



## Simulations 3D du vent solaire pour les prévisions en météorologie de l'espace

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LDE3](#)

**Candidature avant le** 05/06/2024

**Durée** 5 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [Perri Barbara](#)  
+33 1 69 08 76 60  
[barbara.perri@cea.fr](mailto:barbara.perri@cea.fr)

### Résumé

Le but de ce stage est d'obtenir un modèle de prévision du vent solaire à la fois réaliste et rapide. Pour cela, il s'agira de développer une version opérationnelle du code Wind Predict-AW, en combinant différents modèles d'accélération du vent solaire. Via une étude paramétrique de simulations numériques, il sera alors possible de quantifier les performances de ce nouveau modèle et de le comparer à des observations à la Terre.

### Sujet détaillé

La météorologie de l'espace a pour ambition de comprendre les événements les plus extrêmes du Soleil afin d'anticiper leur impact sur la Terre. Depuis l'événement de Carrington en 1859 qui avait surchargé les réseaux de télégraphes partout dans le monde, notre société est devenue encore plus technologique, et les conséquences de tels événements se font désormais ressentir sur les satellites, les communications, les réseaux électriques et même la santé humaine.

Néanmoins, prédire la trajectoire de ces événements (et donc leur capacité à impacter ou non la Terre) est un défi complexe qui implique d'être capable de caractériser avec précision le milieu interplanétaire entre le Soleil et la Terre. L'un des éléments les plus critiques à cartographier est alors le vent solaire, un éjecta continu de particules de l'atmosphère solaire qui vient moduler le milieu interplanétaire. Depuis les observations du satellite Ulysses (McComas et al. 2005), on sait qu'il existe plusieurs familles de vent solaire, dont du vent lent (400 km/s) et du vent rapide (800 km/s), qui peuvent donc ralentir, accélérer ou dévier les événements transients.

Pour anticiper correctement les flots de vent solaire, on peut donc se tourner vers la simulation numérique. Prenant en entrée des observations du Soleil, différents modèles sont alors capables de donner une solution en réalisant des approximations sur les processus physiques dans l'atmosphère du Soleil qui sont à l'origine de l'accélération du vent. Le problème est que les modèles actuels sont partagés entre des modèles très réalistes mais trop lents pour être opérationnels (comme le modèle Wind Predict-AW, cf. Réville et al. 2022), et des modèles plus rapides mais avec des approximations plus empiriques qui demandent beaucoup d'ajustements manuels (comme le WSA, cf. Arge et Pizzo 2000).

---

Le but de ce stage est donc de développer une version opérationnelle du code Wind Predict-AW, permettant d'obtenir une distribution bimodale vent lent/vent rapide réaliste, tout en étant capable de fournir une prévision en moins de 24 heures. Pour cela, on se basera sur l'approximation principale du modèle Wind Predict-AW qui est le chauffage par ondes d'Alfvén, et on implémentera cette mécanique dans la version plus simplifiée du modèle appelée Wind Predict (Réville et al. 2017, Perri et al. 2018). Le code utilisé sera le code PLUTO (Mignone et al. 2007), un code open-source multi-physique écrit en C. Les analyses seront réalisées en Python.

Le travail de ce stage sera donc de réaliser différentes combinaisons entre les modules de Wind Predict et Wind Predict-AW afin de parvenir à retrouver la distribution bimodale du vent solaire dans des temps opérationnels. Ceci se fera via la construction d'une fonction de chauffage ad-hoc en combinant chauffage polytropique et par ondes d'Alfvén (plus éventuellement d'autres termes à implémenter si besoin). Il conviendra également de réaliser des études paramétriques afin de vérifier que le nouveau modèle puisse fonctionner pour toutes les phases du cycle solaire (minimum comme maximum). On validera également les résultats sur des événements réels (flots de vent rapides mesurés à la Terre). L'étudiant devra enfin analyser les tendances du modèle pour vérifier que les propriétés physiques de la couronne solaire sont globalement bien reproduites, et pour dériver des lois empiriques permettant de calibrer le modèle.

