

Auto-assemblage de fissures

Comment transformer un inconvénient en une fonctionnalité

Résumé Les méthodes de structuration des films obtenus par dépôt par voie liquide suscitent de l'intérêt dans les domaines de l'électronique, la photonique, la microfluidique, le photovoltaïque... Cependant, ces films sont obtenus par des procédés d'évaporation générant souvent des fissures qui se propagent de manière aléatoire dans les films. Dans des conditions contrôlées, le séchage de gouttelettes de solutions colloïdales entraîne la formation de fissures périodiques parallèles orientées par le front de l'évaporation. En suivant la formation de fissures liées à l'effet « rond de café », des fissures peuvent être auto-assemblées en motifs périodiques en contrôlant l'évaporation. L'auto-assemblage de fissures peut être ainsi utilisé comme une méthode lithographique à faible coût pour la fabrication de dispositifs fonctionnels pour l'optoélectronique et la détection photonique.

Mots-clés Revêtements, fissures, auto-assemblage, ordre, dip-coating, nanotechnologies.

Abstract **Self-assembly of cracks: how to turn a disadvantage into a functionality**

Developing patterning methods for solution-processed films could open perspectives for their utilization in fields such as electronics, photonics, microfluidics or photovoltaics. However, those films are obtained by evaporative processes that often generate cracks randomly propagating in the films. Interestingly, in controlled conditions, drying of droplets of colloidal solutions results in the formation of parallel periodic cracks oriented by the evaporation front-line. Following the formation of cracks related to the "coffee-ring effect", cracks can be self-assembled into periodic patterns by controlling the evaporation. The self-assembly of cracks can be used as a low cost lithographic method for the fabrication of functional devices for optoelectronics and photonic sensing.

Keywords Coatings, cracks, self-assembly, order, dip-coating, nanotechnologies.

Les revêtements obtenus par dépôt chimique par voie liquide sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Les peintures utilisées à des fins artistiques ou de protection de surfaces en sont l'exemple le plus courant. Ces revêtements jouent un rôle clé dans d'innombrables autres applications, notamment dans les domaines de l'électronique, des cellules solaires, de l'automobile ou du biomédical. Quelle que soit leur composition ou leur structure, ils sont généralement obtenus à partir d'une solution liquide, contenant des précurseurs moléculaires ou des objets préformés (comme des nanoparticules) et déposés par des procédés tels que le « spin-coating », « dip-coating » ou « spray-coating » [1]. Dans toutes ces méthodes, une fois qu'un film liquide est étalé, le solvant s'évapore pour conduire au revêtement solide. De plus, pour les applications dans le domaine des nanotechnologies, des procédés additionnels basés sur des méthodes de lithographie peuvent être employés pour texturer le revêtement à l'échelle micro- et nanométrique [2-3]. Cependant, lorsque ces films sont fabriqués, il n'est pas rare d'observer la formation de fissures, qui se propagent de manière aléatoire, notamment lors de l'évaporation du solvant. L'apparition de fissures est donc considérée comme un inconvénient majeur pour l'intégration des revêtements dans des dispositifs réels. Un effort est donc consacré à développer des stratégies pour optimiser la formulation de la solution ou le procédé afin d'éviter ou de limiter la formation de craquelures [4]. Mais que se passerait-il si au lieu d'éviter le problème, on essayait de tourner cet inconvénient en avantage ? Plus précisément, si nous étions capables d'imposer un ordre dans la formation des fissures, ce processus pourrait être utilisé pour texturer la surface, à la place de la lithographie.

La solution est dans le « rond de café »

La formation de fissures lors de l'évaporation est un sujet qui est largement étudié dans de nombreux domaines qui ne sont pas nécessairement liés aux revêtements, ni à la chimie d'ailleurs. La propagation aléatoire des fissures est observée en géologie, comme dans la boue, ou bien dans certains organismes vivants, comme dans les écailles des crocodiles [5] (*figure 1a*). L'analyse des motifs des fissures, formées par le séchage des gouttes de sang, a également été utilisée comme moyen pour diagnostiquer certaines maladies [6] (*figure 1a*). Dans les exemples cités ci-dessus, les craquelures forment des motifs de désordre. Comment contrôler la propagation des fissures ? Une approche consiste à introduire des défauts pour contrôler la nucléation, la propagation et la terminaison des fissures. Plus précisément, des chercheurs de Corée du Sud se sont servis de micro-encoches pour concentrer localement le stress, en amorçant ainsi la formation de fentes [7]. En utilisant une couche mince de nitrure de silicium (Si_3N_4) déposée sur silicium, ils ont été capables d'obtenir des fissures contrôlées avec des morphologies différentes, dont le logo du journal *Nature* (*figure 1b*). Bien que cette méthode de « propagation dirigée » des fissures soit élégante et prometteuse pour certaines applications (la nanofluidique par exemple [8]), elle nécessite toujours des techniques lithographiques pour générer des défauts locaux.

