

Prospectives 2004
Thème : « Physique et Chimie pour le « nucléaire » et l'environnement »
Sous-groupe : XADS/Spallation

S. Leray et T. Kirchner

L'objectif de ce sous-groupe est d'examiner les perspectives des études fondamentales et techniques concernant les cibles de spallation et leur environnement pour les réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS).

1. Intérêt et perspectives des ADS

La poursuite du développement de l'énergie nucléaire nécessite de trouver une solution, acceptable par la société, pour la gestion des déchets nucléaires à vie longue. Dans le cadre de la loi Bataille de 1991, sont étudiés en parallèle le stockage, l'entreposage de longue durée et la transmutation des déchets en isotopes stables ou à vie courte. Les réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS) constituent l'une des voies envisagées pour l'incinération des actinides mineurs. Ils font appel à un accélérateur de protons de haute intensité, bombardant une cible de spallation, généralement faite dans un matériau de numéro atomique élevé (W, Pb ou Pb-Bi). Les neutrons générés lors des réactions de spallation sont ensuite multipliés dans le réacteur sous-critique où ont lieu les réactions de transmutation. L'avantage principal de cette solution est de permettre l'utilisation de combustibles à haute teneur en actinides mineurs, assurant une incinération efficace, ce qui n'est pas possible dans des réacteurs critiques du fait de la dégradation des paramètres de sûreté (fraction de neutrons retardés, coefficients de température...) lorsque la concentration en plutonium ou d'actinides mineurs est importante. Quelques ADS dédiés à l'incinération des actinides mineurs dans un parc de REPs et de RNRs pourraient suffire pour réduire de façon significative la radiotoxicité à long terme des déchets.

En Europe, est en train de se mettre en place le projet IP-EUROTRANS, dans le cadre du 6^{ième} PCRD, dont l'objectif est la conception et l'étude de faisabilité d'un prototype d'ADS. Ce projet réunit l'ensemble des acteurs Européens dans les domaines des combustibles, matériaux, accélérateurs et données nucléaires pour les ADS et vise une démonstration expérimentale de certaines composantes de l'ADS afin de rassembler tous les éléments permettant de décider la construction éventuelle d'un démonstrateur Européen lors du 7^{ième} PCRD.

En ce qui concerne les études plus spécifiques liées au module de spallation, il s'agit d'évaluer et de démontrer la technologie des cibles de métal lourd liquide en termes de performances, de résistance aux dommages et de radioprotection, et d'estimer la tenue dans le temps des composants environnants comme la fenêtre ou le container de la cible soumis à d'importants dommages ou à des problèmes de corrosion. Ceci nécessite un vaste ensemble d'études alliant la compréhension des mécanismes élémentaires des réactions de spallation, des tests de matériaux dans des conditions représentatives et des validations en vraie grandeur dans des cibles de spallation comme MEGAPIE.

Il est important de noter que les sources de spallation ont aussi beaucoup d'autres applications potentielles (caractérisation de matériaux pour l'industrie et la biologie, irradiation pour les réacteurs du futur, la fusion, l'industrie spatiale, production de faisceaux radioactifs, ...) qui

pourraient bénéficier de ces études. Rappelons que des sources de spallation sont actuellement en construction aux USA (SNS) et au Japon (JPARC).

2. Etudes de base sur la spallation

L'objectif général est d'atteindre une compréhension détaillée du mécanisme physique de la spallation pour pouvoir prédire avec une précision suffisante et quantifiée toute quantité relative aux réactions de haute énergie (>20 MeV) dans un ADS. En particulier, il est nécessaire de pouvoir déterminer les performances de la cible en terme de production de neutrons et d'estimer les problèmes spécifiques liés aux réactions de spallation comme par exemple les fuites de neutrons de haute énergie, les dommages aux matériaux dans la fenêtre et le container de la cible, la radioactivité induite ou les modifications de composition chimique qui peuvent induire des problèmes de corrosion.

