

## Proposition de thèse – 2024-2027

**Thématique :** Structure nucléaire théorique

**Sujet de thèse :** Interactions effectives régularisées et calculs au-delà de l'approximation du champ moyen

**Directeur de thèse :** K. Bennaceur

**Téléphone :** +33 (0)6 70 35 01 48

**Email :** [bennaceur@ipnl.in2p3.fr](mailto:bennaceur@ipnl.in2p3.fr)

**Adresse :** IP2I Lyon – Bureau 338  
Domaine Scientifique de la Doua – Bât. Paul Dirac  
4 rue Enrico Fermi – 69622 Villeurbanne Cedex - France

### Description du travail demandé :

Les propriétés élémentaires des noyaux, comme leurs masses, tailles et formes, peuvent, en première approximation, être décrites par des méthodes de champ moyen comme la méthode de Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) qui permet de prendre en compte explicitement les corrélations d'appariement ou la méthode HFB avec contraintes lorsque l'état fondamental du noyau étudié est déformé. Ces approches reposent sur l'utilisation d'une interaction effective décrivant l'interaction forte entre les nucléons dans le noyau.

Ces approches dites de type « champ moyen » sont cependant insuffisantes dans de nombreuses situations. C'est par exemple le cas lorsque l'on veut attribuer des « bons nombres quantiques » aux états nucléaires calculés. En effet, les méthodes de champ moyen imposent de briser explicitement des symétries de l'opérateur hamiltonien auxquels ces nombres quantiques sont associés. Ces symétries doivent donc être restaurées afin de pouvoir attribuer des nombres quantiques bien définis aux états du noyau. C'est également le cas lorsque l'on veut prendre en compte les fluctuations quantiques le long d'une ou plusieurs coordonnées collectives (par exemple liées à la forme du noyau) dans le cadre de la méthode de la coordonnée génératrice (GCM). Les méthodes de restauration de symétrie et la GCM sont dites « au-delà du champ moyen ».

Les interactions effectives donnant des résultats satisfaisants à l'approximation du champ moyen contiennent des constantes de couplages dépendantes de la densité du noyau décrit. Or il a été montré, il y a quelques années, que ces termes dépendants de la densité n'étaient pas utilisables (sans difficultés et ambiguïtés) dans les approches au-delà du champ moyen. Des travaux récemment réalisés à l'IP2I en collaboration avec les universités de Jyväskylä (Finlande) et de York (Royaume Uni) ont permis de proposer une nouvelle interaction effective dite « régularisée » et contenant des termes à deux et trois corps qui est à ce jour la seule interaction donnant des résultats satisfaisants à l'approximation du champ moyen et ne contenant pas de terme dépendant de la densité.

Le travail demandé durant cette thèse consistera à implémenter une telle interaction dans un programme permettant de faire des calculs GCM avec restauration de symétrie puis à en ajuster paramètres. Une première série de calculs de production et d'analyse des résultats permettra de mesurer les qualités et le pouvoir prédictif de cette interaction et d'en proposer une éventuelle amélioration. Ce travail contiendra donc une partie formelle, de la programmation et nécessitera l'utilisation d'outils statistiques permettant d'analyser les résultats obtenus.

## PhD thesis proposal – 2024-2027

**Research field:** Theoretical nuclear structure

**Thesis title:** Regularized effective interactions and beyond-mean-field calculations

**Supervisor:** K. Bennaceur

**Phone:** +33 (0)6 70 35 01 48

**Email:** [bennaceur@ipnl.in2p3.fr](mailto:bennaceur@ipnl.in2p3.fr)

**Address:** IP2I Lyon – Bureau 338  
Domaine Scientifique de la Doua – Bât. Paul Dirac  
4 rue Enrico Fermi – 69622 Villeurbanne Cedex - France

### Work description:

Elementary properties of atomic nuclei, such as their mass, size and shape, can be approximately described using mean-field methods like the Hartree-Fock-Bogolyubov method (HFB) that allows pairing correlations to be explicitly taken into account or like the HFB method with constraints when the considered nucleus is deformed in its ground state. These methods are based on the use of an effective interaction which describes the strong interaction between nucleons in the nucleus.

These so-called “mean-field” approaches are, however, insufficient in many situations. This is, for example, the case when we want to obtain states with “good quantum numbers”. Indeed, mean-field methods require an explicit breaking the symmetries of the Hamiltonian operator with which these quantum numbers are associated. These symmetries must therefore be restored in order to be able to assign well-defined quantum numbers to the states of the nucleus. This is also the case when we want to take into account quantum fluctuations along one or more collective coordinates (for example linked to the shape of the nucleus) within the framework of the generator coordinate method (GCM). Symmetry restoration methods and GCM are called “beyond mean field” methods.

Effective interactions that give satisfying results at the mean-field level contain density-dependent coupling constants. However, it was shown, a few years ago, that these density-dependent terms could not be used (without difficulties and ambiguities) in approaches beyond the mean-field approximation. Works recently done at IP2I, in collaboration with the universities of Jyväskylä (Finland) and York (United Kingdom), has made it possible to propose a new effective “regularized” interaction that contains two- and three-body terms. This is to date the only interaction that gives satisfactory results at the mean-field approximation and which does not contain density-dependent terms.

During this thesis, the student will work on the implementation of such an interaction in a program allowing for GCM calculations with symmetry restoration and on the adjustment of its parameters. A first series of production calculations and the analysis of the results will make it possible to measure the qualities and predictive power of this interaction and to propose possible improvements. This work will therefore contain a formal part, some programming and will require the use of statistical tools to analyze the results obtained.