicité liée aux nanoparticules présentes dans les fumées (risque physique) n'est que très peu documentée (1), la multitude de substances classées CMR retrouvées parmi les produits de pyrolyse ne laisse aucun doute sur le risque chimique. Et si, pour certains produits chimiques, les signes attribuables à des expositions aiguës ne surviennent qu'à des concentrations très supérieures à celles

observées dans les fumées chirurgicales, d'autres agissent à faible concentration et peuvent être à l'origine d'une toxicité chez le personnel exposé (65).

Bien qu'une prise de conscience ait débutée dans les années 2000 en France, face aux résultats contradictoires retrouvés dans la littérature il est à ce jour difficile de conclure sur un risque formel. Plusieurs articles montrent d'ailleurs une absence de relation significative entre l'exposition aux fumées chirurgicales et les effets néfastes pour la santé (29,30) et ne concluent pas forcément sur la nécessité de mettre en place des mesures de protection (32). Pourtant, avec la volonté de protéger les professionnels de santé contre ces risques potentiels, plusieurs sociétés savantes recommandent malgré tout la mise en place de mesures de précaution pour l'évacuation des fumées chirurgicales (52). Récemment, en lien avec la pandémie à nouveau coronavirus, de nombreux auteurs et sociétés savantes ont également nourri cette réflexion et permis, grâce à leurs travaux et leur expertise, l'élaboration de nouvelles recommandations à ce propos. Malgré l'absence de consensus dans la littérature, pendant la période de l'épidémie de la Covid-19, certains auteurs préconisent de préférer la technique dite fermée de création du pneumopéritoine (laparoscopie) (53) et de mettre en place un certain nombre de précautions afin de diminuer le risque de transmission : limiter la fuites des fumées et gaz concentrés au niveau du pneumopéritoine (grâce à l'utilisation d'un trocart avec ballonnet par exemple), utiliser des aspirateurs avec filtre (de préférence ULPA), utiliser des aspirateurs à l'exsufflation pour éviter la libération des fumées dans l'environnement du bloc opératoire, porter un masque, travailler à basse pression… Au CHU de Saint Etienne, le sujet de la filtration des fumées chirurgicales a été abordé le 3 septembre 2020 au cours d'une réunion du CLIN (Comité de lutte contre les infections nosocomiales). Le comité ne s'est pas prononcé quant à la généralisation de

l'utilisation des dispositifs d'évacuation des fumées en l'absence de recommandations officielles des sociétés savantes dans le cadre de la pandémie à nouveau coronavirus et de données d'efficacité des dispositifs dans ce contexte. Ils ont recommandé une limitation de leur emploi aux indications de cancérologie en considérant le risque de transmission du papillomavirus (HPV) pour lequel des cas ont été décrits dans la littérature.

Comme nous avons pu le voir, il existe donc un certain nombre de mesures de protection collective et individuelle qui peuvent et doivent être mises en place autant que faire se peut afin de contribuer à l'amélioration de la sécurité du personnel. Parmi elles, nous pouvons en citer plusieurs qui sont complémentaires : la ventilation générale, l'utilisation d'appareils de protection respiratoire individuels ou encore la mise à disposition de dispositifs d'évacuation et de filtration des fumées (qu'ils soient captifs ou non d'un équipement).

La ventilation générale de la salle est considérée à elle seule comme insuffisante pour capter efficacement les fumées générées au niveau du site opératoire. Le port du masque (appareil de protection respiratoire de type FFP2) est également recommandé dès l'entrée au bloc opératoire. Contrairement aux masques médicaux, les APR permettent à la fois la protection contre l'inhalation d'agents infectieux transmissibles par voie aérienne ou gouttelettes et les particules en suspension dans l'air. En revanche, ils ne protègent pas contre les gaz et les vapeurs d'où l'importance d'associer les différentes mesures de prévention (101,102). Par ailleurs, le choix de cet APR est crucial et s'il doit prendre en compte l'efficacité, l'impasse ne doit pas être faite sur le confort et la tolérance car ils conditionnent leur bonne utilisation. Et qu'en est-il des masques à cartouche, demi-masques ou masques complets filtrants, appareils à ventilation assistée employés dans d'autres secteurs

d’activité ? Efficaces contre les aérosols et les gaz, leur port constitue néanmoins une gêne, principalement en raison de leur poids, de leur encombrement et/ou des différences de pression qui peuvent exister à l’inspiration et à l’expiration par rapport à une respiration libre. Cette pénibilité exclut leur utilisation au quotidien au bloc opératoire (147).

Techniquement, le captage à la source des fumées chirurgicales reste la mesure de prévention la plus efficace puisque l’aspiration des fumées au plus près du site chirurgical permet une réduction pouvant aller jusqu’à 99 % l’émission de particules dans l’environnement opératoire (83). Il minimise ainsi l'exposition des professionnels de santé aux contaminants potentiels et maintient un environnement plus sûr (26).

Il existe une grande diversité de dispositifs d’évacuation et de filtration des fumées avec une multitude de spécificités. Le choix parmi ces derniers doit donc être un choix utilisateur et établissement dépendant. Les dispositifs d’évacuation et de filtration des fumées évoqués dans ce travail ne sont qu’un échantillon de l’ensemble des dispositifs disponibles sur le marché. Il faut noter que le choix des dispositifs présentés a été réalisé de manière arbitraire et de façon à permettre d’évoquer la diversité de ces derniers. Il conviendra d’étudier leurs caractéristiques de façon exhaustive et de les comparer avant d’envisager le référencement de l’un d’entre eux. Par ailleurs, des études plus poussées apportant la preuve de leur efficacité sur le plan particulaire, biologique et chimique devront être réalisées afin de pallier au manque de données constaté à ce jour (notamment pour ce qui est du risque lié au nouveau coronavirus).

