

Proposition de sujet de thèse 2026

A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD : hammad@cerege.fr

(1) à remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

Tableau récapitulatif du sujet

Candidat(e)(1)	
Nom - Prénom :	
Date de naissance :	
Licence (origine, années, mention) :	
Mention et classement au Master 1 année (Xème sur Y)	
Mention et classement au S3 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au S4 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au M2 (année) (Xème sur Y)	
MASTER (nom, université)	
Sujet de doctorat proposé	Comment interpréter de façon fiable le signal paléomagnétique des météorites hydratées afin d'étudier le champ magnétique du disque proto-solaire ?
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)	Clara Maurel, Jérôme Gattacceca (HDR)
Laboratoire	CEREGE
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)	ANR JCJC (déposé), dotation nouvel entrant CNRS Clara Maurel (obtenu)

Sujet de doctorat proposé

Encadrants : Clara Maurel (cmaurel@cerege.fr), Jérôme Gattacceca (gattacceca@cerege.fr)

Laboratoire : CEREGE

Intitulé :

Comment interpréter de façon fiable le signal paléomagnétique des météorites hydratées afin d'étudier le champ magnétique du disque proto-solaire ?

How can we reliably interpret the paleomagnetic record of hydrated meteorites to study the magnetic field present in the sun's protoplanetary disk?

Descriptif :

Contexte. Comprendre la formation des planètes dans les disques protoplanétaires est l'un des plus grands défis actuels des sciences planétaires. Si notre compréhension des dernières étapes de la formation planétaire, qui nécessitent une population initiale d'objets kilométriques appelés planétésimaux, s'est considérablement affinée, le mécanisme à l'origine de l'accrétion de ces planétésimaux demeure énigmatique. Les disques protoplanétaires sont sculptés d'anneaux et de spirales où sont piégées les particules de poussière. Ces structures pourraient être des sites favorables à la formation des planétésimaux, mais d'importantes incertitudes persistent quant aux mécanismes responsables de la formation de ces anneaux. Une hypothèse majeure est que ces régions résultent des interactions entre les champs magnétiques et le gaz du disque. La caractérisation des champs magnétiques dans les disques et la quantification de leur influence sur la dynamique des particules de poussière constituent donc des étapes essentielles vers une compréhension globale du processus de formation planétaire. Des modèles numériques de formation et d'évolution des disques simulent des effets magnétiques complexes afin d'étudier l'influence des champs magnétiques sur le processus de formation planétaire. A ce stade, l'obtention de données empiriques fiables est essentielle pour orienter les modèles vers une représentation précise des champs de disques. Les météorites et les échantillons extraterrestres rapportés par des missions spatiales constituent une source

unique de données quantitatives sur l'intensité, la durée de vie et les variations radiales du champ magnétique d'un disque protoplanétaire (celui du soleil). En effet, la plupart des météorites sont des fragments de planétésimaux et contiennent des minéraux ferromagnétiques qui, selon leur nature, leur taille, leur structure cristalline, leur processus de formation et leur histoire thermique, peuvent conserver pendant des milliards d'années la mémoire des champs magnétiques auxquels elles ont été soumises dans le disque proto-solaire. Cette mémoire est appelée aimantation rémanente naturelle (*natural remanent magnetization*, NRM).

Motivation. L'étude paléomagnétique des météorites est particulièrement complexe car, le plus souvent, l'acquisition de la NRM est un processus non reproductible en laboratoire et les analyses doivent généralement être non destructives. Plus précisément, pour déterminer l'intensité d'un champ magnétique ancien (paléointensité), nous utilisons des lois empiriques reliant cette paléointensité à la NRM mesurée en laboratoire. Ces lois dépendent de la nature des minéraux porteurs de la NRM et du mécanisme d'acquisition de cette dernière. Pour la majorité des météorites susceptibles de porter la trace du champ magnétique de la nébuleuse solaire, la NRM n'a pu être acquise que lors de la cristallisation de minéraux ferromagnétiques secondaires résultant de l'altération aqueuse de leur planétésimal parent (aimantation rémanente chimique, *chemical remanent magnetization*, CRM). En l'absence de lois empiriques spécifiques aux CRM, plus de la moitié des études paléomagnétiques ayant estimé l'intensité du champ magnétique de la nébuleuse solaire présentent d'importantes incertitudes dans leurs résultats. Récemment, notre groupe a proposé la première loi empirique préliminaire reliant une CRM à une paléointensité (Maurel et Gattacceca, 2023). Cette étude ouvre la voie à un travail d'envergure dont l'objectif est d'établir des lois spécifiques aux différents minéraux et mécanismes de formation rencontrés dans les météorites. Il est important de noter que les CRM sont aussi très fréquentes dans les roches terrestres et sont parfois notre unique moyen de caractériser l'intensité et l'orientation du champ magnétique terrestre dans certaines périodes du passé. Ces lois empiriques auront donc également une grande valeur ajoutée pour la recherche en paléomagnétisme terrestre.

