

Tracing differentiation processes through siderophile elements, from meteorites to giant ore deposits (DESIRED)

Contexte

Le projet DESIRED étudie la manière dont les éléments modérément à fortement sidérophiles — incluant l’Au, les PGE (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd), le Re, ainsi que des métaux associés tels que Cr, Co, Ni, Mo et W — sont distribués dans les matériaux terrestres et extraterrestres. Ces métaux se partitionnent préférentiellement dans les phases métalliques lors de la différenciation planétaire et ont donc été séquestrés dans le noyau terrestre très tôt dans l’histoire de la Terre. Leur fort appauvrissement dans la croûte et le manteau par rapport aux abondances solaires explique leur statut de métaux rares. Ils ont par ailleurs tendance à former des gisements économiquement significatifs uniquement lorsque des processus géodynamiques ou de surface spécifiques les concentrent, souvent par l’érosion de roches (ultra)mafiqes échantillonnant des réservoirs mantelliques chimiquement distincts.

La compréhension du comportement des éléments sidérophiles offre une fenêtre unique sur les toutes premières étapes de l’accrétion de la Terre. Des assemblages distincts d’éléments présentant des affinités métalliques particulières se sont révélés particulièrement utiles pour reconstituer, au cours du temps, la composition isotopique des matériaux constitutifs de la planète. Un concept clé est celui du *late veneer*, correspondant à un apport tardif de matière météoritique survenu après la différenciation noyau-manteau et ayant enrichi les réservoirs silicatés de la Terre en éléments fortement sidérophiles (HSE). En déterminant les contributions relatives et les signatures isotopiques du matériel issu du *late veneer* par rapport au matériel antérieur, il devient possible d’identifier les abondances et la nature des apports météoritiques, d’affiner les modèles de croissance planétaire et de réconcilier des observations isotopiques divergentes, notamment celles suggérant des composants accrétés riches en volatils ou, au contraire, extrêmement pauvres en eau. Ces avancées peuvent contribuer à expliquer la formation de gisements géants riches en PGE ainsi que d’autres caractéristiques fondamentales de la Terre, telles que la présence d’eau liquide, les budgets volatils, un champ magnétique protecteur, la convection mantellique et l’évolution de la vie.

Objectifs

- **Origine des gisements de métaux précieux du craton du Kaapvaal**
Analyser des roches magmatiques mafiques âgées d’environ 3,5 à 2,0 Ga et les schistes associés afin de déterminer comment l’or et les PGE ont été transférés des réservoirs mantelliques vers la croûte. Le craton du Kaapvaal possède des enrichissements minéraux sans équivalent à l’échelle mondiale : le bassin du Witwatersrand a produit environ un tiers de tout l’or jamais extrait, tandis que le complexe du Bushveld voisin constitue la principale source mondiale de PGE. Malgré cette concentration exceptionnelle de métaux précieux, aucun modèle génétique unifié n’existe à ce jour. Cet objectif vise à tester si ces gisements reflètent des signatures isotopiques caractéristiques d’apports de *late veneer* ou, au contraire, des hétérogénéités mantelliques plus anciennes, antérieures au *late veneer*, possiblement liées à une différenciation noyau-manteau incomplète ou à des apports ultérieurs de matériel extraterrestre non différencié.

- **Contraintes apportées par les météorites sur les signatures isotopiques pré-*late veneer* et *late veneer***

Caractériser des météorites sélectionnées, en particulier les météorites à enstatite et les chondrites carbonées, afin de déterminer ce que chaque proxy isotopique (Cr, Ni, Mo, Ru, Os, W) enregistre. Les données de concentration, les plages isotopiques et les coefficients de partage à haute pression et haute température déterminés expérimentalement sont utilisés pour discriminer les matériaux incorporés précocement lors de l'accrétion terrestre de ceux ajoutés lors du *late veneer*. Les travaux existants suggèrent que la matière accrétée précocement était dominée par des compositions de type enstatite, tandis que la matière ajoutée tardivement pourrait ressembler aux chondrites carbonées CI. Cela implique un *late veneer* provenant de régions plus externes du Système solaire et potentiellement de masse plus faible que ce qui était précédemment estimé.