Ceci nécessite des outils de simulation fiables et validés. Pour cela, il faut donc, à la fois, des mesures expérimentales de qualité qui permettent de comprendre les mécanismes et de contraindre les modèles de physique décrivant les réactions, et des développements théoriques permettant d'améliorer ces modèles puis de les valider. Pour les énergies intermédiaires, ces modèles servent à générer des bases de données évaluées tandis que pour les hautes énergies ils sont directement inclus dans les codes de transport utilisés par les concepteurs de sources de spallation.

a. Etat des lieux

Des progrès importants ont été faits au cours des dernières années grâce aux mesures et au travail sur les modèles réalisés dans le cadre du projet Européen HINDAS et de GEDE(PE)ON, surtout en ce qui concerne la prédiction des neutrons et des résidus. Cependant, ces études ont aussi mis en évidence des domaines où les données expérimentales sont insuffisantes ou contradictoires ou que les modèles échouent à reproduire, domaines qui sont fondamentaux pour les applications, en particulier les dommages aux matériaux. C'est le cas des particules légères chargées (LCP), des fragments de masse intermédiaires (IMF), des résidus les plus légers et de la fission dans certains cas. La situation ne pourra être améliorée que grâce à des expériences plus exclusives de coïncidence entre différents types de particules qui devraient permettre de mieux comprendre les mécanismes manquants et de contraindre efficacement les modèles.

b. Perspectives à court et moyen termes (NUDATRA)

Les expériences des équipes françaises en cours ou en projet à court terme se situent essentiellement à GSI-Darmstadt pour les hautes énergies et à Uppsala pour les énergies intermédiaires. Elle vise à répondre aux questions soulevées dans HINDAS: mesures de LCP et IMF, mesures de sections efficaces de fission, mesures en coïncidence plus contraignantes pour les modèles (systèmes légers seulement), mesures avec faisceaux de neutrons aux énergies intermédiaires de l'ensemble des voies de réaction. Parallèlement, les développements théoriques sont poursuivis: prise en compte de la production de composites et IMF dans les modèles, amélioration de l'évaporation et de la fission. Ce travail se fera, partiellement étant donné les faibles ressources allouées, dans le cadre du sous-projet NUDATRA (Domain 5) du projet IP-EUROTRANS qui est un programme sur 4 ans. Il devrait permettre une prédiction plus fiable des performances et problèmes spécifiques de MEGAPIE, TRADE et autres projets de démonstrateurs.

c. Perspectives à plus long terme

Les dispositifs expérimentaux actuels ne permettent pas de réaliser des expériences complètement exclusives pour les systèmes lourds. Actuellement, est à l'étude un dispositif alliant un aimant de grande acceptance (GLAD), des détecteurs de traces (pour les particules chargées) et de neutrons de grande granularité qui permettrait ces expériences à GSI. Cet ensemble, qui intéresse aussi les physiciens de structure et dynamique nucléaire (collaboration R3B, voir sous-groupe "réactions nucléaires"), devrait être opérationnel en 2008-2009.

Les mesures en coïncidence avec cet ensemble à GSI devraient permettre de résoudre les problèmes spécifiques des noyaux lourds et d'aboutir à une compréhension complète des réactions de spallation. A cette date, on aura par ailleurs le retour des expériences MEGAPIE et TRADE qui auront permis de tester en vraie grandeur les prédictions des codes de simulation. Ceci devrait constituer une validation finale des modèles qui seront mis à la disposition d'outils de simulation comme MCNPX ou GEANT4 afin d'assurer une prédiction fiable des performances et problèmes spécifiques des réactions de spallation dans un futur ADS.

Par ailleurs, les expériences réalisées et les modèles développés seront aussi très importants pour la physique des mécanismes de réaction en général (synergie avec les sous-groupes "Réactions nucléaires" et "Matière, noyau, transport et transition" du groupe "Structure et Dynamique Nucléaire"), d'autres applications de la spallation comme l'astrophysique ou le spatial.

3. Développement des cibles de spallation:

Objectif général: maîtriser la réalisation des cibles de spallation pour de futurs ADS et d'autres domaines en recherche fondamentale ou applications industrielles nécessitant des sources de neutrons intenses.

L'approche pour atteindre cet objectif est une approche par étapes reflétées par les projets en cours et en préparation. Il s'agit de MEGAPIE et la cible de spallation de TRADE avec, respectivement la réalisation d'une première cible de spallation liquide et la caractérisation d'une cible de spallation au sein d'un cœur de réacteur à faible puissance.