Dans des cas très spécifiques, la formation de motifs ordonnés de fissures peut se produire spontanément, par exemple pendant le séchage d'une gouttelette de suspension de nanoparticules. Nous observons généralement ce qu'on appelle l'effet « rond de café » (« coffee-ring effect ») [9].

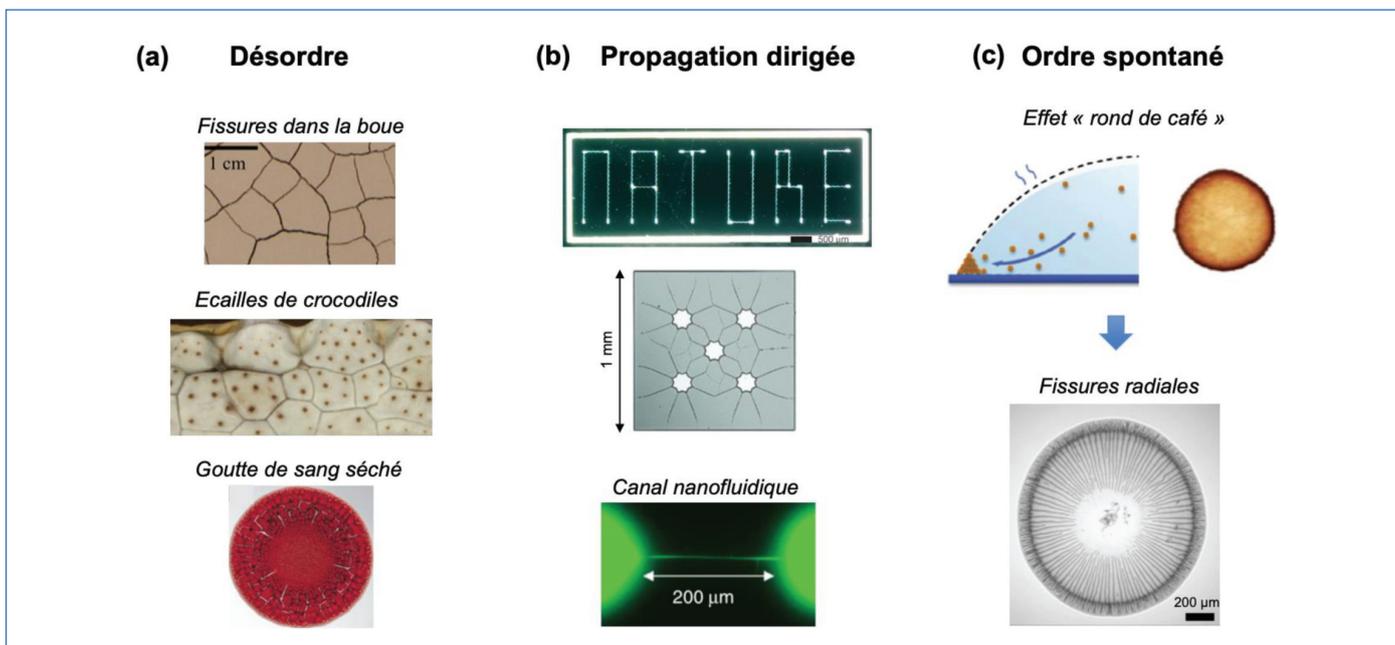


Figure 1 - (a) Réseaux de fissures désordonnés (avec des fissures dans la boue, sur des écailles de crocodile [5] et dans une goutte de sang [6], en opposition à une propagation dirigée, obtenue à l'aide de défauts, créés par lithographie (b)). Une fissure générée par cette approche a été utilisée comme un canal nanofluidique pour étudier le comportement de petites molécules dans des espaces confinés (photo du bas) [7-8]. (c) La photo du haut est une illustration de l'effet « rond de café » dans lequel les particules s'accumulent au bord de la gouttelette (la ligne pointillée dans le schéma représente le profil de la gouttelette) ; comme le montre la photo du bas, dans certaines conditions, l'évaporation d'une solution colloïdale entraîne la formation de fissures radiales [10].

Lorsqu'une goutte de café sèche sur une surface, la couleur du café – ses particules pigmentées – se concentre sur la bordure de la goutte, formant un anneau sombre (figure 1c). De la même manière, à partir d'une suspension colloïdale, un film se produit principalement au bord formant un gel de nanoparticules. Pendant le séchage, les gels colloïdaux se dessèchent lentement et se rétractent, entraînant une accumulation de contraintes internes qui sont libérées par la nucléation et la propagation de fissures. Dans certains cas, les craquelures qui apparaissent dans le film de nanoparticules se propagent radialement par rapport au front d'évaporation et généralement à la même distance les unes des autres à l'échelle micro-métrique [10].

