



HAL
open science

Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles avancées

Claire Douat, Thierry Dufour, João Santos Sousa

► **To cite this version:**

Claire Douat, Thierry Dufour, João Santos Sousa. Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles avancées. Reflets de la Physique, 2023, 75, pp.24-30. 10.1051/refdp/202375024 . hal-04259896

HAL Id: hal-04259896

<https://hal.science/hal-04259896>

Submitted on 26 Oct 2023

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.

Les plasmas froids et le Vivant, de nouvelles avancées

Claire Douat⁽¹⁾ (claire.douat@univ-orleans.fr), Thierry Dufour⁽²⁾ et João Santos Sousa⁽³⁾

(1) Groupe de recherche sur l'énergétique des milieux ionisés (GREMI, UMR7344 CNRS et Université d'Orléans), 14 rue d'Issoudun, BP6744, 45067 Orléans Cedex 2

(2) Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP, UMR7648, Sorbonne Université, CNRS, École polytechnique), Sorbonne Université, 4 place Jussieu, Case courrier 90, 75252 Paris Cedex 05

(3) Laboratoire de physique des gaz et des plasmas (LPGP, UMR8578 CNRS et Université Paris-Saclay), Bâtiment 210 (rue Becquerel), Faculté des Sciences d'Orsay de l'Université Paris-Saclay, 15 rue Georges Clémenceau, 91405 Orsay Cedex

Depuis le début des années 2000, des avancées technologiques majeures ont permis l'émergence de plasmas froids à pression atmosphérique ayant de faibles valeurs de courant et des températures proches de la température ambiante.

Dans cet article, nous exposons dans un premier temps les principales sources de plasma froid utilisées avec succès dans les applications biomédicales, en insistant notamment sur les propriétés physico-chimiques recherchées.

Dans un second temps, nous proposons un état de l'art des dernières avancées médicales (en particulier en cancérologie et en dermatologie), ainsi qu'en agriculture.

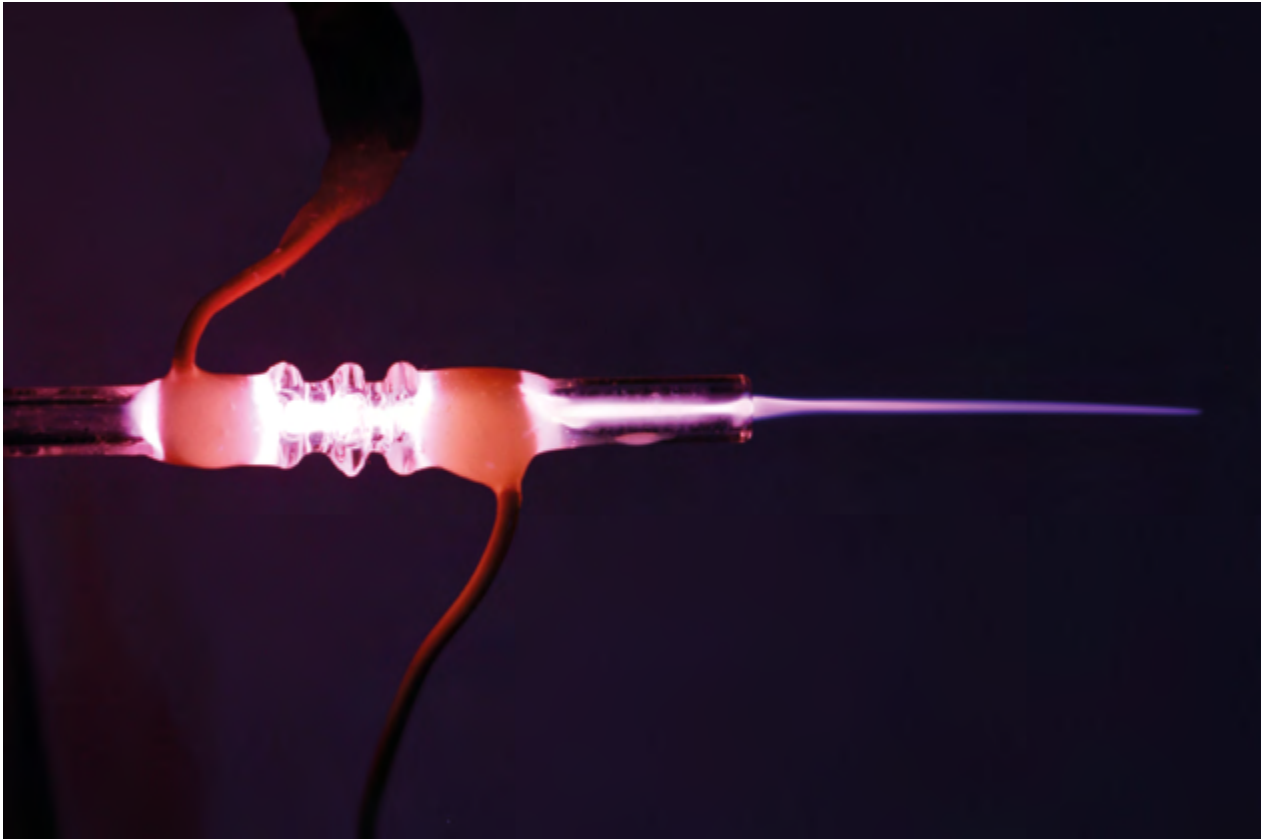
Les plasmas froids sont des gaz partiellement ionisés, constitués d'électrons libres, d'ions (positifs et négatifs) et d'espèces neutres (atomes et molécules), dont certaines chimiquement actives, et qui émettent du rayonnement sur une gamme spectrale allant de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge (IR), provenant de la dés-excitation électronique et ro-vibrationnelle des différentes espèces excitées présentes.

