

Prospectives 2004-2014 DSM/DAPNIA – IN2P3
Physique et Chimie pour le nucléaire et l'environnement

Groupe de travail : Physico-Chimie sous irradiation
1^{er} document : Mai 2005

**R. Barillon (IRES), G. Blondiaux (CERI), S. Bouffard (CIRIL),
C. Corbel (SCM), M. Fattahi (SUBATECH), N. Moncoffre (IPNL),
A. Özgümüs (IPNO), L. Thomé (CSNSM)**

La science de l'irradiation est un domaine complexe où la physique atomique, la physique de la matière condensée et la chimie se côtoient pour une approche fondamentale qui, de tout temps, a eu des retombées dans de nombreux domaines appliqués. En effet, les irradiations, qu'elles soient liées à l'activité humaine ou naturelle, ont des conséquences qu'il est important de connaître afin de mieux les utiliser ou de s'en prémunir. Nous pouvons ainsi classer les perspectives de recherche sur la physico-chimie sous irradiation en quatre grands domaines :

i) **Les recherches pour l'énergie :**

L'énergie nucléaire de fission et de fusion restera une source majeure d'énergie au cours de ce siècle, avec la nécessité de maîtriser la sécurité des réacteurs du futur et la gestion des déchets. Les matériaux et les conditions de sollicitation de ces matériaux sont extrêmement variés: fort taux d'endommagement et haute température pour le combustible, les cibles de transmutation et les éléments de structure des tokamaks, irradiation sur des temps géologiques pour les matrices de stockage, intégrité des éléments de sécurité soumis à de faibles doses, corrosion sous irradiation... Aussi, à côté des études d'ingénierie de la tenue et de l'évolution à long terme des matériaux et des interfaces solide/liquide et solide/gaz sous irradiation, la recherche en amont doit-elle fournir les bases de l'interprétation du comportement des matériaux dans le champ complexe de leurs utilisations. Ainsi des expériences modèles bien ciblées devront permettre de comprendre les processus élémentaires et les éléments particuliers du problème réel. De plus, ces expériences sur des cas simplifiés permettront de caler les paramètres et de valider les simulations multi-échelles qui ont pour objectif de modéliser ces phénomènes complexes allant de la création des défauts à l'influence de ces défauts sur les propriétés macroscopiques, entre autres, mécaniques. La recherche amont dans le domaine de la réactivité de surface en présence de radiolyse aux interfaces permettra de hiérarchiser les processus et d'identifier les mécanismes d'évolution qui, suivant les circonstances, peuvent devenir prépondérants.

ii) **Les recherches pour l'environnement :**

Ce domaine est étroitement lié au précédent par les choix énergétiques et la gestion rigoureuse des déchets nucléaires. L'irradiation via l'interaction des particules irradiantes avec la matière est en outre un outil de caractérisation fort

utile pour des mesures de pollution atmosphérique et des sols (ex d'ARCANE à Bordeaux) et pour l'étude des mécanismes de dépollution.

iii) La Science des Matériaux :

L'irradiation en permettant le contrôle de la concentration et de la nature des défauts introduits dans les matériaux devient un outil de maîtrise de leurs propriétés macroscopiques. Dans les polymères, le durcissement par création d'un désordre contrôlé ou par réticulation est un exemple de modification de microstructure. Un autre exemple est celui de la microélectronique où l'implantation ionique s'est imposée pour des fins aussi variées que le contrôle du dopage, la durée de vie des porteurs ou la découpe de couches minces. Les perspectives dans d'autres domaines méritent d'être explorées.

L'irradiation est également un outil pour la synthèse de matériaux hors équilibre (mélange par faisceaux d'ions, stabilisation de phases hors d'équilibre...) ou de matériaux nanostructurés de géométries diverses par ségrégation ou modifications structurales (traces latentes par exemple).

Ces utilisations sont possibles sur les bases de la recherche amont menée en physique du solide sur la physique des défauts dans les matériaux irradiés. L'introduction contrôlée des défauts et leur identification sont corrélées à l'évolution de diverses propriétés macroscopiques des matériaux - transport, électrique, optique, magnétique, - pour mettre en évidence le rôle des défauts.

iv) La santé, le domaine du vivant :

La radiobiologie est un des volets les plus importants des études portant sur les effets des irradiations subies (radioprotection) ou voulues (radiothérapie) sur les matériaux du vivant. Cette science, par essence pluridisciplinaire, va de la physique de l'interaction particule-matière à la médecine, en passant par la chimie radicalaire et la biologie fondamentale.