La formation de craquelures régulièrement espacées résulte de la combinaison entre deux contributions : lorsqu'une fissure se forme, il y a relaxation des contraintes (due à l'ouverture de la fissure), et accumulation des contraintes (due à l'évaporation à travers la fissure déjà formée) [11]. Cette combinaison conduit à un maximum du stress global, situé à une distance précise de la première fissure, où se formera la suivante. Ce phénomène est répété jusqu'à ce que tout le film soit recouvert de craquelures périodiquement espacées et parallèles à la direction de séchage. Ceci peut être considéré comme un auto-assemblage spontané de fissures. Bien que ce phénomène soit très prometteur, le séchage des gouttelettes n'est pas un procédé adapté à la texturation des surfaces et à la fabrication de dispositifs. D'autres méthodes de dépôt par voie liquide peuvent être utilisées pour maîtriser l'auto-assemblage de fissures de manière plus contrôlée et à plus grande échelle.

Auto-assemblage de fissures par dépôt par trempage

Notre groupe a mis au point une approche permettant d'obtenir de l'ordre de manière spontanée par la méthode par

trempage. Cette méthode est probablement la technique la plus simple pour préparer un film homogène sur une grande surface [12]. Historiquement, elle a été utilisée pour préparer les premiers films d'oxyde par chimie sol-gel pour des applications optiques (brevet Schott Glasswerke, 1939) [13], mais elle est également largement répandue pour obtenir des films de polymères ou de matériaux hybrides. Dans cette méthode du dip-coating, le substrat est plongé dans la solution et est retiré à une vitesse constante. Après évaporation du solvant, une couche solide est obtenue au-dessus de la ligne de séchage. La vitesse de retrait du substrat et la vitesse d'évaporation sont les deux facteurs qui permettent de préparer un film d'épaisseur et de qualité contrôlées, à partir d'une solution donnée. La relation entre l'épaisseur et la vitesse de retrait dans le dépôt par trempage est illustrée dans la figure 2a pour les films de silice obtenus par chimie sol-gel [14]. À des vitesses supérieures à $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, les films sont obtenus dans le régime « drainage ». Il a été décrit pour la première fois par Landau et Levich [15-16] qui ont proposé un modèle prenant en compte la traînée visqueuse, induite par la gravité, s'opposant à l'adhésion du fluide sur le substrat. Dans ce régime, l'épaisseur est proportionnelle à la vitesse de retrait à la puissance $2/3$. À une vitesse inférieure à $0,1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, les films sont obtenus dans le régime « convectif » ou « capillaire » [17-18]. Dans cette configuration, l'épaisseur finale est inversement proportionnelle à la vitesse de retrait (puissance - 1). À très basse vitesse, l'épaisseur dépend également de la vitesse d'évaporation et peut être contrôlée en modifiant la température ou la pression de vapeur relative de l'environnement [19-20]. Entre les deux, un régime intermédiaire, situé entre $0,1$ et $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, permet d'atteindre l'épaisseur minimale. Un modèle prédictif semi-empirique a été proposé pour décrire cette tendance en forme de V en tenant compte des deux régimes [4].

Cette compréhension permet d'obtenir des revêtements avec un très bon contrôle de l'épaisseur sur de grandes surfaces en utilisant une technique de dépôt à faible coût. Ceci est très

important pour plusieurs applications en optique et électronique par exemple. Comme pour l'effet « rond de café », le dépôt dans le régime « capillaire » à très basse vitesse est gouverné par l'évaporation du solvant au niveau du ménisque, qui entraîne un flux convectif des solutés de la solution vers le point triple. En travaillant dans le régime dit « capillaire » (à vitesse lente) et en évaporant une solution colloïdale, il est donc possible d'induire l'auto-assemblage de fissures. Pendant le dépôt, la formation de fissures peut être observée à l'aide d'un microscope optique. Trois zones distinctes peuvent être identifiées (*figure 2b*). La première, qui se situe sous le point triple d'évaporation, est la suspension colloïdale. La deuxième, qui se situe au-dessus du point triple, est ce qu'on appelle un « gel humide » constitué de nanoparticules formant un réseau percolé qui est rempli par le solvant (eau). Dans cette zone, les contraintes internes commencent à s'accumuler à cause de la contraction provoquée par l'élimination du solvant. Des fissures apparaissent pour relâcher la contrainte induite par l'évaporation et se propagent ensuite perpendiculairement à la ligne de séchage. Enfin, la troisième zone est formée d'un film dit « sec », où le solvant s'est totalement évaporé [21]. Certaines particularités majeures de cette méthodologie sont présentées dans la *figure 2c*. Elle permet de préparer des réseaux périodiques de craquelures avec presque aucun défaut sur une surface relativement grande. Plus important encore, selon la littérature, la périodicité des fissures dépend presque linéairement de l'épaisseur du film. L'un des avantages de l'utilisation du dip-coating est donc que la périodicité des réseaux de fissures peut être facilement réglée en faisant varier la vitesse de retrait ; la distance entre les fissures peut varier de quelques dizaines de micromètres à quelques micromètres.

