

Le potentiel émergent du plasma froid à pression atmosphérique pour le traitement de la peau

Cristina Muja

Laboratoire DPHE
I.N.U. J.F. Champollion,
Université de Toulouse, Albi, France
<https://orcid.org/0000-0001-8302-0653>

Coralie Cayron

Equipe Biophysique cellulaire
Institut de Pharmacologie et Biologie
Structurale, Toulouse, France
<https://orcid.org/0000-0002-1721-5310>

Thomas Maho

Laboratoire DPHE
I.N.U. J.F. Champollion,
Université de Toulouse, Albi, France
<https://orcid.org/0000-0003-3842-7846>

Muriel Golzio

Equipe Biophysique cellulaire
Institut de Pharmacologie et Biologie
Structurale, Toulouse, France
<https://orcid.org/0000-0002-7470-3708>

Philippe Guillot

Laboratoire DPHE
I.N.U. J.F. Champollion,
Université de Toulouse, Albi, France
philippe.guillot@univ-jfc.fr

Résumé — Cette étude examine le potentiel d'une source plasma froid à pression atmosphérique dans le domaine de la santé, plus particulièrement le traitement de la peau. La source utilisée dans ce travail appartient à la catégorie des Décharges à Barrières Diélectriques. Elle est alimentée en régime impulsif. La caractérisation expérimentale de cette source est faite à partir de diagnostics électriques et optiques de façon à déterminer respectivement les signaux électriques (tension, courant) et les propriétés du plasma (émissions et homogénéité du plasma), ainsi que la distribution des espèces réactives produites par la source. La capacité du dispositif d'inactiver des bactéries, levures et fungi a été examinée, ainsi que les effets du plasma sur des kératocytes et fibrocytes.

Mots-clés — plasma, Décharges à Barrières Diélectrique, dermatologie, désinfection.

I. INTRODUCTION

Le traitement par plasma froid est une technique innovante qui suscite un intérêt croissant en dermatologie pour ses nombreux bienfaits thérapeutiques. Le plasma, souvent considéré comme le "quatrième état de la matière", est généré en créant une décharge électrique dans un gaz rare ou un mélange de gaz, ce qui produit un ensemble de particules chargées, de molécules neutres, d'ions, et de radicaux libres. En dermatologie, le plasma doit rester à basse température (inférieure à 40°C), ce qui le rend sans risque pour la peau et les tissus vivants, contrairement aux plasmas thermiques utilisés dans d'autres applications.

Cette technologie a démontré des résultats prometteurs pour traiter une variété de pathologies cutanées, comme les plaies chroniques, l'acné, le psoriasis, et certaines infections de la peau. Grâce à ses effets anti-inflammatoires, antimicrobiens et stimulants pour la régénération cellulaire, le plasma froid favorise la cicatrisation et améliore la santé cutanée sans nécessiter de contact direct ou d'utilisation de produits chimiques agressifs. Il agit en stimulant les processus de réparation cellulaire et en réduisant la charge microbienne, ce qui en fait une solution innovante et non invasive dans les soins dermatologiques modernes.

Ainsi, le plasma froid pourrait devenir un complément ou une alternative aux traitements traditionnels, notamment pour les patients qui recherchent des options moins invasives ou qui sont sensibles aux médicaments topiques.

II. LA GENERATION ET LA CARACTERISATION DES PLASMAS FROIDS POUR LE TRAITEMENT DE SURFACE

A. Décharges à Barrières Diélectriques (DBD)

Dans le domaine du traitement de surface, en particulier pour les applications biologiques, les chercheurs développent

généralement des procédés pour générer des décharges dans les conditions ambiantes sans échauffement de la surface. La formation d'arcs électriques doit être notamment évitée car ils pourraient engendrer un échauffement, des risques électriques et des instabilités au niveau de la décharge. Afin d'empêcher le passage à l'arc, une solution consiste à recouvrir une des électrodes par un diélectrique, voire les deux électrodes. Cette configuration se nomme Décharge à Barrières Diélectriques (DBD). La capacité du diélectrique limite le courant dans la décharge et permet de conserver un plasma hors équilibre dans les conditions atmosphériques. De nombreuses géométries de DBD ont été étudiées dans la littérature [1] pour différentes applications (figure 1).

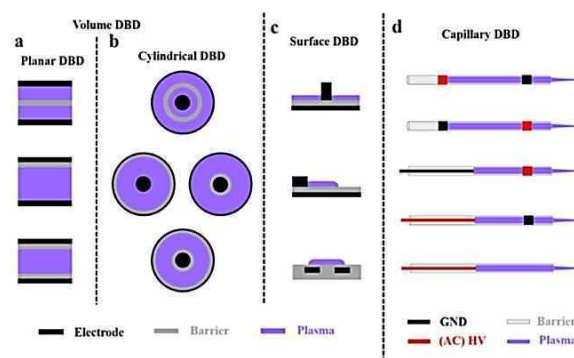


Fig. 1. Décharges à Barrières Diélectriques : différentes géométries (a-géométrie plane, décharge en volume, b-géométries cylindriques, décharges en volume, c-géométries planes, décharges en surface, d-jet de plasma).