Concernant l'efficacité des dispositifs de captage, la capacité d'élimination des particules des dispositifs d'évacuation de fumée est, par conception, limitée à l'efficacité et à la taille de leurs filtres. Les filtres à particules ultra-faibles (ULPA) retiennent 99,9 % des particules à 0,1µm. Cela les rend idéaux pour éliminer les particules créées lors des procédures électro chirurgicales et laser. Ils sont d'ailleurs souvent associés à un préfiltre qui capture les grosses particules et un filtre charbon de bois qui capture les produits chimiques toxiques présents dans la fumée. Néanmoins, ces filtres nécessitent un remplacement régulier générant un coût supplémentaire pour l'intervention. Il est aussi important d'assurer une maintenance régulière, sans oublier le surcoût éventuel lié aux autres consommables (exemple : bistouri à usage unique, tubulure spécifique…).

De plus, ces dispositifs doivent être adaptés aux pratiques des utilisateurs concernés et compatibles avec un usage quotidien (en termes de confort par exemple) afin qu'ils soient utilisés dans les meilleures conditions et qu'ils aient un impact positif sur la diminution de l'exposition et la qualité de l'air au bloc opératoire. En effet, ils présentent un certain nombre d'inconvénients qu'il est important de garder en tête. 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 (16). En plus du stress physiologique lié au bruit, des niveaux sonores élevés pendant la chirurgie peuvent entrainer la perturbation d'une communication claire (148). En 2011, Kurmann *et al.* ont montré, grâce au suivi des patients opérés à 30 jours, une association entre le bruit au bloc et la survenue d'infections postopératoires (149).

De fait, malgré les recommandations préconisant l'utilisation d'appareils d'extraction de fumée dans les salles d'opération, ces mesures ne sont pas largement

utilisées en raison du bruit excessif, du coût élevé, des problèmes de maintenance de l'équipement, de l'encombrement important des appareils mais aussi du manque de compliance des professionnels (26).

Il apparait comme nécessaire de réaliser des essais plus poussés puisqu'il n'existe pas d'étude sur l'efficacité réelle de la filtration contre le SARS CoV-2. Néanmoins, il semble tout de même raisonnable d'envisager le référencement de l'un de ces dispositifs pour améliorer la protection des professionnels de santé au bloc opératoire puisque les recommandations des sociétés savantes semblent évoluer en ce sens. L'idée d'un risque potentiel non négligeable se dégageant, il apparaît comme nécessaire de mettre en œuvre un certain nombre de mesures permettant de prévenir ou réduire l'exposition des soignants aux fumées chirurgicales dans le cadre de leur activité professionnelle. Malgré les doutes sur les effets nocifs de l'exposition à la fumée chirurgicale, la prudence doit être appliquée (44). La question qui se pose à ce jour est celle de savoir s'il est plus opportun de privilégier une démarche proactive (c'est-à-dire selon le principe de précaution), ou s'il convient de ne mettre en place ces mesures de réduction des risques que lorsque les données scientifiques et épidémiologiques seront suffisantes et cohérentes. Avec l'émergence de la pandémie COVID 19, de nombreuses sociétés savantes (119,121,122) ont recommandé l'utilisation de dispositifs d'évacuation des fumées avec filtres que ce soit en cœlioscopie ou en chirurgie ouverte, et ce malgré le manque de données et de preuves concernant le risque de transmission par ce biais. Il va sans dire que ces dispositifs deviendront probablement dans un futur proche un équipement incontournable dans la gestion du risque associé aux fumées au bloc opératoire.

VIII) Conclusion

La littérature s'accorde à dire que la fumée chirurgicale représente un risque pour la santé des professionnels qui y sont exposés. Si bon nombre de composants des fumées possèdent des propriétés cancérogènes, mutagènes ou reprotoxiques, d'autres sont des agents biologiquement actifs. Une part très importante des fumées est susceptible d'être inhalée et de se déposer dans l'arbre pulmonaire.

Sur la base de ce constat, des mesures de prévention contre ce risque multiforme devraient être appliquées afin de protéger le personnel du bloc opératoire.

Ainsi tout instrument dont l'utilisation s'accompagne d'un dégagement de fumées chirurgicales ne devrait être utilisé que dans des zones équipées d'un système de ventilation comprenant au minimum un filtre HEPA voire ULPA. Le port d'un appareil de protection respiratoire doit bien évidemment se surajouter à cette ventilation qui ne permet pas une diminution suffisante de l'exposition. Enfin, dans la mesure du possible, ces fumées devraient être captées à la source afin de contribuer à la réduction de ce risque.

Il apparait comme nécessaire, à mon sens, que tous les salariés soient informés des dangers inhérents aux fumées chirurgicales et des mesures de prévention applicables dans les zones où ils travaillent. Le sujet préoccupant des risques multiples liés aux fumées chirurgicales doit encore faire l'objet d'une véritable prise de conscience généralisée à l'ensemble des professionnels de santé qui y sont confrontés et semblent encore en ignorer les conséquences.

