

Présentation et résumé des conclusions

Ce rapport concerne les « matériaux du nucléaire », raccourci commode pour désigner le champ des multiples matériaux (métaux et alliages, polymères, verres, céramiques...) qui, des cuves de réacteurs aux matrices de stockage de déchets, en passant par les générateurs de vapeur ou les barrières ouvragées, sont – ou pourraient être – utilisés dans l'industrie nucléaire. Pourquoi un rapport sur ce thème ? En quoi ce champ mérite-t-il, à l'égal de thématiques plus en vogue, une réflexion scientifique prospective approfondie ? N'a-t-il donc pas déjà reçu des techniciens du nucléaire assez de solutions pratiques pour ne plus avoir à solliciter la science du siècle nouveau ? Quels problèmes scientifiques et technologiques majeurs soulève-t-il encore dont la résolution demande un effort national particulier de recherche, de formation et d'organisation ? Ce sont les questions auxquelles les pages qui suivent s'efforceront d'apporter réponse.

1 – Champ, enjeux et défis des matériaux du nucléaire

Un premier constat s'impose : un demi-siècle à peine sépare la maîtrise industrielle du nucléaire de sa découverte ! Comment s'étonner dès lors que, même s'il a rapidement acquis une évidente maturité, ce secteur soulève encore tous les jours de nouvelles questions scientifiques et techniques ? À ce constat s'ajoute un autre, pour ce qui concerne plus particulièrement les matériaux : s'il n'est guère d'industrie qui n'ait, à quelque degré, à se soucier de maîtriser les problèmes de matériaux que posent son fonctionnement et son développement, il en est peu qui aient à le faire de manière aussi importante et exigeante que l'industrie nucléaire.

Grande consommatrice d'une extrême diversité de matériaux, cette industrie se doit en effet, non seulement pour fonctionner avec l'efficacité économique voulue mais aussi pour atteindre le haut niveau de sûreté et de sécurité légitimement imposé par la société, aux plans national autant qu'international, d'accorder une importance toute particulière à la maîtrise, d'un bout à l'autre de son cycle, des propriétés d'usage des matériaux qu'elle utilise et de leur *évolution*. Les matériaux du nucléaire ne sont que l'un des facteurs qui déterminent cette efficacité et cette sûreté mais ils interviennent de manière souvent critique en divers maillons de la chaîne de production, de l'amont à l'aval, qu'il s'agisse du fonctionnement des réacteurs, de l'accroissement de leur longévité, de leur démantèlement, du conditionnement ou de la gestion à long terme des déchets.

Ceci tient vraisemblablement à la combinaison peu commune dont ils sont l'objet de conditions de fonctionnement particulièrement sévères et d'une exigence extrême quant à la capacité de prévision de leur comportement, notamment de leur comportement à long, voire à très long terme : ainsi, tandis que l'irradiation, les sollicitations thermo-mécaniques et l'agression chimique se conjuguent pour mettre à rude épreuve leurs capacités de résistance, il importe de prévoir leur tenue ou leurs propriétés sur des échelles de temps allant de quelques années ou dizaines d'années pour les uns jusqu'à des durées séculaires, voire multi-millénaires pour d'autres. Il en résulte un besoin large et intense de connaissances avancées qui sollicitent en permanence à leurs limites la science et le génie des matériaux et leur proposent de manière continue de nouveaux défis. En cela les matériaux du nucléaire se retrouvent souvent en position d'être un facteur déterminant pour la résolution des questions posées par le présent et l'avenir du nucléaire et donc un élément clé vis-à-vis des enjeux économiques et de société correspondants – enjeux d'une importance particulière, est-il besoin de le rappeler, dans notre pays, du fait de la place prééminente qu'y occupe la production d'électricité d'origine nucléaire, avec un parc original tant par son homogénéité que par son importance (premier rang en Europe, second au niveau mondial).

Ainsi, aux enjeux économiques et de société qui s'attachent à leur maîtrise se conjuguent de forts enjeux scientifiques et techniques qui font que, quelle que soit l'évolution de la politique énergétique du pays, du seul fait de l'engagement déjà consenti dans le domaine électro-nucléaire et des besoins associés, désormais incontournables, en termes d'entretien, de démantèlement et de gestion des déchets produits, les matériaux du nucléaire s'imposent au nombre des thèmes scientifiques et technologiques d'importance nationale majeure, tant pour le présent que pour de nombreuses années à venir. Simultanément, par la nouveauté et la variété des questions scientifiques et techniques qu'ils posent comme par l'exigence de

compréhension approfondie qu'impose la capacité d'y répondre de manière pertinente, les matériaux du nucléaire se retrouvent sans aucun doute à l'un des carrefours les plus riches et actifs de la science et du génie des matériaux d'aujourd'hui.