Au niveau des signaux pour générer un plasma à partir d'une structure à barrières diélectriques, de nombreuses possibilités utilisant un signal alternatif sont offertes en termes de formes (sinusoïdal, carré, impulsif) et de fréquences (du kHz au Mhz en ordre de grandeur).

En plus de la température, les DBD sont aussi généralement synonymes de faible puissance consommée par le plasma, de facilité de contrôle de la décharge et dans certaines conditions d'homogénéité du plasma, ce qui leur confère un fort potentiel dans de nombreuses applications et un grand intérêt pour de nombreux chercheurs.

B. Configuration de la source plasma

La source utilisée dans ce travail est une DBD représentée schématiquement sur la figure 2. La source est en forme de cloche. Un mélange de gaz (Hélium 99.8% - Oxygène 0.2%) est injecté dans la structure avec un débit de 3 l/min. Le potentiel est appliqué dans la cloche par l'intermédiaire d'une électrode verticale. Le plasma est généré dans la cloche et diffusé ensuite vers la partie

basse, cylindrique, de 6 cm de diamètre, en contact avec la surface à traiter.

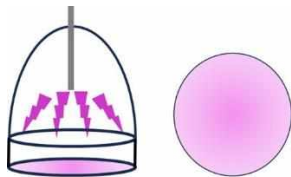


Fig. 2. Géométrie de la source (à gauche, vue de côté, à droite, vue de dessous).
Le plasma ainsi généré interagit avec la surface d'un disque.

Le générateur délivre un signal impulsionnel d'amplitude, de fréquence et de rapport cyclique variables. Dans ce travail, la fréquence de répétition des impulsions est de 20kHz (période de 50 μ s) avec des impulsions de durée 3 μ s (rapport cyclique de 6%). La tension appliquée peut varier entre 1kV et 20kV. Un exemple de signaux de tension et de courant est représenté sur la figure 3. Le courant total fourni par l'alimentation a été mesuré à l'aide d'une sonde de courant (PEARSON), tandis que la tension appliquée a été mesurée avec une sonde de tension (Tektronix P6015A). Les signaux ont été enregistrés avec un oscilloscope numérique (ROHDE & SCHWARZ RTE1204). Dans cet exemple, la tension maximale et le pic de courant sont respectivement de 5 kV et 55 mA.

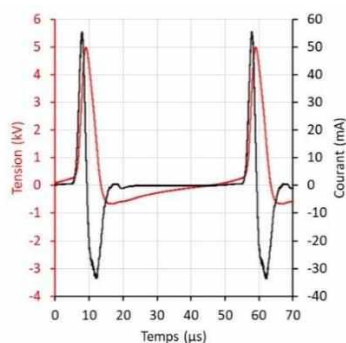


Fig. 3. Allure de la tension appliquée (en noir) et du courant (en rouge) en fonction du temps.

C. Caractérisation optique du plasma

Pour identifier les espèces réactives générées par le plasma, nous avons utilisé un spectromètre optique (PI-HRS-750 couplé à une caméra ICCD PI-MAX4). Un exemple typique de spectre est représenté sur la figure 4. Ce spectre correspond aux émissions dans la partie basse de la source, il caractérise les espèces présentes en interaction avec l'air ambiant et potentiellement avec la surface à traiter. Nous pouvons observer les émissions dues à la présence d'hélium mais surtout les émissions d'azote et d'oxygène.

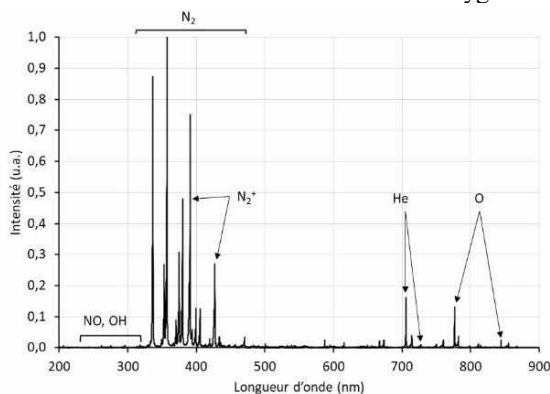


Fig. 4. Exemple de spectre mesuré dans des conditions classiques de fonctionnement de la source plasma.

Pour observer la distribution spatiale du plasma à la sortie de la source, nous avons utilisé une caméra ICCD (Princeton Instruments PI-MAX1) en intégrant sur une période de façon à évaluer l'homogénéité du plasma. Nous avons également utilisé cette caméra en mode séquentiel de façon à observer l'évolution spatio-temporelle du plasma sur une période. Un exemple typique de distribution est représenté sur la figure 5. La caméra ICCD a été positionnée de façon à observer la source vue de dessous. Ici, l'image est intégrée sur plusieurs périodes. Cette distribution en deux dimensions permet de visualiser l'intensité du plasma plus forte sur la périphérie de la source mais homogène sur la surface interne, d'environ 28 cm².

