

La sonoélectrochimie

À la fois outil d'investigation et d'accélération des procédés

Jean-Yves Hihn, Marie-Laure Doche, Loïc Hallez et Abdeslam Et Taouil

Résumé L'utilisation des ultrasons de puissance sur des surfaces a montré des effets bénéfiques sur les procédés dans de très nombreux cas, qu'il s'agisse du nettoyage ou de manière plus complexe des propriétés fonctionnelles des revêtements métalliques ou organiques. Cependant, le passage à une échelle industrielle se heurte à de nombreux problèmes, notamment dans le dimensionnement des unités de production. Pour pallier cette difficulté, l'utilisation de procédés électrochimiques comme capteurs de l'activité ultrasonore locale a permis la collecte d'un grand nombre d'informations quantitatives sur les réacteurs qui ont permis une meilleure intégration de la technologie ultrasonore dans les procédés. Avec en plus de nouveaux transducteurs permettant la focalisation de l'onde et de nouvelles avancées dans la modulation des signaux d'excitation, la voie de l'industrialisation est grande ouverte.

Mots-clés Sonoélectrochimie, revêtements métalliques, revêtements organiques, sonoréacteurs.

Abstract **Sonoelectrochemistry: a both investigative and acceleration process tool**

Surface irradiation by power ultrasound had proven beneficial effects, concerning cleaning but also the modification of functional properties of metallic or organic coatings. Nevertheless the scale-up results are failing to match up to initial expectations, in particular in the industrial unit designs. To counterbalance this problem, the use of electrochemical systems as a sensor of the ultrasonic activity in a given location allows collecting numerous quantitative information upon the sonoreactors, leading to a better control. With in addition new transducers allowing a focalisation of the wave and new progress in the modulation of transducer excitation, the path to industrialisation is wide open.

Keywords **Sonoelectrochemistry, metallic coatings, organic coatings, sonoreactors.**

L'un des moteurs actuels de la recherche et du développement dans le domaine de l'élaboration de revêtements métalliques est la pression réglementaire et environnementale qui augmente les contraintes d'exploitation, voire interdit l'utilisation de substances toxiques (règlement européen REACH). En plus d'agir sur la formulation des bains en intervenant dans leur composition chimique, un grand espoir repose sur des procédés spécialisés et novateurs, comme les ultrasons de puissance ou les courants pulsés, qui peuvent permettre de limiter les additifs organiques.

L'utilisation des ultrasons de puissance appliqués à une surface est très répandue dans le cadre du nettoyage. Il est en effet très fréquent de rencontrer des dispositifs ultrasonores dans la préparation de surface, pour l'étape de nettoyage ou de dégraissage. Ils peuvent avantageusement remplacer les procédés de dégraissage électrochimique en évitant les problèmes dus au relargage d'hydrogène. Le principe du nettoyage par ultrasons ne peut pas être plus simple : des transducteurs vibrant entre 20 à 400 kHz sont fixés sur un bac de nettoyage allant jusqu'à plusieurs centaines de litres, et la propagation de l'onde ultrasonore va agiter la solution de nettoyage. En plus du flux convectif généré par l'absorption de l'onde dans le liquide, un phénomène de cavitation lié aux variations locales de pression va agir sur les contaminants adhérant aux métaux, aux plastiques, aux verres, etc. Des millions de très fines bulles (1 à 100 μm), parfaitement distribuées, vont grossir puis imploser violemment,

pénétrant ainsi dans chaque orifice des pièces devant être nettoyées, détachant les salissures en quelques secondes.

Un outil pour accélérer l'élaboration des revêtements

Il est tout naturel d'étendre ce procédé à l'élaboration du revêtement proprement dit, car l'apport des ultrasons est mis en évidence sur toutes les étapes d'une réaction électrochimique. La plus évidente bien sûr est l'augmentation du transfert de matière, du fait de l'agitation par la convection et l'implosion des bulles de cavitation. Lorsque l'implosion de celle-ci se produit à proximité immédiate d'une paroi, soit cette dernière est impactée par l'onde de choc et subit des effets mécaniques importants, soit elle induit une déformation de l'implosion qui devient asymétrique [1]. Il faut également remarquer que l'étape de transfert électronique peut largement être affectée par les ultrasons qui agissent continuellement sur la surface, empêchant par exemple la formation d'un dépôt parasite qui gênerait la réaction que l'on cherche à privilégier. Enfin, la multiplication des implosions de bulles de cavitation à la surface sont autant de sites de nucléation qui agissent directement sur les mécanismes de germination et conditionnent l'ensemble de la croissance des dépôts. On note ainsi que les dépôts sont plus fins, les structures sont nettement modifiées et la croissance va se faire selon des plans privilégiés.

