

**Contribution aux exercices de prospective 2020-2030**  
***Contribution to the 2020-2030 prospective reflection***

**Energie nucléaire et environnement**  
*Nuclear energy and environment*

**1) Aperçu / Overview**

Thème de recherche proposé :

Données nucléaires pour l'énergie (DNE), de l'expression du besoin à l'évaluation

Axe principal concerné (**voir la liste des thèmes en fin de document**) :

Physique des réacteurs (acquisition des données de base, évaluation, modélisation)

Contributeur(s) (et affiliations) de la proposition :

✕ **LPSC** - Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie de Grenoble, IN2P3 (CNRS), Université Grenoble Alpes :

*A. Bidaud, G. Kessedjian, A. Billebaud*

✕ **IPNO** - Institut de Physique Nucléaire Orsay CNRS/IN2P3, Université Paris Sud :

*X. Doligez, L. Audouin*

✕ **SUBATECH**, CNRS/IN2P3, IMT, Université de Nantes :

*L. Giot, M. Fallot, A. Porta, M. Estienne*

✕ **CENBG** - Centre Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan CNRS/IN2P3, Université de Bordeaux :

*B. Jurado, M. Aiche, L. Mathieu*

✕ **IPHC** - Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN CNRS/IN2P3, Université de Strasbourg :

*M. Kerveno, Ph. Dessagne, G. Henning*

✕ **LPCC** - Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, ENSICAEN/Université de Caen/CNRS-IN2P3 :

*J. -L. Lecouey, F.-R. Lecolley, G. Lehaut, N. Marie*

Email du contact de la proposition : maelle.kerveno@iphc.cnrs.fr

Résumé (500 caractères max., incluant les espaces) :

Cette contribution propose des orientations nouvelles pour construire des projets de recherches complémentaires et cohérents répondant aux enjeux de la thématique DNE. Les équipes de l'IN2P3 souhaitent articuler leurs recherches autour de la mesure de données nucléaires, de la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'évaluation et de l'étude des sensibilités permettant de tester les effets des nouvelles mesures et évaluations produites sur des grandeurs macroscopiques du réacteur nucléaire.

## 2) Description de la question/problématique scientifique rattachée au thème (1 page)

Quels que soient les codes utilisés, la simulation de réacteurs et des cycles de combustibles innovants nécessite l'emploi de bases de données évaluées qui regroupent les observables et les différents paramètres de physique nucléaire indispensables à la simulation de l'interaction particules-matière. Une donnée nucléaire évaluée d'une grandeur physique (section efficace, distribution angulaire, spectre de particules émises,...) est construite à partir de sa connaissance expérimentale (mesure microscopique et intégrale) et théorique (modélisation par les codes de calcul des réactions nucléaires par exemple) et représente sa meilleure estimation. Aujourd'hui les défis à relever pour produire des bases de données modernes et optimales touchent tous les aspects du cycle de l'évaluation : la production de données expérimentales de qualité (précises, explicites, contraignantes, ...), le développement de modèles théoriques prédictifs (du phénoménologique vers le microscopique) et de méthodes d'évaluation modernes. Le faible nombre d'évaluateurs aujourd'hui rend d'autant plus critique le processus d'évaluation et oblige la communauté à explorer des pistes nouvelles.

Six équipes de l'IN2P3 sont engagées, en collaboration étroite avec celles du CEA, depuis plus de 20 ans dans la thématique générale des données nucléaires pour l'énergie. A l'origine, les efforts ont été déployés principalement pour produire de nouvelles données expérimentales, qu'elles soient nécessaires pour les études des ADS ou du cycle du thorium. Les équipes de physiciens nucléaires de l'IN2P3 ont su mettre à profit les instruments existants et/ou développer leurs propres systèmes de détection auprès de diverses installations européennes pour produire des données de qualité utilisables par les évaluateurs. Ces travaux ont été réalisés notamment grâce au soutien du programme français NEEDS et des projets européens tels qu'ANDES ou CHANDA. Les équipes françaises ont étendu leurs études à différents types de réacteurs actuels et futurs et sont aujourd'hui bien identifiées et reconnues dans la communauté européenne et internationale des données nucléaires (implication dans les réunions du projet NEA/JEFF et de la Nuclear Data Section de l'AIEA, les WPEC de la NEA - Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, ...). Le CNRS a notamment participé activement à la construction du nouveau projet européen SANDA (H2020-NFRP2018).

Compte tenu des enjeux cités plus haut, les équipes de l'IN2P3 font évoluer leur implication dans la thématique au-delà de la seule mesure de données expérimentales. En effet, certaines équipes s'investissent dans le travail d'évaluation en lui-même et d'autres développent des collaborations avec les neutroniciens de l'IN2P3 pour développer des outils de calculs de sensibilités qui servent, in fine, à déterminer l'impact de nouvelles mesures sur la précision de certains paramètres de fonctionnement des réacteurs. Ces nouveaux axes de recherches s'inscrivent parfaitement dans le contexte européen qui, via le nouveau projet SANDA (2019-2023), tente de consolider les passerelles entre les différents acteurs (expérimentateurs, théoriciens, évaluateurs) des données nucléaires mais également de rapprocher les communautés des physiciens nucléaires et des neutroniciens. Au niveau français, ces rapprochements sont aussi favorisés via le projet structurant NEEDS/NACRE où émergent toutes les équipes de l'IN2P3 et leurs homologues du CEA ainsi qu'une équipe d'évaluateurs de l'IRSN. L'animation scientifique créée au sein du GDR SciNEE permet également des échanges sur des projets communs.

