



## Développement d'une méthode de réduction de variance multi-particules/multi-détecteurs pour les expériences de physique nucléaire

**Spécialité** Neutronique

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Ingenieur/Master

**Unité d'accueil** [DPhN/LEARN](#)

**Candidature avant le** 30/04/2025

**Durée** 6 mois

**Poursuite possible en thèse** non

**Contact** [THULLIEZ Loïc](#)  
+33 1 69 08 74 53  
[loic.thulliez@cea.fr](mailto:loic.thulliez@cea.fr)

### Résumé

### Sujet détaillé

La simulation Monte Carlo du transport des particules est devenue aujourd'hui centrale dans de nombreux domaines tels que la physique fondamentale, la physique médicale ou les applications spatiales pour n'en citer que quelques-uns. Afin de pallier les temps de calculs inhérents à cette méthode, des techniques dites "de réduction de variance" sont développées, dont l'objectif est de "pousser" les particules vers le(s) détecteur(s) sans induire de biais sur les résultats du calcul. Récemment, une méthode de réduction de variance dite Adaptative Multilevel Splitting (AMS) [1,2], s'intéressant aux événements rares, a été conçue et implémentée dans différents codes de calculs, tels que le code Monte Carlo TRIPOLI4 développé au CEA ou le code Monte Carlo Geant4 développé au CERN par une collaboration internationale [3]. Cette méthode offre des perspectives très intéressantes car elle permet de préserver les corrélations entre les particules contribuant à la mesure, ce que ne permettent pas les méthodes standards de réduction de variance comme par exemple l'Importance Sampling.

Ce sujet de stage propose d'évaluer l'intérêt de cette approche dans le contexte de la physique fondamentale, où les simulations cherchent à détecter des événements rares, comme par exemple dans les expériences visant à mettre en évidence la diffusion cohérente des neutrinos auprès de réacteur (CEvNS). En effet, ces expériences mettent régulièrement en œuvre des méthodes de détection en coïncidence permettant d'augmenter le rapport signal sur bruit (à titre illustratif on peut imaginer la détection d'un neutron dans un détecteur A et d'un photon dans un détecteur B). Elles représentent un challenge en termes de calcul numérique car leur simulation nécessite l'échantillonnage d'un très grand nombre de particules (de sorte à ce qu'une fraction très faible d'entre elles contribuent à la mesure).

Le sujet de ce stage consiste donc à utiliser l'AMS implémenté dans le code Geant4 et à en optimiser les paramètres dans des configurations dites "multi-particules/multi-détecteurs", afin de pouvoir simuler des événements rares corrélés. Le/la stagiaire devra pour ce faire finaliser les développements déjà entrepris (cf. [4]) puis à en vérifier l'efficacité sur différents cas physiques simples représentatifs. Une fois ce travail terminé, deux pistes pourront être suivies suivant l'intérêt du candidat :

---

1) soit le/la candidat(e) s'intéressera au déploiement de cette méthode dans le code Geant4 lui-même pour qu'il soit accessible à tous les physiciens pour qu'il soit dans la version officielle, 2) soit le/la candidat(e) mettra en place un dispositif expérimental pour comparer les résultats obtenus avec l'AMS à des données expérimentales.

[1] F. Cérou and A. Guyader, *Stochastic Analysis and Applications* 25(2):417-443, 2007

[2] H. Louvin et al., *EPJ Web of Conferences*, Vol153, EDP Sciences, 2017

[3] <https://geant4.web.cern.ch>

[4] L. Thulliez, B. Mom et E. Dumonteil, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 1051 (2023) 168190

### **Mots clés**

physique nucléaire, des particules, mécanique quantique, neutronique

### **Compétences**

Méthode de réduction de variance

### **Logiciels**

Python, C++, ROOT (est un plus/à un asset), Geant4 (est un plus/à un asset)