En conclusion, ce stage offre une approche très complémentaire de l'étude du vent solaire, avec des simulations numériques, des observations et de la théorie de la physique des plasmas. Il sera réalisé au sein de l'équipe du LDE3 à l'AIM, sous l'encadrement du Dr. Barbara Perri, du Dr. Allan Sacha Brun et du Dr. Antoine Strugarek. Ce sujet de stage pourra déboucher sur une thèse financée portant sur le développement d'un nouveau modèle de prévision de vent solaire basé sur de l'assimilation de données pour le prochain maximum d'activité.

### **Mots clés**

Météorologie de l'espace, vent solaire, simulations numériques, magnétohydrodynamique

### **Compétences**

Physique des plasmas Simulations numériques Analyse et traitement de jeux de données

### **Logiciels**

C Python

---

## 3D simulations of the solar wind for space weather forecasting

### Summary

The aim of this internship is to obtain a realistic and fast solar wind forecasting model. This will involve developing an operational version of the Wind Predict-AW code, combining different solar wind acceleration models. Through a parametric study of numerical simulations, it will then be possible to quantify the performance of this new model and compare it with observations on Earth.

### Full description

Space weather aims to understand the Sun's most extreme events in order to anticipate their impact on Earth. Since the Carrington event in 1859, which overloaded telegraph networks around the world, our society has become even more technological, and the consequences of such events are now felt on satellites, communications, power grids and even human health.

Nevertheless, predicting the trajectory of such events (and therefore their ability to impact the Earth or not) is a complex challenge that involves being able to accurately characterize the interplanetary medium between the Sun and the Earth. One of the most critical elements to map is the solar wind, a continuous ejecta of particles from the solar atmosphere that modulates the interplanetary medium. Since observations by the Ulysses satellite (McComas et al. 2005), we know that there are several families of solar wind, including slow (400 km/s) and fast (800 km/s) winds, which can slow down, speed up or deflect transient events.

To correctly anticipate solar wind flows, we can therefore turn to numerical simulation. Taking observations of the Sun as input, various models are then able to provide a solution by approximating the physical processes in the Sun's atmosphere that are responsible for wind acceleration. The problem is that current models are divided between those that are very realistic but too slow to be operational (such as Wind Predict-AW, cf. Réville et al. 2022), and those that are faster but with more empirical approximations that require a lot of manual adjustments (such as WSA, cf. Arge and Pizzo 2000).

The aim of this internship is therefore to develop an operational version of the Wind Predict-AW code, making it possible to obtain a realistic bimodal slow wind/fast wind distribution, while being able to provide a forecast in less than 24 hours. To achieve this, we will rely on the main approximation of the Wind Predict-AW model, which is Alfvén wave heating, and implement this mechanics in the more simplified version of the model called Wind Predict (Réville et al. 2017, Perri et al. 2018). The code used will be PLUTO (Mignone et al. 2007), an open-source multi-physics code written in C. Analyses will be performed in Python.

The task of this internship will therefore be to carry out various combinations between the Wind Predict and Wind Predict-AW modules in order to recover the bimodal distribution of the solar wind in operational times. This will be achieved by constructing an ad-hoc heating function combining polytropic and Alfvén wave heating (plus other terms to be implemented if required). Parametric studies will also be carried out to check that the new model can work for all phases of the solar cycle (minimum and maximum). The results will also be validated on real events (fast wind flows measured at Earth). Finally, the student will be asked to analyze the model's trends to check that the physical properties of the solar corona are globally well reproduced, and to derive empirical laws to calibrate the model.

In conclusion, this internship offers a highly complementary approach to the study of the solar wind, involving numerical simulations, observations and plasma physics theory. It will be carried out within the LDE3 team at AIM, under the supervision of Dr. Barbara Perri, Dr. Allan Sacha Brun and Dr. Antoine Strugarek. This internship may lead to a funded thesis on the development of a new data assimilation-based solar wind forecasting model for the next maximum activity.

### Keywords

Space weather, solar wind, simulations, MHD

---

**Skills**

Plasma physics Simulations Big data Data analysis

**Softwares**

C Python