Les recherches fondamentales ou appliquées sur la physico-chimie sous irradiation doivent donc pouvoir disposer d'accélérateurs (ions et électrons) et d'une instrumentation spécifique. De plus, il est important de rappeler que ces machines sont pour la plupart communes à d'autres domaines comme l'analyse par les techniques nucléaires ou la physique nucléaire.

Projets techniques

Un certain nombre de projets techniques sont en cours de développement :

Projet JANNUS

Une fédération de laboratoires CEA et CNRS situés sur les sites de Saclay et d'Orsay a été créée dans le but de construire puis d'exploiter un ensemble expérimental, nommé JANNUS, constitué de trois accélérateurs électrostatiques d'ions couplés à une chambre expérimentale commune et d'un microscope électronique en transmission couplé à un accélérateur et à un implanteur d'ions. Cette installation, qui devrait être en fonctionnement dans le courant de l'année 2006 permettra de réaliser des expériences d'irradiation simultanées ou séparées de matériaux solides inorganiques dans des conditions contrôlées de flux, de fluence, de température et de régime d'endommagement, et d'étudier les synergies qui peuvent en résulter. Elle sera ouverte aux communautés

scientifiques nationale et internationale et aux grands projets fédérateurs sur les thèmes centraux de la synthèse et évolution structurale d'alliages et de modification des propriétés d'usage des matériaux nucléaires en vue d'une modélisation multi-échelle.

CERI à Orléans

Parmi les principaux projets techniques du CERI, le développement d'outils supplémentaires permettant la caractérisation des défauts induits par l'irradiation et l'étude des interactions défauts-impuretés est envisagé. La construction d'un accélérateur pulsé de positons lents et la réalisation d'une source intense basée sur l'emploi d'un linac permettraient d'aboutir à la construction d'un microscope à positons. Dans le domaine de la santé, le développement de la potentialisation par capture de neutrons est en cours avec pour finalité la mise au point d'un traitement du glioblastome. Enfin un centre d'imagerie radioisotopique du petit animal utilisant les moyens d'irradiation du centre doit rapidement se mettre en place.

CIRIL et les faisceaux du GANIL à Caen

Les recherches sont essentiellement axées sur les effets des excitations électroniques sur les matériaux quelle que soit leur nature (molécules isolées, oxydes, polymères, matière vivante...). Les projets portent sur le développement d'instrumentations en ligne permettant de décrire en temps réel les processus physico-chimiques déclenchés par l'impact d'ions multichargés d'une part (le faisceau direct de SPIRAL II est particulièrement bien adapté à ces études) et de suivre les évolutions structurales des matériaux d'autre part. Les études de radiobiologie en soutien à l'hadronthérapie prendront une importance accrue.

Cyclotron de Nantes

Le Cyclotron de Nantes a trois objectifs principaux :

- La mise en œuvre de radionucléides émetteurs de particules alpha et de positons,
- L'étude de la radiolyse alpha de l'eau dans le domaine fondamental (radiolyse pulsée) et appliquée (problématique du stockage des déchets),
- La recherche en biologie qui apporte les données fondamentales sur l'effet des radiations ionisantes sur les cellules tumorales et les tissus sains.

L'IRES de Strasbourg

Ce laboratoire a pour objectif de réaliser un plateau d'expériences pour caractériser l'interaction ions/électrons avec la matière d'intérêt biologique. Ce plateau devra permettre une étude sous faisceau et résolue en temps de l'absorption, de l'émission (UV-visible) et des modes de vibrations moléculaires de la matière irradiée, le tout modulé par un champ magnétique ou électrique. Ce plateau constituera un ensemble unique pour l'étude de la matière biologique, en particulier en milieu aqueux. Il permettra d'explorer de nouveaux domaines expérimentaux tels que l'action des électrons de basse énergie. Il s'agit d'une collaboration IRCAD, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, LURE (Orsay), GANIL (Caen), PHASE (Strasbourg), Université de Kobe (JP), NIRS (Chiba, JP). Dans cette perspective, un équipement sera demandé afin de développer un générateur d'impulsions nanosecondes qui sera installé sur l'accélérateur linéaire 4 MV du PHASE pour des études avec des protons et des hélions.

Projet d'organisation

La science de l'irradiation, par essence très pluridisciplinaire, implique différents secteurs de la recherche (IN2P3, SPM, SC), tant dans les moyens humains que dans les moyens techniques. Il serait ainsi souhaitable de regrouper les moyens mis à la disposition de cette science dans une structure identifiant clairement la discipline (sous forme d'un GIS ou d'un GDR).