Comme pour toute méthode de structuration, la possibilité de contrôler la taille des réseaux périodiques est une condition essentielle pour l'intégration de ces matériaux dans des dispositifs réels. De plus, par rapport à d'autres techniques de lithographie (comme la lithographie optique), la méthode se déroule en une seule étape, est peu coûteuse et peut être

transposée à de nombreux substrats (y compris les plastiques souples) aux géométries complexes (comme les tubes). L'approche de l'auto-assemblage de fissures est également versatile et peut être appliquée à d'autres méthodes de dépôt pour voie liquide comme le « blade-coating » [22]. Tous ces avantages font de cette technique une alternative très prometteuse aux techniques lithographiques traditionnelles pour plusieurs domaines d'application, notamment la photonique, l'électronique et/ou le mouillage. Quelques exemples d'application sont présentés ci-après.

Applications des fissures dans les nanotechnologies

La possibilité d'obtenir des réseaux périodiques de fissures ouvre des perspectives intéressantes pour la fabrication de dispositifs. En effet, les surfaces texturées sont employées dans de nombreux domaines liés à la nanotechnologie. L'auto-assemblage de fissures dans les nanoparticules polymères peut être utilisé pour fabriquer des masques permettant de transférer les motifs à d'autres matériaux fonctionnels. Deux exemples sont présentés en *figure 3*. La *figure 3a* montre la fabrication de réseaux de lignes d'or [23]. Le processus de fabrication a consisté à fabriquer des micro-canaux parfaitement ordonnés dans des films de nanoparticules de polystyrène par auto-assemblage de fissures. Ceux-ci sont radiaux dans le cas du séchage d'une goutte ou parallèles dans le cas de géométries confinées, telles que deux plaques de verre rapprochées. La surface a ensuite été recouverte d'une couche d'or de 50 nm (par pulvérisation). Puis à travers un traitement chimique, la couche de nanoparticules de polystyrène est retirée et il ne reste plus que des lignes d'or de largeur submicrométrique, là où les fissures étaient présentes. Ce type de réseau de fils métalliques peut être utilisé comme électrodes conductrices transparentes ou comme réseaux de microélectrodes pour la détection électrochimique. La technique d'auto-assemblage de fissures peut être aussi utilisée pour fabriquer des photodétecteurs, constitués de nanofilaments de pérovskites [24]. Il est en effet compliqué