Des travaux de laboratoire déjà anciens ont démontré l'intérêt d'une irradiation ultrasonore pour la réalisation de revêtements [2]. Plusieurs auteurs comme Walker *et coll.* [3] ont été les premiers à reporter les effets bénéfiques d'une irradiation ultrasonore pour la déposition métallique. Ils remarquent que plusieurs propriétés se montrent très sensibles, comme la dureté et la brillance. Les films montrent une meilleure adhésion au substrat, des grains plus fins, une porosité et des contraintes internes réduites [4]. De plus, et cette amélioration est importante du point de vue industriel, des dépôts de bonne qualité peuvent être obtenus à des densités de courant deux fois plus grandes, ce qui conduit à une réduction significative du temps nécessaire à l'obtention d'une épaisseur donnée.

L'utilisation des ultrasons a été étendue au domaine des dépôts chimiques sur des substrats non conducteurs, comme le dépôt de cuivre sur des résines époxy en présence d'ultrasons à hautes fréquences [2]. Il a été démontré que les ultrasons augmentent considérablement la vitesse de déposition, mais également l'adhésion (jusqu'à 4 N, soit une augmentation de 40 %) alors que les contraintes internes diminuent de manière notable (moins 50 %) !

L'étude de la corrosion sous ultrasons est encore plus ancienne, avec pour objectif initial de simuler le phénomène synergique de corrosion-cavitation classiquement rencontré sur les dispositifs industriels de circulation de fluide (parois des tubes, aubes de turbine, pompe...) ou sur les hélices des bateaux [5]. Les différents travaux ont ainsi permis d'aboutir à la formalisation d'une norme [6] permettant d'anticiper la tenue à la corrosion-cavitation des métaux. Cette norme préconise l'utilisation d'un transducteur basse fréquence (20 kHz) pour générer une intense cavitation à proximité de l'échantillon ($0 \text{ cm} < \text{distance échantillon-source} < 1 \text{ cm}$). La variété des supports étudiés dans le cadre de ces études (alliages cuivreux, aluminium, acier inoxydable...) démontre que les ultrasons permettent d'accélérer à peu près toute les formes de corrosion.

Un besoin de caractérisation...

Cependant, malgré ces très bons résultats qui ont suscité un fort engouement de la communauté scientifique dans le milieu des années 1990, plusieurs échecs lors du passage à l'échelle industrielle ont mis en évidence le manque de connaissances fondamentales et le besoin de données concernant les opérations utilisant des ultrasons de puissance. Comme l'intensité de la production des bulles de cavitation modifie considérablement la propagation et l'absorption des ondes ultrasonores, les non-linéarités qui apparaissent ne permettent pas l'utilisation de lois mécaniques simples.

Il est alors possible d'utiliser l'électrochimie pour l'étude des phénomènes entraînés localement dans un sonoréacteur à la surface d'une électrode : de processus accéléré par les ultrasons, l'électrochimie devient un outil d'investigation au service de la caractérisation de l'énergie dispersée à proximité immédiate de la paroi. Le comportement de couples réversibles rapides comme $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ présente un intérêt particulier pour la mise en œuvre de la méthode électrodiffusionnelle qui consiste à mesurer des courants limites lors d'une voltampérométrie linéaire avec une espèce électroactive faiblement concentrée en solution. Cela s'est révélé efficace dans une première approche, notamment pour confirmer la distribution et la quantification des zones actives au sein des réacteurs [1]. En déplaçant une électrode dans

