

Désinfection par plasma froid à l'air ambiant pour l'hygiène des mains

Gilles Courret^{1*}, Alain Savary¹, Wolfram M. Brück², Martine Baudin², Martine Emery Mabillard²

¹Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO), Route de Cheseaux 1, 1400 Yverdon-les-Bains, Suisse, gilles.courret@heig-vd.ch (ORCID: 0000-0003-0740-588X); alain.savary@heig-vd.ch

²Institut des Technologies du Vivant, Ecole d'ingénieurs, Haute École spécialisée de Suisse occidentale Valais-Wallis (HES-SO Valais/Wallis), Rue de l'Industrie 23, 1950 Sion, Suisse, wolfram.bruck@hevs.ch (ORCID: 0000-0002-4516-5146); martine.baudin@hevs.ch; martine.emerymabillard@hevs.ch

*Auteur de correspondance

Mots clés : Plasma froid atmosphérique ; décontamination des surfaces ; hygiène ; inactivation bactérienne ; désinfection des mains ; sècheurs aérauliques

Résumé

Face à l'épidémie de Covid-19, l'importance de l'hygiène des mains est sans cesse rappelée, le premier des gestes barrières étant en effet de se laver les mains très régulièrement. Bien que l'application de lotions à base d'alcool se soit révélée efficace, le lavage des mains suivi d'un séchage par jets d'air reste la méthode préférée. Les plasmas atmosphériques froids, dit aussi non thermiques, utilisant l'air ambiant comme gaz plasmagène peuvent constituer une alternative à la désinfection des mains lorsqu'il n'y a pas d'installations sanitaires à proximité. La puissance électrique est contrôlée de manière à éviter tout effet délétère sur la peau. Dans cette étude, nous avons testés divers générateurs produisant divers types de plasmas. Des essais microbiologiques basés sur la norme EN 13697:2015+A1:2019 ont été réalisés avec des microorganismes non-pathogènes, sur des surfaces en métal ou en silicone pour modéliser la peau. En utilisant des techniques d'induction électromagnétique dans la gamme des MHz, nous avons produit un jet stable de plasma froid d'air atteignant un niveau significatif de désinfection sur des substrats conducteurs et non conducteurs. La performance sur les surfaces en silicone est presque aussi élevée qu'avec des plasmas à courant continu qui eux, par contre, ne sont efficaces que sur les substrats conducteurs. Consommant uniquement de l'électricité, le plasma froid d'air ambiant pourrait remplacer ou compléter les méthodes actuelles de désinfection des mains et atténuer le fardeau économique des crises de santé publique à l'avenir.

Introduction

Hygiène des mains

Porteuses de plus de 10 milles organismes par cm² de peau, les mains sont un important vecteur de contagions (Villa et Russo, 2021). La promotion de l'hygiène des mains dans les environnements publics et privés s'est avérée essentielle pour réduire la propagation incontrôlée des agents pathogènes humains (Stephenson et al., 2014). La pratique du lavage des mains à intervalles réguliers, en particulier après avoir toussé ou éternué, après avoir soigné des malades, après avoir utilisé les toilettes, avant de manger, pendant la préparation des aliments et après avoir manipulé des animaux ou des déchets animaux, a un effet significatif sur la réduction des taux de transmission des bactéries, des virus et des champignons pathogènes. De même, le lavage des mains après avoir touché des surfaces contaminées, comme les poignées, constitue une protection efficace. Ce geste barrière est particulièrement recommandé après avoir visité un endroit fréquenté, en particulier les lieux de travail. Ainsi, l'hygiène des mains s'est avérée lors de l'épidémie de Covid-19 être l'un des principaux moyens de renforcer la sécurité sanitaire, si ces gestes simples sont fréquemment répétés (Mathur, 2011 ; Nicolaidis et al., 2020). Les gels hydroalcooliques se sont répandus une fois que la production industrielle a été en mesure de répondre aux quantités nécessaires à l'usage public, mais leur utilisation fait l'objet de directives contradictoires (Price et al., 2022). Bien qu'une étude systématique du potentiel de désinfection de divers produits commercialisés n'ait révélé aucune différence dans leur efficacité sur les mains, le lavage au savon suivi d'un séchage à l'air libre reste la méthode préférée pour se nettoyer les mains (Price et al., 2022, Braidablik et al., 2023). Cela peut s'expliquer par le fait que les désinfectants à base d'alcool augmentent la sensibilité de la peau à l'eczéma (Plum et al., 2020). Malheureusement, comme la plupart des lavabos sont situées dans les toilettes, qui sont généralement des zones hautement contaminées, le risque de recontamination est évident. Par exemple, des études ont montré qu'en moyenne, seulement 20 % des personnes dans les aéroports ont les mains propres, ce qui signifie qu'elles ont été lavées avec de l'eau et du savon pendant au moins 15 secondes au cours de l'heure écoulée. Les 80 % restants contaminent potentiellement tout ce qu'ils touchent avec les micro-organismes et les agents pathogènes potentiels dont ils sont porteurs (Nicolaidis et al., 2020). L'innovation technologique est ainsi appelée à rendre l'hygiène des mains plus pratique et rapide, afin que ces gestes soient plus fréquents. Cela nécessite de démultiplier les installations de désinfection des mains en dehors des toilettes, sans recourir aux produits de désinfection du fait des contraintes logistiques qu'ils induisent (Kivuti-Bitok et al., 2020).