2 – Spécificité, retombées et problèmes génériques

Avant même de présenter la structure générale de ce rapport, nous voulons d'abord souligner ici, pour appeler dès maintenant l'attention du lecteur sur les nombreuses illustrations qui en seront faites, l'une des caractéristiques majeures de la recherche dans le domaine scientifique concerné : **la conjugaison d'une forte spécificité, d'une grande capacité de retombées en dehors du secteur nucléaire et du caractère largement générique de nombre des problèmes posés.**

D'un côté, en effet, les conditions du nucléaire sollicitent les matériaux, dans une grande variété de situations, d'une manière très spécifique : il en va tout particulièrement ainsi de tout ce qui concerne *l'irradiation* et ses effets. La poursuite de l'objectif de compréhension et de maîtrise du comportement de la grande variété des matériaux du nucléaire dans les conditions réelles de leur utilisation, actuelle ou prévisible, conduit donc tout naturellement à accorder toute son importance à cette spécificité et à ses conséquences. C'est pour souligner ce fait majeur que nous consacrons à cette question centrale le premier Chapitre de ce rapport.

Pour autant, les connaissances acquises et les méthodes développées dans le cours de cette investigation peuvent trouver un vaste champ d'application en dehors de ces conditions spécifiques. Pour une part, en effet, nombre des phénomènes et mécanismes élémentaires mis en jeu dans le contexte du nucléaire régissent tout autant, dans des conditions généralement moins sévères ou simplement différentes, le comportement des mêmes matériaux dans l'ensemble des secteurs qui les utilisent. Pour une autre part, il peut s'agir de phénomènes ou de mécanismes spécifiques mais dont la compréhension nécessite des développements théoriques nouveaux et la mise au point d'approches, de méthodes et d'outils qui sont, de fait, de portée générale et peuvent profiter à toute la science des matériaux.

D'un autre côté, l'exigence élevée de sécurité qui prévaut dans le secteur nucléaire et donc celle d'une capacité de prévision, y compris *quantitative*, particulièrement poussée imposent à la fois une compréhension approfondie et une description précise des mécanismes élémentaires

aux échelles les plus fines et la mise au point de méthodes fiables de prévision de la réponse de structures de grandes dimensions, sièges de couplages complexes. Tout progrès réalisé dans la compréhension des mécanismes élémentaires rejaillit alors nécessairement sur celle du comportement des matériaux dans leur ensemble, tandis que toute avancée dans les méthodes de calcul, de dimensionnement et de tenue des structures profite à l'ensemble des domaines industriels de haute technicité. C'est là, déjà, un fait d'expérience, étayé par des décennies de percées scientifiques et techniques réalisées à partir d'une motivation issue du secteur nucléaire et qui montrent que les besoins de l'industrie nucléaire ont été et seront encore longtemps un puissant catalyseur pour le développement de la science et du génie des matériaux.

Ceci tient en particulier au fait que les conditions d'irradiation auxquelles sont soumis nombre de matériaux du nucléaire et la modification des propriétés qui en découle, d'une part, et le besoin de prévision de leur comportement à long, voire à très long terme, d'autre part, ne peuvent, par nature, s'appuyer que sur une base expérimentale limitée ; le recours à des simulations physiques (irradiation aux particules chargées) ou à des essais accélérés (analyse de la réponse à court terme à des sollicitations plus sévères) n'apporte, quant à lui, de réponse assurée que pour autant que la physique en jeu soit déjà bien comprise et les mécanismes à l'œuvre bien identifiés.

D'où la nécessité impérieuse de développements théoriques originaux, de l'élaboration de nouvelles connaissances, de la construction d'approches et d'outils, théoriques, numériques et expérimentaux, plus performants, notamment de méthodes de simulation partant de l'échelle atomique, ici incontournable, et de modélisations multi-échelles parvenant aux niveaux les plus macroscopiques : tout ceci revigore et renouvelle la science et le génie des matériaux dans leurs fondements et les rend également mieux à même de répondre aux besoins généraux de connaissances qu'appelle, dans l'ensemble du domaine des matériaux, le progrès scientifique et technique.

Simultanément, la maîtrise du comportement des matériaux du nucléaire soulève tout un ensemble de problèmes génériques que l'on rencontre dans bien d'autres domaines, avec une acuité variée, notamment mais non exclusivement dans les secteurs de haute technologie. Il en va particulièrement ainsi de tout ce qui concerne le vieillissement et, plus généralement, la maîtrise de la durabilité des matériaux et des structures dans leur environnement. Les besoins de compréhension de phénomènes couplés et de leur modélisation par changements d'échelle, d'espace et de temps, ont alors tout intérêt à être traités dans une communauté scientifique élargie et dans le cadre fortement interdisciplinaire indispensable à leur étude. Là encore, dans les collaborations souhaitables, au niveau tant national qu'international, la place de la science, du génie et de l'industrie du nucléaire peut être centrale.