Dans un plasma froid, ce sont les électrons libres qui stockent le plus d'énergie, de sorte que leur température peut atteindre quelques dizaines de milliers de degrés Celsius. Comme leur nombre est très faible et leur masse très inférieure à celle des atomes et des molécules (les neutres, qui représentent la quasi-totalité de la

matière dans les plasmas froids), les électrons transfèrent avec peu d'efficacité leur énergie aux neutres et, par conséquent, ne chauffent pas le gaz. La température du gaz est donc largement inférieure (par au moins deux ordres de grandeur) à celle des électrons ; pour certains plasmas froids, comme ceux utilisés dans le domaine biomédical, cette température peut avoisiner la température ambiante.

Les plasmas froids sont couramment utilisés dans diverses applications industrielles, telles que l'éclairage (ex. tubes fluorescents) et le traitement des matériaux (ex. gravure et dépôt) et des effluents gazeux (ex. purification de l'air). Par ailleurs, des recherches prometteuses laissent entrevoir leur utilisation future dans les domaines de la médecine et de l'agriculture.

Historiquement, la plupart des plasmas froids sont amorcés sous forme de décharges électriques dans un gaz confiné à basse pression. Ainsi, les électrons communiquent leur énergie par collisions avec les atomes et/ou les molécules, donnant naissance à de nouvelles espèces chimiques qu'il serait compliqué d'obtenir à température ambiante par d'autres approches. Depuis le début du XXI^e siècle, les chercheurs ont développé des réacteurs permettant d'obtenir, cette fois à pression atmosphérique, des plasmas froids ayant une température ressentie par les tissus vivants proche de la température corporelle (< 40°C). Cette avancée a permis de faire interagir les plasmas froids avec des tissus vivants sans risque de les brûler, et ainsi d'élargir le spectre d'applications de



© GREMI, Université d'Orléans, CNRS, Claire Douat et Éric Mestre

Jet de plasma froid à pression atmosphérique alimenté en hélium et se propageant dans un environnement d'air.



© GREMI, Université d'Orléans, CNRS

1. Application d'un jet de plasma froid d'hélium sur la peau.

ces plasmas, donnant alors naissance à une nouvelle discipline nommée « médecine au plasma » (en anglais *Plasma Medicine*), qui réunit des physiiciens, des ingénieurs, des chimistes, des biologistes et des médecins. La figure 1 illustre un plasma froid d'hélium traitant une joue. La température ressentie est inférieure à 40°C, ce qui permet au plasma d'interagir avec la peau sans la brûler.