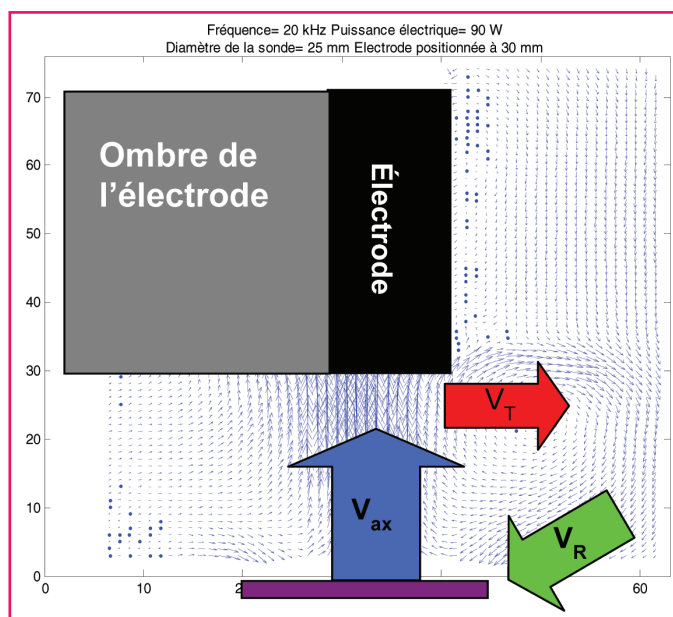


Figure 1 - Exemple de mesure de vecteur vitesse d'écoulement dans un sonoréacteur à proximité d'une électrode.

V_R : vitesse moyenne de recirculation ; V_T : vitesse moyenne pour le flux tangentiel ; V_{ax} : vitesse moyenne pour le flux axial.

le champ ultrasonore, nous pouvons cartographier l'activité acoustique en différents points.

Les plus récents travaux nous ont conduits à explorer la zone la plus proche du transducteur, siège de la plus grande activité. Pour garantir la plus grande portabilité des résultats (comparaison des résultats entre différents équipements, différents laboratoires ou situations), nous avons choisi d'exprimer les mesures électrochimiques en une vitesse équivalente qui serait celle d'un écoulement normal à l'électrode permettant d'atteindre le même signal électrochimique [1]. Nous obtenons ainsi pour chaque point de mesure une grandeur qui a la dimension et le sens physique d'une vitesse et dont la valeur est caractéristique de l'agitation ultrasonore. Il est alors possible de comparer les résultats obtenus avec la vitesse réelle de l'écoulement en un point, grâce à la technique PIV (« particle image velocimetry » : mesure par caméra haute vitesse du déplacement d'un traceur dans une nappe 2D de lumière obtenue par laser).

La comparaison systématique permet de séparer les contributions respectives de la cavitation à la surface de l'électrode et des courants de convection appelés vent ultrasonore (figure 1) [1]. On constate ainsi que les ordres de grandeur des déplacements réels sont, à 20 kHz, près de dix fois moins importants que pour la vitesse équivalente : la contribution majoritaire à l'agitation sur une surface exposée aux ultrasons est à près de 90 % l'implosion des bulles de cavitation (onde de choc comme microjets). Une collecte systématique des mesures expérimentales (tomographie laser, PIV, mesures électrochimiques) a été rassemblée dans un modèle phénoménologique et il est possible de les intégrer dans des corrélations reliant les nombres adimensionnels de type Sherwood (représentatif de l'agitation) à des nombres de Reynolds (représentatif de l'écoulement) et des nombres de Schmidt (représentatif de la solution) [1] (voir encadré p. 38).

Ce besoin de caractérisation a été étendu à des solvants non conventionnels qui sont les liquides ioniques à température ambiante, généralement appelés RTIL (« room

Nombres de Sherwood, de Reynolds et de Schmidt

Sherwood :

$$Sh = \frac{k_d \cdot d_h}{D_0}$$

avec k_d , coefficient de transfert de matière, d_h , longueur caractéristique, et D_0 , coefficient de diffusion de l'espèce examinée.

Reynolds :

$$Re = \frac{U \cdot r}{\nu}$$

avec U , vitesse du fluide, r , rayon de l'électrode, et ν , viscosité cinématique du fluide.

Schmidt :

$$Sc = \frac{\nu}{D_0}$$

avec la corrélation suivante fréquemment rencontrée : $Sh = 0,5 Re^{0,4} \cdot Sc^{1/3}$

temperature ionic liquids »). Ils présentent des propriétés physico-chimiques particulièrement intéressantes pour de nombreuses applications en électrochimie (séparation des actinides, électrodéposition de métaux... [7]), mais leurs viscosités élevées ainsi que leur hygroscopicité restent un frein à leur développement. L'utilisation d'ultrasons de puissance peut contribuer à la résolution de ces différents problèmes. Pour cela, nous avons caractérisé puis étudié le comportement de couples redox adaptés aux solutions dans un micro-réacteur sonoélectrochimique spécialement conçu [8], avec la possibilité d'appliquer une surpression au fluide caloporteur (*figure 2*). Des essais ont été menés afin de mettre en évidence l'influence de la nature du liquide. Il apparaît que la densité de courant limite diminue selon l'ordre : CH_3CN , eau,

