



Promotion IUF 2014
Rapport d'activité (2014 - 2019)

- Nom : **Merkel**
- Prénom : **Sébastien**
- Date de naissance : **11 sep 1974**
- Grade : **Professeur des université**
- Discipline principale : **Géosciences / géomatériaux**
- CNU : **28**
- Université ou établissement d'appartenance : **Université de Lille**
- Unité de recherche d'appartenance : **UMET UMR CNRS 8207**
- Catégorie : **Junior**

THEMATIQUE DE RECHERCHE :

Ma recherche porte sur la formation et la dynamique de la terre. Je réalise des expériences dans les conditions de pression et température de l'intérieur de la terre pour comprendre le développement de microstructures dans les polycristaux, leurs propriétés mécaniques, et l'effet de transformations de phase. J'intègre ensuite mes résultats expérimentaux dans des modèles de comportement de polycristaux, analysant l'effet des microstructures sur la propagation d'onde, et en comparant les résultats de ces modèles à des observations sismiques. Ces travaux ont pour but de contraindre la dynamique et la formation du manteau et noyau terrestre.

RÉSUMÉ SCIENTIFIQUE À PROPOS DE LA RÉALISATION DU PROJET DE RECHERCHE IUF (2 pages maximum) :

Avancées majeures / État d'achèvement / réorientations éventuelles au cours des 5 ans / Perspectives ouvertes par le travail réalisé

Le projet de recherche déposé lors dans la demande de délégation à l'IUF portait sur les effets de transformations de phase et de cinétique sur la microstructure des minéraux, la propagation des ondes sismiques, et leur lien avec la dynamique de l'intérieur la terre. En effet, l'étude de la structure, la dynamique, et l'histoire de la terre repose sur un nombre d'observables limité. Ainsi, l'interprétation de mesures de temps de trajet, de réflexions, et de formes des signaux sismiques ayant traversé le manteau et le noyau terrestres est fondamentale pour contraindre la dynamique des couches profondes de notre planète. Ces mesures font partie des rares observables dont nous disposons.

Lors de ma délégation à l'IUF, je voulais ré-aborder la question des transformations de phase des minéraux du manteau et de leur lien avec les observables sismiques. Les transitions minérales sont, depuis plusieurs décennies, associées à des réflecteurs sismiques. Elles sont la sources des discontinuités entre le manteau supérieur, la zone de transition, ou le manteau inférieur. Cependant, les signaux sismiques provenant de ces interfaces sont beaucoup plus riches que de simples réflexions. On observe ainsi des variations d'amplitude des ondes réfléchies, des conversions d'ondes P en ondes S (et inversement), des modifications de polarité, etc. L'interprétation de ces signaux, en revanche, demande de bien comprendre non seulement la cristallographie des

transformations minérales associées, mais aussi les microstructures qu'elles induisent (tailles de grains, orientations des minéraux, etc).

Avant le dépôt de projet IUF, j'avais commencé le développement d'une nouvelle technique expérimentale, reposant sur la diffraction multi-grains permettant de suivre plusieurs centaines de grains lors de processus dynamiques, tels que des transformations de phase, et ce in-situ sous haute pression et haute température. Je voulais asseoir le principe de la technique et l'appliquer aux transformations mantelliques. J'ai donc commencé ma délégation par stabiliser le protocole expérimental développé pendant le post-doctorat d'Angelika Rosa (2013-2014) et faire valider les résultats obtenus par le biais de publications (Rosa *et al* (2015, 2016). J'ai ensuite bénéficié d'une bourse de doctorat couplée Région Nord Pas de Calais / Université de Lille pour débiter la thèse de Christopher Langrand (2014-2017) et prendre la suite de ces travaux. J'ai enfin cherché à mettre en place une collaboration internationale composée d'experts de physique des minéraux mais aussi de sismologie de la terre profonde, et ce afin de disposer de toutes les compétences nécessaires à ce projet.

La collaboration internationale est constituée de Christine Thomas (Univ. Münster, Allemagne), Sergio Speziale (GFZ Potsdam, Allemagne), et Carmen Sanchez-Valle (Univ. Münster, Allemagne). Nous avons débuté le travail d'interprétation de signaux sismiques en provenance de réflecteurs du manteau, avec une publication à la clé (Saki *et al*, 2018). Nous nous sommes ensuite reposés sur ces travaux pour déposer un projet conjoint [ANR-DFG TIMEleSS](#), pour lequel nous avons obtenu 700 k€ en 2018, avec le soutien supplémentaire du partenariat Hubert-Curien PROCOPE pour l'échange d'étudiants et de post-doctorants entre nos sites.