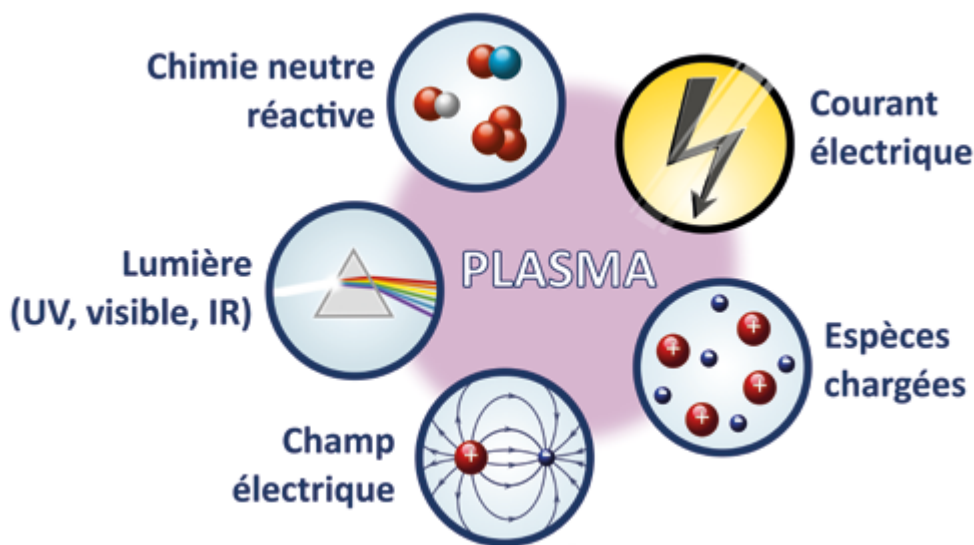
Quels sont les effets des plasmas froids sur le Vivant ?

Les plasmas froids peuvent endommager l'ADN et diverses biomolécules (protéines, lipides), mais aussi inactiver des agents pathogènes y compris ultrarésistants (bactéries, virus, champignons). Ils permettent ainsi de désinfecter et décontaminer

des surfaces biologiques (ex. tissus ou aliments), et même de stériliser des surfaces inorganiques (ex. implants ou outils médicaux), de favoriser la coagulation sanguine et la cicatrisation des plaies, d'initier l'apoptose (mort cellulaire programmée) et de ralentir la croissance tumorale. Cependant, aujourd'hui, même si la médecine au plasma avance à grands pas, l'interaction entre les tissus et le plasma froid est loin d'être totalement comprise.

Actuellement, nous savons que les mécanismes de ces effets biologiques reposent sur deux principes fondamentaux : (i) le plasma modifie l'environnement liquide des cellules et (ii) l'interaction du plasma et de l'air produit des espèces chimiques réactives de l'oxygène et/ou de l'azote qui jouent un rôle clef dans la réponse biologique. Beaucoup de ces espèces

>>>



2. Les différents composants du plasma pouvant interagir avec le Vivant.

>>>

sont naturellement présentes dans le monde vivant et sont des acteurs importants en biochimie. Par exemple, elles interviennent au niveau du système immunitaire des animaux et des plantes, agissent contre les micro-organismes comme les microbes, inhibent la prolifération tumorale, sont générées naturellement en réponse aux blessures et sont des molécules de signalisation clés. On distingue ainsi des espèces à longue durée de vie (supérieure à la minute) comme, par exemple, l'ozone (O_3), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le dioxyde d'azote (NO_2), mais aussi des espèces à courte durée de vie (inférieure à la minute) comme le radical hydroxyle (OH) et le monoxyde d'azote (NO), entre autres.

La chimie générée localement par le plasma est donc riche et réactive, et la combinaison avec les autres composantes du plasma, comme le rayonnement électromagnétique (des ultra-violetts (UV) aux infrarouges (IR), en passant par le visible), le champ électrique, les espèces chargées et le courant électrique (fig. 2), peut induire des effets synergiques, comme nous le verrons dans les exemples abordés dans cet article.

Comment générer un plasma froid pour agir sur le Vivant ?

Actuellement, les deux principales sources de plasma froid utilisées sur le Vivant sont (i) les décharges à barrière diélectrique (DBD) et (ii) les jets de plasma froid. Ces sources sont souvent alimentées par de l'hélium, de l'argon, de l'air ou un mélange de ces trois gaz.

La particularité d'une décharge à barrière diélectrique par rapport à une décharge classique (deux électrodes simples) est la présence d'une ou plusieurs couches diélectriques entre les deux électrodes, permettant ainsi d'éviter le passage d'un courant électrique directement entre les électrodes et, donc, la formation d'un arc électrique (plasma thermique), caractérisé par des températures pouvant atteindre plusieurs milliers de degrés Celsius.