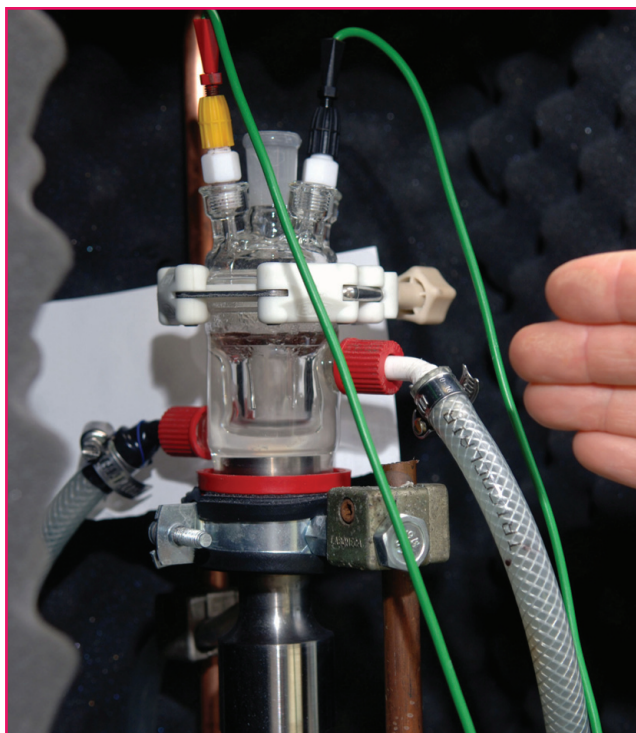


Figure 2 - Réacteur sonochimique double enveloppe pour électrochimie en milieu liquide ionique. © Georges Pannetton/ Université de Franche-Comté.

[Bmim] $[\text{Tf}_2\text{N}]$. Ce résultat est en parfait accord avec la variation observée du coefficient de diffusion de l'espèce électroactive considérée.

Cependant, en regroupant les mesures caractéristiques de l'agitation à l'électrode dans un critère adimensionnel de Sherwood, on observe un comportement hydrodynamique singulier du 1-butyl-3-méthylimidazolium bis(trifluorométhanesulfonyl)imides [Bmim] $[\text{Tf}_2\text{N}]$. Il apparaît en effet qu'à intensité transmise égale, l'agitation ultrasonore est beaucoup plus efficace pour le liquide ionique que pour l'eau et l'acétonitrile. Ce comportement hydrodynamique singulier a permis de mettre en évidence une interaction onde/liquide différente pour plusieurs liquides ioniques. En comparant une agitation par électrode tournante à 5 000 rpm à une densité de puissance ultrasonore de $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, il a été possible de distinguer des transferts de matière jusqu'à huit fois plus élevés lorsque les ultrasons sont le moyen d'agitation [9] !

Applications

Ce bond en avant dans la maîtrise des conditions ultrasonores a été décisif pour les applications et l'équipe a pu alors utiliser ses sonoréacteurs dans des domaines variés.

La prise en compte des écoulements et l'utilisation d'une vitesse équivalente tangentielle a été déterminante pour l'aide à la conception d'outils de nettoyage de coques de bateaux (société Navy Clean [10-11]). L'intense activité des ultrasons sur les surfaces peut être mise à profit lors de tests accélérés pour obtenir une réponse rapide à la tenue à la corrosion tout en étant conforme au mécanisme réactionnel, pouvant être extrapolée aux conditions réelles. Cela a été appliqué à des aciers zingués avec des électrolytes reproduisant les conditions de corrosion atmosphérique ou encore sur l'acier inoxydable [12]. Par exemple, la vitesse de corrosion généralisée du zinc en milieu Na_2SO_4 0,5 M est directement proportionnelle à la distribution de l'hydrodynamique dans le réacteur (*figure 3*) [13]. Cette dernière présente des maxima d'agitation dont la position dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore et de la distance entre l'électrode (qui agit comme un réflecteur d'ondes ultrasonores) et la source, dans une configuration en vis-à-vis. La position idéale pour accélérer la corrosion uniforme, sans modifier le mécanisme de corrosion par une trop forte érosion, se situe à une distance échantillon-source proportionnelle au quart de la longueur d'onde (ici la vitesse de propagation de l'onde acoustique/fréquence d'excitation = 1,87 cm dans l'eau à 20 kHz). En jouant sur la fréquence et l'amplitude du signal, il devient donc possible de moduler l'intensité de la corrosion. Dans le même temps, d'autres auteurs ont montré que des pulses d'ultrasons peuvent induire un effet d'interrupteur (switch on/switch off) correspondant à des phases de dépassivation/repassivation de l'acier inoxydable 304 L dans l'acide nitrique enrichi en chlorures [14]. Enfin, les ultrasons contribuent aussi à une accélération de la croissance des piqûres générées en milieu halogénure [14].