Plasma froid d'air ambiant pour la désinfection des mains

Une étude pilote récente sur la transmission des virus dans les hôpitaux a révélé que l'utilisation de serviettes en papier entraînait des taux de contamination inférieurs à ceux d'un sèche-mains à jets d'air standard (Moura et al., 2022). Mais il est clair que l'intégration d'un module de désinfection dans ces appareils change la donne radicalement. Suite à la pandémie Covid-19, le marché propose des appareils de séchage des mains intégrant une fonction de désinfection à l'intérieur de l'appareil. Elle est réalisée

principalement par deux moyens : les diodes émettant des ultraviolets de la bande C (UV-C) et la génération d'ozone par décharge corona. Tous deux ont un faible coût de production, mais aussi des inconvénients qui les rendent inapplicables à la désinfection des mains : Les rayons UV-C sont bloqués par les corps opaques, et d'un autre côté, ils provoquent des brûlures de la peau et la cataractes et, de plus, ils sont cancérigènes (Greinert et al., 2015). Pour ce qui est de ces générateurs d'ozone, la décharge corona présentent de sérieux risques électriques. L'intégration d'une fonction de désinfection des mains apporterait donc une véritable avancée technique dans le domaine de l'hygiène.

La recherche a montré en outre que les plasmas froids à pression atmosphérique (Cold Atmospheric Plasma - CAP) permettent d'atteindre des niveaux de désinfection intéressants. En 2022, Mounir Laroussi et al. ont conclu que cette technologie devrait permettre de relever les défis sanitaires qu'engendrent les pandémies de type Covid-19 (Laroussi et al., 2022). Depuis 1968, à partir du brevet de W. P. Menashi (1968), la recherche pour l'utilisation des plasmas froids s'est intensifiée dans les traitements antimicrobiens, d'abord dans les applications à basse pression, donc en enceinte close. Depuis, les scientifiques ont montré qu'en contrôlant la puissance, les CAP peuvent être appliqués en toute sécurité sur la peau (Fridman, 2009). Deux types de sources de plasma conviennent : APPJ (jet de plasma à basse température et à pression atmosphérique) et DBD (plasma à décharge à barrière diélectrique) (Busco et al., 2020). La DBD a été mise en œuvre avec succès dans le développement d'un dispositif d'hygiène des mains pour les hôpitaux (Osman et al., 2016). Cependant, la DBD génère de l'ozone à partir de l'air. C'est un sous-produit toxique. Afin de ne pas dépasser 5 ppm, la limite de danger spécifiée par les Centers for Disease Control and Prevention (CDC), l'appareil fonctionne avec un module de brumisation qui humidifie l'air avant son ionisation. La vapeur piège l'ozone et le transforme en radicaux libres, renforçant ainsi l'effet de désinfection (Osman et al., 2016). Cependant, cette opération nécessite de l'eau, ce qui implique le raccordement de l'appareil au réseau d'eau sanitaire. Pour remplacer l'utilisation de gels hydroalcooliques, l'appareil doit être installé dans les lieux de passage, tels que les halls d'entrée et les couloirs, à des endroits bien choisis d'un point de vue pratique, par exemple près des portes pour éviter la contamination par les poignées. Ce sont des endroits où il n'y a généralement pas d'accès au système de distribution de l'eau, mais où une connexion électrique peut être ajoutée à peu de frais.

Cette étude participe à l'amélioration de la sécurité sanitaire à travers le monde en étudiant la faisabilité d'un nouveau type de sèche-mains à jets d'air, doté d'une fonction de désinfection utilisant le CAP et fonctionnant sans eau, ni savon ou produits désinfectants. Bien que la technologie CAP ait déjà fait progresser de nombreux procédés dans l'agro-alimentaire (Domonkos et al., 2021), les applications utilisant uniquement l'air ambiant comme gaz plasmagène sont encore rares et actuellement aucun système permettant de désinfecter les mains ne peut encore être intégré dans appareil à jets d'air.

Matériel et méthodes

Prototype de sources de plasma

Le projet a été réalisé en plusieurs phases, afin de développer un jet de plasma CAP à radiofréquence (RF) pour la désinfection des mains. Dans un premier temps, nous avons réalisé un prototype plasma atmosphérique à courant continu (DC), basé sur le dispositif développé par Deng et al. (2013). Plus simple qu'un dispositif RF, ce prototype a donné de bonnes performances de désinfection, mais son application est par principe limitée aux surfaces électriquement conductrices (Kassir et al., 2022). Puis, dans un deuxième temps, nous avons réalisé un jet CAP d'Argon généré avec une source RF fonctionnant à 10kHz. Basé sur le développement de Qian et al. (2011), qui permet de traiter les surfaces non conductrices, ce prototype n'était qu'une étape intermédiaire car le jet était instable si l'on utilisait de l'air comme gaz plasmagène. La stabilisation du plasma en utilisant de l'air, objectif final, a été atteint en augmentant la fréquence d'induction jusque dans la gamme des Mégahertz, ce que nous avons pu réaliser en développant un dispositif d'adaptation d'impédance RF spécifique, fonctionnant à 15.6 MHz. Afin de procéder aux tests de désinfection, un montage a été mis en place pour exposer des plaques au jet de plasma de manière contrôlée (**Figure 1**).