À l'inverse des DBD, les jets de plasma (voir la photo du haut de la page 25) ont l'avantage de générer un plasma froid pouvant aller au-delà de l'espace inter-électrode et s'étendre sur plusieurs centimètres dans l'air ambiant, voire sur plusieurs mètres dans un

capillaire, rendant ainsi possible les traitements endoscopiques. La figure 3 montre des exemples de plasmas froids utilisés en médecine au plasma et développés au laboratoire du Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés (GREMI) et au Laboratoire de physique des gaz et des plasmas (LPGP). Le plasma est initialement généré en amont (non visible sur les photos) d'un tube en verre, et se propage ensuite le long du tube pour finalement sortir dans l'air ambiant. Le canal de gaz, qui est ici de l'hélium, conduit le plasma pour former un jet de plasma froid traitant une tomate (a) ou des cellules cancéreuses (b). À l'œil nu, la couleur du plasma apparaît rose dans le canal en verre, couleur caractéristique de l'hélium, et violette à l'extérieur du tube, ce qui est dû à la présence d'azote provenant de l'air ambiant. Malheureusement, la couleur des plasmas étant très vive, les capteurs CCD (Charge-Coupled Device – Dispositif à transfert de charges) ne sont pas très fidèles à ces couleurs peu présentes dans la vie de tous les jours, et peuvent apparaître bleues au lieu de violettes, comme sur la photo 3b.

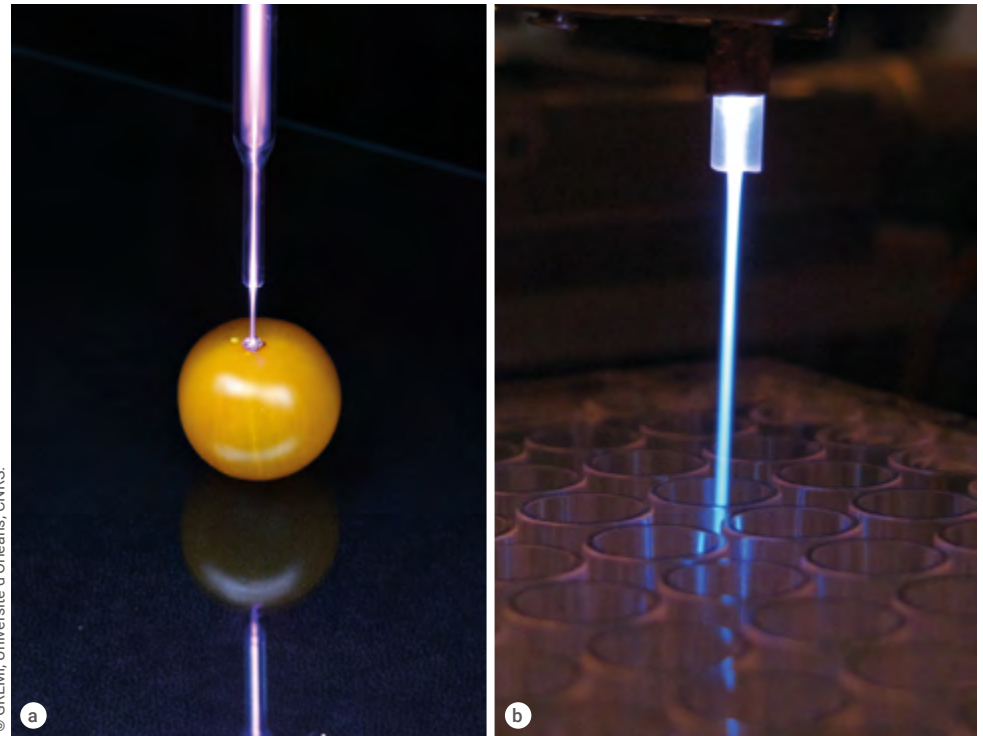
Les matériaux biologiques peuvent être exposés au plasma froid selon deux approches qualifiées de directe et indirecte. Dans le cas d'une exposition directe, où le matériau biologique traité est en contact avec le plasma, un courant électrique circule et toutes les composantes du plasma (fig. 2) interagissent avec le matériau. Dans le cas d'une exposition indirecte, les particules chargées et les espèces à courte durée de vie se recombinent avant d'atteindre le matériau biologique ; seules les espèces à longue durée de vie créées par le plasma atteignent le matériau, par diffusion ou transport en phase gazeuse. Une troisième méthode existe également, et consiste à exposer la cible biologique à un milieu liquide préalablement activé par plasma. Ce milieu est bien souvent de l'eau ou un liquide biologique qui a été exposé au plasma, par exemple durant quelques minutes. Le plasma engendre la production dans le liquide d'espèces réactives à longue durée de vie, telles que du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et des nitrites (NO_2^-). Ces espèces, en réagissant avec le matériau biologique, peuvent ensuite

induire divers effets, notamment la mort cellulaire ou encore la réduction de la charge microbienne, comme nous allons l'expliquer dans la partie suivante.