Pour les 10 ans à venir, nous souhaitons donc nourrir nos activités autour de 3 pôles d'intérêt qui permettront de relever de façon cohérente et pertinente les défis de la

thématique des données nucléaires. Le premier, historique et de plus grande ampleur en terme de budget et de ressources humaines, s'appuie sur nos savoirs faire expérimentaux pour la production de données nucléaires de qualité. Les programmes de recherches seront définis pour partie en accord avec la NEA/HPRL (High Priority Request List), l'AIEA et la feuille de route de la nouvelle version de la base de données européenne JEFF-4 prévue pour 2024 mais pourront s'enrichir, également, des requêtes déterminées grâce aux études de sensibilité menées à l'IN2P3. Ces études constituent un second pôle de recherches. Enfin un troisième pôle sera développé autour de l'évaluation des données nucléaires.

Collaborateurs (personnes ou organismes) identifiés ou potentiels (dans et hors IN2P3) :  
CEA, AIEA, IRSN, partenaires du projet européen H2020-NFRP2018-SANDA

Instruments/Outils impliqués :

- Les installations nucléaires européennes (par exemple celles du réseau européen ARIEL).  
GELINA@EC-JRC Geel, Lohengrin@ILL, Jyväskylä, ALTO@IPNO, GENESIS@LPSC, NFS@SPIRAL2, n-TOF@CERN, R3B@GSI, ISOLDE@ CERN ...
- Les détecteurs des collaborations (GRAPHEME, TAGS, E-shape , SCALP, SOFIA, ...) et leur électronique (FASTER, ...)
- Les codes de simulation de physique de réacteur utilisés et/ou développés à l'IN2P3 : SMURE, MCNP, SERPENT et les plateformes de simulation et le CC-IN2P3.

### **3) Suggestion de projet(s) pouvant répondre à la question/problématique proposée (1 page max.)**

*Indiquer si possible l'envergure qu'auraient ce ou ces projets (manpower, budget, durée).*

Pour répondre aux enjeux de la thématique des données nucléaires dans les 10 prochaines années, les équipes de l'IN2P3 se positionnent sur trois projets (pôles de recherches) :

#### *Pôle 1 : production de données nucléaires expérimentales*

Fortes de leur expertise acquise depuis plus de 20 ans, les équipes poursuivent leurs investigations autour de la mesure de sections efficaces de réactions, de rendements de fission et de la décroissance des produits de fission. Le cycle pour obtenir une nouvelle mesure d'une observable peut prendre jusqu'à 5 ans (voir plus dans certains cas) et s'inscrit donc bien dans une prospective à 10 ans. Afin d'obtenir des précisions accrues et/ou de coupler davantage d'observables, l'instrumentation fait l'objet d'une R&D permanente amenant soit à des améliorations de détecteurs existants, soit à la mise en service de nouveaux systèmes. Ces activités se déroulent principalement auprès des installations européennes et seront soutenues par les programmes européens facilitant l'accès aux faisceaux de particules (cf. projet H2020-NFRP2018-ARIEL). On peut mentionner également que, dans les années à venir, de nouveaux programmes de mesures pourront être mis en œuvre avec le démarrage de la nouvelle installation SPIRAL2/NFS qui fournira un faisceau de neutron dans une gamme d'énergie encore peu explorée ou avec le développement de FAIR à GSI qui ouvrira de nouvelles perspectives en termes de faisceaux radioactifs.

#### *Pôle 2 : évaluation de données nucléaires*

L'évaluation de données nucléaires est un domaine en soi qui a pour but de fournir, à un instant donné, la meilleure information sur une observable. Cette information est à la fois la synthèse des connaissances expérimentales et théoriques, le plus souvent basée sur des modèles phénoménologiques qui possèdent des paramètres à déterminer avec leurs marges. Les méthodes expérimentales comme les modèles concourent à l'estimation de la fiabilité des évaluations à travers des tests statistiques pour le niveau de confiance requis. Ces évaluations permettront de définir les programmes expérimentaux des prochaines années par des analyses de sensibilités des modèles aux données et la compréhension des mécanismes de réactions à l'œuvre dans les observables à interpréter. Evaluer c'est aussi prendre en compte les informations macroscopiques issues de la physique des réacteurs, en particulier les inventaires du cycle mesurés et calculés. Ce sujet fait appel à une diversité de méthodes déterministe ou stochastique, fréquentiste ou bayésienne et s'ouvre actuellement aux méthodes d'intelligences artificielles. Le développement et la maîtrise de ces outils numériques en interne doivent être à la fois l'enjeu et les perspectives de l'institut dans le domaine de l'évaluation, tout en gardant les compétences en physique nucléaire fondamentale, base de la vraisemblance des solutions proposées.