L'utilisation en mode anodique est très rare pour les métaux, mais de nombreux travaux se développent aujourd'hui dans des procédés d'électropolymérisation [15]. L'implosion des bulles de cavitation semble être à l'origine d'une répartition plus homogène et mieux distribuée des centres de croissance du film à la surface, comme une meilleure solubilisation des monomères sous ultrasons [15]. Ainsi, un revêtement possédant une topographie plus fine et plus homogène est obtenu grâce à l'irradiation ultrasonore

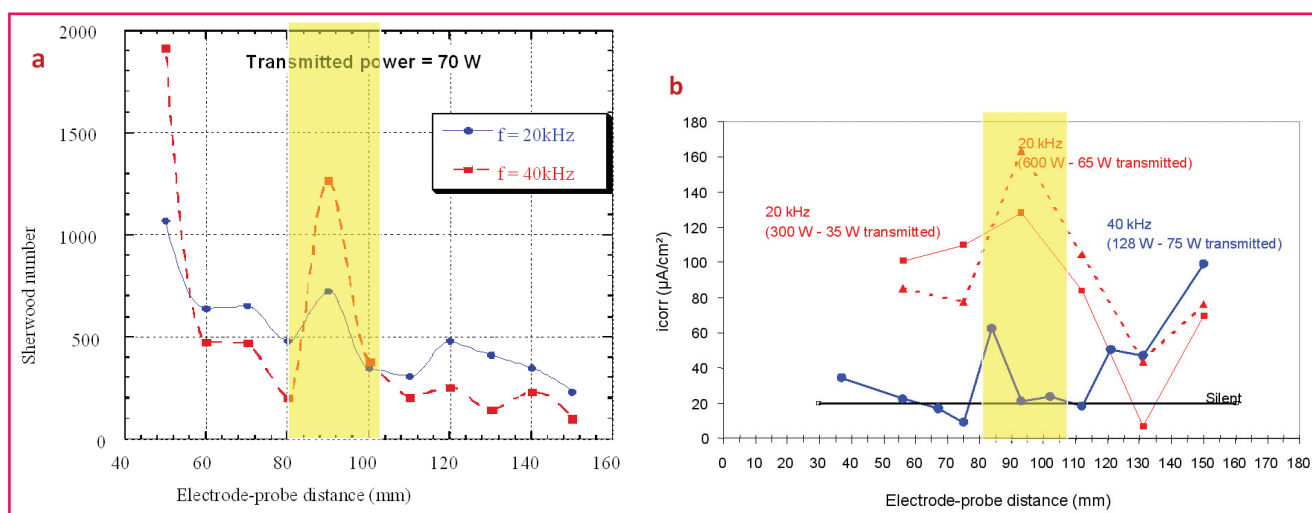


Figure 3 - a) Variation du transfert de matière dans une cellule de corrosion soumise à une irradiation ultrasonore de 20 et 40 kHz pour des distances électrode-source variables. b) Vitesse de corrosion de plaques de zinc mesurées dans la même configuration géométrique. Reproduit avec permission de [13]. © 2003 Elsevier.