- **Préservation des signatures extraterrestres dans les calcaires phanérozoïques belges**

Appliquer les outils isotopiques développés dans les deux premiers objectifs à des successions calcaires phanérozoïques présentant des enrichissements en chrome et des indices d'apports extraterrestres, tels que la poussière cosmique. Cet objectif vise à tester si les signatures isotopiques des bombardements météoritiques peuvent survivre à la diagenèse et aux processus géologiques à long terme, permettant ainsi de reconstituer les flux anciens de matière extraterrestre et d'améliorer l'interprétation des archives sédimentaires.

- **Extension et curation de la collection de météorites antarctiques du RBINS**

Renforcer la taille, la qualité et l'utilité scientifique de la collection antarctique de météorites du RBINS grâce à des missions de collecte ciblées (BELARE 2022–2023 ; 2024–2025 et au-delà). La collection élargie, dépassant déjà 1 450 spécimens, fournit des échantillons de taille suffisante pour les analyses isotopiques de haute précision requises par l'objectif 2. L'amélioration des protocoles de curation soutient en outre l'accessibilité à long terme et la fiabilité de ces échantillons extraterrestres clés.

Conclusions

Au cours de la période du projet, des progrès substantiels ont été réalisés dans l'ensemble des axes de recherche majeurs, à commencer par des travaux approfondis sur le craton du Kaapvaal. Les analyses par microsonde électronique et LA-ICP-MS des silicates, sulfures, oxydes et phosphates ont révélé une diversité minéralogique importante ainsi que des preuves claires d'altérations post-cristallisation, soulignant l'impact potentiel des processus métamorphiques sur la distribution des éléments sidérophiles et les systèmes isotopiques. La digestion complète et la séparation chromatographique de huit échantillons du Kaapvaal, validées par comparaison avec des jeux de données antérieurs, révèlent une variabilité des HSE principalement contrôlée par la pétrologie, vraisemblablement dominée par des hétérogénéités à petite échelle. La nouvelle méthode de micro-distillation couplée à des mesures isotopiques par TIMS pour la mesure des isotopes de l'osmium a été mise en place avec succès, produisant des valeurs du standard DROSS cohérentes avec les données publiées (écarts $< 0,007$ en $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$). Ces analyses étant extrêmement chronophages, les travaux se poursuivent. L'article consacré à la caractérisation in situ de la distribution des HSE dans des chondrites ordinaires non équilibrées analysées par LA-ICP-MS est actuellement en préparation. En parallèle, des travaux menés à la VUB ont permis d'approfondir l'étude des signatures météoritiques dans les structures d'impact terrestres, incluant des mesures isotopiques collaboratives du Ru et du Cr.

Le programme de météorites antarctiques a également fortement progressé, la collection du RBINS dépassant désormais 1 450 spécimens à la suite de la mission de récupération 2022-2023 et de la campagne de terrain 2024-2025, qui a livré 110 nouveaux fragments dans les monts Belgica. Les activités de curation, de classification et d'imagerie micro-CT sont en cours et contribuent à la numérisation de la collection ainsi qu'au développement de futures expositions virtuelles, parallèlement à des publications issues d'analyses antérieures de particules cosmiques. Les travaux sur les micrométéorites fossiles issues de calcaires belges ont également fourni des résultats majeurs : 130 kg de roches carbonatées ont été traités, permettant la récupération de plus de 2 000 micrométéorites, dont des types rares et bien préservés contenant des silicates, constituant aujourd'hui l'une des plus grandes collections mondiales de ce type. Une caractérisation minéralogique et isotopique complète (SEM, XRF, EMPA, LA-ICP-MS, isotopes de l'O et du Fe) a permis de reconstituer un pic marqué de flux de micrométéorites précédant l'événement de Hangenberg, et a abouti à une publication dans *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Krämer Ruggiu et al., 2025), un second article consacré à la technique d'extraction étant en préparation. Enfin, l'engagement communautaire a été renforcé par l'organisation du 86^{ème} congrès annuel de la Meteoritical Society (27 juillet – 2 août 2024) par l'équipe ULB-VUB, incluant un atelier dédié à la curation des météorites au RBINS, renforçant encore la collaboration et la visibilité internationales.

Mots-clés

Éléments sidérophiles; différenciation planétaire; métaux précieux; craton du Kaapvaal; éléments du groupe du platine (EGP); géochimie isotopique; isotopes de l'osmium; météorites; curation des météorites antarctiques; micrométéorites; limite Dévonien–Carbonifère; événement de Hangenberg; genèse des gisements; processus mantelliques; LA-ICP-MS; TIMS; collections numériques.