#### *Pôle 3 : études de sensibilité aux données nucléaires*

Les récents développements des méthodes numériques pour les calculs d'incertitudes et sensibilités (méthodes analytiques, TMC et sensibilités) permettent désormais de rapprocher la physique des réacteurs de la physique nucléaire en amont des évaluations et de leur traitement. Ces progrès numériques ouvrent la porte à de nouveaux calculs de sensibilités à des paramètres de modèles (données thermiques, paramètres de résonance, ...) et aussi à de nouvelles grandeurs comme les taux de réactions, les coefficients de réactivité ou les

fonctions propres des distributions de puissance par exemple. Toutes ces études pourront aussi intégrer l'évolution des combustibles.

Ces avancées se concrétisent aujourd'hui dans les algorithmes proposés, testés et diffusés à l'IN2P3. Avec les pôles 1 (production de nouvelles mesures) et 2 (évaluation pour des nouvelles données) de la présente contribution, il sera possible de quantifier précisément l'impact de chaque nouvelle expérience sur les paramètres intégraux des réacteurs en recalculant les erreurs et les sensibilités avant et après la nouvelle évaluation. Il sera aussi possible de comparer les méthodes de production des données et notamment le traitement des covariances lors des évaluations sur les calculs de sensibilités et d'incertitudes. Un des objectifs ultimes de ce travail serait de définir le besoin de nouvelles mesures à inclure dans les listes des priorités discutées dans les groupes de travail internationaux.

Manpower et budgets minimum pour atteindre, dans des conditions acceptables, les objectifs fixés dans les 10 ans à venir:

Pour ces projets (pôle 1 et 2), les équipes IN2P3 sont engagées, actuellement, à hauteur d'environ 140 h.m/an (doctorants compris) pour un budget global approximatif de 200 k€/an (réparti comme suit : IN2P3 - 45 k€/an, NEEDS - 75 k€/an, SANDA - 75 k€/an). Il faut noter que les activités du pôle 2 représentent aujourd'hui une part minime de ces montants et qu'un renforcement de cette activité nécessite l'augmentation du manpower dédié. Par ailleurs, la maintenance et la mise à niveau de nos instruments nécessitent un budget d'équipement récurrent. Le maintien des effectifs sur les 10 ans à venir est une condition, a minima, de la réussite de nos projets expérimentaux.

Pour le pôle 3, il faut envisager un vrai saut (facteur 3) dans l'engagement de personnels pour atteindre 60 h.m/an (doctorants compris) pour un budget de fonctionnement de l'ordre 30 k€/an.

Merci de renvoyer ce document à [prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr](mailto:prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr) avant le

**1er Novembre 2019**

*Please send this document to [prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr](mailto:prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr) before*

**November 1st, 2019**

### Liste des thèmes

- Physique des réacteurs : modélisation et expérimentation, neutronique, thermohydraulique, couplage multi-physique, acquisition de données de base (sections efficaces, évaluation des données nucléaires, données de thermohydraulique), physique de la sous-criticité, études de scénarios, ouverture interdisciplinaire : approche technico-socio-économique (prix, coût, ressources, ...). Application aux réacteurs actuels et innovants, études de scénarios...
- Radiochimie des matières nucléaires : données de base (spéciation, interaction avec ligands), compréhension des processus de dissolution, de séparation, processus de diffusion, modélisation. Application au traitement des combustibles usés, processus de dissolution et d'extraction, conditionnement des radionucléides, diffusion des radionucléides dans un site de stockage (matériaux, barrière, argile)...
- Irradiation des matériaux nucléaires : compréhension des processus d'endommagement par les ions et neutrons, acquisition de données de base, modélisation. Application aux matériaux de structures et combustible, tenue des déchets nucléaires à l'irradiation, impact de l'irradiation dans les gisements...
- Radioactivité et environnement : acquisition de données de base (spéciation, ligands), modélisation, processus de transferts, mesures de très basses radioactivités. Application au comportement des radionucléides dans le biotope, microorganismes, exploration de procédés de remédiation.

### Research topics :

- Reactor physics : modelling and experimentation, neutronics, thermohydraulics, multi-physics coupling, basic data acquisition (cross sections, evaluation of nuclear data, thermohydraulics data), subcriticality physics, scenario studies, interdisciplinary activities : technical-socio-economic approach (price, cost, resources, etc.). Application to current and innovative reactors, scenario studies....
- Radiochemistry of nuclear materials : basic data (speciation, interaction with ligands), understanding of dissolution, separation, diffusion processes, modelling. Application to the treatment of spent fuels, dissolution and extraction processes, conditioning of radionuclides, diffusion of radionuclides in a storage site (materials, barrier, clay)...
- Irradiation of nuclear materials : understanding of ion and neutron damage processes, basic data acquisition, modelling. Application to structural and fuel materials, resistance of nuclear waste to irradiation, impact of irradiation in deposits...
- Radioactivity and environment : acquisition of basic data (speciation, ligands), modelling, transfer processes, measurements of very low radioactivity. Application to the behaviour of radionuclides in the biotope, microorganisms, exploration of remediation processes.