---

# Development of a multi-particles/multi-detectors variance reduction method for nuclear physics experiments

## Summary

## Full description

The Monte Carlo simulation of particle transport has become central in many fields such as fundamental physics, medical physics or space applications just to name a few. In order to overcome the computation time inherent to this method, so-called "variance reduction" techniques are developed, whose objective is to "push" the particles towards the detector(s) without inducing bias on the computation results. Recently, a variance reduction method called Adaptive Multilevel Splitting (AMS) [1,2], which focuses on rare events, has been designed and implemented in different calculation codes, such as the Monte Carlo code TRIPOLI4 developed at CEA or the Monte Carlo code Geant4 developed at CERN by an international collaboration [3]. This method offers very interesting perspectives because it allows to preserve the correlations between the particles contributing to the measurement, which is not possible with standard variance reduction techniques such as Importance Sampling.

This internship topic proposes to evaluate the interest of this approach in the context of fundamental physics, where simulations seek to detect rare events, as for example in experiments aiming to detect the coherent neutrino scattering at nuclear reactors (CEvNS). Indeed, these experiments regularly use coincidence detection methods to increase the signal-to-noise ratio (as an example, one can imagine the detection of a neutron in detector A and a photon in detector B). They represent a challenge in terms of numerical calculation because their simulation requires the sampling of an often-prohibitive number of events (so that a very small fraction of them contribute to the measurement).

The subject of this internship is therefore to use the AMS implemented in the Geant4 code and to optimize its parameters in so-called "multi-particle/multi-detector" configurations, in order to be able to simulate rare correlated events. The trainee will have to finalize the developments already undertaken (see [4]) and to verify their efficiency on different simple representative physical cases. Once this work is completed, two avenues can be pursued, depending on the candidate's interest:

- 1) either the candidate will be interested in deploying this method in the Geant4 code itself, so that it can be made available to all physicists for inclusion in the official version,
- 2) or the candidate will set up an experimental setup to compare the results obtained with AMS with experimental data.

[1] F. Cérou and A. Guyader, *Stochastic Analysis and Applications* 25(2):417-443, 2007

[2] H. Louvin et al., *EPJ Web of Conferences*, Vol153, EDP Sciences, 2017

[3] <https://geant4.web.cern.ch>

[4] L. Thulliez, B. Mom et E. Dumonteil, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 1051 (2023) 168190

## Keywords

Nuclear and particle physics, quantum mechanics, neutronics

## Skills

Variance reduction method

## Softwares

---

Python, C++, ROOT (est un plus/is an asset), Geant4 (est un plus/is an asset)



## Etude de faisabilité par simulation d'expériences de production de noyaux radioactifs auprès du futur irradiateur pour la fusion IFMIF-DONES

**Spécialité** Physique nucléaire

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Ingenieur/Master

**Unité d'accueil** [DPhN/LEARN](#)

**Candidature avant le** 30/04/2025

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** non

**Contact** [LETOURNEAU Alain](#)  
+33 1 69 08 76 01  
[alain.letourneau@cea.fr](mailto:alain.letourneau@cea.fr)

### Résumé

Le travail de stage consistera à étudier par simulation la possibilité d'utiliser les neutrons produits par l'installation IFMIF-DONES pour réaliser des expériences de physique nucléaire et notamment de production de noyaux radioactifs.

### Sujet détaillé

IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility DEMO Oriented Neutron Source) [1] sera la plus intense source de neutrons au monde. Elle est en cours de construction en Espagne et servira à étudier les effets des neutrons dans les matériaux de structure qui seront utilisés dans les futurs réacteurs de fusion. Les neutrons seront produits par un faisceau de deutons de 50 MeV frappant une cible de lithium liquide. Si la principale utilisation de l'installation sera pour l'étude des matériaux de fusion, une étude préliminaire menée par notre équipe [2], a montré que IFMIF-DONES présentait de nombreux intérêts pour nombre d'applications comme l'imagerie neutronique, la production de radioéléments, les études fondamentales, ....