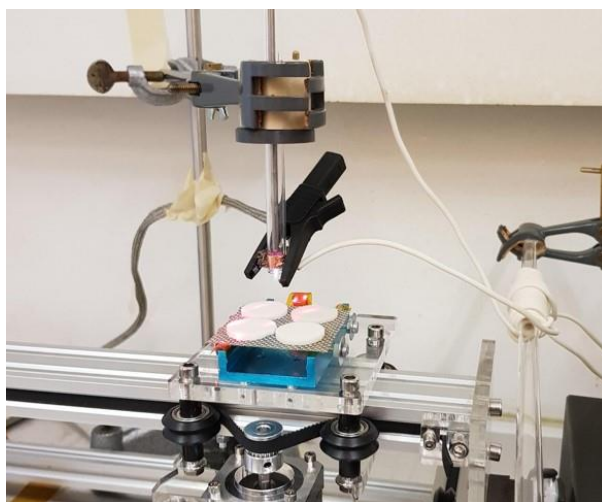


Figure 1 Montage permettant d'exposer des plaques au jet de plasma de manière contrôlée

Monitoring

Un détecteur (Trotec OZ-ONE, Heinsberg, Allemagne) a été utilisé pour mesurer les niveaux d'ozone. La température des surfaces exposées a été mesurée par thermographie infrarouge, à l'aide d'une caméra IR FLIR A8580 (Teledyne FLIR, Wilsonville, OR, USA60), et la température du plasma a été contrôlée à l'aide d'un thermomètre FTI-10 (FISO Technologies Inc., Québec, Canada G2E 5R9). La consommation d'énergie électrique était aussi mesurée. Deux niveaux de puissance d'induction électromagnétique ont été testés, 50W et 90W. La température est restée sous la limite tolérée par les micro-organismes (figure 2), ce qui confirme que la désinfection ne se fait pas par action thermique, mais par action chimique. Et de fait, les spectres d'émission optique du jet de plasma témoignent de la

présence d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (**Figure 3**), très recherchées pour la désinfection (Laroussi, 2018 ; Chen et al., 2020).

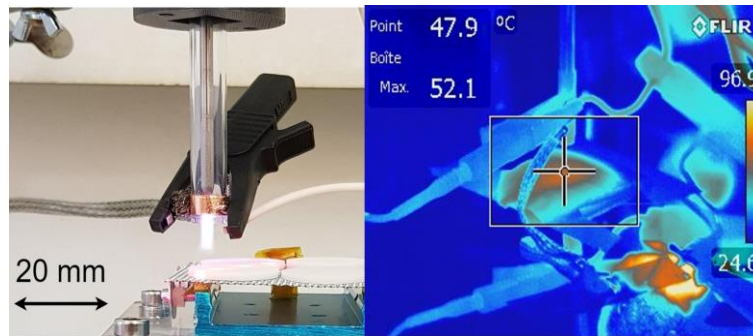


Figure 2 CAP à air (à gauche) et température en sortie de buse (à droite)

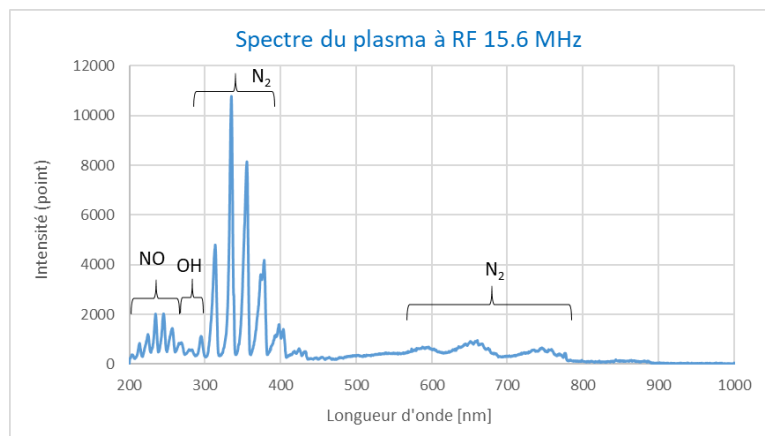


Figure 3 Spectre d'émission optique du jet CAP de type RF

Tests microbiologiques

Les essais microbiologiques étaient basés sur la norme EN 13697:2015+A1:2019 " Antiseptiques et désinfectants chimiques - Essai quantitatif de surface non-poreuse pour l'évaluation de l'activité bactéricide et/ou fongicide des désinfectants chimiques utilisés dans le domaine de l'agro-alimentaire, dans l'industrie, dans les domaines domestiques et en collectivité - Méthode d'essai sans action mécanique et prescriptions (phase 2/étape 2)" (Anonyme, 2019).