Le plasma froid, un stérilisateur efficace

En 1857, Werner von Siemens et ses collaborateurs ont utilisé, pour la première fois, un plasma froid pour décontaminer de l'eau. La recherche dans ce domaine s'est ensuite accrue dans les années 1980 : des sources de plasmas froids à basse pression ont ainsi été développées pour inactiver des micro-organismes, en particulier sous forme de lampes UV qui sont encore aujourd'hui couramment utilisées pour stériliser diverses surfaces. D'autres stérilisateur plasmas, fonctionnant à pression réduite, sont également commercialisés comme alternative innovante aux autoclaves et stérilisateur dont l'action repose sur l'utilisation de produits chimiques toxiques. Le plasma froid est capable non seulement d'inactiver des micro-organismes (y compris des agents pathogènes ultrarésistants), des prions ou des virus, mais aussi d'éliminer complètement la matière organique.

Actuellement, aucune résistance des micro-organismes au plasma froid n'a jamais été observée. En effet, l'effet stérilisant du plasma froid résulte de ses divers composants (rayonnement UV, courant électrique, champ électrique, espèces réactives, espèces chargées — cf. figure 2), face auxquelles les stratégies d'adaptation des micro-organismes (notamment la dormance) sont mises en échec. En conséquence, il est hautement improbable que des micro-organismes réussissent à développer une résistance face à tous ces composants et à leur synergie potentielle. Par exemple, la synergie entre les ions et les espèces réactives explique pourquoi les couches externes des spores et des bactéries sont plus facilement érodées, conduisant à une diminution accrue de leur viabilité. La force électrostatique provoquée par l'accumulation de charges sur la surface externe de la membrane cellulaire peut vaincre la force de traction de la membrane et provoquer sa rupture. La cellule n'étant plus protégée de l'environnement extérieur mourra.



3. Jets de plasma froid d'hélium en interaction avec (a) une tomate cerise et (b) un tapis de cellules cancéreuses. Le diamètre des jets est ici d'environ 1 mm, et leur longueur de quelques centimètres.

Les ions et les espèces réactives du gaz plasmagène sont adsorbés à la surface des bactéries et réagissent chimiquement avec les molécules de la membrane cellulaire, formant des composés toxiques et des radicaux secondaires, et perturbant leurs processus métaboliques. Le rayonnement UV dans la gamme de longueur d'onde de 200 à 300 nm est aussi connu pour causer des dommages génétiques mortels aux cellules. Il représente le mécanisme dominant de l'action bactéricide des plasmas froids à basse pression, ce qui est rarement le cas à pression atmosphérique.

L'action anti-pathogène des plasmas froids ne se limite pas qu'au nettoyage de matériel ; cet effet est également recherché pour soigner des pathologies à l'hôpital.

Vers une utilisation en hôpital

Les plaies chroniques et les ulcères cicatrisent très difficilement (typiquement en plus de six semaines) et touchent près de deux millions de personnes en France, notamment celles ayant une mauvaise circulation

sanguine, comme les diabétiques, les personnes en surpoids et les personnes âgées. Les traitements conventionnels pour soigner ce type de plaies reposent sur l'utilisation d'antibiotiques dont l'efficacité devient de moins en moins grande en raison de l'apparition de souches bactériennes résistantes. Si la prolifération de la plaie chronique n'est pas contrôlée, l'amputation du membre devient alors inévitable. Dans ce contexte, les plasmas froids ont alors très vite intéressé les chercheurs et les médecins, car ils représentent une alternative potentielle aux antibiotiques.

En 2012, les premiers essais cliniques par traitement au plasma froid ont été réalisés en Allemagne à Munich. Les scientifiques ont montré que ce traitement était indolore et n'induisait pas d'effets secondaires comme une réaction allergique. De plus, ils ont aussi démontré que la charge bactérienne présente sur la plaie était plus faible après un traitement au plasma froid qu'après un traitement conventionnel. Ces résultats très prometteurs ont alors incité d'autres équipes de recherche à travailler dans ce domaine. Ainsi, une équipe berlinoise a montré

>>>

“ [Les plasmas froids] permettent de désinfecter et décontaminer des surfaces biologiques, et même de stériliser des surfaces organiques, de favoriser la circulation sanguine et la cicatrisation des plaies, d’initier l’apoptose (mort cellulaire programmée) et de ralentir la croissance tumorale.”