Objectif, méthode, perspectives. L'objectif de cette thèse de doctorat est d'établir les lois empiriques nécessaires à l'interprétation précise des CRM météoritiques et d'appliquer ces résultats pour déterminer des paléointensités robustes à partir de données paléomagnétiques de météorites hydratées (données publiées et à acquérir lors de la thèse). Ceci permettra d'obtenir un enregistrement considérablement enrichi et fiable des champs magnétiques dans le disque protoplanétaire solaire et de nourrir les échanges avec la communauté des modélisateurs de disques protoplanétaires. Pour cela, l'étudiant(e) réalisera des expériences de synthèses de minéraux sous champ magnétique contrôlé et des mesures magnétiques en laboratoire, sur produits de synthèse et sur météorites. Au cours de sa thèse, l'étudiant(e) pourra développer de solides compétences en magnétisme des roches, paléomagnétisme, pétrographie, analyse chimique et imagerie à haute résolution, ainsi qu'en design expérimental, analyse et interprétation de données. L'étudiant(e) sera encouragé(e) à participer à des conférences, et un séjour dans un laboratoire partenaire aux USA pourra être envisagé. Un soutien lui sera apporté dans l'élaboration de son plan de carrière. Du fait de l'omniprésence des CRM dans la nature, cette thèse ouvrira des perspectives de recherche futures en magnétisme extraterrestre et terrestre, ainsi que plus généralement en science des météorites.

Context. Understanding how planets form in protoplanetary disks is one of the greatest challenges in Planetary Sciences. While our understanding of the late stages of planet formation, which require an initial population of km-size objects called planetesimals, has become increasingly robust, the mechanism driving the anterior accretion of the planetesimals remains surprisingly elusive. Protoplanetary disks are carved by rings and spirals where dust particles are trapped. These structures are proposed to be favorable sites for planetesimal formation, but major uncertainties remain regarding the force(s) and mechanism(s) responsible for shaping the dust rings. One prominent idea is that these regions result from the interactions between magnetic fields and the gas of the disk. Characterizing protoplanetary magnetic fields and quantifying their influence on the dynamics of dust particles are therefore essential steps towards a global understanding of the planetary formation process. Numerical models of disk formation and evolution simulate complex magnetic effects to investigate the influence of magnetic fields on the planetary formation process. Obtaining reliable empirical data is now essential to guide their future developments towards an accurate representation of magnetic fields in protoplanetary disks. Meteorites and returned extraterrestrial samples are a unique source of quantitative knowledge on the strength, longevity and radial variations of a protoplanetary disk magnetic field inside a planet formation region. In fact, most meteorites are remnant pieces of the planetesimals and all contain ferromagnetic minerals, which depending on their nature, size, crystal structure, formation process and thermal history have the potential to preserve for billions of years a record of the magnetic fields they experienced while their host rock was still embedded in the proto-solar disk. This record is called a natural remanent magnetization (NRM).

Motivation. Paleomagnetic studies of meteorites are particularly challenging because, most of the time, NRM acquisition is a process non-reproducible in the laboratory and analyses must often be non-destructive. Specifically, to determine the intensity of an ancient field (paleointensity), we use empirical laws relating this paleointensity to the NRM measured in the laboratory. These laws depend on the nature of the minerals carrying the NRM and on the mechanism of NRM acquisition. For the majority of the meteorites possibly carrying a record of the solar nebula magnetic field, their NRM could only be acquired during the crystallization of secondary ferromagnetic minerals resulting from the aqueous alteration of their parent planetesimal (we call this type of NRM a chemical remanent magnetization, CRM). In the absence of empirical laws specific to CRMs, more than half of the paleomagnetic studies that have estimated the intensity of the solar nebula's magnetic field bear significant uncertainties. Recently, our group proposed the first preliminary empirical law relating a CRM to a paleointensity (Maurel and Gattacceca, 2023). This study paves the way for a large-scale project aimed at establishing laws specific to the different minerals and formation mechanisms found in meteorites. It is important to note that CRMs are very common in terrestrial rocks and are sometimes our only means of characterizing the intensity and orientation of the Earth's magnetic field in certain periods of the past. These empirical laws will therefore also be of great value to research in terrestrial paleomagnetism.

