



HAL
open science

Le MXène : un mille-feuille aux multiples talents

Lola Loupias, Mohamed Benchakar, Stephane Celerier

► **To cite this version:**

Lola Loupias, Mohamed Benchakar, Stephane Celerier. Le MXène : un mille-feuille aux multiples talents. *Microscop: Un regard sur les laboratoires en Centre Limousin Poitou-Charentes (CNRS)*, 2019, 80, pp.18-19. hal-02325186

HAL Id: hal-02325186

<https://hal.science/hal-02325186>

Submitted on 24 Oct 2019

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.

Le MXène : un mille-feuille aux multiples talents

De nos jours, les matériaux lamellaires ou matériaux 2D, organisés en feuillets de quelques couches atomiques, aiguisent de plus en plus l'intérêt de la communauté scientifique. L'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers s'est engagé dans la voie originale de la préparation des MXènes, des matériaux 2D aux propriétés riches et variées.



Obtention d'un film de MXène par simple filtration.

L'attention portée sur les matériaux 2D n'est pas récente. Elle demeure une thématique extrêmement dynamique en science des matériaux notamment depuis l'avènement du graphène, dont la découverte a été récompensée par le prix Nobel de physique en 2010. Les matériaux 2D ou de basse dimensionnalité ont un rapport surface/volume bien plus important que leur équivalent tridimensionnel où certains atomes dans le cœur du matériau n'ont aucun rôle à jouer. Dans les matériaux 2D, la plupart des atomes peuvent potentiellement influencer sur les propriétés. La quantité de matière à mettre en œuvre dans les applications où ils interviennent est alors limitée, un enjeu environnemental majeur dans nos sociétés modernes. À quantité égale, leurs performances sont supérieures.

"... d'autant plus intéressants qu'ils sont extrêmement récents..."

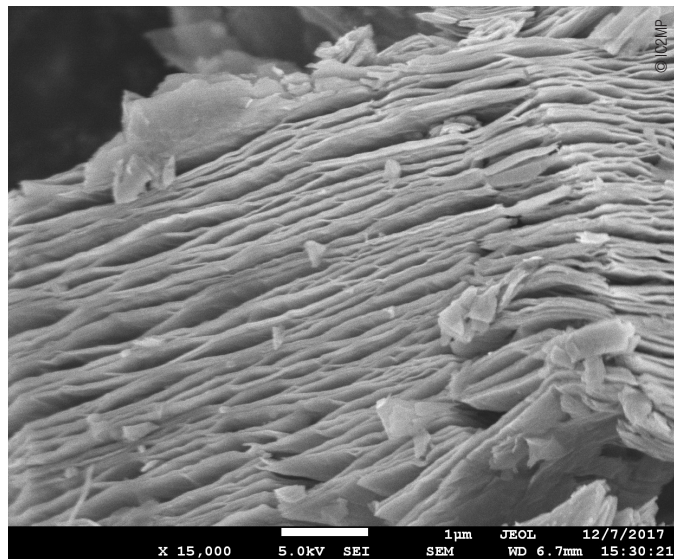
UNE CHIMIE VERSATILE

D'une manière générale, la propriété d'un matériau est pilotée par sa composition chimique, c'est-à-dire la nature des atomes du tableau périodique qui le compose. Par conséquent, la possibilité de moduler facilement la composition dans un matériau 2D est un atout considérable pour viser des applications extrêmement variées. Si le graphène est LE matériau 2D par excellence, il est difficile toutefois de faire varier significativement sa composition chimique constituée principalement que de carbone. Ce constat pousse naturellement vers la recherche d'autres composés 2D. C'est dans ce contexte qu'ont été découverts en 2011 les MXènes nommés ainsi d'après leur composition chimique (M : métal de transition et X : atomes de carbone et/ou d'azote, suffixe "ène" : analogie au graphène). En effet, de nombreux MXènes contenant des atomes très différents sont potentiellement synthétisables (différents métaux de transition M). Cette particularité remarquable parmi les matériaux 2D s'explique par le fait que les MXènes sont préparés à partir de solides tridimensionnels appelés phase MAX, qui comprend plus de 70 membres de composition très variée. La versatilité chimique des MXènes se traduit aussi par la présence à la surface

des feuillets MX d'autres atomes tels que l'oxygène, l'hydrogène ou le fluor et dont la composition et la quantité peuvent être contrôlées ce qui influe aussi sur les propriétés. Ces nouveaux matériaux sont d'autant plus intéressants qu'ils sont extrêmement récents : ceci laisse le champ libre à de nombreux résultats nouveaux et originaux.