>>>

que le plasma froid n’avait pas seulement des propriétés stérilisantes, mais également des propriétés cicatrisantes en accélérant le renouvellement des cellules de peau. Plusieurs centaines de patients atteints de plaies chroniques ont été traités par plasma froid, et aujourd’hui certains hôpitaux allemands comme à Göttingen et à Rostock proposent de soigner ainsi ces plaies.

À la suite de ces résultats prometteurs, des scientifiques ont réalisé en 2015 une étude de cas^(a) sur des patients sévèrement affectés d’un cancer de la tête et du cou. À ce stade du cancer, les patients présentent des ulcères cancéreux très douloureux. Le nid bactérien au niveau des ulcères est très important et dégage une odeur nauséabonde difficilement supportable pour l’entourage du malade. Le

but premier de cette étude a été d’utiliser le plasma froid en traitement palliatif. Malgré des ulcères cancéreux importants, cette étude a montré que le traitement au plasma froid restait indolore, et qu’après plusieurs jours de traitement, la douleur liée à ces ulcères diminuait. De plus, l’odeur nauséabonde due à l’activité des bactéries a fortement diminué, permettant aux patients de retrouver une vie plus décente vis-à-vis de leur entourage. Le plus remarquable est que certains patients ont bénéficié d’une rémission superficielle et partielle de la tumeur accompagnée d’une cicatrisation des ulcérations : un résultat très encourageant pour l’avenir (fig. 4). Par le passé, les plasmas froids ont démontré avoir des effets anti-tumoraux sur des souris [1], mais l’étude décrite ici a été une des premières réalisées sur des humains.

© University Medicine Greifswald (Allemagne).



4. Observation d’une rémission partielle de la tumeur d’un patient atteint d’un cancer du cou.

Source : H.-R. Mettelmann et al., *Clinical Plasma Medicine*, 9 (2018) 6-18. Permission : Elsevier

Pourquoi le plasma froid est-il efficace pour soigner des plaies ?

Actuellement, seules des explications partielles peuvent être fournies. En interagissant avec l’air, le plasma froid forme des espèces réactives de l’azote et de l’oxygène. Parmi ces espèces, le peroxyde d’hydrogène (H_2O_2), l’hydroxyle (OH) et l’ozone (O_3) sont bactéricides et sont probablement l’une des causes principales des effets stérilisants des plasmas froids à pression atmosphérique. Dans certains cas, les UV sont aussi capables de tuer des bactéries. En revanche, les explications relatives à la stimulation de la cicatrisation restent vagues, même si certaines pistes sont envisagées.

Le monoxyde d’azote (NO), généré par le plasma froid lorsqu’il interagit avec l’air, est naturellement présent dans le corps. Ses principales fonctions sont la vasodilatation des vaisseaux sanguins ainsi que la stimulation de l’angiogenèse. Cette dernière correspond à la formation de nouveaux vaisseaux sanguins. L’angiogenèse et la régulation du flux sanguin sont deux paramètres primordiaux de la cicatrisation. Ils permettent d’irriguer la plaie et de lui apporter l’oxygène et les nutriments nécessaires pour la remodeler. La circulation sanguine au niveau d’une plaie chronique est très mauvaise, et il est possible que l’apport de monoxyde d’azote par le plasma froid améliore la circulation du sang, stimulant ainsi la cicatrisation.

Les travaux d’une équipe orléanaise travaillant au GREMI vont dans ce sens. Les chercheurs ont observé qu’après avoir traité des souris par un plasma froid, leur pression partielle et leur flux sanguins augmentent localement d’un facteur deux à quatre. La corrélation entre le monoxyde d’azote et cette augmentation n’a pas été démontrée, mais cette étude pourrait expliquer comment la cicatrisation serait améliorée avec un traitement au plasma froid.

En dermatologie, les plasmas froids sont également étudiés pour traiter des maladies cutanées comme l’acné et la rosacée. Les chercheurs tentent aussi de l’utiliser en odontologie pour traiter des caries ou des abcès, et en ophtalmologie pour stériliser la cornée lors d’opérations. De par leur flexibilité



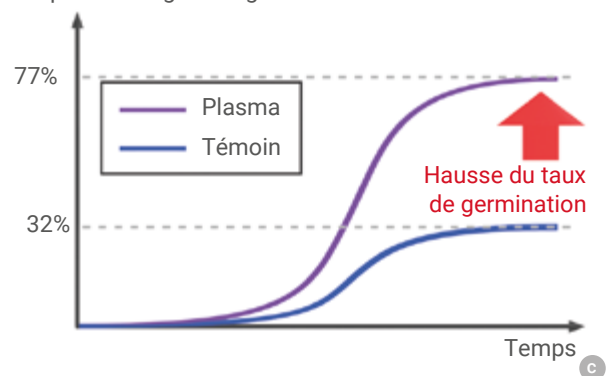
5. Influence de l'exposition à un plasma froid sur la germination de graines de lentilles.