Cultures microbiennes

Des semences d'*Escherichia coli* DSM 682 ou de *Staphylococcus epidermidis* DSM 20044 ont été cultivées à 30°C pendant 24 heures dans un bouillon Tryptic Soya (milieu de digestion de la caséine et du soja ; Oxoid, Bâle, Suisse). Les densités cellulaires des cultures ont été déterminées à l'aide d'une chambre de comptage Neubauer améliorée d'une profondeur de 0,02 mm (Assistent, Glaswarenfabrik Karl Hecht GmbH & Co KG, Sondheim vor der Rhön, Allemagne). Des suspensions contenant environ 10⁶ cellules/ml de microorganismes ont été préparées à l'aide de sérum physiologique (pH 7,0 ; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Buchs, Suisse).

Conditions d'essai de désinfection

Dans les premières expériences, nous avons étudié l'effet du CAP appliqué directement sur des boîtes de Pétri inoculées avec une suspension de 1 ml contenant environ 10^6 cellules/ml d'E. coli ou de S. epidermidis. Après le traitement, les plaques de gélose ont été incubées pendant 24 à 48 heures à 30°C. Dans d'autres expériences, des disques stérilisés de 25 cm² en acier inoxydable ou en silicone ont été inoculés avec 1ml de suspensions contenant environ 10^6 cellules/ml d'E. coli ou de S. epidermidis. Après contamination, les disques étaient séchés à l'air dans une armoire de sécurité biologique de classe II, type A2 (Vitaris AG, Baar, Suisse) avant d'être utilisés dans les essais de désinfection. Pour chaque type de bactérie, un ensemble de quatre plaques était testé avec un balayage uniforme allant de 30 à 120 s par disque (25 cm²), en incrémentant par pas de 30 s. La vitesse de balayage était réglée d'abord à 4 cm/s, pour le balayage en 30 s, allant décroissant par pas de 1 cm/s jusqu'à 1 cm/s, pour le balayage en 120 s. Ultérieurement, le temps du balayage a été réduit à 75 secondes par disque pour que la température de la surfaceensemencée reste en-dessous de 50°C dans les essais de plus forte puissance (90 W) avec la buse à 14 mm. Après l'application du CAP, les micro-organismes ont été transférés dans 10 ml de solution saline physiologique (pH 7.0). Des dilutions au 1/10 des suspensions bactériennes obtenues ont été préparées dans une solution saline physiologique (pH 7.0), dont 1 ml a été déposé sur des boîtes de Pétri de 9 cm avant de mélanger les suspensions avec de la gélose tryptique au soja (Oxoid, Bâle, Suisse) à une température maximale de 48°C. Les boîtes ont été soigneusement séchées avant d'être incubées pendant 24 à 48 heures à 30°C. Les plaques contenant 10 à 300 colonies ont été comptées pour estimer la quantité d'ufc/ml dans les échantillons.

Nous avons choisi le silicone pour évaluer la désinfection de la peau humaine car cet élastomère est déjà employé pour simuler ce tissu organique (Nachman et al., 2016, Franklin et al., 2013). Pour ces disques, un problème mécanique a compliqué les essais au début : en passant à 14 mm sous la buse, le flux d'air soulevait et déplaçait ces disques plus légers. Nous avons dû les poser sur une grille métallique. De plus, la puissance d'induction a été limitée à 50W de sorte à ce que la température de la surfaceensemencée ne dépasse pas la limite d'inactivation thermique des bactéries utilisées (50°C).

Résultats

Essais avec le plasma DC

Les tests avec la source DC n'ont pas montré d'effet significatif de désinfection sur les boîtes de Petri (Kassir et al., 2022). Mais la surface n'a pas surchauffé : sa température est restée autour de 45°C. Suite à ce résultat, une autre série de tests a été réalisée, cette fois-ci sur des disques métalliques (acier inoxydable) mis à la Terre. Cette configuration permet un traitement direct de la surface contaminée car elle fait alors partie du circuit électrique de décharge, soit par mise à la Terre, soit par effet capacitif selon la configuration d'électrode flottante introduite par Fridman et al. (2006).

La norme EN 13697:2015+A1:2019, qui fait référence en matière de gels hydroalcooliques, requière une réduction de 4 Log₁₀ des bactéries (Anonyme, 2019). Sans atteindre ce niveau, requis par exemple dans des domaines aussi exigeants que l'industrie agro-alimentaire, des niveaux de désinfection significatifs ont été atteints lors de nos tests sur les cibles en matériaux conducteur électrique (acier inoxydable) ou isolant (silicone), comme le montre le **Tableau 1**. En traitement direct, sur le métal, la réduction de la charge microbienne atteint 1,99 log₁₀ après 120 secondes pour E. coli et 1,81 log₁₀ pour S. epidermidis. La réduction du nombre des colonies bactériennes est significative, comme le montre le test statistique de Student (test t à deux échantillonnages indépendants). Dans le cas du balayage de 120 s, par exemple, la probabilité que l'écart des moyennes ne soit pas significatif, à un niveau de confiance de 95%, est inférieur à 2% (paramètre p sur la **Figure 4**).

Le traitement indirect offre l'avantage de pouvoir traiter les deux types de substrat, conducteur ou isolant, mais le traitement indirect au plasma DC est nettement moins efficace (**Tableau 1**). Cette différence montre que la désinfection par plasma DC résulte essentiellement du bombardement électronique de la surface. On observe en outre sur le **Tableau 1** que la désinfection sur le silicone était moins forte que sur l'acier inoxydable. Par ailleurs, les niveaux d'ozone ont atteint 0,5-0,6 ppm, ce qui représente trois fois la valeur limite tolérable selon les normes de sécurité suisses (Suva, 2021). Une ventilation supplémentaire de la zone de traitement de surface a permis de réduire la présence d'ozone à des niveaux acceptables lors des essais suivants.