UNE TRÈS LARGE GAMME D'APPLICATIONS POTENTIELLES

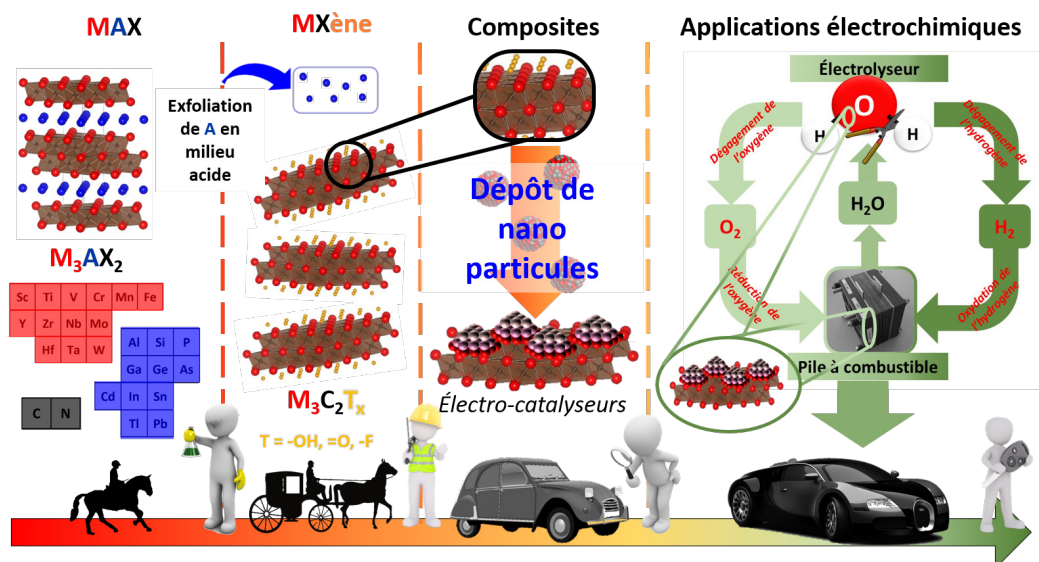
Les MXènes offrent déjà d'énormes potentialités dans de nombreuses applications aussi variées que le stockage et la conversion de l'énergie (batteries, supercondensateurs, piles à combustibles...), la photocatalyse, le traitement de l'eau, les capteurs de gaz, le blindage électromagnétique, les films conducteurs transparents, les composites polymères ou encore en nano-médecine. Ces propriétés exceptionnelles en font sans doute déjà un des matériaux de référence pour le stockage électrochimique de l'énergie. Par ailleurs, la possibilité de moduler la composition chimique du MXène ainsi que la possibilité d'intercaler différentes espèces actives dans cette sorte de mille-feuille, ouvre de nombreuses applications non encore explorées en catalyse et en électrocatalyse.



Exemple de cliché de microscopie de feuillets de MXènes sous forme de stack.

DES ARGILES CONDUCTRICES

Une autre propriété remarquable de ces matériaux est leur capacité à se comporter comme des argiles. En effet suivant leur nature chimique, les MXènes peuvent devenir hydrophiles et stocker des cations stabilisant des couches d'eau entre les feuillets. Ils sont alors appelés communément des argiles conductrices en raison de leur conductivité électronique très élevée. Ainsi, cette particularité parmi les matériaux 2D conducteurs, offre des perspectives très importantes pour faciliter leur mise en forme, notamment pour fabriquer des encres ou encore des films par simple filtration. Cette faculté les rend très attractifs pour le monde industriel, la simplification de la mise en forme réduisant significativement le coût de fabrication.