En parallèle du montage et dépôts multiples du projet TIMEleSS, Christopher Langrand a réalisé de grands progrès théoriques et expérimentaux concernant les transformations de phase dans la manteau. Ce travail, intégralement financé sur les moyens accordés par l'IUF, a donné lieu à 2 publications (Langrand *et al*, 2017, 2019), dont une publication dans *Nature Communication* en décembre 2019. Dans cette publication, nous avons étudié la cinétique de la transformation perovskite-post-perovskite (pertinente à des profondeurs de 2700 km). Les résultats expérimentaux démontrent que la transformation est très rapide aux échelles de temps géologiques et qu'elle n'a donc pas d'effet sur la dynamique du manteau profond. En revanche, les mesures permettent de réconcilier la détection de structures par la sismologie et les contraintes de minéralogie. En effet, avec les temps de transformations mesurés, certaines ondes sismiques pourraient être amplifiées lorsqu'elles traversent des zones où la transformation se produit. Ces travaux permettent ainsi de lever les contradictions entre mesures de minéralogie expérimentale et sismologie. La publication des résultats de la thèse de C. Langrand n'est pas terminée. Il reste, en particulier, une publication importante sur les microstructures induites par la transformation perovskite-post-perovskite, publication qui sera soumise à des journaux à « haut facteur d'impact ».

Depuis 2018 et le début du projet TIMEleSS, nous avons maintenant 4 doctorants (2 à Lille et 2 à Münster, Estelle Ledoux, Jeffrey Gay, Matthias Krug, Federica Rochira), dans les domaines de la sismologie et de la minéralogie expérimentale. Ces doctorants travaillent ensemble pour comprendre et interpréter les signatures sismiques dues aux réflecteurs dans le manteau profond. Ma délégation à l'IUF a été fondamentale pour la mise en place de cette thématique, en m'offrant la disponibilité pour stabiliser les dispositifs expérimentaux, les méthodes de traitement de données, et un solide réseau de collaboration pour l'interprétation des résultats. 6 publications sont déjà sorties et plusieurs sont en préparation.

Notons, aussi, que notre impact dans l'étude de transformations minérales par la technique de diffraction multigrains est maintenant reconnu. L'*International Union of Crystallography* a mis en place un groupe de travail pour pour une standardisation des techniques et

procédures de diffraction multigrains. Je fais partie de ce comité et représente les domaines de géosciences et d'expérimentation en conditions extrêmes de pression et de température.

Depuis 2 ans maintenant, je prépare de nouveaux projets. Je compte m'intéresser aux propriétés de la graine du noyau terrestre, en l'abordant sous un angle nouveau lié à l'atténuation des ondes sismiques. J'ai donc, une nouvelle fois, mis à profit ma délégation l'IUF pour lancer et financer des expériences pilotes et constituer un réseau de collaboration international sur le sujet avec, pour objectif, le dépôt d'un projet ERC en 2020 ou 2021. J'ai ainsi engagé des travaux avec Carlos Tomé (Los Alamos National Labs, USA), Arianna Gleason et Wendy Mao (Stanford University, USA) et Anne Pommier (Univ. Californie San Diego). Les travaux sont en cours et n'ont pas encore donné lieu à publication. Les premières devraient sortir en 2020.

Enfin, la délégation à l'IUF m'a permis de finir et publier de nombreux projets en cours au début de ma délégation. Ainsi, sur la période 2014-2019, j'ai publié 25 articles dans des revues scientifiques d'envergure internationale sur des sujets divers et variés.

Pour conclure, ces 5 années de délégation à l'IUF m'ont permis

- de dégager du temps pour
 - finir et maintenir les travaux et collaborations engagés, donnant lieu à 19 publications,
 - monter un nouveau projet scientifique et réseau de collaboration lié aux transformations de phase dans les minéraux du manteau, avec 6 publications déjà parues, l'obtention d'un projet ANR-DFG en 2018, et de nombreuses publications à venir,
 - débiter la mise en place d'un nouveau projet orienté vers la graine du noyau terrestre, à déposer en 2020-2021.
- de financer
 - mes activités, celles de la post-doctorante A. Rosa (venue sur une bourse suisse), et du doctorant C. Langrand à un moment où je ne disposais que de très peu d'autres financements,
 - mes déplacements et expériences pilotes, pour la mise en place du projet ANR-DFG TIMEleSS obtenu en 2018, ainsi que pour un projet sur la graine terrestre, à déposer en 2020-2021.