Dans ce travail de stage, nous proposons d'étudier la possibilité d'implanter des expériences de physique nucléaire dans une salle d'expérience située à l'arrière de la zone d'irradiation et dans laquelle un faisceau collimaté de neutrons pourrait être disponible. Les expériences prévues sont de deux types : la spectroscopie gamma de noyaux riches en neutrons produits par fission d'une cible d'actinide ; la mesure de réactions nucléaires d'intérêt pour la nucléosynthèse stellaire. Pour ces deux expériences, il s'agira d'évaluer les taux de production pour comparer à d'autres installations et d'estimer les bruits de fond induits par les neutrons et les rayonnements gamma afin d'en définir la faisabilité.

Le logiciel Geant4, écrit en C++ et développé par le CERN pour traiter de l'interaction rayonnement matière, sera utilisé à ces fins de simulation.

Ce travail viendra compléter un travail déjà réalisé sur l'utilisation des neutrons dans IFMIF-DONES et sera le point de départ pour définir les futures expériences qui prendront place dans l'installation.

Des connaissances en C++ et calculs numériques sont souhaitables.

---

[1] <https://ifmif-dones.es/>

[2] J. Hirtz et al., "Neutron availability in the Complementary Experiments Hall of the IFMIF-DONES facility", Fusion Engineering and Design 179 (2022) 113133, arXiv:2201.08711

### **Mots clés**

Physique nucléaire, Neutronique, Simulation

### **Compétences**

Des connaissances en C++ et calculs numériques sont souhaitables.

### **Logiciels**

Geant4

---

## Simulation-based feasibility study of radioactive nuclei production experiments at the future IFMIF-DONES fusion irradiator

### Summary

The internship will involve simulating the possibility of using the neutrons produced by the IFMIF-DONES facility to carry out nuclear physics experiments, and in particular to produce radioactive nuclei.

### Full description

IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility DEMO Oriented Neutron Source) [1] will be the world's most intense neutron source. Currently under construction in Spain, it will be used to study the effects of neutrons in the structural materials to be used in future fusion reactors. The neutrons will be produced by a 50 MeV deuteron beam striking a liquid lithium target. While the main use of the facility will be for the study of fusion materials, a preliminary study carried out by our team [2] has shown that IFMIF-DONES is of great interest for a number of applications, such as neutron imaging, radioelement production, fundamental studies, etc. ....

In this internship, we propose to study the possibility of setting up nuclear physics experiments in an experiment room located behind the irradiation zone, where a collimated neutron beam could be available. Two types of experiments are planned: gamma spectroscopy of neutron-rich nuclei produced by fission of an actinide target; and measurement of nuclear reactions of interest for stellar nucleosynthesis. For these two experiments, the aim will be to evaluate production rates for comparison with other facilities, and to estimate the background noise induced by neutrons and gamma rays, in order to define their feasibility. Indeed, these experiments use detectors that are highly sensitive to radiation, and could be blinded or fail to operate in excessively noisy environments.

The Geant4 software package, written in C++ and developed by CERN to deal with radiation-matter interaction, will be used for these simulation purposes.

This work will complement work already carried out on the use of neutrons in IFMIF-DONES, and will be the starting point for defining future experiments to be carried out in the facility.

[1] <https://ifmif-dones.es/>

[2] J. Hirtz et al., "Neutron availability in the Complementary Experiments Hall of the IFMIF-DONES facility", Fusion Engineering and Design 179 (2022) 113133, arXiv:2201.08711

### Keywords

### Skills

### Softwares

Geant4



## Analyse des rayons gamma retardés de la fission thermique de l'U-235 mesurés sur le spectromètre FIPPS

**Spécialité** Physique nucléaire

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Ingenieur/Master

**Unité d'accueil** [DPhN/LEARN](#)

**Candidature avant le** 04/05/2025

**Durée** 3 mois

**Poursuite possible en thèse** non

**Contact** [Materna Thomas](#)

+33 1 69 08 40 91

[thomas.materna@cea.fr](mailto:thomas.materna@cea.fr)

### Résumé

Le stage consistera à développer un code d'analyse semi-automatique de spectres bidimensionnels. Il sera appliqué aux données du spectromètres FIPPS pour étudier la production des rayons gamma retardés de la fission thermique de l'U-235.