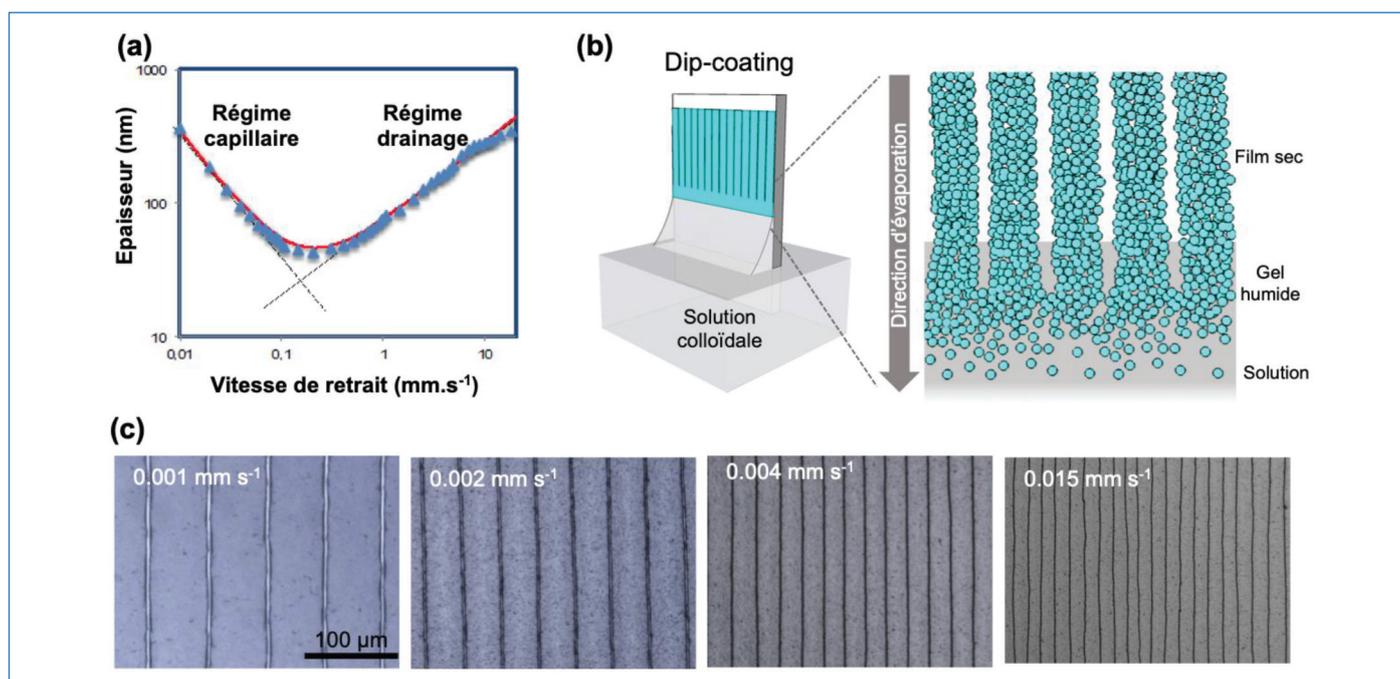


Figure 2 - Graphique présentant la variation de l'épaisseur du film en fonction de la vitesse de retrait (a), avec un schéma explicatif de l'auto-assemblage de fissures, obtenu par dip-coating (b) et des images de fissures dans des films de nanoparticules de polystyrène, obtenus à différentes vitesses de retrait (c).

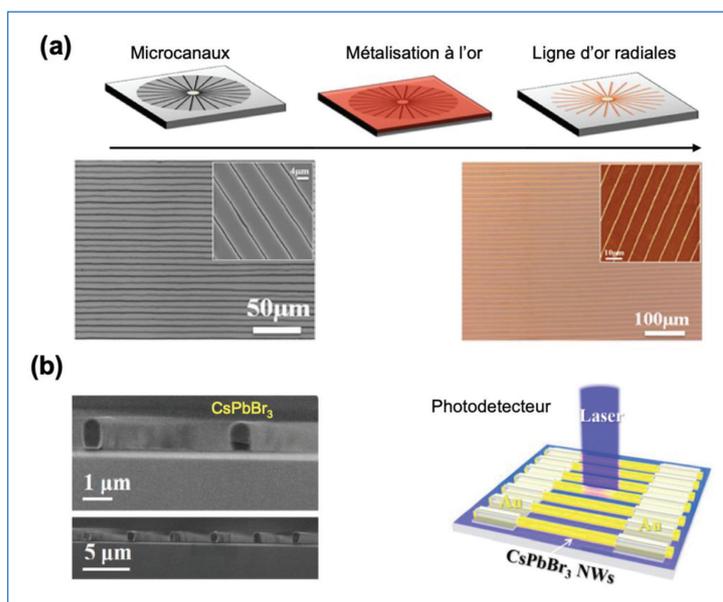


Figure 3 - Différentes applications d'auto-assemblage de fissures, telles que la fabrication de lignes d'or [23] (a) ou de nanofilaments de pérovskites pour la conception d'un photodétecteur [24] (b).

d'obtenir ces nanofilaments unidimensionnels sans avoir recours à la lithographie, nécessitant souvent plusieurs étapes de synthèse. La méthode consiste en deux étapes : l'auto-assemblage de fissures dans les films de nanoparticules de polystyrène est d'abord obtenu par blade-coating. Ensuite, une fois ce masque créé, il est possible d'infiltrer une solution contenant les précurseurs utiles pour la synthèse de pérovskites, CsBr et PbBr₂, dans les nanocanaux fabriqués. Ces fissures vont permettre de diriger unidimensionnellement la cristallisation de ce matériau. En particulier, l'évaporation du solvant dirige alors la nucléation et la propagation de la pérovskite, CsPbBr₃, en formant des nanofilaments (figure 3b). Les pérovskites sont largement utilisées en optoélectronique en raison (entre autres) de leur grand coefficient d'absorption et de leur mobilité des charges électriques. L'alignement de nanofilaments de pérovskites permet d'augmenter le courant de sortie. En raison de ces propriétés, les surfaces constituées de nanofilaments de CsPbBr₃ ont été utilisées comme photodétecteurs présentant une sensibilité élevée et avec une réponse dépendante de la polarisation de la lumière.