Objective, method and perspectives. The objective of this PhD thesis is to establish the empirical laws needed to accurately interpret meteoritic CRMs, and apply these findings to published datasets and new collected datasets. This will result in a significantly augmented, reliable record of the sun's protoplanetary disk, and foster interactions with the community of protoplanetary disk modelers. To this end, the student will conduct mineral synthesis experiments in a controlled magnetic field and perform magnetic measurements in the laboratory, on synthetic products and meteorites. Consequently, during her/his PhD, the student will develop strong skills in rock magnetism, paleomagnetism, petrography, chemical analysis, and high-resolution imaging, as well as in experimental design, data analysis, and interpretation. The student will be encouraged to attend conferences, and a research stay at a partner laboratory in the USA may be considered. Support will be provided in developing her/his career plan. Considering the ubiquitous presence of CRMs in nature, this PhD will open up future research avenues in both extraterrestrial and terrestrial magnetism, as well as more generally in meteorite science.

Détail du Programme finançant la recherche : Le projet est finançable sur les fonds propres de C. Maurel (dotation nouvel entrant CNRS et reliquat de projet Européen). Cependant, le sujet s'inscrit dans le cadre d'une demande d'ANR jeune chercheur qui a été déposée en 2026 et qui pourra offrir un environnement de travail confortable à la thèse.

Directeurs de thèse proposés

Directeur HDR proposé

Nom - Prénom : Gattacceca Jérôme

Corps : DR CNRS

Laboratoire : CEREGE

Adresse mail : gattacceca@cerege.fr

Choix de cinq publications récentes (étudiants dirigés co-signataires soulignés) :

Sadaka C., Gattacceca J., Dumas F., Braucher R., ASTER Team, Leya I., Tauseef M., Blard P.-H., Bekaert D., Füre E., Zimmermann, L., Lagain A., Devillepoix H.A.R., Gounelle M. 2026. Terrestrial ages of meteorites from the Atacama Desert (Chile) and insights in the past meteorite flux to the Earth. *Meteoritics and Planetary Science*. doi.org/10.1111/maps.70125

Sadaka C., Gattacceca J., Gounelle M., Roskosz M., Lagain A., Tartese R., Bonal L., Maurel C., Martinez R., Valenzuela M. 2025. Systematic meteorite collection in the Catalina Dense Collection Area (Chile): description and statistics. *Meteoritics and Planetary Science* 60:308-323. doi:10.1111/maps.14307.

Gattacceca J., Gounelle M., Devouard B., Barrat J.-A., Bonal L., King A.J., Maurel C., Beck P., Roskosz et al. 2025. Oued Chebeika 002: A new CI1 meteorite linked to outer solar system bodies. *Meteoritics and Planetary Science* 60: 1684-1947. doi:10.1111/maps.14359

Gattacceca J., Maurel C., Hutzler A., Rochette P., Weiss B.P. 2025 Curation and storage of astromaterials: a magnetic perspective. *Space Science Reviews* 221:67, doi : 10.1007/s11214-025-01194-2

Krämer Ruggiu L., Devouard B., **Gattacceca J.**, Bonal L., Piani L., Leroux H., Grauby O. 2024. Multistage aqueous alteration in CeC 022 and other nakhlites. *Meteoritics and Planetary Science* 60: 151-174. doi:10.1111/maps.14295.

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années

Nom : Carine Sadaka

Intitulé : Constraints on the meteorite flux to Earth over the last 2 million years

Type d'allocation : ED 251

Date de début de l'allocation de doctorat : oct 2022 – sept 2025

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 11 décembre 2025

Programme finançant la recherche : Programme National de Planétologie (INSU/CNES)

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : ATER

Autre directrice proposée

Nom - Prénom : Maurel Clara

Corps : CRCN CNRS

Adresse mail : cmaurel@cerege.fr

Laboratoire : CEREGE

Choix de cinq publications récentes :

J. Gattacceca, C. Maurel, A. Hutzler, P. Rochette, B. P. Weiss (2025) Curation and storage of astromaterials: a magnetic perspective, *Space Science Reviews*, 221:67, 1-15, doi: 10.1007/s11214-025-01194-2

B. P. Weiss, E. N. Mansbach, C. Maurel, C. J. Sprain, N. L. Swanson-Hysell, W. Williams (2025) What we can learn about Mars from the magnetism of returned samples, *Proceedings of the National Academy of Science*, 122, e2404259121, doi: 10.1073/pnas.2404259121

C. Maurel and J. Gattacceca (2024) A 4,565-My-old record of the solar nebula field, *Proceedings of the National Academy of Science*, 121, e2312802121, doi: 10.1073/pnas.2312802121

C. Maurel, J. Gattacceca, M. Uehara (2024) Hayabusa 2 returned samples reveal a weak to null magnetic field during aqueous alteration of Ryugu's parent body, *Earth and Planetary Science Letters* 627C, 118559, doi: 10.1016/j.epsl.2023.118559

C. Maurel and J. Gattacceca (2023) Estimating paleointensities from chemical remanent magnetizations of magnetite using non-heating methods, *Journal of Geophysical Research: Planets* 128, e2023JE007779, doi: 10.1029/2023JE007779

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années : Aucune.