### Sujet détaillé

L'anomalie des antineutrinos de réacteur, à savoir un déficit significatif, de  $5.5 \pm 1.2$  % dans le nombre d'antineutrinos détectés à courte distance des réacteurs reste une énigme. Les résultats de plusieurs expériences de grande envergure, dont celle menée par notre laboratoire avec le détecteur STEREO auprès du réacteur à haut flux de Grenoble, confirment l'anomalie mais rejette l'hypothèse proposée initialement, celle d'une oscillation des antineutrinos vers un état stérile. L'hypothèse actuellement retenue est l'existence de biais dans la prédiction obtenue à partir des spectres beta de référence, mesurés dans les années 80 avec le spectromètre magnétique BILL auprès du réacteur de Grenoble. La prédiction de spectres des antineutrinos directement à partir des données nucléaires actuelles, et donc sans utiliser les mesures BILL, est également possible mais les incertitudes sont dominées par des erreurs et/ou des lacunes dans les données de décroissance beta (effet Pandémonium).

Le stage consistera à poursuivre le développement d'un code d'analyse de spectres bidimensionnels basé sur des méthodes de Machine Learning. Ce code sera utilisé pour extraire dans les données du spectromètre FIPPS de l'ILL les productions précises de rayons gamma retardés de différents noyaux produits lors de la fission thermique de l'U-235 et de les comparer aux valeurs calculées avec les données nucléaires actuelles (rendements de fission, données de décroissance). Ces résultats permettront à terme d'évaluer un modèle de la fonction force beta développé dans notre laboratoire permettant de corriger l'effet Pandémonium.

De bonnes connaissances en physique nucléaire et un attrait marqué pour l'expérimentation et l'analyse des données sont indispensables. Ce stage requière de très bonnes compétences en programmation. Une connaissance de l'environnement ROOT et des techniques de Machine Learning sont un atout sans être une obligation.

---

**Mots clés**

Spectroscopie gamma, fission nucléaire, désintégration beta

**Compétences**

Analyse de spectres de rayons gamma

**Logiciels**

C++, ROOT, python

---

## **Analysis of delayed gamma rays from U-235 thermal fission measured on the FIPPS spectrometer**

### **Summary**

The internship will consist in developing a semi-automatic software tool for the analysis of two-dimensional spectra. It will be applied to data from the FIPPS spectrometer to study the production of delayed gamma rays from the thermal fission of U-235.

### **Full description**

The reactor antineutrino anomaly, namely a significant deficit of  $5.5 \pm 1.2\%$  in the number of antineutrinos detected at short distance from the reactors remains an enigma. The results of several large-scale experiments, including the one carried out by our laboratory with the STEREO detector at the high flux reactor of Grenoble, confirm the anomaly but reject the hypothesis initially proposed, an oscillation of antineutrinos towards a sterile state. The current hypothesis is the existence of biases in the prediction obtained from reference beta spectra, measured in the 1980s with the BILL magnetic spectrometer at the Grenoble reactor. The prediction of antineutrino spectra directly from actual nuclear data, and thus without using the BILL measurements, is also possible but the uncertainties are dominated by errors and/or gaps in the beta decay data (Pandemonium effect).

The aim of the internship is to complete the development of a two-dimensional spectra analysis code based on Machine Learning techniques. This code will be used to extract in data from the FIPPS spectrometer (ILL) the precise production of delayed gamma-rays from various nuclei produced during the thermal fission of U-235, and to compare them with values calculated with current nuclear data (fission yields, decay data). These results will later be used to evaluate a model of the beta force function developed in our laboratory with the aim of correcting for the Pandemonium effect.

A good knowledge of nuclear physics and a strong interest in experimentation and data analysis are essential. This internship requires very good programming skills. Knowledge of the ROOT environment and Machine Learning techniques is an asset, but not a requirement.

### **Keywords**

Gamma-ray spectroscopy, nuclear fission, beta decay

### **Skills**

Gamma-ray spectra analysis

### **Softwares**

C++, ROOT, python