Au-delà des films de nanoparticules polymères, l'auto-assemblage de fissures peut être généralisé à d'autres nanoparticules présentant des propriétés intrinsèques intéressantes et pouvant être directement intégrées dans des dispositifs [21]. C'est le cas des « metal-organic frameworks » (MOF). En raison de leur forte porosité, ces matériaux peuvent adsorber des molécules de vapeur dans leurs cavités. Ils sont donc considérés comme des candidats sérieux pour la détection de molécules de vapeur toxiques, par exemple par détection optique. Un défi concerne l'intégration de ces matériaux dans des dispositifs optiques afin de pouvoir évaluer la qualité de l'air, par exemple en utilisant uniquement l'appareil photo d'un smartphone. L'auto-assemblage de fissures est un moyen efficace et peu coûteux de fabriquer de tels capteurs. La figure 4a schématise l'approche de formation de motifs de fissures par dip-coating pour le matériau MIL-101(Cr) [21]. La solution colloïdale a été obtenue par synthèse micro-ondes. Après dépôt, le film séché est un gel colloïdal composé de motifs rectangulaires orientés, régulièrement espacés et ressemblant à des briques. À la différence des exemples

précédents, pour ce système colloïdal l'évaporation du solvant induit de fortes contraintes capillaires, libérées par la formation de fissures secondaires aléatoires, perpendiculaires à la direction de séchage (figure 4b). Grâce à ce haut degré de périodicité des fissures, les films de MOF diffractent la lumière en se comportant comme des réseaux de diffraction. En exploitant la porosité élevée, les propriétés d'adsorption sélective du MIL-101(Cr) ainsi que la versatilité du procédé d'auto-assemblage des fissures, un capteur de vapeur photonique a été développé. Le MIL-101 a la particularité d'avoir une structure présentant des micro- et des mésopores. Lorsque les pores sont remplis par des molécules de solvants, l'indice de réfraction du matériau est modifié et l'intensité de la lumière diffractée varie également (figure 4c). Dans le cas des vapeurs de toluène, la figure 4d montre que l'intensité de la lumière diffractée (diffraction du premier ordre) peut être reliée au changement de l'indice de réfraction Δn , en réponse à l'adsorption de l'analyte dans la porosité. Le capteur photonique à base de fissures est ainsi capable de détecter les vapeurs toxiques présentes dans l'air ; sa sensibilité a été comparée à d'autres dispositifs optiques similaires rapportés dans la littérature. Le capteur à base de fissures présente la meilleure sensibilité, comparable (et même supérieure) aux miroirs de Bragg à base de MOF [21]. Ceci est remarquable si l'on considère que la fabrication d'un miroir de Bragg nécessite six étapes de dépôt, de deux matériaux différents, alors que l'auto-assemblage de fissures peut être réalisé en une seule étape. Pour toutes ces raisons, il s'agit d'une avancée technologique significative pour la fabrication de capteurs à faible coût pour le suivi de la qualité de l'air, en particulier dans les environnements présentant un risque élevé de pollution chimique (industries et zones urbaines). Plus généralement, il s'agit du premier exemple d'exploitation de fissures pour des applications photoniques.

Vers une nouvelle méthode de lithographie ?

Pour conclure, l'auto-assemblage de fissures produit par l'évaporation de solutions colloïdales peut être utilisé comme technique de structuration de surface de manière simple, compatible avec le dépôt à grande échelle et sur de nombreux substrats de nature et de géométrie différentes. En outre, cette méthode permet l'intégration directe de nanomatériaux dans les dispositifs structurés à moindre coût. Cette méthode présente des avantages majeurs par rapport aux autres méthodes lithographiques pour fabriquer des surfaces texturées à l'échelle micrométrique. Bien qu'elle en soit encore à ses débuts, cette méthode pourrait être utilisée pour la fabrication de surfaces superhydrophobes ou de dispositifs électroniques et photoniques à grande échelle. Malgré ces promesses, plusieurs défis doivent être relevés en termes de performances, notamment en ce qui concerne la composition chimique des films qui peuvent être obtenus et la résolution des motifs. Les perspectives actuelles consistent donc à étendre la méthode à d'autres compositions ou à d'autres géométries de motifs de fissures (au-delà des lignes). Enfin, comme pour toutes les méthodes lithographiques, l'amélioration de la résolution vers des périodicités à l'échelle submicrométrique représenterait une grande avancée vers d'autres applications en nanotechnologie à faible coût. En conclusion, ces fissures, considérées comme des défauts ou des inconvénients, ont été transformées en fonctionnalité. La conversion de ce simple phénomène physico-chimique curieux en un