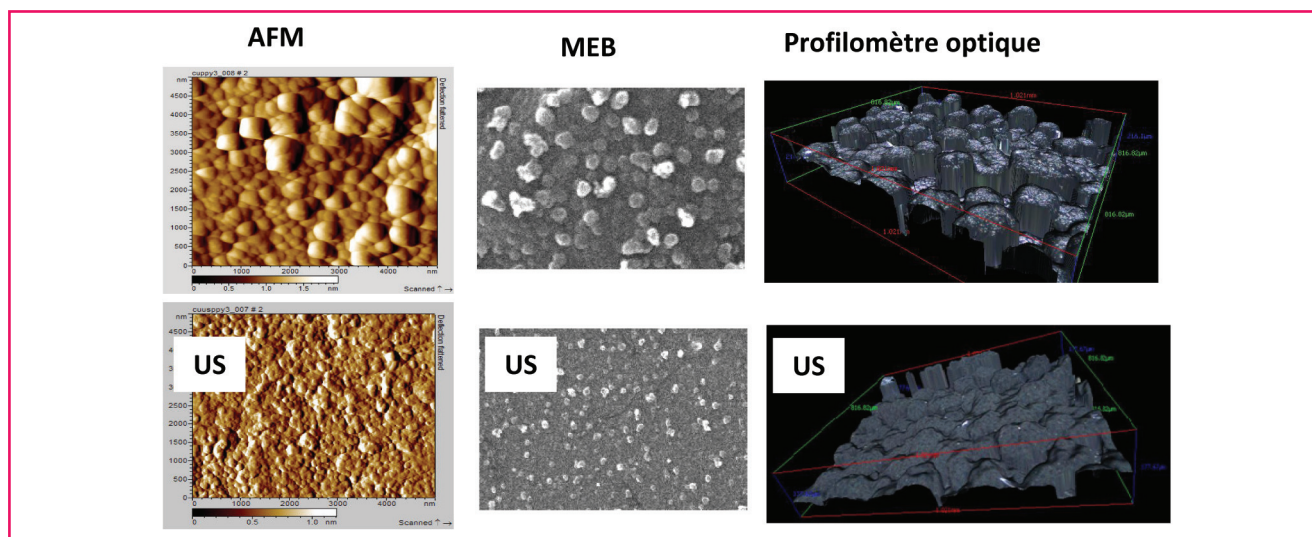


Figure 4 - Caractérisation de la morphologie de surface par AFM, MEB et microscopie optique de films polymères conducteurs élaborés en conditions silencieuses et sous ultrasons haute fréquence.

(figure 4). Ce contrôle offre un grand nombre de possibilités d'applications, notamment dans le domaine des capteurs et des revêtements anticorrosion où la morphologie de surface joue un rôle primordial [15]. La compacité est aussi fortement influencée par l'utilisation des ultrasons. En effet, une texture beaucoup plus compacte pour les films irradiés a été également mise en évidence par une mobilité des ions réduite au sein des films et la possibilité de piloter, grâce aux ultrasons, les mouvements des espèces chargées au sein de la matrice organique. Il faut noter que la conductivité électrique des revêtements organiques est légèrement réduite sous ultrasons, du fait de la dégradation partielle des chaînes polymères, suite aux grandes quantités d'énergie libérées lors de l'implosion des bulles de cavitation [15]. On passe par exemple pour le polypyrrole dopé au perchlorate d'une conductivité de $0,3 \times 10^4$ à $0,2 \times 10^4$ S/m. Encore une fois, la modification sélective de surface, c'est-à-dire d'une zone strictement délimitée, a montré tout son intérêt. Ce type de challenge est possible grâce aux transducteurs HIFU (« high intensity focused ultrasound »), qui possèdent une surface émettrice concave permettant la focalisation de l'onde acoustique haute fréquence sur une zone de quelque mm^3

[16]. L'intensité acoustique générée par ce type de technologie peut atteindre plusieurs kW/cm^2 et la vitesse du fluide peut atteindre 10 cm/s à la focale, ce qui a permis de développer des applications thérapeutiques comme par exemple le traitement de certains cancers par hyperthermie.

En vue de leur intégration dans les procédés de traitement de surface par voie humide, nous avons dû adapter les transducteurs dédiés initialement au domaine médical (fréquence, robustesse, résistance chimique, étanchéité...) (figure 5). Ces études ont été menées en lien avec des utilisateurs et le fabricant (société IMASONIC de Besançon). Ces dispositifs ont été caractérisés avec tous les moyens d'investigation mis au point pour les transducteurs plans et ces études ont montré qu'il existe deux types d'effet en surface qui dépendent essentiellement des propriétés acoustiques des matériaux irradiés (impédance et coefficient d'absorption). Dans le cas d'une surface possédant une impédance acoustique proche de celle de l'eau, typiquement les matériaux polymères, l'énergie acoustique impacte la surface avant d'être convertie en chaleur par frottement visqueux. Au contraire, pour une surface réfléchissante (impédance différente du fluide de couplage : métaux et céramiques), une onde stationnaire est

