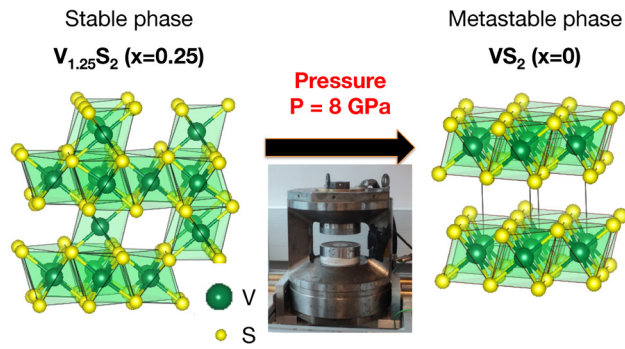


## La pression pour contrôler le dopage électronique

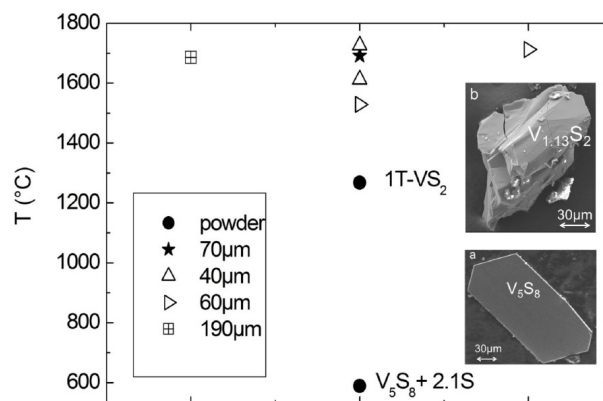
**Le contrôle du dopage dans les semi-conducteurs est à la base du fonctionnement des dispositifs électroniques actuels, constitués de structures hybrides MOS (mé-tal, oxyde, semi-conducteur). L'évolution de ces structures est cependant limitée par le choix restreint des matériaux compatibles avec le silicium. Récemment, il y a eu un fort intérêt pour des matériaux alternatifs comme les dichalcogénures bidimensionnels  $A_xMX_2$  ( $M =$  métal de transition;  $X = S$  or  $Se$ ), où le dopage est réalisé par l'insertion d'un donneur de charge  $A$  inséré entre les feuillets constitutifs du matériau. Or, les méthodes d'insertion traditionnelles à pression ambiante ne permettent de faire varier le taux de dopage  $x$  que dans une gamme limitée et ceci seulement pour quelques composés comme  $TiSe_2$  et  $MoS_2$ . Des membres de l'équipe « Design et Etude de nouveaux MATériaux à propriétés remarquables » (DEMARE) de l'IMPMC, viennent de franchir une nouvelle étape en utilisant la haute pression pour contrôler  $x$  dans une gamme importante, en stabilisant des phases métalliques ou semi-conductrices instables à pression ambiante.**

Les chercheurs de l'IMPMC ont trouvé ce résultat dans le composé bidimensionnel  $V_xVS_2$  (ou  $V_{1+x}S_2$ , voir fig. 1), métastable pour  $x < 0.25$ , en développant une voie originale de synthèse en deux étapes qui permet la formation de monocristaux. La première étape consiste en la synthèse de monocristaux de la phase stable  $V_{1.25}S_2$  (ou  $V_5S_8$ ) par une voie standard de chimie du solide à pression ambiante (voir fig. 2). Ensuite, les monocristaux ont été mélangés avec du soufre en poudre et soumis à des conditions de haute température (1600 °C) et haute pression (4-6 GPa) dans une presse Paris-Edimbourg<sup>1</sup> (voir fig. 1). À ces températures, le soufre se trouve en phase liquide et il est possible que ces conditions, dites hydrothermales, jouent un rôle fondamental dans la cinétique de formation des monocristaux. À noter que  $x$  peut être réduit jusqu'à 0 en appliquant une haute pression allant jusqu'à 8 GPa (voir fig. 1). Cette réduction importante permet de transformer la phase initiale avec  $x=0.25$ , métallique et stable en conditions ambiantes, en une phase caractérisée par  $x=0$ , semi-conductrice et métastable aux pressions et températures normales.



**Figure 1**

Schéma de la désintercalation du vanadium entre feuillets de  $VS_2$  contrôlée par la pression durant la synthèse. La phase de gauche, thermodynamiquement stable, correspond à une concentration  $x = 0.25$  d'atomes vanadium intercalés. Dans la phase de droite, métastable, aucun atome n'est intercalé ( $x = 0$ ). Les atomes de vanadium (V) et de soufre (S) sont indiqués en vert et en jaune, respectivement. La photo au centre montre la presse Paris-Edimbourg utilisée pour la synthèse sous haute pression.



**Figure 2**

Conditions de formation des cristaux de  $V_{1+x}S_2$  à partir de cristaux de  $V_{1.25}S_2$  dans un diagramme de phase température-pression. Les images de microscopie électronique à balayage montrent la morphologie et la taille des cristaux. La légende indique la taille des cristaux obtenus pour des conditions différentes de synthèse.

Le contrôle du dopage dans  $V_{1+x}S_2$  par la route de sulfuration hydrothermale offre des perspectives intéressantes car la même voie est applicable à une large gamme d'espèces intercalées et à tout composé lamellaire. De plus, la stabilisation par la pression d'un composé métastable comme  $V_{1+x}S_2$  aux propriétés métalliques, semi-conductrices ou isolantes selon  $x$ , ouvre la voie aux applications de couches minces de dichalcogénures à densité de porteurs contrôlée. En effet, il est envisageable de contrôler  $x$  par les contraintes mécaniques engendrées par le substrat dans la couche. Cela permettrait la réalisation de structures métal-isolant-semi-conducteur à partir d'un même matériau de base, ce qui constituerait un avantage clair par rapport à l'actuelle technologie hybride MOS.

### Référence

"High-Pressure Control of Vanadium Self-Intercalation and Enhanced Metallic Properties in 1T- $V_{1+x}S_2$  Single Crystals"

H. Moutaabbid, Y. Le Godec, D. Taverna, B. Baptiste, Y. Klein, G. Loupias and A. Gauzzi  
*Inorganic Chemistry* 55, 6481–6486 (2016).

### Contacts

Hicham Moutaabbid : Hicham.Moutaabbid@impmc.upmc.fr

Andrea Gauzzi : andrea.gauzzi@impmc.upmc.fr