Tableau 1 Réduction de la charge microbienne avec un CAP type DC en traitement direct, utilisant de l'air sec, en fonction du temps de balayage. Traitement direct en gris, indirect en blanc.

Temps (s)	Silicone disks				Stainless steel disks			
	<i>E. coli</i> DSM682		<i>S. epiderminis</i> DSM20044		<i>E. coli</i> DSM682		<i>S. epiderminis</i> DSM20044	
	Log ₁₀ cfu/disk ±ET ¹	Log ₁₀ reduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ reduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ reduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ reduction
0					5.76 ±0.056	N/A	6.32 ±0.000	N/A
30					5.24 ±0.134	0.51	5.83 ±0.049	0.53
60					4.75 ±0.007	1.01	4.90 ±0.177	1.42
120					3.77 ±0.205	1.99	4.51 ±0.085	1.81
0	5.30 ± 0.063	N/A	6.72 ± 0.170	N/A	5.78 ±0.007	N/A	6.65 ±0.021	N/A
30	5.73 ± 0.001	no reduction	6.76 ± 0.001	no reduction	5.21 ±0.092	0.58	> 6.00	no reduction
60	4.27 ± 0.622	1.03	6.66 ± 0.001	0.1	5.02 ±0.035	0.77	> 6.00	no reduction
120	4.38 ± 0.085	0.92	6.09 ± 0.219	0.63	4.96 ±0.113	0.83	5.88 ±0.021	0.72

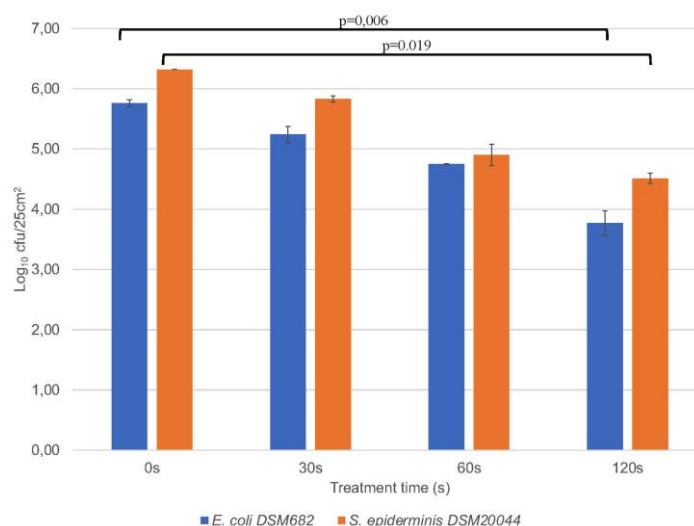


Figure 4 Traitement direct au CAP de type DC sur du métal (acier inoxydable), pendant 0s (témoin), 30s, 60s et 120s. L'échelle verticale est logarithmique (unité : log₁₀ cfu/ml). Les barres d'incertitude donnent les écart-types et le paramètre p la probabilité que l'écart des moyennes ne soit pas significatif.

Essais avec le plasma RF

Les plasmas DC ne peuvent cependant pas être employées sur la peau à cause des risques de brûlures ; c'est pourquoi nous avons mis au point un jet de plasma CAP utilisant une radiofréquence (RF) à 15.6 MHz. Dans tous les essais que nous avons réalisés avec ce plasma, les durées d'exposition n'ont pas permis d'atteindre le niveau de décontamination spécifié par la norme EN 13697:2015+A1:2019. Au bout de 75 s, à une vitesse de balayage de 20 mm/s, l'effet de désinfection est néanmoins clair, la réduction du nombre de colonies étant en effet nettement visible (**Tableau 2 et Figure 5**). Comme escompté, la désinfection des deux types de matériaux est comparable : à 50W, le taux de réduction des colonies atteint en moyenne 54% (0,34 log₁₀ cfu/ml) sur le silicone et 64% (0,45 log₁₀ cfu/ml) sur l'acier

¹ ET : écart-type

inoxydable ; à 90W, ces valeurs passent respectivement à 87% (0,88 log₁₀ cfu/ml) et 92% (1,12 log₁₀ cfu/ml).

Tableau 2 Réduction de la charge microbienne avec un CAP type RF à 15.6 MHz utilisant de l'air sec pour une vitesse de balayage de 20 mm/s, à deux niveaux de puissance RF : 50 et 90 W