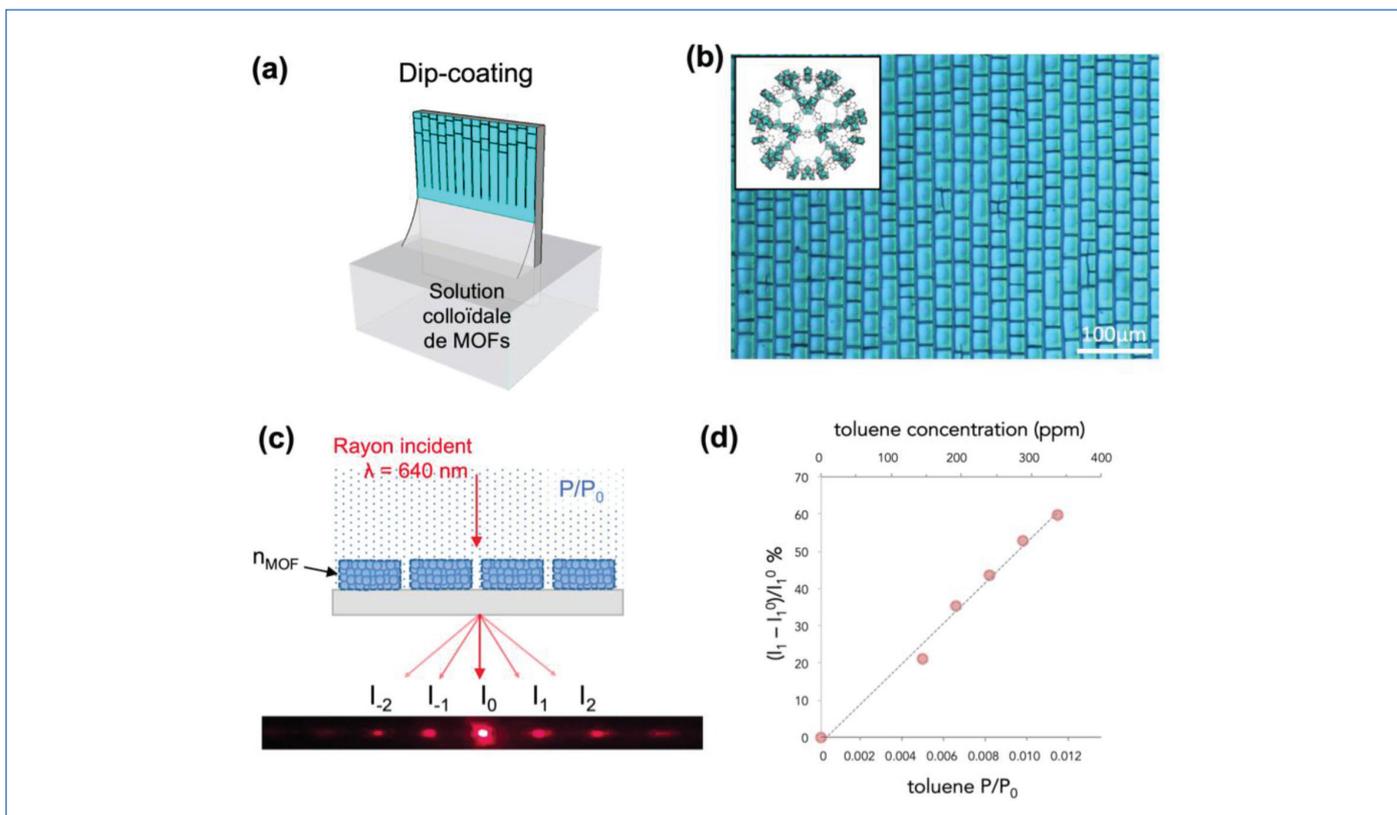


Figure 4 - Exemple d'auto-assemblage de fissures avec la fabrication d'un réseau de diffraction photonique [21]. Schéma récapitulatif du dip-coating d'une solution de MIL-101 (a), avec l'image optique d'un film obtenu (b) et le schéma du dispositif pour la détection photonique des vapeurs (c). Graphique représentant l'évolution de l'intensité diffractée (ordre 1) en fonction de la pression partielle de toluène (d).

procédé lithographique pertinent représente, à notre avis, un axe de recherche stimulant.