La majeure partie de ces objectifs n'auraient tout simplement pas été atteints sans le soutien de l'IUF, de part la réduction de ma charge d'enseignement et les fonds mis à ma disposition.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE DE LA PÉRIODE 2014-2019 :

Publications scientifiques / Communications orales invitées / Ouvrages / Brevets / Autres réalisations

Publications

1. C. Langrand, D. Andrault, S. Durand, Z. Konôpková, N. Hilairret, C. Thomas, S. Merkel, Kinetics and detectability of the bridgmanite to post-perovskite transformation in the Earth's D'' layer, *Nature Communications*, **10**, 5680 (2019) [doi: [10.1038/s41467-019-13482-x](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13482-x)]
2. S. Speziale, J. Immoor, A. Ermakov, S. Merkel, H. Marquardt, and H.-P. Liermann, The equation of state of TaC_{0.99} by X-ray diffraction in radial scattering geometry to 32 GPa and 1073 K, *Journal of Applied Physics*, **126**, 105107 (2019) [doi: [10.1063/1.5115350](https://doi.org/10.1063/1.5115350)]
3. B. Reynard, R. Caracas, H. Cardon, G. Montagnac, S. Merkel, High-pressure yield strength of rocksalt structures using quartz Raman piezometry, *Comptes Rendus Geoscience*, **351**, 71-79 (2019) [doi: [10.1016/j.crte.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.02.001)]

4. P. Raterron, C. Bollinger, S. Merkel, Olivine intergranular plasticity at mantle pressures and temperatures, *Comptes Rendus Geoscience*, **351**, 80-85 (2019) [doi: [10.1016/j.crte.2018.10.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.10.001)]
5. J. Amodeo, S. Merkel, C. Tromas, Ph. Carrez, S. Korte-Kerzel, P. Cordier and J. Chevalier, Dislocations and Plastic Deformation in MgO Crystals: A Review, *Crystals*, **8**, 240 (2018) [doi: [10.3390/cryst8060240](https://doi.org/10.3390/cryst8060240)]
6. M. Roskosz, E. Deloule, J. Ingrin, C. Depecker, D. Laporte, S. Merkel, L. Remusat, H. Leroux, D/H fractionation during hydration and dehydration of silicate glasses, melts and nominally anhydrous minerals, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **233**, 14-32 (2018) [doi: [10.1016/j.gca.2018.04.027](https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.04.027)]
7. J. Immoor, H. Marquardt, L. Miyagi, F. Lin, S. Speziale, S. Merkel, J. Buchen, A. Kurnosov, H.-P. Liermann, Evidence for {100}<011> slip in ferropericlasite in Earth's lower mantle from high-pressure/high-temperature experiments, *Earth and Planetary Science Letters*, **489**, p. 251-257 (2018) [doi: [10.1016/j.epsl.2018.02.045](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.045)]
8. M. Saki, C. Thomas, S. Merkel, J. Wookey, Detecting seismic anisotropy above the 410 km discontinuity using reflection coefficients of underside reflections, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **274**, 170-183 (2018) [doi: [10.1016/j.pepi.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.12.001)]
9. F. Lin, N. Hilairet, P. Raterron, A. Addad, J. Immoor, H. Marquardt, C. N. Tomé, L. Miyagi, S. Merkel, Elasto-viscoplastic self consistent modeling of the ambient temperature plastic behavior of periclasite deformed up to 5.4 GPa, *Journal of Applied Physics*, **122**, 205902 (2017) [doi: [10.1063/1.4999951](https://doi.org/10.1063/1.4999951)]
10. C. Langrand, N. Hilairet, C. Nisr, M. Roskosz, G. Ribárik, G.B.M. Vaughan, S. Merkel, Reliability of Multigrain Indexing for Orthorhombic Polycrystals above 1 Mbar: Application to MgSiO₃-Post-Perovskite, *Journal of Applied Crystallography*, **50**, 120-130 (2017) [doi: [10.1107/S1600576716018057](https://doi.org/10.1107/S1600576716018057)]
11. A. D. Rosa, M. Merkulova, G. Garbarino, V. Svitlyk, J. Jacobs, C. Sahle, O. Mathon, M. Munoz, S. Merkel, Amorphous boron composite gaskets for in situ high pressure and high temperature studies, *High Pressure Research*, **36**, 564-574 (2016) [doi: [10.1080/08957959.2016.1245297](https://doi.org/10.1080/08957959.2016.1245297)]
12. A. D. Rosa, N. Hilairet, S. Ghosh, J.-P. Perrillat, G. Garbarino, S. Merkel, Evolution of grain sizes and orientations during phase transitions in hydrous Mg₂SiO₄, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 7161-7176 (2016) [doi: [10.1002/2016JB013360](https://doi.org/10.1002/2016JB013360)]
13. B. Yue, F. Hong, S. Merkel, D. Tan, J. Yan, B. Chen, and H.-K. Mao, Deformation behavior across the zircon-scheelite phase transition, *Physical Review Letters*, **117**, 135701 (2016) [doi: [10.1103/PhysRevLett.117.135701](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.135701)]
14. C. Bollinger, P. Raterron, O. Castelnaud, F. Detrez, S. Merkel, Textures in Deforming Forsterite Aggregates up to 8 GPa and 1673 K, *Physics and Chemistry of Minerals*, **43**, 409-417 (2016)
15. A. Lincot, Ph. Cardin, R. Deguen, S. Merkel, Multiscale model of global inner-core anisotropy induced by hcp-alloy plasticity, *Geophysical Research Letters*, **43**, (2016) [doi: [10.1002/2015GL067019](https://doi.org/10.1002/2015GL067019)]
16. A. D. Rosa, N. Hilairet, S. Ghosh, G. Garbarino, J. Jacobs, J.-P. Perrillat, G. Vaughan and S. Merkel, In situ monitoring of phase transformation microstructures at Earth's mantle pressure and temperature using multi-grain XRD, *Journal of Applied Crystallography*, **48**, 1346-1354 (2015) [doi: [10.1107/S1600576715012765](https://doi.org/10.1107/S1600576715012765)]
17. S. Merkel and N. Hilairet, Multifit/Polydefix: a Framework for the Analysis of Polycrystal Deformation using X-Rays, *Journal of Applied Crystallography*, **48**, 1307-1313 (2015) [doi: [10.1107/S1600576715010390](https://doi.org/10.1107/S1600576715010390)]
18. F. Detrez, O. Castelnaud, P. Cordier, S. Merkel, and P. Raterron, Effective viscoplastic behavior of polycrystalline aggregates lacking four independent slip systems inferred from homogenization methods; application to olivine, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **83**, 199-220 (2015), abstract [doi: [10.1016/j.jmps.2015.05.022](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.05.022)]