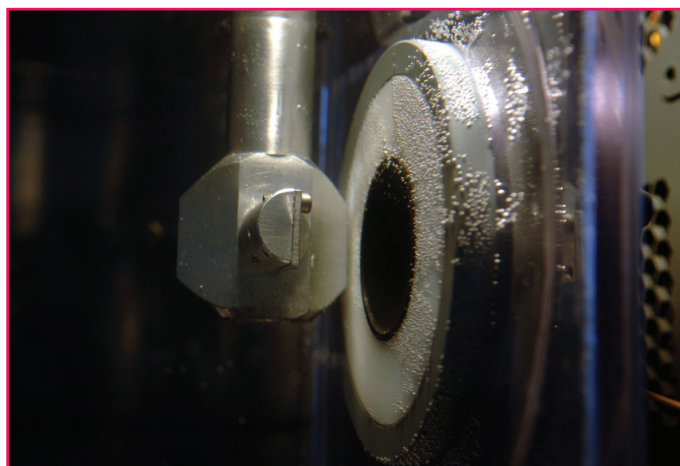


Figure 5 - Irradiation d'une cible métallique par un HIFU. Le diamètre du transducteur (en noir) est de 40 mm. © Georges Pannetton/Université de Franche-Comté.

établie au voisinage de la surface irradiée et donne naissance à un cluster de bulles de cavitation qui érodent la surface en implosant sur une zone localisée (quelques mm²).

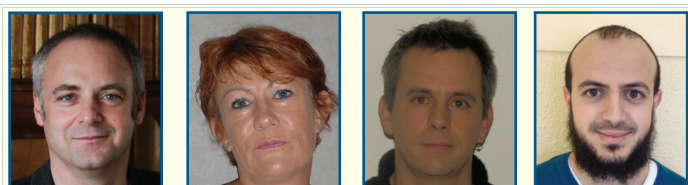
En optimisant tous ces paramètres, nous avons mis au point en collaboration avec la société C&K Components un procédé d'ablation d'une résine de masquage par irradiation HIFU sur des bandes destinées à l'industrie de la micro-connectique [17] en vue d'un dépôt sélectif. La résine déposée sur des connecteurs en défilement continu est fondue et expulsée en quelques millisecondes sur la zone choisie. La bande recouverte de résine partiellement ablatée va subir un revêtement électrolytique de métaux précieux qui va se déposer sélectivement sur les zones dénudées par le HIFU. La résine peut ensuite être éliminée ou laissée sur la bande.

Ce besoin de contrôler la cavitation, c'est-à-dire d'amplifier ou de totalement étouffer le phénomène de cavitation, nous a conduits à nous intéresser à la modulation en fréquence des ultrasons [18]. Ce phénomène utilise la capacité des bulles à osciller en résonance avec l'onde acoustique : pour un balayage en fréquence positif (vers les hautes fréquences), les bulles deviennent trop grosses pour résonner en phase avec l'onde et se dissolvent, et pour un balayage négatif, un nombre plus important de bulles peut être activé en fonction du taux de balayage. Cela ouvre la porte à de nouveaux champs d'exploration, en étant capable, pour un équipement et une puissance donnés, de contrôler avec efficacité l'activité acoustique dans une très large amplitude.

Références

- [1] Hihn J.-Y., Doche M.-L., Mandroyan A., Hallez L., Pollet B.G., Chap. 23 "Ultrasound and better reactor design", in *Handbook on Applications of Ultrasound: Sonochemistry for Sustainability*, CRC Press, Taylor & Francis, **2011**, p. 599-622.
- [2] Hihn J.-Y., Touyeras F., Doche M.-L., Mandroyan A., Costa C., Pollet B.G., Chap. 6 "Sono-electrodeposition: use of ultrasound in metallic coating elaboration", in *Power Ultrasound in Electrochemistry: From Versatile Tool to Engineering Solution*, John Wiley & Sons, **2012**, p. 169-214.
- [3] Walker C.T., Walker R., Effect of ultrasonic agitation on some properties of electrodeposits, *Electrodepos. Surface Treat.*, **1973**, 1, p. 457.
- [4] Prasad R., Vasudevan P., Seshadri S.K., Ultrasonic agitation during electrodeposition, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **1993**, 46(4), p. 247.

