

LA NANO-GÉODYNAMIQUE : UNE SPÉCIALITÉ LILLOISE ?

par Patrick CORDIER



LES CHERCHEURS

L'équipe de recherche Plasticité, dirigée par le professeur Philippe Carrez, est une composante de l'Unité Matériaux et Transformations (UMET) de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lille. Elle comporte deux professeurs et trois maîtres de conférences. A l'heure où sont écrites ces lignes trois chercheurs contractuels y travaillent et deux doctorants y préparent leurs thèses.

LES SUJETS

La *nano-géodynamique* repose sur le pari que certaines réponses concernant l'évolution dynamique de notre planète trouvent leur origine et leur explication dans des mécanismes microscopiques au sein des roches et de leurs minéraux constituants. Cette discipline est née aux Etats-Unis dans les années soixante dans le sillage de D.T. Griggs. Depuis, d'autres centres ont porté haut cette discipline. On pense bien entendu à l'Australie (Canberra) autour de M.S. Paterson, mais aussi à la France qui a une longue tradition d'excellence en métallurgie physique et physique du solide (J. Friedel) où les concepts de base de la déformation des matériaux ont été forgés.

En France, la convergence entre la métallurgie physique et la géologie a été incarnée par la collaboration entre J.P. Poirier et A. Nicolas qui a donné lieu à un livre marquant « *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks* ».

A Lille, c'est J.C. Doukhan qui a installé durablement cette thématique aux côtés de B. Escaig dans le Laboratoire de Structure et Propriétés de l'Etat Solide (ancêtre de l'UMET) qu'il venait de monter. Spécialiste de microscopie électronique en transmission, J.C. Doukhan a fait émerger à Lille un centre de microscopie aujourd'hui régional qui a été la compétence centrale et la spécificité reconnue internationalement de l'équipe.

En 1995, P. Cordier a ouvert le chantier, alors vierge, des mécanismes de plasticité des minéraux du manteau terrestre. Grâce à une collaboration au long cours avec le Bayerisches Geoinstitut (BGI), la plupart des minéraux importants du

manteau (jusqu'à environ 700 km de profondeur) ont été déformés en presses multienclumes afin de caractériser les mécanismes de déformation actifs, à Lille, en microscopie électronique.

Depuis une quinzaine d'années, une nouvelle compétence a émergé sous l'impulsion de P. Carrez : la modélisation numérique multiéchelle de la plasticité. Cette science en émergence repose sur deux convictions. D'une part que nous disposons de concepts suffisamment robustes pour comprendre la plasticité des matériaux, d'autre part, que nous avons aujourd'hui accès à des puissances de calcul qui nous permettent un traitement satisfaisant de systèmes réalistes. Cette nouvelle compétence nous a permis de faire deux avancées majeures : d'une part d'aborder le comportement de minéraux pas ou peu accessibles à l'expérimentation, jusqu'à la frontière avec le noyau. D'autre part, de modéliser le comportement des minéraux inaccessibles à l'expérimentation, en particulier pour les vitesses de déformations infiniment lentes de la convection mantellique. Sans oublier l'enrichissement que constitue l'échange permanent entre théorie et expérience.

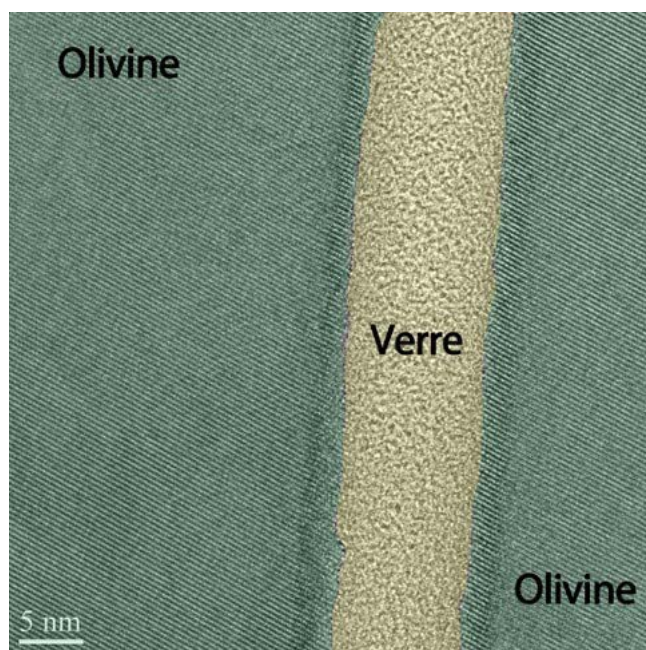
QUELQUES RÉSULTATS

L'olivine et le manteau supérieur

Il est difficile d'imaginer que ce minéral si étudié puisse encore réserver des surprises, et pourtant que l'on en juge !

