

Stage de Master 2

Année universitaire 2025-26

Couplage spin-orbite dans des films minces de MXènes

Encadrant(s)	Simon HURAND Vincent MAUCHAMP	Julien RAMADE David BABONNEAU
Laboratoire	Institut Pprime (Université of Poitiers) Département de Physique et Mécanique des Matériaux	
Equipe	Physique et Propriétés des Nanostructures	
Poursuite en thèse	Non	
Mots clefs	Matériaux 2D Localisation faible Magnétoresistance	Couplage spin-orbite MXène Transport basse température

Description du sujet

Contexte :

La possibilité de manipuler les degrés de liberté de spin des électrons libres via le couplage spin-orbite est à la base de nombreux enjeux fondamentaux comme appliqués : stockage d'information magnétique, vannes de spin, information quantique, états topologiques, etc. La mise en évidence d'un effet de couplage spin-orbite dans un matériau conducteur ouvre donc des applications potentielles dans ce vaste domaine, communément regroupé sous le nom de spintronique. A cette fin, un outil clef est l'étude du transport électronique (résistivité) à basse température et sous champ magnétique, qui permet, en réduisant le bruit thermique et de révéler les mécanismes de transport fondamentaux. En particulier, les effets d'interférences quantiques entre les fonctions d'onde électroniques induisent une augmentation de la résistivité à basse température (de l'ordre de quelques Kelvins) : ce phénomène est appelé *localisation faible* (LF). Sous l'effet d'un champ magnétique, cette augmentation est normalement supprimée, mais peut au contraire être maintenue en présence d'un fort couplage spin-orbite, un phénomène appelé *anti-localisation faible* (ALF).

Dans ce contexte, des signatures d'ALF ont récemment été mises en évidence dans des films minces de MXène de formule $Ti_3C_2T_x$ [Jin et al. Adv. Nano. Res. 2022], ce qui a été confirmé à Pprime (voir Figure 2). Les MXènes, de formule générale $M_{n+1}X_nT_x$ (où M est un métal de transition, X du carbone ou de l'azote, et T sont des terminaisons de surface -O, -OH ou -F, voir Figure 1), sont l'une des plus vastes familles parmi les matériaux 2D [Vahid Mohammadi et al., Science 2021]. Tandis que d'autres matériaux 2D tel que le graphène ou les dichalcogénures de métaux de transition sont semi-métalliques, isolants ou semi-conducteurs, les MXènes sont au contraire de nature métallique. Leur caractère hydrophile

les rend faciles à mettre en forme, y compris à l'échelle industrielle. La présence d'un fort couplage spin-orbite dans ces matériaux leur ouvrirait donc un nouveau et vaste champ d'application. Toutefois, cet effet s'avère pour l'heure assez faible : il y a donc un enjeu fondamental à explorer des moyens de le renforcer dans des films de MXènes.

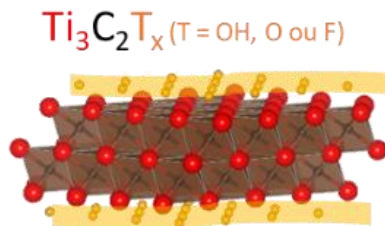


Figure 1. Modèle structural du MXène $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ avec ses terminaisons de surface (en jaune).

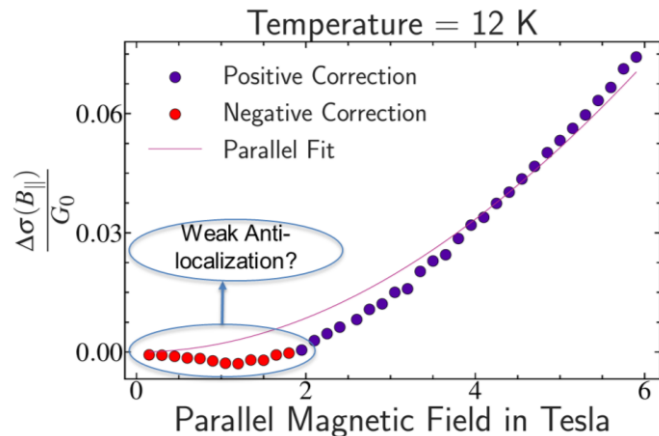


Figure 2. Variation de la conductivité σ en fonction du champ magnétique B mesurée à basse température (ici 12 K) pour un film mince de MXène de formule $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$: la correction positive (en bleu) correspond à la LF, la (faible) contribution négative (en rouge) à l'ALF.