- [1] M. Faustini, C. Boissière, L. Nicole, D. Grosso, From chemical solutions to inorganic nanostructured materials: a journey into evaporation-driven processes, *Chem. Mater.*, **2014**, *26*, p. 709-723.
- [2] M. Gayrard, M. Faustini *et al.*, Replacing metals with oxides in metal-assisted chemical etching enables direct fabrication of silicon nanowires by solution processing, *Nano Lett.*, **2021**, *21*, p. 2310-17.
- [3] M. Faustini, B. Marmiroli, L. Malfatti, B. Louis, N. Krins *et al.*, Direct nano-in-micropatterning of TiO_2 thin layers and TiO_2/Pt nanoelectrode arrays by deep X-ray lithography, *J. Mater. Chem.*, **2011**, *21*, p. 3597-603.
- [4] M. Faustini, B. Louis, P.A. Albouy, M. Kuemmel, D. Grosso, Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions, *J. Phys. Chem. C*, **2010**, *114*, p. 7637-45.
- [5] M.C. Milinkovitch, L. Manukyan, A. Debry, N. Di-Poi, S. Martin *et al.*, Crocodile head scales are not developmental units but emerge from physical crackin, *Science*, **2013**, *339*, p. 78-81.
- [6] R. Chen, L. Zhang, D. Zang, W. Shen, Blood drop patterns: formation and applications, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2016**, *231*, p. 1-14.
- [7] K.H. Nam, I.H. Park, S.H. Ko, Patterning by controlled cracking, *Nature*, **2012**, *485*, p. 221-224.
- [8] M. Kim, D. Ha, T. Kim, Cracking-assisted photolithography for mixed-scale patterning and nanofluidic applications, *Nat. Commun.*, **2015**, *6*, art. 6247, DOI 10.1038/ncomms7247.
- [9] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten, Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops, *Nature*, **1997**, *389*, p. 827-829.
- [10] Y. Zhang, Y. Qian, Z. Liu, Z. Li, D. Zang, Surface wrinkling and cracking dynamics in the drying of colloidal droplets, *Eur. Phys. J. E*, **2014**, *37*, art. 84, DOI 10.1140/epje/i2014-14084-3.
- [11] C. Allain, L. Limat, Regular patterns of cracks formed by directional drying of a colloidal suspension, *Phys. Rev. Lett.*, **1995**, *74*, 2981.
- [12] D.R. Ceratti, B. Louis, X. Paquez, M. Faustini, D. Grosso, A new dip coating method to obtain large-surface coatings with a minimum of solution, *Adv. Mater.*, **2015**, *27*, p. 4958-62.
- [13] M. Faustini, L. Nicole, E. Ruiz-Hitzky, C. Sanchez, History of organic-inorganic hybrid materials: prehistory, art, science, and advanced applications, *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, *28*, 1704158.
- [14] M. Faustini, D.R. Ceratti, B. Louis, M. Boudot, P.-A. Albouy *et al.*, Engineering functionality gradients by dip coating process in acceleration mode, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, *6*, p. 17102-110.
- [15] L. Landau, B. Levich, Dragging of a liquid by a liquid plate, *Acta Physicochimica Urss*, **1942**, *17*, p. 42-54.

- [16] C.J. Brinker, A.J. Hurd, P.R. Schunk, G.C. Frye, C.S. Ashley, Review of sol-gel thin film formation, *J. Non-Cryst. Solids*, **1992**, *147-148*, p. 424-436.
- [17] G. Berteloot, C.-T. Pham, A. Daerr, F. Lequeux, L. Limat, Evaporation-induced flow near a contact line: consequences on coating and contact angle, *EPL Europhys. Lett.*, **2008**, *83*, 14003.
- [18] M. Le Berre, Y. Chen, D. Baigl, From convective assembly to Landau-Levich deposition of multilayered phospholipid films of controlled thickness, *Langmuir*, **2009**, *25*, p. 2554-57.
- [19] E. Bindini, G. Naudin, M. Faustini, D. Grosso, C. Boissière, Critical role of the atmosphere in dip-coating process, *J. Phys. Chem. C*, **2017**, *121*, p. 14572-580.
- [20] M. Faustini, G.L. Drisko, C. Boissiere, D. Grosso, Liquid deposition approaches to self-assembled periodic nanomasks, *Scr. Mater.*, **2014**, *74*, p. 13-18.
- [21] O. Dalstein, E. Gkaniatsou, C. Sicard, O. Sel, M. Faustini *et al.*, Evaporation-directed crack-patterning of metal-organic framework colloidal films and their application as photonic sensors, *Angew. Chem.*, **2017**, *129*, p. 14199-203.
- [22] B. Li, B. Jiang, W. Han, M. He, X. Li *et al.*, Harnessing colloidal crack formation by flow-enabled self-assembly, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *56*, p. 4554-59.
- [23] W. Han, B. Li, Z. Lin, Drying-mediated assembly of colloidal nanoparticles into large-scale microchannels, *ACS Nano*, **2013**, *7*, p. 6079-85.
- [24] S. Pan, H. Zou, A.C. Wang, Z. Wang, J. Yu *et al.*, Rapid capillary-assisted solution printing of perovskite nanowire arrays enables scalable production of photodetectors, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*, p. 14942-49.

Fanny THORIMBERT, doctorante,
Mateusz ODZIOMEK, post-doctorant, et
Marco FAUSTINI*, maître de conférences,
 Laboratoire de Chimie de la Matière
 Condensée de Paris (LCMCP, UMR 7574),
 Sorbonne Université, CNRS, Collège de
 France.
**Marco Faustini a reçu le prix Jeune
 chercheur 2021 de la division SCF Chimie
 physique.**



M. Faustini

*marco.faustini@sorbonne-universite.fr