- (a) Semences de lentilles placées dans un dispositif à barrière diélectrique sans plasma.
 (b) Semences de lentilles placées dans un dispositif à barrière diélectrique avec plasma froid d'hélium en écoulement.
 À ce stade, il n'est pas encore possible de faire la différence.
 (c) Courbes de germination des semences non traitées (témoin) et traitées au plasma froid.

et leurs résultats prometteurs, les plasmas froids sont également étudiés en cosmétique. Par exemple, l'oxydation temporaire induite par plasma améliore la perméabilité de la peau, facilitant ainsi la pénétration de certaines molécules actives. Un autre exemple concerne la lutte contre le vieillissement de la peau. Les kératinocytes constituent la majorité des cellules se trouvant dans l'épiderme (couche superficielle de la peau) et ont un cycle de régénération de 28 jours. Un allongement de ce cycle entraîne une accumulation des cellules plus anciennes, et induit un vieillissement de la peau. Grâce à son potentiel régénérateur, le plasma froid serait alors capable de lutter contre le vieillissement en stimulant les cellules à se renouveler plus rapidement.

Les études ont également montré qu'un milieu liquide exposé au plasma froid voit son pH diminuer (acidification). Il s'agit d'une tendance tout à fait avantageuse pour lutter contre le stress induit par des facteurs extérieurs (soleil, tabac et pollution), car ces derniers modifient le pH de la peau et altèrent le bon fonctionnement des cellules. Comme le pH naturel de la peau est acide (entre 4 et 6), le plasma froid permettrait de le rééquilibrer lors d'un stress.

Proportion de graines germées



Enfin, il a aussi été montré qu'utiliser un plasma froid pouvait être une alternative intéressante pour blanchir les dents.

Les applications ne manquent pas, et aujourd'hui ce domaine s'est également ouvert à l'ensemble des applications biologiques, et plus particulièrement à l'agriculture.

Faire pousser des plantes par plasma froid

Les fondements de la civilisation reposent sur l'agriculture, qui reste importante aujourd'hui comme à ses débuts il y a dix millénaires. Même si au cours des deux derniers siècles la mécanisation lourde et l'utilisation intensive de produits phytosanitaires ont révolutionné la productivité des denrées agricoles, ces paradigmes apparaissent de plus en plus limités dans une perspective de développement durable. Plusieurs enjeux restent en suspens : comment nourrir une population mondiale qui est en constante augmentation ? Comment

cultiver des semences et des plantes par des procédés qui ne polluent ni les sols ni les nappes phréatiques ? Comment l'agriculture peut-elle évoluer dans un contexte marqué par le réchauffement climatique ? Autant de questions auxquelles aucune technologie seule n'apporte à ce jour de réponse absolue. D'où la nécessité de recourir à diverses approches technologiques, qu'elles soient ancestrales ou innovantes, pour peu qu'elles épousent la diversité et les spécificités des paysages de notre planète. Dans ce contexte, l'utilisation des plasmas froids en agriculture permet de se positionner en complément ou synergie avec d'autres approches comme la permaculture, la sylviculture et l'hydroponie. Les plasmas froids peuvent être utilisés d'une part pour agir sur les propriétés germinatives des semences, sur leur résistance aux attaques d'agents pathogènes, mais aussi sur les propriétés de croissance de la plantule et de la plante, ainsi que sur la qualité nutritive et la sécurité alimentaire des produits finis issus de l'agriculture.

>>>



Plant de référence
Eau du robinet
(60 j)

Témoin

Eau activée par plasma (9 j)
Eau du robinet
(51 j)

Traitement A

Traitement des graines
par plasma (10 min)
Eau activée par plasma (9 j)
Eau du robinet (51 j)

Traitement B

6. Croissance d'un plant de poivron après 60 jours d'arrosage quotidien.

À gauche, le plant arrosé avec de l'eau du robinet ; au centre, le plant a été arrosé avec de l'eau activée par plasma froid ; et, à droite, mêmes conditions qu'au centre, mais où la graine a été en plus traitée au plasma froid. Source : L. Swachandiran et A. Khacef, *RSC Adv.* 7 (2017) 1822-1832. Permission : Royal Society of Chemistry.