Puis. RF (W)	Silicone disks				Stainless steel disks			
	<i>E. coli</i> DSM682		<i>S. epidermis</i> DSM20044		<i>E. coli</i> DSM682		<i>S. epidermis</i> DSM20044	
	Log ₁₀ cfu/disk ±ET ^[1]	Log ₁₀ réduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ réduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ réduction	Log ₁₀ cfu/disk ±ET	Log ₁₀ réduction
Témoin	6.06 ±0.233		6.37 ±0.162		6.12 ±0.113		6.56 ±0.127	
50	5.65 ±0.092	0.41	6.09 ±0.190	0.28	5.98 ±0.283	0.14	5.98 ±0.148	0.58
50	5.58 ±0.184	0.48	6.19 ±0.141	0.18	5.57 ±0.001	0.55	6.04 ±0.007	0.52
Moyen.		0.45		0.23		0.35		0.55
90	5.09 ±0.360	0.97	5.67 ±0.162	0.70	4.99 ±0.389	1.13	5.46 ±0.071	1.10
90	4.97 ±0.360	1.09	5.60 ±0.311	0.77	5.14 ±0.120	0.98	5.31 ±0.042	1.25
Moyen.		1.03		0.74		1.05		1.18

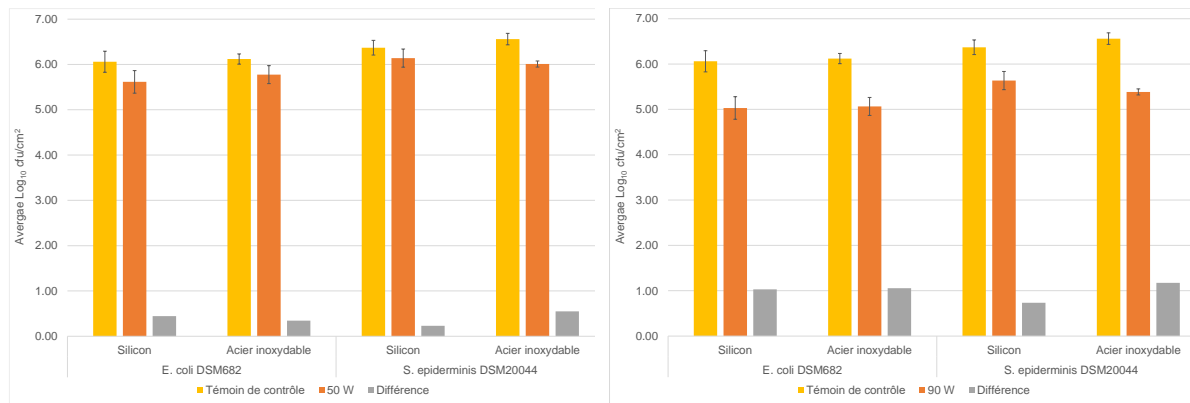


Figure 5 Désinfection par CAP de type RF (15.6 MHz) sur du métal (acier inoxydable) et de la peau artificielle (silicone) pendant 75 secondes. L'échelle verticale est logarithmique (unité : log₁₀ cfu/ml). Les barres d'incertitude indiquent les écart-types. La puissance RF était à 50 W (à gauche) et 90 W (à droite).

Discussion

Analyse des résultats des essais

La **Figure 5** donne une comparaison des désinfections obtenues par traitements aux CAP de type RF à deux niveaux de puissance RF : 50 W (à gauche) et 90 W (à droite). On constate que ce type de plasma permet d'obtenir un effet de désinfection significatif, en rapport de la puissance. Comme la température est restée inférieure à la limite d'inactivation thermique des bactéries utilisées (50°C), ces résultats confirment que l'action du plasma est d'ordre chimique. Concernant le Covid-19, les agents chimiques issus des jets CAP à air par lesquels la désinfection s'opère ont été identifiés comme étant des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et de l'azote (RNS) (Chen et al., 2022). Les ROS, notamment le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), le radical hydroxyle (OH⁻), l'oxygène singulet (¹O₂) et l'anion superoxyde (O₂⁻), produites de manière endogène par les organismes à inactiver, ont déjà été considérées comme des armes intéressantes pour l'élimination des pathogènes (Li et al., 2021). De même, il a été démontré que les espèces réactives de l'azote (NO₂[•] et ONOO⁻/HOONO) détruisent l'ADN et peuvent supprimer complètement les états viables mais non cultivables des micro-organismes et inhiber la réactivation des bactéries (Wang et al., 2022). Le processus exact d'inactivation à l'aide du plasma n'a toutefois pas été entièrement compris, mais on pense que les ROS hydrophobes oxydent la bicouche lipidique des cellules et diminuent l'épaisseur de la membrane cellulaire (Waskov et al., 2018 ; Hu et al., 2019). Par ailleurs, il a été observé que la désinfection des disques en silicone était moins forte que celle des disques en acier inoxydable. Cela pourrait provenir de la porosité du silicone, qui rendrait la désinfection plus difficile.

Intégration dans un sèche-mains

Les tests effectués dans cette étude ne correspondent pas exactement à ce qui pourrait se passer dans un sèche-mains, puisqu'une seule buse était en fonctionnement et, surtout, l'aérodynamisme du flux de plasma sur les mains n'était pas du tout reproduit. Néanmoins, en tablant sur deux rangées en vis-à-vis d'au moins une vingtaines de buses chacune, s'étendant sur un peu plus de 30 cm de long de sorte à exposer les deux mains de chaque côté en un seul passage, on peut estimer qu'un balayage à environ 2 cm/s couvrirait les mains jusqu'aux poignets en environ 10 à 15 secondes, ce qui équivaut au temps nécessaire au séchage avec un appareil standard ; la performance de désinfection dans un sèche-mains pourrait donc arriver au niveau de celles du **Tableau 2**. En comparaison, le temps d'application recommandé pour les gels à base d'alcool est une demi-minute pour atteindre un niveau de désinfection conforme à la norme susmentionnée. Notons de plus que, comme la vapeur d'eau favorise l'effet de désinfection du plasma (Osman et al., 2016) et que nos tests ont été réalisés avec de l'air sec, pour des raisons de reproductibilité, la désinfection devrait être plus efficace en utilisant l'air ambiant comme gaz plasmagène.