Objectif :

Le but de ce stage est d'étudier la possibilité de renforcer le couplage spin-orbite dans des films minces de MXène, en déposant sur la couche de MXène des **impuretés à fort couplage spin-orbite**, telle que de faibles concentrations d'atomes d'or ou de platine.

Ce dépôt sera réalisé par évaporation sous vide via un faisceau d'électrons de cibles métalliques, directement sur des films de MXènes dans le bâti DIVA (Dépôt en Incidence VArable). Ce bâti unique et original, développé spécifiquement à Pprime, présente plusieurs avantages : (i) la possibilité de déposer l'or sous incidence oblique, permettant de **contrôler finement de très faibles quantités de matière déposée**, jusqu'à la limite de quelques atomes isolés ; (2) la possibilité de **suivre la réponse optique des films minces en temps réel** par des mesures (transmittance ou réflectance) *in situ* en cours de dépôt, permettant de caractériser finement la quantité de matière déposée et son organisation. Ces paramètres structuraux (notamment l'agrégation ou non des atomes d'or) pourront aussi être caractérisés à Pprime par microscopie électronique à transmission, diffraction des rayons X, et par des méthodes optiques *ex situ* telle que l'ellipsométrie, selon les besoins révélés lors du stage.

La partie essentielle du stage consistera ensuite à caractériser le couplage spin-orbite de ces films. Pour ce faire, l'Institut Pprime dispose d'un cryostat (PPMS) permettant d'attendre des **basses températures jusqu'à 2 Kelvin** (proche du zéro absolu), et des **forts champs magnétiques jusqu'à 9 Tesla**. L'analyse des mesures de résistance des films minces en fonction de la température et du champ magnétique à l'aide des modèles de localisation faible (prenant en compte la nature quantique, donc ondulatoire, des électrons libres) permettra de quantifier l'ALF et donc l'amplitude du couplage spin-orbite, comme illustré sur la Figure 2. Le fort couplage spin-orbite attendu dans ces nouveaux systèmes devrait permettre d'augmenter son impact en termes d'applications potentielles.

Profil du candidat

Nous recherchons un(e) étudiant(e) de Master 2 ayant une solide formation en physique du solide, physique-chimie, ou physique des matériaux, faisant preuve d'une grande curiosité scientifique et d'une bonne motivation pour mener l'ensemble des travaux expérimentaux, de la préparation d'échantillon à la caractérisation, et leur interprétation

Contacts :

Simon Hurand	simon.hurand@univ-poitiers.fr
Julien Ramade	julien.ramade@univ-poitiers.fr
Vincent Mauchamp	vincent.mauchamp@univ-poitiers.fr
David Babonneau	david.babonneau@univ-poitiers.fr

Master 2 Internship

Academic Year 2025-26

Spin-orbit coupling in MXene thin films

Supervisor(s)	Simon HURAND	Julien RAMADE
	Vincent MAUCHAMP	David Babonneau
Laboratory	Institut Pprime (University of Poitiers) Department of Physics and Mechanics of Materials	
Research Team	Physics and Properties of Nanostructures	
Continuation to PhD	No	
Keywords	2D Materials Weak localization Magnetoresistance	Spin-orbit coupling MXene Low-temperature transport

Internship description

Scientific context:

The ability to manipulate the spin degrees of freedom of free electrons via spin-orbit coupling is at the heart of numerous fundamental and applied challenges: magnetic information storage, spin valves, quantum information, topological states, etc. The demonstration of a spin-orbit coupling effect in a conductive material thus opens potential applications in this vast field, commonly grouped under the name of spintronics. To this end, a key tool is the study of electronic transport (resistivity) at low temperature and under a magnetic field, which allows, by reducing thermal noise, to reveal fundamental transport mechanisms. In particular, quantum interference effects between electronic wave functions induce an increase in resistivity at low temperature (on the order of few Kelvins): this phenomenon is called *weak localization* (WL). Under the effect of a magnetic field, this increase is normally suppressed, but can instead be maintained in the presence of strong spin-orbit coupling, a phenomenon called *weak anti-localization* (WAL).