THÈSE SOUTENUE PAR : Chloé SERVEILLE

TITRE :

RISQUES LIES AUX FUMÉES CHIRURGICALES : ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES ET MOYENS DE PREVENTION AU BLOC OPÉRATOIRE

CONCLUSION :

La littérature s'accorde à dire que la fumée chirurgicale représente un risque pour la santé des professionnels qui y sont exposés. Si bon nombre de composants des fumées possèdent des propriétés cancérogènes, mutagènes ou reprotoxiques, d'autres sont des agents biologiquement actifs. Une part très importante des fumées est susceptible d'être inhalée et de se déposer dans l'arbre pulmonaire.
Sur la base de ce constat, des mesures de prévention contre ce risque multiforme devraient être appliquées afin de protéger le personnel du bloc opératoire.
Ainsi tout instrument dont l'utilisation s'accompagne d'un dégagement de fumées chirurgicales ne devrait être utilisé que dans des zones équipées d'un système de ventilation comprenant au minimum un filtre HEPA voire ULPA. Le port d'un appareil de protection respiratoire doit bien évidemment se surajouter à cette ventilation qui ne permet pas une diminution suffisante de l'exposition. Enfin, dans la mesure du possible, ces fumées devraient être captées a la source afin de contribuer à la réduction de ce risque.
Il apparait comme nécessaire, à mon sens, que tous les salariés soient informés des dangers inhérents aux fumées chirurgicales et des mesures de prévention applicables dans les zones ou ils travaillent. Le sujet préoccupant des risques multiples liés aux fumées chirurgicales doit encore faire l'objet d'une véritable prise de conscience généralisée à l'ensemble des professionnels de santé qui y sont confrontés et semblent encore en ignorer les conséquences.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER
Grenoble, le : 23/03/2022

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DE PHARMACIE

Pr Michel SÈVE

LE DIRECTEUR / LA DIRECTRICE DE THÈSE

François Hallouard/Morgane Cessiecq

LE TUTEUR / LA TUTRICE UNIVERSITAIRE

Christine Demeilliers

IX) Bibliographie

1. Eickmann U, Falcy M, Fokuhl I, Ruegger M. Fumées chirurgicales - Risques et mesures de prévention (document complet). Association internationale de la sécurité sociale AISS; 2011.

2. Vigneswaran Y, Prachand VN, Posner MC, Matthews JB, Hussain M. What Is the Appropriate Use of Laparoscopy over Open Procedures in the Current COVID-19 Climate ? J Gastrointest Surg. juill 2020;24(7):1686-91.

3. Laparotomies définitions [Internet]. [cité 29 nov 2021]. Disponible sur: https://www.encyclopedie.fr/definition/Laparotomie

4. Boy L. Bistouris à ultrason en chirurgie : état des lieux en 2015 [Thèse en pharmacie]. Toulouse III Paul Sabatier; 2015.

5. Laparoscopie vs laparotomie [Internet]. Alamy. 2001 [cité 8 déc 2021]. Disponible sur: https://www.alamyimages.fr/laparoscopie-laparotomie-vs-ouvert-image7712320.html

6. Cœlioscopie définitions [Internet]. Encyclopédie.fr. [cité 29 nov 2021]. Disponible sur: https://www.encyclopedie.fr/definition/coelioscopie

7. Bukraa S. Les dispositifs médicaux de coeliochirurgie [Thèse de pharmacie]. [Rabat]: Université Mohammed V-Faculté de médecine et de pharmacie de Rabat; 2011.

8. Benifla J, Sroussi J, Mezzadri M. Coelioscopie [Internet]. Cours présenté à: DES Gynécologie obstétrique; 2012 nov 14 [cité 15 févr 2022]; Hopital A.Trousseau. Disponible sur: http://www.miniseminaires.com/wp-content/uploads/-2012/12/cours-des-coelioscopie.pdf

9. Poghosyan T. Installations, mise en place des trocarts et création du pneumopéritoine. Cours présenté à: DIU Techniques Cœlioscopiques en Chirurgie Viscérale; Hôpital Ambroise

Paré, Boulogne-Billancourt.

10. Cœlioscopie [Internet]. [cité 13 déc 2021]. Disponible sur: https://www.urologiegrandestparisien.com/holep-1

11. Coelioscopie et coeliochirurgie : principes généraux et instrumentation [Internet]. Université Médicale Virtuelle Francophone; 2008. Disponible sur: http://campus.cerimes.fr/chirurgie-generale/enseignement/coelioscopie/site/html/cours.pdf

12. Denis I, Capelle A. Cœlioscopie et renforts de paroi. Cours présenté à: UE Dispositifs Médicaux; 2020 janv 24; CHU Saint Etienne.

13. Yeo C, Yeo D, Kaushal S, Ahmed S. Is it too premature to recommend against laparoscopic emergency surgery in COVID-19 patients? British Journal of Surgery. 28 mai 2020;107(7):e202-e202.

14. Golub R, Siddiqui F, Pohl D. Laparoscopic Versus Open Appendectomy: A Metaanalysis. Journal of the American College of Surgeons. mai 1998;186(5):545-53.

15. Brunt L. M, Langer JC, Quasebarth MA, Whitman ED. Comparative analysis of laparoscopic versus open splenectomy. The American Journal of Surgery. nov 1996;172(5):596-601.