En 2004, H. Couvy montre pendant sa thèse (en cotutelle avec le BGI) que les mécanismes de déformation intracristalline de l'olivine (portés par des défauts cristallins appelés dislocations) sont affectés par la pression. Or ceux-ci sont couramment utilisés pour interpréter les données d'anisotropie sismique comme des traces fossiles des écoulements dans le manteau supérieur. L'affaiblissement de ce signal en dessous de 250 km était interprété comme un indice de prééminence des mécanismes de diffusion alors qu'il s'explique par ce changement de mécanismes. Ces résultats ont été publiés dans *Nature* en 2005 (Mainprice *et al.*). Les dislocations dans

l'olivine ont fait l'objet de beaucoup d'études, on sait cependant que ces défauts ne sont pas suffisants dans ce minéral orthorhombique pour rendre compte d'une déformation générale. D'autres mécanismes doivent être à l'œuvre et l'attention se porte depuis une dizaine d'années sur les joints de grains. D'autres défauts cristallins, longtemps ignorés, peuvent rendre compte d'une déformation localisée dans ces parois entre les grains cristallins : les disclinaisons. Ces défauts de rotation très particuliers et très difficiles à mettre en évidence ont été observés pour la première fois dans l'olivine par notre équipe (Cordier *et al.* Nature 2014). Nous pensons qu'ils peuvent rendre compte d'une partie importante de la plasticité dans le manteau asthénosphérique. Mais probablement pas dans la lithosphère ! Dans un article publié en mars 2021 dans Nature (Samae *et al.*), nous montrons que sous l'influence de concentrations de contraintes localisées, ces joints de grains peuvent se vitrifier. Or le verre d'olivine, comme tous les verres, se ramollit considérablement lorsque l'on atteint une température critique appelée la température de transition vitreuse, les souffleurs de verre le savent bien. Pour l'olivine, cela se traduit autour de 1 000 °C par une grande facilité de glissement intergranulaire. Nous proposons que cette chute de viscosité pourrait rendre compte de celle observée à la frontière entre la lithosphère et l'asthénosphère.



Lamelle de cisaillement amorphe dans l'olivine après déformation à 1 000 °C, 5 GPa (C. Bollinger). Microscopie électronique en transmission à haute résolution (colorisée pour une meilleure visualisation). Samae *et al.* 2021.

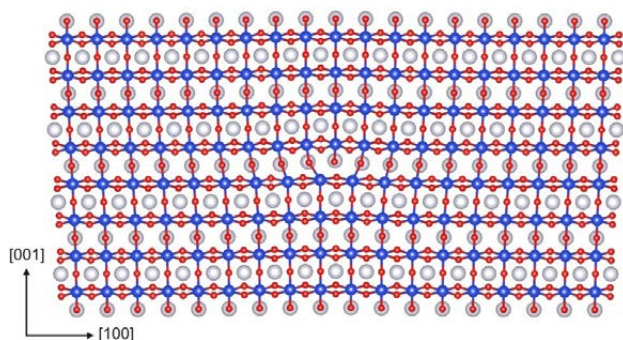
La manteau inférieur : un oxyde de fer et de magnésium et un silicate

Cet assemblage permet de rendre compte au premier ordre du manteau inférieur. Nous avons beaucoup travaillé

sur l'oxyde de magnésium qui, outre son importance dans le manteau, a été notre outil de transfert entre les matériaux simples (métaux) d'où viennent nos concepts et les minéraux auxquels nous les appliquons. Dans le cadre de la thèse de J. Amodeo, nous avons élaboré pour la première fois notre méthodologie numérique. Elle consiste (i) à se baser sur les premiers principes de la mécanique quantique pour modéliser les défauts cristallins (dislocations) à l'échelle atomique, (ii) à modéliser leur mobilité en fonction de la température et de la contrainte, (iii) enfin à modéliser le comportement collectif de ces dislocations. Une telle approche, basée sur la physique des processus permet d'intégrer de manière robuste l'influence de la pression, mais aussi de la vitesse de déformation comme paramètre intrinsèque. Nous avons, pour la première fois pu proposer des équations de comportement pour les vitesses de déformation du manteau, sans extrapolation (Cordier *et al.* Nature 2012). Cette approche a ensuite été appliquée à la bridgmanite, le silicate de magnésium et de fer de structure pérovskite qui prédomine dans le manteau inférieur (et représente près de la moitié de la masse de la Terre). Nous avons été les premiers à déformer ce minéral dans les conditions de pression et de température du manteau terrestre (Cordier *et al.* Nature 2004). Dans le cas de la bridgmanite, nous avons constaté que le glissement des dislocations est rendu extrêmement difficile sous pression. Ce minéral est indéformable dans les conditions du manteau. Cela nous a conduit à proposer un mécanisme original, basé sur la montée pure des dislocations (Reali *et al.* Sci. Rep. 2019), dont nous pensons qu'il est un mécanisme majeur pour la déformation des intérieurs planétaires.