>>>

La dormance et la vigueur comptent parmi les plus importantes propriétés germinatives. La dormance est une forme de vie ralentie empruntée par des semences pour minimiser les risques liés à un environnement hostile. Ainsi des graines d'*Arabidopsis Thaliana* (ayant une teneur en eau de 30%) peuvent voir leurs taux de germination passer de 25% à 70% après un simple traitement au plasma froid de dix minutes. Le plasma permet également d'agir sur la vigueur : une propriété biologique mesurable à partir de la durée correspondant à 50% de semences germées. Ainsi, comme illustré dans la figure 5, des graines de lentilles exposées pendant vingt minutes à un plasma froid d'hélium voient ensuite leur temps de germination médian passer de 32 à 23 heures. Améliorer la dormance et la vigueur constituent, entre autres, des enjeux agro-économiques considérables puisqu'elles impactent directement les coûts de production à travers les rendements agricoles et le coût de la main d'œuvre. Un des principaux effets du plasma

froid sur la semence est celui de pouvoir modifier ses propriétés de surface : le plasma peut ainsi hydrophiliser le tégument des semences et contribuer à une meilleure imbibition hydrique.

La question de l'arrosage des graines semées dans la terre et de la gestion des stress environnementaux (biotiques et abiotiques) comporte de nouveaux enjeux. Là encore, les plasmas froids se sont révélés être des outils précieux, non pas pour traiter directement les semences mais pour modifier la composition chimique de l'eau destinée à les arroser. Cette approche consiste à enrichir l'eau en espèces réactives — notamment en nitrates (NO_3), nitrites (NO_2), peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et ammonium (NH_4) — capables de favoriser la croissance des plantules et des plantes, tout en préservant la qualité des sols, en particulier les propriétés structurales et fonctionnelles du microbiote. Ainsi, des chercheurs ont montré la possibilité d'augmenter d'un facteur deux la croissance de plants de poivrons au bout de 60 jours (fig. 6). Outre ces effets accélérant la croissance, des études ont également souligné le rôle bénéfique de ces espèces réactives dans la résistance accrue des plantules à divers agents pathogènes, qu'il

s'agisse de bactéries, de champignons ou de pucerons. À ce jour, les chercheurs tentent de lever deux verrous technologiques : comment activer par plasma froid de grands volumes d'eau pour satisfaire par exemple les besoins de serres potagères, et comment s'y employer pour que la technologie plasma ait un coût énergétique — et donc une empreinte carbone — aussi faible que possible.

Une fois les fruits, légumes, céréales, graines, pousses et autres produits de la terre récoltés, il convient de préserver leur valeur nutritive et d'assurer leur qualité sanitaire sur une durée suffisamment longue avant consommation. Là encore, les plasmas froids peuvent être utilisés pour jouer un rôle stérilisant, avec toutefois les contraintes de ne pas accélérer l'oxydation des lipides, de ne pas réduire leurs teneurs en vitamines et d'éviter la perte des caractéristiques sensorielles. À titre d'exemple, le traitement au plasma froid de fraises placées sous emballage permet de diviser d'un facteur 100 la microflore de fond (bactéries mésophiles aérobies, levures et moisissures), sans altérer le taux de respiration, la texture et la couleur de ces fruits. La littérature fait état de nombreux autres exemples (tomates, mandarines, kiwis...), preuve s'il en faut de l'extraordinaire potentiel des plasmas froids à satisfaire nos exigences en matière de sécurité alimentaire.

Conclusion

Les plasmas froids constituent une approche technologique innovante pour répondre à l'extraordinaire diversité des problématiques soulevées par les sciences de la vie, qu'il s'agisse d'applications médicales ou environnementales, de santé publique ou de pathologies individuelles. Les traitements au plasma froid ont ainsi offert des preuves de concept solides et des traitements couronnés de succès là où des approches conventionnelles restaient limitées, voire mises en échec. La science des plasmas froids est la promesse de recherches intensives et d'innovations majeures qui jaloneront le XXI^e siècle. ■

(a) Une étude de cas est une étude comprenant une dizaine de personnes. Les études de cas précèdent bien souvent un essai clinique.



1• J.-M. Pouvesle et É. Robert, « Applications thérapeutiques des plasmas froids atmosphériques », *Reflète de la physique* 33, (2013) 17-22.