16. Perniceni T, Slim K. Quelles sont les indications validées de la cœlioscopie en chirurgie digestive ? Gastroenterol Clin Biol. Masson. 2001;25:B57-B70.

17. Patterson TJ, Currie PJ, Beck J, Spence RAJ, Spence GM. A systematic review of viral transmission risk to healthcare staff comparing laparoscopic and open surgery. The Surgeon. déc 2020;18(6):e72-7.

18. Velanovich V. Laparoscopic vs open surgery: A preliminary comparison of quality-of-life outcomes. Surg Endosc. janv 2000;14(1):16-21.

19. Dufaug A. Optimisation d'un instrument laparoscopique ergonomique pluri-articulé motorisé pour une efficacité et un confort opératoires accrus. [Thèse en génie mécanique]. Université Grenoble Alpes; 2017.

20. Costa M, De'angelis N, Disabato M, Azoulay D, Brunetti F. Chirurgie cœlioscopique versus laparotomie pour la résection de tumeurs stromales gastro-intestinales : résultats cliniques et analyse des coûts. Journal de Chirurgie Viscérale. oct 2014;151(4):A26.

21. Chirurgie à haute fréquence : Applications et conseils pratiques. Erbe Elektromedizin GmbH; 2017.

22. Dupres M, Castel-Molieres M. Revue des dispositifs médicaux : l'énergie au bloc. Journée EuroPharmat; 2015 oct; Nice.

23. ATMOS. Produits de combustion en chirurgie laser et HF.

24. Eickmann U, Falcy M, Fokuhl I, Ruegger M, Bloch M. Fumées chirugicales - Risques et mesures de prévention. 2011 me trimestre. Report No.: 127.

25. Barrett WL, Garber SM. Surgical smoke: a review of the literature. Surgical Endoscopy. 1 juin 2003;17(6):979-87.

26. Mowbray NG, Ansell J, Horwood J, Cornish J, Rizkallah P, Parker A, et al. Safe management of surgical smoke in the age of COVID-19. British Journal of Surgery. 16 sept 2020;107(11):1406-13.

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

28. Giordano BP. Don't be a victim of surgical smoke. AORN Journal. mars 1996;63(3):520-2.

29. Ulmer BC. The Hazards of Surgical Smoke. AORN Journal. avr 2008;87(4):721-38.

30. Gates MA, Feskanich D, Speizer FE, Hankinson SE. Operating room nursing and lung cancer risk in a cohort of female registered nurses. Scand J Work Environ Health. avr 2007;33(2):140-7.

31. King B, McCullough J. NIOSH Health Hazard Evaluation Report. NIOSH; 2006.

32. Scott E, Beswick A, Wakefield K. The Hazards of Diathermy Plume Part 1 the Literature Search. British Journal of Perioperative Nursing (United Kingdom). sept 2004;14(9):409-14.

33. Peyrot S, Brochard G, Le Bâcle C. Risques infectieux des fumées laser : exemple des papillomavirus humains. Références en santé au travail n°135. sept 2013;125-33.

34. Alain S, Hantz S, Denis F. Papillomavirus : les virus et la physiopathologie de l'infection. Médecine thérapeutique/pédiatrie. févr 2010;13(1).

35. Département Prévention Cancer et Environnement. Infections à Papillomavirus humains (HPV) [Internet]. Cancer environnement. 2021 [cité 20 sept 2021]. Disponible sur: tps://www.cancer-environnement.fr/610-Infections-a-HPV.ce.aspx

36. Garden JM, O'Banion MK, Shelnitz LS, Pinski KS, Bakus AD, Reichmann ME, et al. Papillomavirus in the vapor of carbon dioxide laser-treated verrucae. JAMA. 26 févr 1988;259(8):1199-202.

37. Guideline for surgical smoke safety. Denver: Association of periOperative Registered Nurses.; 2017 p. 477-506. (Guidelines for Perioperative Practice.).

38. Fox-Lewis A, Allum C, Vokes D, Roberts S. Human papillomavirus and surgical smoke: a systematic review. Occup Environ Med. 1 déc 2020;77(12):809.

39. Zhou Q, Hu X, Zhou J, Zhao M, Zhu X, Zhu X. Human papillomavirus DNA in surgical smoke during cervical loop electrosurgical excision procedures and its impact on the surgeon. CMAR. avr 2019;Volume 11:3643-54.

40. Lobraico RV, Schifano MJ, Brader KR. A Retrospective Study on the Hazards of the Carbon Dioxide Laser Plume. Journal of Laser Applications. oct 1988;1(1):6-8.

41. Gloster HM, Roenigk RK. 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. mars 1995;32(3):436-41.

42. Kofoed K, Norrbom C, Forslund O, Møller C, Frøding L, Pedersen A, et al. Low Prevalence of Oral and Nasal Human Papillomavirus in Employees Performing CO2-laser Evaporation of Genital Warts or Loop Electrode Excision Procedure of Cervical Dysplasia. Acta Derm Venerol. 2015;95(2):173-6.

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

44. Liu Y, Song Y, Hu X, Yan L, Zhu X. Awareness of surgical smoke hazards and enhancement of surgical smoke prevention among the gynecologists. J Cancer. 2019;10(12):2788-99.