L'étape suivante est le développement des cibles de spallation pour les XADS, notamment pour MYRRHA (XADS de max. 100kW(th)) et le ETD (European Transmutation Demonstrator de ~ 300kW(th)) de EUROTRANS du 6^e PCRD.

a. La cible de spallation MEGAPIE

MEGAPIE sera la première réalisation d'une cible de spallation en plomb-bismuth liquide. L'irradiation de la cible est prévue pour 2006 et l'analyse post irradiation (après une période de refroidissement) durera jusqu'en 2009.

A court terme jusqu'en 2006 la priorité des activités en physique nucléaire s'articulent autour de l'étude de sûreté menée avec/pour les autorités suisses. Un certain nombre de résultats de simulations (obtenus par FLUKA et MCNPX) sont à valider par des expériences dédiées (ex. étude de la production des gazes volatiles avec l'expérience ISOLDE ...).

Pendant l'irradiation les caractéristiques neutroniques seront étudiées (ex. via les micro-chambres à fission à l'intérieur de la cible). L'analyse de la cible après irradiation permettra de tirer des enseignements sur les performances générales de la cible et de les comparer avec les prédictions initiales, en ce qui concerne le comportement des matériaux, l'activation de la cible, le vieillissement, la production des résidus de spallation ...

b. La cible de spallation pour TRADE

La recherche qui s'articule autour de la cible de spallation pour TRADE est la caractérisation et le monitoring de la source de neutrons (IN2P3 responsable du work-package correspondant dans EUROTRANS).

A court terme il s'agit de mener une campagne expérimentale réalisée auprès du réacteur TRIGA (sans cible de spallation), campagne qui s'arrêtera à la fin de l'année 2004. Ces mesures permettent d'établir la distribution du flux de neutrons dans différentes configurations du réacteur, comme point de référence pour la suite du développement.

Ces mesures reprendront en 2007 après la construction de TRADE, avec le faisceau et un "mock-up" de la cible de spallation, puis en 2008 avec la vraie cible dans le cœur du réacteur. Ce travail est mené en parallèle avec une forte implication dans le domaine de la physique des réacteurs, comme participer à la mise au point de procédures de contrôle, à la maîtrise du couplage accélérateur-cœur, ...

c. Les cibles de spallation pour MYRRHA et ETD

Base sur le retour d'expérience du projet MEGAPIE et TRADE différents concepts de cible de spallation sont à étudier pour les futures XADS. Un ensemble de simulations nucléaires sera nécessaire pour déterminer les grandeurs physiques pertinentes qui serviront à la conception de la cible, à l'étude de sûreté, à l'estimation de la durée de vie de la cible, à l'étude d'impact sur les caractéristiques du cœur, ...

Le travail de simulation doit être fortement soutenu par un programme de recherche expérimentale et un développement théorique des codes de simulation pour identifier et, si possible, minimiser les incertitudes.

d. Conclusion

Ces travaux de développement, avec comme objectif final la réalisation des cibles de spallation, nécessitent de réunir les compétences au sein des organismes, à la fois des équipes de chercheurs et des ingénieurs en bureau d'études. Par ailleurs cette recherche ne peut se faire qu'en étroites collaborations avec nos autres partenaires nationaux (CEA, CNRS, Framatome ...) et internationaux (6^e PCRD, accords bilatéraux)

4. Conclusions

L'ensemble des études évoquées dans ce document sont faites dans le cadre de collaborations Européennes dans lesquelles les laboratoires du DAPNIA et de l'IN2P3 sont parfaitement intégrés et ont chacun leur spécificité reconnue. Ces collaborations réunissent d'ailleurs beaucoup plus largement aussi des physiciens, chimistes et ingénieurs d'autres directions du CEA, d'autres départements du CNRS ou de l'industrie. Il ne paraît pas nécessaire de changer des structures qui fonctionnent plutôt bien.

Il paraît par contre important de veiller à ce que les moyens expérimentaux nécessaires à ces études qui se trouvent tous à l'étranger soient disponibles: faisceaux de neutrons (Uppsala, Louvain), machines de haute énergie (GSI, COSY) avec systèmes de détection appropriés, éléments de démonstration ou de qualification comme MEGAPIE ou TRADE. Ceci nécessite une implication claire et pérenne des équipes françaises. En particulier, il est important de se positionner rapidement et fortement (en partenariat avec les groupes de structure et dynamique nucléaire) dans le projet du futur GSI.

L'ensemble de ces études ne pourra se faire et les équipes n'auront d'impact au niveau international que si les groupes impliqués ont des moyens humains et financiers suffisants.