

NNT : 20XXIPPAXXXXX

Thèse de doctorat



Statistical study of the location of magnetic reconnection at the dayside magnetopause

Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris
préparée à École polytechnique

École doctorale n°626 Institut Polytechnique de Paris (EDIPP)
Spécialité de doctorat: Astrophysique

Thèse présentée et soutenue à Palaiseau, le 30 septembre 2026, par

Ambre Ghisalberti

Composition du Jury :

Christian Jacquey Astronome, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie	Rapporteur
Matthieu Kretzschmar Professeur, Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace	Rapporteur
Clara Froment Chargée de recherche, Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace	Examinatrice
Aurélie Marchaudon Directrice de recherche, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie	Examinatrice
Tai Phan Senior Researcher, University of California, Berkeley, Space Sciences Lab	Examineur
Nicolas Aunai Chargé de recherche, Laboratoire de Physique des Plasmas	Directeur de thèse
Benoît Lavraud Directeur de recherche, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux	Directeur de thèse

Abstract

Magnetic reconnection constitutes the primary coupling mechanism between the Earth's magnetosphere and the solar wind, driving the formation of the boundary layer between these two plasmas. The efficiency of this phenomenon depends heavily on the position of the X-line, where reconnection occurs. Due to its inherent multi-scale nature, the location of reconnection—and its variability in response to interplanetary properties—remains poorly understood to date. While several models predict the location of reconnection, their validation remains either fragmentary when relying on localized satellite measurements, or dependent on global magnetohydrodynamics numerical simulations that are computationally expensive and not necessarily realistic. The primary obstacle before this PhD lied in the inability to directly map the magnetopause on a global scale using only in-situ data.

This thesis provides new observational constraints to the X-line position. Our methodology relies on the fact that reconnection strongly alters the, otherwise axisymmetric, plasma flow around the magnetopause, by accelerating plasma away from the X-line. The work of this PhD starts with the conception and implementation of an innovative method based on statistical learning to automatically extract and process all boundary layer crossings recorded over two decades by the multi-satellite missions Cluster, THEMIS, and MMS. By reconstructing a global map of the flow on the dayside magnetopause allows us to locate the X-line at the source of the diverging plasma flows, characterizing its dependence on the interplanetary magnetic field direction and the Earth dipole tilt. Finally, a systematic comparison between various model predictions, global MHD simulation results, and our empirical observations allows us to better discern the physical mechanisms governing the localization of magnetic reconnection. Our results seem to indicate that the X-line is spontaneously located in a way to maximize the reconnection rate. We critically examine our methodological limits and technical constraints to properly nuance the scope of our results.

Résumé

La reconnexion magnétique constitue le principal mécanisme de couplage entre la magnétosphère terrestre et le vent solaire, à l'origine de la couche frontière entre ces deux plasmas. L'efficacité du processus dépend de la localisation de la ligne X, où se déroule la reconnection. En raison de sa nature intrinsèquement multi-échelle, la position de la reconnection, et sa variation en fonction des propriétés du milieu interplanétaire, restent à ce jour mal comprises. Plusieurs modèles prédisent la position de la ligne X mais leur validation reste soit parcellaire lorsqu'elle s'appuie sur des mesures satellitaires locales, soit dépendante de simulations numériques magnétohydrodynamiques globales au réalisme limité et particulièrement lourdes en temps de calcul. La principale difficulté avant cette thèse résidait dans une incapacité à cartographier la magnétopause à l'échelle globale à partir des seules données in-situ.

Cette thèse apporte de nouvelles contraintes observationnelles à la position de la ligne X. Notre méthodologie repose sur le fait que la reconnection altère fortement l'écoulement, autrement axisymétrique, du plasma autour de la magnétopause, en créant une divergence du plasma accéléré de part et d'autre de la ligne X. Le travail de cette thèse repose en premier lieu sur la conception et la mise en oeuvre d'une méthode innovante basée sur l'apprentissage statistique permettant d'extraire et de traiter automatiquement l'ensemble des traversées de cette couche frontière enregistrées sur deux décennies par les missions multi-satellites Cluster, THEMIS et MMS. La reconstruction d'une cartographie globale de l'écoulement sur la face jour de la magnétopause permet d'inférer où se trouve la ligne X en localisant la divergence de l'écoulement, et ce de manière paramétrée par l'orientation de l'IMF et du dipôle terrestre.

Enfin, une comparaison systématique entre les prédictions de différents modèles, les résultats de simulations globales magnétohydrodynamiques, et nos résultats empiriques nous permet de mieux discerner les mécanismes physiques gouvernant la localisation de la reconnection. Il semblerait notamment que nos résultats indiquent que la ligne X se positionne spontanément de manière à maximiser le taux de reconnexion total. Un travail de réflexion est mené pour apporter les nuances nécessaires quant aux limites méthodologiques et techniques de nos résultats.