45. Fiche Technique Santé-Sécurité : Agents Pathogènes – Virus de l'immunodéficience humaine (VIH) [Internet]. Canada.ca. 2016 [cité 19 févr 2022]. Disponible sur: https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agents-pathogenes-evaluation-risques/virus-immunodeficience-humaine.html

46. Weiss S, Goedert J, Gartner S, Popovic M, Waters D, Markham P, et al. Risk of human

immunodeficiency virus (HIV-1) infection among laboratory workers. Science. 1 janv 1988;239(4835):68-71.

47. Baggish MS, Polesz BJ, Joret D, Williamson P, Refai A. Presence of human immunodeficiency virus DNA in laser smoke. Lasers Surg Med. 1991;11(3):197-203.

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

49. Rutschmann O. VIH et chirurgie [Internet]. Fondation Genevoise pour la Formation et la Recherche Médicales. 2021 [cité 21 déc 2021]. Disponible sur: https://www.gfmer.ch/Presentations_Fr/VIH_chirurgie.htm

50. Chevaliez S. Virus de l'hépatite B (VHB) [Internet]. [cité 19 févr 2022]. Disponible sur: https://www.sfm-microbiologie.org/wp-content/uploads/2019/02/VIRUS_HEPATITE-B.pdf

51. Kwak HD, Kim S-H, Seo YS, Song K-J. Detecting hepatitis B virus in surgical smoke emitted during laparoscopic surgery. Occup Environ Med. 2 août 2016;oemed-2016-103724.

52. Drolet R, Larocque B, Nourissat A, Rhainds M. Risque de transmission virale par voie aérienne en chirurgies abdominales et thoraciques par laparoscopie. Revue sommaire de la littérature. CHU de Québec, Université Laval: UETIMS, DQEEAI; 2020 avr.

53. Veziant J, Bourdel N, Slim K. Risques de contamination virale des soignants au cours d'une laparoscopie pendant la pandémie de la Covid-19. Journal de Chirurgie Viscérale. juin 2020;157(3):S60-3.

54. COVID-19 et prévention en entreprise [Internet]. INRS Santé et sécurité au travail; 2021. Disponible sur: http://www.inrs.fr/risques/COVID19-prevention-entreprise

55. Fears AC, Klimstra WB, Duprex P, Hartman A, Weaver SC, Plante KS, et al. Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions.

Emerg Infect Dis. sept 2020;26(9):2168-71.

56. Avis relatif au risque de transmission du SARS-CoV-2 par aérosols en milieux de soins. Haut Conseil de la santé publique; 2020 sept.

57. Avis du Comité sur les infections nosocomiales du Québec. Salle d'opération avec cas suspect ou confirmé COVID-19. Institut national de santé publique du Québec; 2020.

58. Zhang W, Du R-H, Li B, Zheng X-S, Yang X-L, Hu B, et al. Molecular and serological investigation of 2019-nCoV infected patients: implication of multiple shedding routes. Emerging Microbes & Infections. 1 janv 2020;9(1):386-9.

59. Chen W, Lan Y, Yuan X, Deng X, Li Y, Cai X, et al. Detectable 2019-nCoV viral RNA in blood is a strong indicator for the further clinical severity. Emerging Microbes & Infections. 1 janv 2020;9(1):469-73.

60. Wang W, Xu Y, Gao R, Lu R, Han K, Wu G, et al. Detection of SARS-CoV-2 in Different Types of Clinical Specimens. JAMA [Internet]. 11 mars 2020 [cité 13 août 2021]; Disponible sur: https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762997

61. Nduka CC, Poland N, Kennedy M, Dye J, Darzi A. Does the ultrasonically activated scalpel release viable airborne cancer cells? Surg Endosc. août 1998;12(8):1031-4.

62. Fletcher JN, Mew D, DesCôteaux J-G. Dissemination of melanoma cells within electrocautery plume. The American Journal of Surgery. juill 1999;178(1):57-9.

63. Ikramuddin S. Detection of aerosolized cells during carbon dioxide laparoscopy,. Journal of Gastrointestinal Surgery. déc 1998;2(6):580-4.

64. Hamel M, Coulombe M, Rhainds M. Evaluation des risques associés à l'exposition aux fumées chirurgicales. CHU Québec; 2011 mars. Report No.: 03-11.

65. Sillière J. Évaluation du risque chimique en milieu de soins: application aux activités de désinfection et stérilisation et aux blocs opératoires dans deux cliniques. [Internet] [Thèse en pharmacie]. [Grenoble]: Université Joseph Fourier; 2014. Disponible sur: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00933415

66. Liste des substances chimiques classées CMR [Internet]. inrs.fr. 2021 [cité 11 mars 2022]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil66

67. Le risque chimique au poste de travail [Internet]. [cité 24 févr 2022]. Disponible sur: http://uved.univ-nantes.fr/GRCPB/sequence3/html/chap1.html

68. Tseng H-S, Liu S-P, Uang S-N, Yang L-R, Lee S-C, Liu Y-J, et al. Cancer risk of incremental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in electrocautery smoke for mastectomy personnel. World J Surg Onc. déc 2014;12(1):31.

69. Wehrlé P. Pharmacie galenique, 2e ed. Maloine. 2012. (Etudes et Diplomes en Pharmacie).

70. Nanomatériaux, nanoparticules. Effets sur la santé [Internet]. inrs.fr. [cité 24 nov 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/effets-sante.html

71. Butler DA, Madhavan G, Alper J, éditeurs. Health Risks of Indoor Exposure to Particulate Matter: Workshop Summary [Internet]. Washington, D.C.: National Academies Press; 2016 [cité 14 oct 2021]. Disponible sur: http://www.nap.edu/catalog/23531

72. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, et al. Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease: An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association. Circulation. juin 2010;121(21):2331-78.

73. Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, et al. Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain. Inhalation Toxicology. janv 2004;16(6-7):437-45.

74. Cheng H, Clymer JW, Po-Han Chen B, Sadeghirad B, Ferko NC, Cameron CG, et al. Prolonged operative duration is associated with complications: a systematic review and meta-analysis. Journal of Surgical Research. sept 2018;229:134-44.

75. Daley BJ, Cecil W, Clarke PC, Cofer JB, Guillamondegui OD. How Slow Is Too Slow? Correlation of Operative Time to Complications: An Analysis from the Tennessee Surgical Quality Collaborative. Journal of the American College of Surgeons. avr 2015;220(4):550-8.

76. Chacon E, Eman P, Dugan A, Davenport D, Marti F, Ancheta A, et al. Effect of operative duration on infectious complications and mortality following hepatectomy. HPB. déc 2019;21(12):1727-33.

77. Sturm L, Dawson D, Vaughan R, Hewett P, Hill AG, Graham JC, et al. Effects of fatigue on surgeon performance and surgical outcomes: a systematic review: The effect of fatigue on surgery. ANZ Journal of Surgery. juill 2011;81(7-8):502-9.

78. Weld KJ, Dryer S, Ames CD, Cho K, Hogan C, Lee M, et al. Analysis of Surgical Smoke Produced by Various Energy-Based Instruments and Effect on Laparoscopic Visibility. Journal of Endourology. mars 2007;21(3):347-51.

79. Limchantra IV, Fong Y, Melstrom KA. Surgical Smoke Exposure in Operating Room Personnel: A Review. JAMA Surg. 1 oct 2019;154(10):960.

80. Okoshi K, Kobayashi K, Kinoshita K, Tomizawa Y, Hasegawa S, Sakai Y. Health risks associated with exposure to surgical smoke for surgeons and operation room personnel. Surg Today. août 2015;45(8):957-65.

81. Brace MD, Stevens E, Taylor SM, Butt S, Sun Z, Hu L, et al. 'The air that we breathe': assessment of laser and electrosurgical dissection devices on operating theater air quality. J of Otolaryngol - Head & Neck Surg. déc 2014;43(1):39.

82. Ott DE, Moss E, Martinez K. Aerosol exposure from an ultrasonically activated (Harmonic) device. The Journal of the American Association of Gynecologic Laparoscopists. févr 1998;5(1):29-32.

83. Seipp H-M, Steffens T, Weigold J, Lahmer A, Maier-Hasselmann A, Herzog T, et al. Efficiencies and noise levels of portable surgical smoke evacuation systems. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2 nov 2018;15(11):773-81.

84. Xie W, Dumas O, Varraso R, Boggs KM, Camargo CA, Stokes AC. Association of Occupational Exposure to Inhaled Agents in Operating Rooms With Incidence of Chronic Obstructive Pulmonary Disease Among US Female Nurses. JAMA Netw Open. 20 sept 2021;4(9):e2125749.

85. Ilce A, Yuzden GE, Yavuz van Giersbergen M. The examination of problems experienced by nurses and doctors associated with exposure to surgical smoke and the necessary precautions. J Clin Nurs. juin 2017;26(11-12):1555-61.

86. Hill DS, O'Neill JK, Powell RJ, Oliver DW. Surgical smoke – A health hazard in the operating theatre: A study to quantify exposure and a survey of the use of smoke extractor systems in UK plastic surgery units. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery. juill 2012;65(7):911-6.

87. Yoshifumi T, Shigenobu M, Kazuto N, Setsuo U, Masakazu F, Minoru H, et al. Mutagenicity of smoke condensates induced by CO2-laser irradiation and electrocauterization. Mutation Research/Genetic Toxicology. juin 1981;89(2):145-9.

88. Sugimura T, Wakabayashi K, Nakagama H, Nagao M. Heterocyclic amines: Mutagens/carcinogens produced during cooking of meat and fish. Cancer Science. avr 2004;95(4):290-9.

89. Seow A, Poh WT, Teh M, Eng P, Wang YT, Tan WC, et al. Fumes from meat cooking and lung cancer risk in Chinese women. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev. nov 2000;9(11):1215-21.

90. Ko YC, Lee CH, Chen MJ, Huang CC, Chang WY, Lin HJ, et al. Risk factors for primary lung cancer among non-smoking women in Taiwan. International Journal of Epidemiology. 1 févr 1997;26(1):24-31.

91. Code du travail article R4412-5 [Internet]. Legifrance. 2008 [cité 11 mars 2022]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/

92. Plan Santé travail 2005-2009 [Internet]. Ministère de l'emploi, du travail et de la cohésion sociale; 2004 juill [cité 11 mars 2022]. Disponible sur: http://www.intefp-sstfp.travail.gouv.fr/

93. Spearman J, Tsavellas G, Nichols P. Current Attitudes and Practices Towards Diathermy Smoke. annals. mars 2007;89(2):162-5.

94. Définition filtration [Internet]. Larousse. [cité 31 déc 2021]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/filtration/33776

95. Campanile FC, Campanile LF. Smoke Evacuation Filters After the COVID-19 Pandemic: Technical Awareness for Safety. Annals of Surgery. oct 2020;272(4):e266-8.