In this context, WAL signatures have recently been demonstrated in thin films of MXene with the formula $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ [Jin et al. Adv. Nano. Res. 2022], which has been confirmed at Institut Pprime (see Figure 2). MXenes, with the general formula $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$ (where M is a transition metal, X is carbon or nitrogen, and T are surface terminations -O, -OH or -F, see Figure 1), are one of the largest families among 2D materials [Vahid Mohammadi et al., Science 2021]. While other 2D materials such as graphene or transition metal dichalcogenides are semi-metallic, insulating or semiconducting, MXenes are instead metallic in nature. Their hydrophilic character makes them easy to process, including at industrial scale. The presence of strong spin-orbit coupling in these materials would therefore open a new and vast field of application

for them. However, this effect proves to be rather weak for now: there is therefore a fundamental challenge to explore ways to enhance it in MXene films.

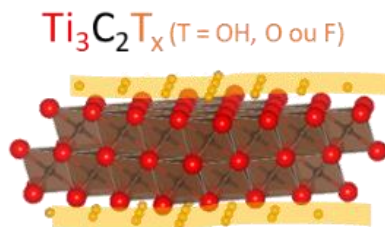


Figure 1. Structural model of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene including its surface terminations (in yellow).

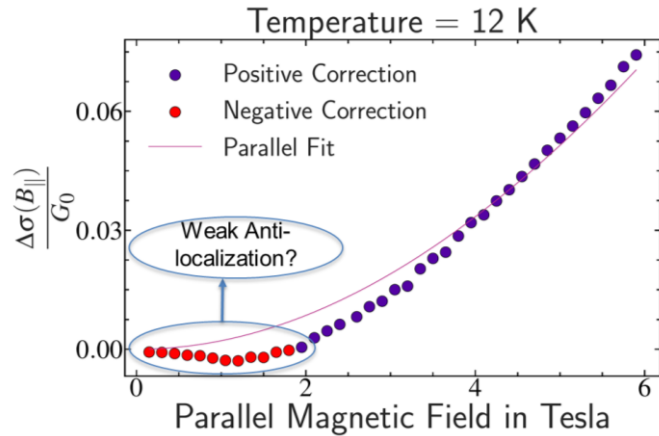


Figure 2. Variation of the conductivity σ as a function of the magnetic field B measured at low temperature (here 12 K) for a MXene thin film of formula $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$: the positive correction (in blue) corresponds to the WL, the (small) negative contribution (in red) to the WAL.

Objective:

The aim of this internship is to investigate the possibility of enhancing spin-orbit coupling in thin films of MXene, by depositing on the MXene layer **impurities with strong spin-orbit coupling**, such as low concentrations of gold or platinum atoms.

This deposition will be carried out by vacuum evaporation via an electron beam of metal targets, directly on MXene films in the DIVA (Variable Incidence Deposition) deposition chamber. This unique and original chamber, developed specifically at Institut Pprime, has several advantages: (i) the possibility of depositing gold under oblique incidence, making it possible to **finely control very small quantities of deposited material**, up to the limit of a few isolated atoms; (2) the possibility of **monitoring the optical response of thin films in real time** by in situ measurements (transmittance or reflectance) during deposition, allowing to precisely characterize the quantity of deposited material and its organization. These structural parameters (in particular the aggregation or not of gold atoms) can also be characterized at Institut Pprime by transmission electron microscopy, X-ray diffraction, and by ex situ optical methods such as ellipsometry, according to the needs revealed during the internship.

The essential part of the internship will then consist in characterizing the spin-orbit coupling of these films. To do this, the Institut Pprime owns a cryostat (PPMS) allowing to reach **low temperatures of up to 2 Kelvin** (close to absolute zero), and **strong magnetic fields of up to 9 Tesla**. The analysis of the resistance measurements of thin films as a function of temperature and magnetic field using weak localization models (taking into account the quantum and therefore wave-like nature of free electrons) will allow to quantify the WAL and thus the amplitude of the spin-orbit coupling, as illustrated in Figure 2. The strong spin-orbit coupling expected in these new systems should increase its impact in terms of potential applications.

Candidate profile

We are looking for a Master 2 student with a solid background in solid state physics, physics-chemistry, or materials physics, showing great scientific curiosity and good motivation to carry out all experimental work, from sample preparation to characterization, and their interpretation.

Contacts:

Simon Hurand	simon.hurand@univ-poitiers.fr
Julien Ramade	julien.ramade@univ-poitiers.fr
Vincent Mauchamp	vincent.mauchamp@univ-poitiers.fr
David Babonneau	david.babonneau@univ-poitiers.fr