- [5] Steller J., International cavitation: erosion test and quantitative assessment of material resistance to cavitation, *Wear*, **1999**, 51-64, p. 233.
- [6] Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM G32-10, www.astm.org.
- [7] Endres F., Schweizer A., The electrodeposition of copper on Au(111) and on HOPG from the 66/34 mol% aluminium chloride/1-butyl-3-methylimidazolium chloride room temperature molten salt: an EC-STM study, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2000**, 2, p. 5455.
- [8] Costa C., Hihn J.-Y., Rebetez M., Doche M.-L., Bisel I., Moisy P., Transport limited current and microsonoreactor characterization at 3 low frequencies in presence of water, acetonitrile and imidazolium based ionic liquids ([BuMim][CF₃SO₂]₂N), *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2008**, 10, p. 2149.
- [9] Costa C., Doche M.-L., Hihn J.-Y., Bisel I., Moisy P., Lévêque J.-M., Hydrodynamic sono-voltammetry of ferrocene in [Tf₂N]-based ionic liquid media, *Ultrasonics*, **2010**, 50(2), p. 323.
- [10] Mazue G., Viennet R., Hihn J.-Y., Carpentier L., Devidal P., Albaïna I., Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz), *Ultrason. Sonochem.*, **2011**, 18(4), p. 895.
- [11] Mazue G., Viennet R., Hihn J.-Y., Bonnet D., Barthes M., Bailly Y., Albaïna I., Influence of a perpendicular liquid flow on a cleaning process using 20 kHz ultrasound: characterization of the agitation at vicinity of the surface opposite to the transducer, *Can. J. Chem. Eng.*, **2015**, 93(2), p. 201.
- [12] Doche M.-L., Hihn J.-Y., Chap. 7 "Influence of ultrasound on corrosion kinetics and its application to corrosion tests", in *Power Ultrasound in Electrochemistry: From Versatile Tool to Engineering Solution*, John Wiley & Sons, **2012**, p. 215-247.
- [13] Doche M.-L., Hihn J.-Y., Mandroyan A., Viennet R., Touyeras F., Influence of ultrasound power and frequency upon corrosion kinetics of zinc in saline media, *Ultrason. Sonochem.*, **2003**, 10, p. 357.
- [14] Whillock G.O.H., Harvey B.F., Preliminary investigation on the ultrasonically enhanced corrosion of stainless steel in the nitric acid/chloride system, *Ultrason. Sonochem.*, **1996**, 3, p. 111.
- [15] Lallemand F., Hihn J.-Y., Atobe M., Et Taouil A., Chap. 8 "Sono-electropolymerization", in *Power Ultrasound in Electrochemistry: From Versatile Tool to Engineering Solution*, John Wiley & Sons, **2012**, p. 249-281.
- [16] Hallez L., Touyeras F., Hihn J.-Y., Klima J., Guey J.-L., Spajer M., Bailly Y., Characterization of HIFU transducers designed for sonochemistry application: cavitation distribution, *Ultrasonics*, **2010**, 50, p. 310.
- [17] Rochon S., Hallez L., Hihn J.-Y., Touyeras F., Procédé de dépôt sélectif d'un métal précieux sur un support par ablation ultrasonore d'un élément de masquage et son dispositif, N° de dépôt 08 53892 par C&K Components, Partage de propriété intellectuelle avec le CNRS et l'Université de Franche-Comté PCT/EP2009/056803, publication internationale le 15 déc. **2009** WO 2009/150083A1.
- [18] Hallez L., Lee J., Touyeras F., Nevers A., Ashokkumar M., Hihn J.-Y., Enhancement and quenching of HIFU cavitation activity via short frequency sweep gaps, *Ultrason. Sonochem.*, **2016**, 29, p. 194.



J.-Y. Hihn

M.-L. Doche

L. Hallez

A. Et Taouil

Jean-Yves Hihn (auteur correspondant) est professeur des universités, Institut UTINAM, CNRS/Université de Bourgogne Franche-Comté*.

Marie-Laure Doche, Loïc Hallez et Abdeslam Et Taouil sont maîtres de conférences, UTINAM, CNRS, Université de Bourgogne Franche-Comté**.

* Institut UTINAM, UMR 6213 CNRS/Université de Bourgogne Franche-Comté, 16 route de Gray, F-25030 Besançon Cedex.
Courriel : jean-yves.hihn@univ-fcomte.fr

** Institut UTINAM, UMR 6213 CNRS/Université de Bourgogne Franche-Comté, 30 avenue de l'Observatoire, F-25009 Besançon Cedex.
Courriels : marie-laure.doche@univ-fcomte.fr ; loic.hallez@univ-fcomte.fr ; abdeslam.et_taouil@univ-fcomte.fr