96. Filtration de l'air [Internet]. STS Canada. [cité 24 nov 2021]. Disponible sur: https://www.stscanadainc.com/filtration-de-l-air-sur-media.html

97. Filtration [Internet]. Vectori. [cité 31 déc 2021]. Disponible sur: https://vectori.com

98. Norme NF S90-351 - Etablissements de santé - Zones à environnement maitrisé - Exigences relatives à la maitrise de la contamination aéroportée. AFNOR; 2013 avr. Report No.: Norme NF S90-351.

99. Georgesen C, Lipner SR. Surgical smoke: Risk assessment and mitigation strategies. Journal of the American Academy of Dermatology. oct 2018;79(4):746-55.

100. Recommandations - Qualité de l'air au bloc opératoire et autres secteurs interventionnels. SF2H; 2015 mai.

101. Les masques dans le domaine de la santé : Pourquoi ? Comment ? [Internet]. [cité 24 nov 2021]. Disponible sur: www.qualite-securite-soins.fr

102. Masques de protection respiratoire et risques biologiques : foire aux questions [Internet]. inrs.fr. [cité 27 oct 2021]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/risques/biologiques/faq-masque-protection-respiratoire.html

103. Stock État de masques respiratoires Utilisation et dimensionnement. Haut Conseil de la santé publique; 2011 juill.

104. Chen C-C, Willeke K. Aerosol penetration through surgical masks. American Journal of Infection Control. août 1992;20(4):177-84.

105. Oberg T, Brosseau LM. Surgical mask filter and fit performance. American Journal of Infection Control. mai 2008;36(4):276-82.

106. Brosseau LM, Chen S-K, Vesley D, Vincent JH. System design and test method for measuring respirator filter efficiency using mycobacterium aerosols. Journal of Aerosol Science. déc 1994;25(8):1567-77.

107. Wake D, Bowry AC, Crook B, Brown RC. Performance of respiratory filters and surgical masks against bacterial aerosols. Journal of Aerosol Science. oct 1997;28(7):1311-29.

108. Van Laer F. A propos des masques: lesquels, quand et comment ? 2020;vol.XXIV n°1.

109. Edwards BE, Reiman RE. Results of a Survey on Current Surgical Smoke Control

Practices. AORN Journal. avr 2008;87(4):739-49.

110. Chapman LW, Korta DZ, Lee PK, Linden KG. Awareness of Surgical Smoke Risks and Assessment of Safety Practices During Electrosurgery Among US Dermatology Residents. JAMA Dermatol. 1 mai 2017;153(5):467.

111. Nichol K, McGeer A, Bigelow P, O'Brien-Pallas L, Scott J, Holness DL. Behind the mask: Determinants of nurse's adherence to facial protective equipment. American Journal of Infection Control. janv 2013;41(1):8-13.

112. Steege AL, Boiano JM, Sweeney MH. Secondhand smoke in the operating room? Precautionary practices lacking for surgical smoke: Precautionary Practices Lacking for Surgical Smoke. Am J Ind Med. nov 2016;59(11):1020-31.

113. Directive 89/391/CEE du Conseil du 12 juin 1989 [Internet]. Legifrance. [cité 15 mars 2022]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000333571/

114. AFISO. Les fumées chirurgicales [Internet]. Disponible sur: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi92biW77D0AhUOtRoKHTC3DRoQFnoECAMQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.afiso.be%2Ffile%2F189348%2F&usg=AOvVaw2KDeKE3gvHM_Jjzlcj7Ix4

115. Plume scavenging in surgical, diagnostic, therapeutic, and aesthetic settings: Canadian Standards Association. 2009 revu en 2020. Report No.: Z305.13:13.

116. Le traitement des fumées chirurgicale - Les législations en vigueur [Internet]. Smices surgical. 2021 [cité 24 nov 2021]. Disponible sur: https://smices-surgical.com/fumees_chirurgicales_legislation/

117. Bourgeois L, Delode J, Kirche S, Massei A, Moreno V, Payet-Burin X. Bloc opératoire : état de l'art des technologies biomédicales. IRBM News. juill 2019;40(4):117-56.

118. Un bloc opératoire sans fumée. BOWA-electronic GmbH; 2018.

119. Nohuz E, Dubernard G, Lamblin G, Lebail-Carval K, Chabert P, Chêne G. La chirurgie gynécologique à l'épreuve de l'infection à COVID-19. Quelles recommandations formuler ? Gynécologie Obstétrique Fertilité & Sénologie. juin 2020;48(6):526-9.

120. Rational use of personal protective equipment (PPE) for coronavirus disease (COVID-19). WHO; 2020 mars.

121. Canis M, Descamps P, Dubernard G, Estrade JP, Fernandez H, Mourtialon P. Chirurgie gynécologique en période COVID - Recommandations de sortie de crise [Internet]. SCGP; [cité 20 févr 2022]. Disponible sur: https://www.scgp-asso.fr/actualites/recommandations-covid-et-deconfinement/

122. Classe J-M, Dolivet G, Evrard S, Ferron G, Lécuru F, Leufflen L, et al. Recommandations de la Société française de chirurgie oncologique (SFCO) pour l'organisation de la chirurgie oncologique durant l'épidémie de COVID-19. Bulletin du Cancer. mai 2020;107(5):524-7.

