

# **MOdélisation Statistiques DEs TRajEctoireS rareS de particUles énergétiques dans un Tokamak pour la fusion nucléaiRE**

STATISTICAL MODELING OF THE RARE TRAJECTORIES OF ENERGETIC PARTICLES IN A TOKAMAK FOR NUCLEAR FUSION

Etablissement d'accueil : ECOLE CENTRALE MARSEILLE

Laboratoire d'accueil : M2P2

Directeur de thèse : MITRA FOULADIRAD /DAVID ZARZOZO

Financement : Région SUD

Partenaire industriel : K-EPSILON

Mots Clés: Modélisation statistique, science de données, valeurs extrêmes, processus stochastiques.

Keywords : Statistical modelling, data analysis, extreme values, stochastic processes.

Sujet Français :

Dans un réacteur de fusion nucléaire, les particules énergétiques sont omniprésentes. En effet, les réactions de fusion dans le combustible (appelé plasma), formé par des noyaux de deuterium (D) et de tritium (T), produisent des particules alpha, qui ont une énergie très élevée par rapport à celle du D et du T. Les particules énergétiques - comme les particules alpha - doivent rester suffisamment longtemps dans l'enceinte du réacteur pour transmettre leur énergie aux particules du combustible et ainsi auto-entretenir les réactions de fusion. C'est un des principaux objectifs du réacteur expérimental ITER en construction à Cadarache.

Malheureusement, un plasma de fusion est un milieu très complexe où des instabilités peuvent être déclenchées, conduisant au transport (et éventuellement aux pertes) de particules énergétiques, ce qui représente une baisse d'efficacité du réacteur. Par conséquent, le transport en présence d'instabilités doit être compris, prédit et contrôlé.

Cependant, les trajectoires des particules énergétiques en présence d'instabilités peuvent être chaotiques. Ceci veut dire que deux particules énergétiques produites avec des conditions très similaires peuvent avoir des trajectoires très différentes. En particulier, une des particules peut rester dans le réacteur et l'autre peut être perdue et éventuellement percuter et abîmer la paroi. Ce type d'événements où les particules énergétiques sont perdues doit être évité et une prédiction s'avère donc nécessaire. Mais ces événements ont lieu avec une fréquence très faible, d'où leur nom d'événements rares. D'autres types d'événements rares en dehors de la fusion nucléaire sont par exemple les événements sociaux, les attentats ou encore les mutations génomiques.

Ces événements rares peuvent être représentés par des modèles probabilistes adaptés (par exemple, des processus de Lévy-stable). A partir des propriétés théoriques de ces processus, il est possible de prédire avec un certain niveau de confiance les événements rares. Nous utiliserons cette approche avec des méthodes mathématiques de filtrage particulaire et de propagation d'incertitude pour prédire le temps de sortie des particules énergétiques dans un réacteur à fusion et le point où les particules percutent la paroi. Le choix du modèle utilisé dépendra des données disponibles, issues des expériences et des simulations dans des conditions particulières définies par les experts.

Ph.D project in English :

In a nuclear fusion reactor, energetic particles are everywhere. Indeed, the fusion reactions in the fuel (called plasma), formed by deuterium(D) and tritium(T) nuclei, produce alpha particles, which have a very high energy compared to that of D and T. Energetic particles - such as alpha particles - must remain in the reactor vessel long enough to transmit their energy to the fuel particles and thus self-sustain the fusion reactions. This is one of the main objectives of the ITER experimental reactor under construction in Cadarache.

Unfortunately, a fusion plasma is a very complex medium where instabilities can be triggered, leading to the transport (and possibly loss) of energetic particles, which represents a drop in reactor efficiency. Therefore, transport in the presence of instabilities must be understood, predicted and controlled.

However, the trajectories of energetic particles in the presence of instabilities can be chaotic. This means that two energetic particles produced under very similar conditions can have very different trajectories. In particular, one of the particles may remain in the reactor and the other may be lost and possibly strike and damage the wall. This type of event where energetic particles are lost must be avoided and their prediction is therefore necessary. But these events occur with a very low frequency, hence their name of rare events. Other types of rare events apart from nuclear fusion are, for example, social events, attacks or even genomic mutations.

These rare events can be represented by suitable probabilistic models (eg Lévy-stable processes). From the theoretical properties of these processes, it is possible to predict rare events with a certain level of confidence. We will use this approach with mathematical methods of particle filtering and uncertainty propagation to predict the exit time of energetic particles from the main trajectory in a fusion reactor and the point where the particles impact the wall. The choice of the model used will depend on the available data, resulting from experiments and simulations under specific conditions defined by the experts.