



## Modélisation de la formation des magnétars : relaxation long terme du champ magnétique

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LMPA](#)

**Candidature avant le** 01/04/2025

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [RAYNAUD Raphaël](#)  
+33 1 69 08 56 07  
[raphael.raynaud@cea.fr](mailto:raphael.raynaud@cea.fr)

**Autre lien**  
<https://docs.google.com/document/d/1RRzfuwOGvCaNjjRCSPCSiY92-frYQmXU/edit?usp=sharing&oid=117082917296166736781&rtfpof=true&sd=true>

### Résumé

Ce stage propose d'étudier la formation des étoiles à neutrons les plus magnétiques, les magnétars, en modélisant la relaxation du champ magnétique résultant d'une dynamo convective qui amplifierait le champ à l'intérieur de la protoétoile à neutrons.

### Sujet détaillé

Les magnétars sont les étoiles à neutrons arborant les plus forts champs magnétiques connus dans l'Univers, historiquement découverts comme des sources galactiques de haute énergie (pulsars X anormaux et sursauteurs gamma mou). La formation de ces objets figure parmi les scénarios les plus étudiés pour expliquer certaines des explosions les plus violentes : les supernovae superlumineuses, les hypernovae et les sursauts gamma. L'exploitation scientifique des données de plus en plus abondantes provenant de ces différents objets nécessite le développement de modèles plus prédictifs, en particulier au niveau des caractéristiques du champ magnétique et de son évolution.

Notre équipe a réussi à reproduire numériquement des champs magnétiques d'une intensité comparable à celle des magnétars en simulant des mécanismes d'amplification dynamo qui se développent dans les premières secondes après la formation de l'étoile à neutrons. La plupart des manifestations observationnelles des magnétars nécessitent cependant que le champ magnétique survive sur des échelles de temps bien plus longues (de quelques semaines pour les supernovae superlumineuses à des milliers d'années pour les sursauteurs gamma mous).

Le travail de stage consistera donc à développer des simulations de relaxation initialisées à partir d'un état dynamo calculé précédemment par l'équipe, en les prolongeant vers des stades plus tardifs après la naissance de l'étoile à neutrons lorsque la dynamo n'est plus active. L'objectif est de déterminer comment le champ magnétique turbulent généré dans les premières secondes va évoluer pour atteindre un état d'équilibre stable, à même d'expliquer ces

---

observations, et dont on cherchera à caractériser la topologie. L'évolution du champ magnétique sera calculée avec le code de calcul parallèle MagIC qui résout les équations de la MHD en géométrie sphérique et qui a été adapté au cas des étoiles à neutrons jeunes (Raynaud et al. 2020, Reboul-Salze et al. 2021, Barrère et al. 2023).

Ce stage d'une durée de 4 mois se déroulera au sein du Laboratoire de Modélisation des Plasmas Astrophysiques au Département d'Astrophysique du CEA Saclay et sera encadré par Raphaël Raynaud et Jérôme Guilet. Il sera effectué en collaboration avec Paul Barrère (Université de Genève) et Andrei Igoshev (University of Leeds).

### **Mots clés**

Mécanique des fluides, MHD, calcul haute performance

### **Compétences**

Simulation numérique

### **Logiciels**

Fortran, Python

---

## **Modelling magnetar formation: long-term relaxation of the magnetic field**

### **Summary**

This internship proposes to study the formation of the most magnetic neutron stars, magnetars, by modelling the relaxation of the magnetic field resulting from a convective dynamo that could amplify the field inside the protoneutron star.

### **Full description**

Magnetars are neutron stars with the strongest magnetic fields known in the Universe, historically discovered as galactic high-energy sources (anomalous X-ray pulsars and soft gamma repeaters). The formation of these objects is among the most studied scenarios to explain some of the most violent explosions: superluminous supernovae, hypernovae, and gamma-ray bursts. The increasing amount of scientific data from these various objects necessitates the development of more predictive models, particularly regarding the characteristics of the magnetic field and its evolution.

Our team successfully reproduced magnetic fields with intensities comparable to those of magnetars through numerical simulations of dynamo amplification mechanisms that develop in the first seconds after the formation of the neutron star. However, most observational manifestations of magnetars require the magnetic field to survive over much longer timescales (from a few weeks for superluminous supernovae to thousands of years for soft gamma repeaters).

The internship will involve developing relaxation simulations, initialized from a dynamo state previously calculated by the team, extending them to later stages after the birth of the neutron star when the dynamo is no longer active. The objective is to determine how the turbulent magnetic field generated in the first seconds evolves to reach a stable equilibrium state capable of explaining these observations, and to characterize its topology. The evolution of the magnetic field will be calculated using the MagIC code, which solves the MHD equations in spherical geometry and has been adapted for young neutron stars (Raynaud et al. 2020, Reboul-Salze et al. 2021, Barrère et al. 2023).

This 4-month internship will take place at the Laboratory for Astrophysical Plasma Modelling at the Astrophysics Department of CEA Saclay and will be supervised by Raphaël Raynaud and Jérôme Guilet. It will be conducted in collaboration with Paul Barrère (University of Geneva) and Andrei Igoshev (University of Leeds).

### **Keywords**

astrophysical fluid dynamics, MHD, high performance computing

### **Skills**

Numerical simulations

### **Softwares**

Fortran, Python