La frontière noyau-manteau

La couche anciennement nommée D", qui tapisse le fond du manteau présente des structures très particulières à propos desquelles nous avons acquis beaucoup de connaissances grâce aux travaux récents de la sismologie. C'est aussi dans ce contexte qu'est apparue la plus grande découverte récente de physique des minéraux avec la transformation de la bridgmanite en une phase plus dense : la post-pérovskite. Cette phase qui n'est stable que vers 130 GPa possède une structure en couche très particulière. Grâce à notre approche numérique, nous avons pu être les premiers à modéliser ses dislocations (Carrez *et al.* Nature 2007). Nous avons eu la surprise de constater que les dislocations dans la post-pérovskite peuvent rester très mobiles sous ces pressions extrêmes si elles glissent le long des couches de la structure. La déformation est donc très hétérogène, mais possible, ce qui fournit une explication possible à l'atténuation sismique observée dans D".



Structure de cœur d'une dislocation [100] dans la post-perovskite MgSiO_3 à 130 GPa (Thèse A. Goryaeva). Cette dislocation glisse très facilement, même à cette pression.

EN GUISE DE CONCLUSION

L'héritage des pères fondateurs reste bien vivant dans notre équipe. La dynamique des intérieurs planétaires pose à la physique de la déformation des défis originaux qui constituent encore aujourd'hui un potentiel de découvertes très riche. Plus encore, il nous semble que s'ouvre seulement l'ère « 2.0 » de la discipline. Si l'application des concepts de la métallurgie physique aux minéraux s'est montrée une étape extraordinairement fertile, nous sommes aujourd'hui à un stade où la prise en compte des spécificités de nos matériaux, ou des conditions dans lesquelles ils sont plongés, nous amènent à proposer des mécanismes spécifiques. La montée pure des dislocations ou la déformation par amorphisation sont deux exemples sur lesquels nous continuerons à faire porter nos efforts.

RÉFÉRENCES

- V. SAMAE, P. CORDIER, S. DEMOUCHEY, C. BOLLINGER, J. GASC, S. KOIZUMI, A. MUSSI, D. SCHRYVERS & H. IDRISSE (2021) Stress-induced amorphization triggers deformation in the lithospheric mantle. *Nature* 591, 82–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03238-3>
- R. REALI, J. VAN ORMAN, J. PIGOTT, J.-M. JACKSON, F. BOIOLI, P. CARREZ & P. CORDIER (2019) The role of diffusion-driven pure climb creep on the rheology of bridgmanite under lower mantle conditions. *Scientific Reports*, 9, 2053. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38449-8>
- P. CORDIER, S. DEMOUCHEY, B. BEAUSIR, V. TAUPIN, F. BAROU & C. FRESSENGEAS (2014) Disclinations provide the missing mechanism for deforming olivine-rich rocks in the mantle. *Nature*, 507, 51–56, doi: 10.1038/nature13043.
- P. CORDIER, J. AMODEO & PH. CARREZ (2012) Modelling the rheology of MgO under Earth's mantle pressure, temperature and strain-rates. *Nature*, 481, 177–180. doi: 10.1038/nature10687
- PH. CARREZ, D. FERRÉ & P. CORDIER (2007) Implications for plastic flow in the deep mantle from modelling dislocations in MgSiO_3 minerals. *Nature*, 446(7131), 68–70
- D. MAINPRICE, A. TOMMASI, H. COUVY, P. CORDIER & D. FROST (2005) Pressure sensitivity of olivine slip systems and seismic anisotropy of Earth's upper mantle. *Nature*, 433, 731–733.
- P. CORDIER, T. UNGÁR, L. ZSOLDOS & G. TICHY (2004) Dislocation creep in MgSiO_3 Perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle. *Nature*, 428, 837–840. Doi: 10.1038/nature02472.