Les modèles de sèche-mains à lame d'air se prêtent bien à l'intégration des buses à plasmas au niveau de l'embouchure des canaux aérauliques, en mettant une source CAP à chaque jet d'air. Notons que,

s'agissant d'un plasma froid, il est possible d'utiliser l'impression 3D additive en matière plastique pour accélérer la conception des buses (Kassir et al., 2022). En effet, la conception du circuit aéraulique devrait être reprise pour optimiser l'ergonomie de l'appareil, l'exposition des mains et le recyclage de l'air afin de désactiver l'ozone avec un filtre. Bien entendu, les modules électroniques de puissance générant l'induction RF devront également être intégrés. Ils pourront prendre la place laissée par le système de chauffage, devenu inutile, dont la consommation d'énergie sera réaffectée à la production du plasma. Sur la base d'un sèche-mains du commerce d'une puissance électrique nominale de 1,5 kW, on estime que la puissance totale pourrait rester en-deçà de 3 kW.

Conclusion

Les essais de désinfection présentés ici ont été réalisés avec un CAP utilisant l'air comme gaz plasmagène, qui a été stabilisé en augmentant la fréquence d'induction dans la gamme des MHz. Cette technologie, compatible avec les surfaces délicates, est beaucoup plus respectueuse de l'environnement que les procédés chimiques humides traditionnels, tout en réduisant le risque de contamination des surfaces adjacentes par la formation d'aérosols (Domonkos et al., 2021). Par conséquent, la technologie présentée ici, une fois optimisée, pourrait remplacer ou compléter les méthodes actuelles de désinfection des mains et atténuer le fardeau économique des crises de santé publique à l'avenir (Chen et Wirz, 2020). De surcroît, moyennant une augmentation de puissance de désinfection, on peut envisager des applications plus exigeantes sur le plan sanitaire, comme l'hygiène des mains en milieu hospitalier. Il est en effet possible d'augmenter le temps d'exposition et le nombre de buses à CAP pour atteindre le taux de décontamination requis pour ces applications. En outre, comme le CAP s'est avéré être un outil efficace dans l'inactivation des agents pathogènes (bactéries, champignons, virus...), les générateurs de plasma développés ici pourraient intéresser d'autres secteurs, comme l'industrie agro-alimentaire, notamment là où les traitements thermiques ne sont pas applicables. Toutefois, les impacts de cette technologie devront être davantage étudiés avant approbation réglementaire et acceptation par les consommateurs (Domonkos et al., 2021).

Conflit d'intérêts

Aucun

Remerciements

Le projet a été réalisé grâce à un financement de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) et du domaine Ingénierie et Architecture.