19. A. Dewaele, C. Denoual, S. Anzellini, F. Occelli, M. Mezouar, P. Cordier, S. Merkel, M. Véron, and E. Rausch, Mechanism of the α - ϵ phase transformation in iron, *Physical Review B*, **91**, 174105 (2015) [doi: [10.1103/PhysRevB.91.174105](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.174105)]
20. A. Lincot, S. Merkel, P. Cardin, Is inner core seismic anisotropy a marker for plastic flow of cubic iron?, *Geophysical Research Letters*, **42**, 1326–1333 (2015) [doi: [10.1002/2014GL062862](https://doi.org/10.1002/2014GL062862)]
21. C. Bollinger, S. Merkel, P. Cordier, P. Raterron, Deformation of Forsterite Polycrystals at Mantle Pressure: Comparison with Fe-Bearing Olivine and the Effect of Iron on its Plasticity, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **240**, 95–104 (2015) [doi: [10.1016/j.pepi.2014.12.002](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.12.002)]
22. A. Lincot, R. Deguen, S. Merkel, P. Cardin, Seismic response and anisotropy of a model hcp iron inner core, *Comptes Rendus Geoscience* **346** 148–157 (2014) [doi: [10.1016/j.crte.2014.04.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2014.04.001)]
23. C. Nisr, G. Ribárik, T. Ungár, G. B. M. Vaughan, S. Merkel, Three-dimensional X-ray diffraction in the diamond anvil cell: application to stishovite, *High Pressure Research* **34** 158–166 (2014) [doi: [10.1080/08957959.2014.885021](https://doi.org/10.1080/08957959.2014.885021)]
24. C. Bollinger, P. Raterron, P. Cordier, S. Merkel, Polycrystalline olivine rheology in dislocation creep: Revisiting experimental data to 8.1 GPa, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **228** 211–219 (2014) [doi: [10.1016/j.pepi.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.12.001)]
25. P. Raterron, F. Detrez, O. Castelnau, C. Bollinger, P. Cordier, S. Merkel, Multiscale modeling of upper mantle plasticity: From single-crystal rheology to multiphase aggregate deformation, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **228** 232–243 (2014) [doi: [10.1016/j.pepi.2013.11.012](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.11.012)]