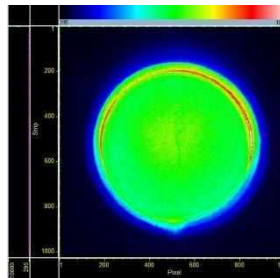


Fig. 5. Exemple de distribution spatiale du plasma obtenue par intégration pendant plusieurs périodes du signal de tension appliquée (diamètre 6 cm).

D. Le plasma froid produit des espèces réactives d'oxygène et d'azote (RONS) ayant un effet sur la peau

Les espèces réactives de l'oxygène et de l'azote (RONS) produites par les plasmas froids jouent un rôle essentiel dans les traitements de la peau. Les plasmas froids génèrent des RONS tels que le peroxyde d'hydrogène, l'ozone et l'oxyde nitrique, qui possèdent des propriétés antimicrobiennes et anti-inflammatoires. Leur action contribue à détruire les agents pathogènes tout en stimulant les processus naturels de régénération cellulaire et la synthèse de collagène. En induisant une réponse de faible stress oxydatif dans les cellules de la peau, les RONS favorisent également la prolifération cellulaire et la production de facteurs de croissance, accélérant ainsi la réparation tissulaire. Pour observer la distribution spatiale des RONS au niveau de la cible à traiter, des matrices contenant du KI et de l'amidon ont été exposées au plasma. En présence de RONS, le mélange KI-amidon produit une coloration bleue qui absorbe autour de 570 nm [2]. La figure 6 montre la matrice KI – amidon après une exposition au plasma de 60 secondes. L'homogénéité de la coloration de la zone exposée indique une distribution uniforme des RONS à la surface de la cible.



Fig. 6. Distribution spatiale des RONS obtenue en exposant des matrices KI-amidon au plasma pendant 60 secondes.

III. L'EFFET DU PLASMA SUR LA PEAU

A. Le plasma froid a un effet bactéricide, levuricide et fongicide

L'efficacité biocide des plasmas froids est très bien documentée pour un très large spectre de microorganismes, sous forme végétative ou en biofilm [3]. Zhou et al [3] ont démontré que cet effet biocide est associé à la présence du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) avec NO₂⁻. Dans cet étude *Staphylococcus aureus* a été utilisé comme modèle de bactérie à Gram positive. Pour analyser l'impact de la nature du support sur l'efficacité bactéricide, les bactéries ont été inoculées sur des

surfaces inertes en verre et sur deux types de gels utilisés comme modèle de peau. Les résultats montrent qu'après 5 minutes d'exposition, il y a une différence significative entre la réduction de la viabilité sur du verre et sur des gels - 33 % vs. -99 %. De plus, l'exposition au plasma a induit des réductions significatives de la viabilité de *Pseudomonas aeruginosa* et *Candida albicans*.

B. La viabilité des cellules tégumentaires n'est pas affectée par l'exposition au plasma

La viabilité et la mobilité des cellules tégumentaires sont des caractéristiques essentielles analysées pour mettre en évidence les effets du plasma froid sur la peau. Plusieurs études ont montré que le traitement par plasma pour des courtes durées induit des effets bénéfiques sur les cellules de la peau. Dans cet étude, l'exposition des kératocytes et fibroblastes au plasma pendant 3 minutes n'affecte pas de manière significative ni leur viabilité, ni leur

motilité. De plus, ce traitement augmente les niveaux de stress oxydatif intracellulaire dans les deux types cellulaires.

REFERENCES

- [1] Niu, G., Knodel, A., Burhenn, S., Brandt, S., & Franzke, J. (2021). Review: Miniature dielectric barrier discharge (DBD) in analytical atomic spectrometry. In *Analytica Chimica Acta* (Vol. 1147).
- [2] D. Boonyawan, K. Lamasai, C. Umongno, S. Rattanabtimtong, L.D. Yu, C. Kuensan, J. Maitip, P. Thana, Surface dielectric barrier discharge plasma-treated pork cut parts: bactericidal efficacy and physiochemical characteristics, *Heliyon* 8 (2022)
- [3] R. Zhou, K. Prasad, Z. Fang, R. Speight, K. Bazaka, K. Ostrikov. Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: the crucial role of peroxynitrite *Green Chem.*, 20 (23) (2018), pp. 5276-5284.
- [4] E.J. Szili, F.J. Harding, S.-H. Hong, F. Hermann, N.H. Voelcker, R.D. Short, The hormesis effect of plasma-elevated intracellular ROS on HaCaT cells, *J. Phys. Appl. Phys.* 48 (2015)