Références

1. Moura I. B., Ewin D., & Wilcox M. H. (2022). From the hospital toilet to the ward: A pilot study on microbe dispersal to multiple hospital surfaces following hand drying using a jet air dryer versus paper towels. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 43(2), 241-244.
2. Laroussi, M. et al. "Low-temperature plasma for biology, hygiene, and medicine: Perspective and roadmap." *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences* 6.2 (2022): 127-157.
3. Menashi, 1968, Treatment of surfaces, USA, US3383163 A.
4. Fridman A. (2009), Plasma Chemistry, Cambridge University Press.
5. Busco G, Robert E, Chettouh-Hammas N, Pouvesle JM, Grillon C. The emerging potential of cold atmospheric plasma in skin biology. *Free Radic Biol Med*. 2020 Dec;161:290-304. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2020.10.004.
6. Osman I., Ponukumati A., Vargas M., Bhakta D., Ozoglu B., & Bailey C. (2016). Plasma-activated vapor for sanitization of hands. *Plasma Medicine*, 6(3-4).
7. Deng X. L., Nikiforov A. Y., Vanraes P., & Leys C. (2013). Direct current plasma jet at atmospheric pressure operating in nitrogen and air. *Journal of Applied Physics*, 113(2), 023305.
8. Kassir A. M., Sonnard J., Roulin L., Baudin M., Courret G., & Brück W. M. Fast prototyping for atmospheric plasma sources integration into air hand dryers. In Proceedings of the irc 2022, XVI international research conference. 30-31 August 2022.
9. Qian M. Y., Ren C. S., Wang D. Z., Fan Q. Q., Nie Q. Y., Wen X. Q., & Zhang J. L. (2011). Investigations on an atmospheric dielectric barrier discharge plasma jet with a concentric wire-mesh cylinder electrode configuration. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(4), 1134-1141.
10. Greinert R., de Vries E., Erdmann F., Espina C., Auvinen A., Kesminiene A., Schüz J. (2015). European Code against Cancer 4th Edition: Ultraviolet radiation and cancer, *Cancer Epidemiology*, 39(1), S75-S83
11. Laroussi, M. (2018). Plasma medicine: a brief introduction. *Plasma*, 1(1), 47-60.
12. Chen Z., Garcia Jr. G., Arumugaswami V., & Wirz R. E. (2020). Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation. *Physics of Fluids*, 32(11), 111702.
13. Suva, Valeurs limites d'exposition aux postes de travail, 1903.f, www.suva.ch/1903.f, February 2021
14. Villa C, Russo E. Hydrogels in Hand Sanitizers. *Materials (Basel)*. 2021 Mar 24;14(7):1577. doi: 10.3390/ma14071577.
15. Stephenson RE, Gutierrez D, Peters C, Nichols M, Boles BR. Elucidation of bacteria found in car interiors and strategies to reduce the presence of potential pathogens. *Biofouling*. 2014;30(3):337-46. doi: 10.1080/08927014.2013.873418
16. Price L, Gozdzielewska L, Alejandre JC, Jorgenson A, Stewart E, Pittet D, Reilly J. Systematic review on factors influencing the effectiveness of alcohol-based hand rubbing in healthcare. *Antimicrob Resist Infect Control*. 2022 Jan 24;11(1):16. doi: 10.1186/s13756-021-01049-9.
17. Mathur P. Hand hygiene: back to the basics of infection control. *Indian J Med Res*. 2011 Nov;134(5):611-20. doi: 10.4103/0971-5916.90985.
18. Breidablik HJ, Johannessen L, Andersen JR, Søreide H, Kleiven OT. Effect of Optimal Alcohol-Based Hand Rub among Nurse Students Compared with Everyday Practice among Random Adults; Can Water-Based Hand Rub Combined with a Hand Dryer Machine Be an Alternative to Remove E. coli Contamination from Hands? *Microorganisms*. 2023 Jan 28;11(2):325. doi: 10.3390/microorganisms11020325.
19. Nicolaidis C, Avraam D, Cueto-Felgueroso L, González MC, Juanes R. Hand-Hygiene Mitigation Strategies Against Global Disease Spreading through the Air Transportation Network. *Risk Anal*. 2020 Apr;40(4):723-740. doi: 10.1111/risa.13438.
20. Plum F, Yüksel YT, Agner T, Nørreslet LB. Skin barrier function after repeated short-term application of alcohol-based hand rub following intervention with water immersion or occlusion. *Contact Dermatitis*. 2020 Sep;83(3):215-219. doi: 10.1111/cod.13587.
21. Kivuti-Bitok LW, Chepchirchir A, Waithaka P, Ngune I. Dry Taps? A Synthesis of Alternative "Wash" Methods in the Absence of Water and Sanitizers in the Prevention of Coronavirus in Low-Resource Settings. *J Prim Care Community Health*. 2020 Jan-Dec;11:2150132720936858. doi: 10.1177/2150132720936858.

22. Chen, Z., Bai, B., Jonas, S. J., Wirz, R. E. (2022), Cold atmospheric plasma for addressing the COVID-19 pandemic, *Plasma Process Polym.*;19:e2200012
23. Li H, Zhou X, Huang Y, Liao B, Cheng L, Ren B. Reactive Oxygen Species in Pathogen Clearance: The Killing Mechanisms, the Adaption Response, and the Side Effects. *Front Microbiol.* 2021 Feb 4;11:622534. doi: 10.3389/fmicb.2020.622534.
24. Wang Y, Yin R, Tang Z, Liu W, He C, Xia D. Reactive Nitrogen Species Mediated Inactivation of Pathogenic Microorganisms during UVA Photolysis of Nitrite at Surface Water Levels. *Environ Sci Technol.* 2022 Sep 6;56(17):12542-12552. doi: 10.1021/acs.est.2c01136.
25. Domonkos M, Tichá P, Trejbal J, Demo P. Applications of Cold Atmospheric Pressure Plasma Technology in Medicine, Agriculture and Food Industry. *Appl. Sci.* 2021,11, 4809. <https://doi.org/10.3390/app11114809>
26. Chen Z.; Wirz R. Cold Atmospheric Plasma for COVID-19. *Preprints.org* 2020, 2020040126. <https://doi.org/10.20944/preprints202004.0126.v1>
27. Hu Y, Zhao T, Zou L, Wang X, Zhang Y. Molecular dynamics simulations of membrane properties affected by plasma ROS based on the GROMOS force field. *Biophys Chem.* 2019 Oct;253:106214. doi: 10.1016/j.bpc.2019.106214.
28. Anonymous (2019). EN 13697:2015+A1:2019. Chemical disinfectants and antiseptics, Quantitative non-porous surface test for the evaluation of bactericidal and/or fungicidal activity of chemical disinfectants used in food, industrial, domestic and institutional areas (phase 2/step 2)” Available at: <https://connect.snv.ch/en/> (accessed 04 August 2021).
29. Nachman, M. and Franklin, S. E. (2016) Artificial Skin Model simulating dry and moist in vivo human skin friction and deformation behaviour. *Tribology International*, 97. pp. 431-439. ISSN 0301-679X
30. Franklin S E, Baranowska J, Furgala J, Piwowarczyk J (2013). Friction of natural human, porcine and synthetic skin. *Proceedings 5th International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues*. Sitges, Spain, 8-12 Dec. 2013.