123. Louguet A, Cessiecq M, Herranz A, Bedjaoui W, Hallouard F, Nuiry O. Fumées chirurgicales et protection contre la transmission du SARS COV-2. In Lyon;

124. Davreux H, Bentahar D. Fumées chirurgicales - Idimed.

125. Ultravision TM contrôle révolutionnaire de la fumée chirurgicale laparoscopique - Données internes. Alesi Surgical;

126. Ansell J, Warren N, Wall P, Cocks K, Goddard S, Whiston R, et al. Electrostatic precipitation is a novel way of maintaining visual field clarity during laparoscopic surgery: a prospective double-blind randomized controlled pilot study. Surg Endosc. juill 2014;28(7):2057-65.

127. Les systèmes de distribution de gaz [Internet]. aphargaz.fr. [cité 20 sept 2021]. Disponible sur: http://www.aphargaz.fr/systemes-distribution-gaz/le-vide.php

128. Medtronic Covidien. Filtres respiratoires. 2010.

129. PlumePort ActiV Dispositif de filtrage de fumées laparoscopiques [Internet]. 2017. Disponible sur: www.buffalofilter.com

130. Endosafe - Automatisons la filtration des fumées chirurgicales [Internet]. Disponible sur: www.smices-surgical.com

131. EndoSafeTM Dispositif médical pour la filtration des fumées issues de la cautérisation des tissus [Internet]. 2020. Disponible sur: www.smices-surgical.com

132. Dossier d'information LiNA LapGuardTM. 2018.

133. VisiClear® Évacuateur de panaches de fumée chirurgicales - Manuel d'utilisation [Internet]. 2018 [cité 19 févr 2022]. Disponible sur: www.buffalofilter.com

134. Erbe. IES 3 - Le système d'aspiration des fumées pour un environnement de travail sain. 2019.

135. IES 3 - Efficacité sur le virus SARS-CoV-2. 2020.

136. George AK, Wimhofer R, Viola KV, Pernegger M, Costamoling W, Kavoussi LR, et al. Utilization of a novel valveless trocar system during robotic-assisted laparoscopic prostatectomy. World J Urol. nov 2015;33(11):1695-9.

137. Annino F, Topazio L, Autieri D, Verdacchi T, De Angelis M, Asimakopoulos AD. Robotic partial nephrectomy performed with Airseal versus a standard CO2 pressure pneumoperitoneum insufflator: a prospective comparative study. Surg Endosc. avr 2017;31(4):1583-90.

138. Herati AS, Andonian S, Rais-Bahrami S, Atalla MA, Srinivasan AK, Richstone L, et al. Use of the Valveless Trocar System Reduces Carbon Dioxide Absorption During Laparoscopy When Compared With Standard Trocars. Urology. mai 2011;77(5):1126-32.

139. Boualaoui I, Bey E, Henry de Villeneuve M, Droupy S, Wagner L. Impact médico-économique et sanitaire de l'insufflateur Airseal® : exemple de la promontofixation cœlioscopique. Progrès en Urologie. nov 2020;30(13):759.

140. Stryker. Pneumoclear - Tubulures et filtres.

141. Matsuzaki S, Vernis L, Bonnin M, Houlle C, Fournet-Fayard A, Rosano G, et al. Effects of low intraperitoneal pressure and a warmed, humidified carbon dioxide gas in laparoscopic surgery: a randomized clinical trial. Sci Rep. déc 2017;7(1):11287.

142. Mason S, Kinross J, Reynecke D, Hendricks J, Arulampalam T. PTH-334 Cost-effectiveness of warm humidified co2 to reduce surgical site infections in laparoscopic colorectal surgery: a cohort study. Gut. juin 2015;64(Suppl 1):A556.1-A556.

143. Frey JM, Janson M, Svanfeldt M, Svenarud PK, van der Linden JA. Local Insufflation of Warm Humidified CO2 Increases Open Wound and Core Temperature During Open Colon Surgery: A Randomized Clinical Trial. Anesthesia & Analgesia. nov 2012;115(5):1204-11.

144. La gestion des risques professionnels [Internet]. Officiel Prévention. 2013 [cité 8 déc 2021]. Disponible sur: detail_dossier_CHSCT.php?rub=38%26ssrub=199%26dossid=474.

145. Colmont D. Les risques professionnels au bloc opératoire : dossier 2018. ISSN; 2018 juill. (Oxymag). Report No.: 162.

146. Meeuwsen F, Guédon A, Klein J, Elst M van D, Dankelman J, Van Den Dobbelsteen J. Electrosurgery: short-circuit between education and practice. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies. 4 juill 2019;28(4):247-53.

147. Equipements Individuels de Protection des voies respiratoires [Internet]. [cité 23 févr 2022]. Disponible sur: https://www.officiel-prevention.com/dossier/protections-individuelles/les-voies-respiratoires/equipements-individuels-de-protection-des-voies-respiratoires

148. Kracht JM, Busch-Vishniac IJ, West JE. Noise in the operating rooms of Johns Hopkins Hospital. The Journal of the Acoustical Society of America. mai 2007;121(5):2673-80.

149. Kurmann A, Peter M, Tschan F, Mühlemann K, Candinas D, Beldi G. Adverse effect of noise in the operating theatre on surgical-site infection. British Journal of Surgery. 27 mai 2011;98(7):1021-5.