Description schématique de la synthèse des MXènes, découverts par l'équipe du professeur Barsoum à l'université Drexel (Etats-Unis) à partir des phases MAX de composition chimique ajustable. Formation d'un composite par dépôts de nanoparticules d'oxydes pour créer un électro-catalyseur qui sera utilisé dans des piles à combustible et des électrolyseurs.

DES APPLICATIONS DANS LES PILES À COMBUSTIBLE ET LES ÉLECTROLYSEURS

En étroite collaboration avec l'Institut Pprime (Université de Poitiers-CNRS), internationalement reconnu dans le domaine des phases MAX utilisées pour la préparation des MXènes, l'IC2MP synthétise ces matériaux avec différentes compositions permettant d'obtenir des propriétés très diverses. Cette chimie particulière est notamment mise à profit pour disperser finement des nanoparticules d'oxydes (par exemple l'oxyde de cobalt) à la surface des feuillets. Ces matériaux composites MXène/oxyde sont alors étudiés comme électrocatalyseurs pour les réactions de réduction et de dégagement du dioxygène. Ces réactions clés sont impliquées dans des applications relevant de la transition énergétique tournée vers une économie basée sur l'hydrogène (Pile à combustible : production d'électricité à partir d'hydrogène ; Electrolyseurs : production d'hydrogène à partir d'eau). Dans ce cadre, le MXène sert notamment de conducteur électronique, un rôle primordial qui doit être assuré dans ce type d'application, et l'oxyde de catalyseur.

La versatilité chimique offerte par les MXènes pourra être mise à profit pour améliorer les performances de ces électrocatalyseurs. En cas de réussite, cette catégorie de matériaux composites pourra alors remplacer les platinoïdes (en particulier platine, iridium et ruthénium), catalyseurs de référence au coût très élevé, dont la production fait face à des problématiques géopolitiques sensibles freinant la production de masse.

UNE APPROCHE MULTIDISCIPLINAIRE

En raison de la grande complexité de la chimie de ces matériaux, un important gap est aussi à franchir pour établir des protocoles de caractérisation fiables afin de déterminer leurs propriétés de surface ainsi que les interactions électroniques entre les oxydes et les MXènes dans les composites. À travers une collaboration interdisciplinaire faisant intervenir des physiciens, des électrochimistes et des chimistes de l'IC2MP, de Pprime, de l'IMN et du CEMTHI,* des études structurales et spectroscopiques permettant d'associer cristallographie et structure

électronique sont menées. Des simulations DFT (méthode de calcul quantique) sont aussi développées pour aider à l'analyse des données expérimentales recueillies. Un tel support théorique est en effet essentiel dans l'appréhension de ces matériaux complexes. Il est utilisé pour guider les protocoles de synthèse vers le MXène le plus prometteur dans les applications visées.

ET AU-DELÀ ?

Ce projet fondamental, collaboratif et interdisciplinaire devrait profiter à la communauté grandissante des MXènes et, *in fine*, aux nombreuses applications associées à ces matériaux. Ceci sera réalisable grâce aux avancées qui seront obtenues sur la synthèse de MXènes à composition bien contrôlée et sur les caractérisations optimisées de ces matériaux multitâches combinant approches expérimentales et théoriques. À n'en pas douter, l'exploration de ces nouveaux objets excitants n'en est qu'à ses débuts et d'autres propriétés remarquables seront peut-être découvertes élargissant encore la gamme d'applications potentielles.

Lola LOUPIAS < IC2MP
lola.loupias@univ-poitiers.fr

Mohamed BENCHAKAR < IC2MP
mohamed.benchakar@univ-poitiers.fr

Stéphane CÉLÉRIER < IC2MP
stephane.celerier@univ-poitiers.fr
<http://ic2mp.labo.univ-poitiers.fr/>

* IMN : Institut des Matériaux Jean Rouxel, UMR 6502, Nantes

CEMHTI : Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, UPR 3079, Orléans

Pprime : Institut P' : Recherche et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et Énergétique, UPR 3346, Poitiers



Projet MXENECAT soutenu financièrement par l'ANR, l'Union européenne (FEDER) et la Région Nouvelle Aquitaine.