Communications orales invitées

1. S. Merkel, Phase transitions in the mantle, CREEP Innovative Training Network Final Workshop, Les Houches, France, Janvier 2019
2. S. Merkel, Les microstructures de matériaux géophysiques sous l'angle des grands instruments, Matériaux 2018, Strasbourg, France, Novembre 2018
3. S. Merkel, The Earth's inner core: a mineral physics perspective, SEDI (Study of the Earth's Deep Interior), Edmonton, Canada, Juillet 2018
4. S. Merkel, In-Situ Studies of Microstructures under Deep Earth Conditions: from Texture Analysis to Multigrain Crystallography, ICOTOM International Conference on the Textures of Materials, St George, UT, États-Unis, Novembre 2017
5. S. Merkel, Stress and microstructures under extreme conditions: advances and opportunities, PETRA IV Workshop: Extreme Conditions Research at the Ultra-Low Emittance Storage Ring PETRA IV, Hamburg, Allemagne, Octobre 2017
6. S. Merkel, R. Farla, N. Hilairret, Synchrotron-Based Extreme Condition Research Using Large Volume Presses, Research with High Energy X-Rays at Ultra-Low Emittance Sources, Hamburg, Allemagne, Février 2017
7. S. Merkel, Anisotropy and History of the Earth's Inner Core: Forward Models and Input from Mineralogy, Flow in the Deep Earth, Collège de France, Paris, France, Décembre 2016
8. S. Merkel, N. Hilairret, Carlos Tome, Deformation Twinning in Zn under High Pressure and the Effect of c/a Ratio on hcp Metals Plasticity, MRS Fall Meeting, Boston, États-Unis, Novembre 2016
9. S. Merkel, Apports des rayons X à l'étude de microstructures sous haute pression, Colloque Rayons X et Matière, Grenoble, France, Décembre 2015
10. S. Merkel, Études expérimentales de plasticité aux conditions de la terre profonde, MECAMAT, Aussois, France, Janvier 2015

11. S. Merkel, Anisotropy, textures, and slip systems in post-perovskite: experimental approach, ppv@10: a meeting for the 10th anniversary of the discovery of post-perovskite, Bristol, Royaume-Uni, Juin 2014
12. S. Merkel, Extracting of single crystal properties from measurements on polycrystals , Elastic Properties of Iron in Extreme Conditions, Takarazuka, Japon, Février 2014
13. S. Merkel, Understanding high pressure plasticity using x-ray diffraction, International Symposium on Plasticity and its Applications, Freeport, Bahamas, Janvier 2014

ENCADREMENT DOCTORAL : Direction de thèses

En cours

- 2018– : Jeffrey Philipp Gay, Université de Lille
Microstructures induced by phase transformations at the 650km discontinuity
- 2018– : Tommaso Mandolini, Université de Lille, co-encadré avec Nadège Hilairet
Déformation de roches de zones de subduction sous hautes pressions
- 2018– : Estelle Ledoux, Université de Lille, co-encadrée avec Damien Jacob
Microstructures dans les minéraux du manteau terrestre
- 2018– : Matthias Krug, Université de Münster, Allemagne, co-encadrée avec Carmen Sanchez
Microstructures de transformation dans les zones de subduction

Soutenue

- 2014–2017 : Christopher Langrand, Université de Lille, co-encadré avec N. Hilairet
Effet des transformations de phase sur la microstructure de minéraux du manteau terrestre

AUTRES AVANCEES SIGNIFICATIVES AU COURS DE LA PÉRIODE :

PRIX ET DISTINCTIONS SCIENTIFIQUES OBTENUS AU COURS DE LA PÉRIODE (indiquer les dates) :

Professeur invité, bourse Blaustein, Université de Stanford, Etats-Unis, Janvier-Mars 2020

Professeur invité, Ernest Cloos Memorial Scholar, Université John Hopkins, Batimore, Etats-Unis, à venir en 2020.

AUTRES OBSERVATIONS :

2018 : élu vice-président de la section *Mineral and Rock Physics* de l'*American Geophysical Union*. A ce titre, je suis membre du conseil de l'*American Geophysical Union* pour la période 2019-2022, suis vice-président de la section *Mineral and Rock Physics* en 2019-2020, et j'en prendrai la présidence en 2021-2022.

2015–2019 : représentant pour les *Dynamics and Extreme Conditions* au comité des utilisateurs du synchrotron ESRF

Acceptez-vous la mise en ligne de ce document sur le site internet de l'IUF : Oui