Cette dualité entre les aspects spécifiques et génériques des problèmes posés par les matériaux du nucléaire sera illustrée dans les trois Chapitres du rapport. On pourra apprécier à la fois la forte spécificité du nucléaire, dans le domaine des matériaux, et l'importance de son apport à la science des matériaux au travers du premier Chapitre, centré sur les phénomènes d'irradiation, leurs modes d'action et leur influence sur les propriétés d'usage des matériaux qui y sont soumis. Le second et le troisième Chapitres illustreront aussi bien la spécificité que la généralité des problèmes à résoudre à travers les questions liées respectivement au fonctionnement des réacteurs et à l'aval du cycle : à propos des réacteurs, présents et futurs, l'accent sera mis sur le vieillissement et l'endommagement de matériaux métalliques (Chapitre II) tandis que la gestion des déchets (Chapitre III) concernera surtout des matériaux non métalliques inorganiques et les phénomènes de confinement et de transport.

Précisons d'emblée que, dans ces développements, nous n'avons pas visé à une exhaustivité illusoire, tant sont divers et souvent complexes les problèmes posés. Le parti a au contraire été pris de dégager, sans excès de développements techniques ni souci d'encyclopédisme, les problématiques et les méthodologies principales, afin de mieux mettre en lumière les thèmes scientifiques émergents et les méthodologies novatrices attachés à l'étude des matériaux du nucléaire.

Réservant aux conclusions de ces chapitres des éléments plus détaillés de diagnostic quant aux forces et faiblesses du dispositif français et aux inflexions souhaitables pour le mettre durablement en état de répondre aux besoins, voire de ne pas laisser échapper ce qui est encore souvent une position de leadership, nous voulons en souligner ici, par anticipation, les recommandations principales et formuler celles, d'ordre plus général, qui résultent d'une appréciation d'ensemble de la situation du secteur étudié. En écho à l'analyse qui précède, nous mettrons successivement l'accent sur la spécificité puis sur le caractère générique des questions posées par les matériaux du nucléaire.

3 – Conclusions liées à la spécificité des questions posées par les matériaux du nucléaire

Au nombre des problèmes spécifiques au nucléaire, il faut citer en tout premier lieu la compréhension, la prévision et la maîtrise du comportement des matériaux sous irradiation. Ceci concerne toute la chaîne

du nucléaire, du fonctionnement des réacteurs à la gestion des déchets, et une extrême variété de matériaux (métaux et alliages, isolants, polymères). Beaucoup a déjà été fait dans ce domaine mais, on s'en convaincra (*cf.* I-B), beaucoup reste encore à faire. Le temps n'est plus où l'on pouvait espérer s'affranchir de la question par une adaptation empirique modérée des savoir-faire en l'absence d'irradiation : parce qu'ils influent aussi bien sur les propriétés mécaniques que sur les propriétés de rétention et de transport, les phénomènes d'irradiation ont une importance centrale dans tout le domaine du nucléaire ; parce qu'ils impliquent à la fois les échelles atomiques et toute la gamme des échelles méso- et macroscopiques et parce qu'ils influent sur les réponses des matériaux à toutes les échelles de temps, ils exigent une compréhension approfondie des mécanismes et des processus qui mobilise à son meilleur niveau la science des matériaux, lui posant des questions inédites qui sollicitent ses fondements mêmes et lui demandant, pour la maîtrise du long, voire du très long terme, des réponses non seulement qualitatives mais aussi quantitatives, ceci à un degré rarement atteint dans d'autres domaines. Cette exigence scientifique est en même temps, compte tenu des enjeux qui lui sont attachés, une exigence industrielle et de société ; d'où l'importance des implications qui en découlent, sur divers plans.

3.1 Thématiques

Sur le plan thématique, il est essentiel de préciser les *mécanismes élémentaires* de l'irradiation, c'est-à-dire de l'interaction particule-matière, et *leurs effets méso- et macroscopiques* sur la microstructure et les propriétés des matériaux, en approfondissant les connaissances acquises sur les métaux et en les étendant, compte tenu de leurs spécificités propres, aux *isolants et polymères*. Ceci passe tout particulièrement par le développement systématique des méthodes et moyens de *simulation numérique partant de l'échelle atomique*, ici strictement incontournable, et parcourant, dans un cadre de modélisation *multi-échelle*, toutes les échelles intermédiaires, jusqu'aux niveaux macroscopiques. Sur cette base, il faut comprendre et modéliser les cinétiques, lentes et rapides, en vue de prédictions sûres des comportements aux différentes échelles de temps, y compris les plus longues. Ceci nécessite l'élaboration de nouvelles théories et de nouveaux concepts qui, s'appuyant sur une vision claire des mécanismes intimes de formation et d'évolution des défauts d'irradiation, renouvellent notamment, au-delà de mesures qui se révèlent insuffisantes quand elles sont utilisées sans le discernement nécessaire, comme les doses ou les débits de dose, les *principes mêmes de quantification* des effets d'irradiation.

3.2 Méthodologies

Sur le plan méthodologique, ces développements fondamentaux sont indispensables pour fonder véritablement sur des bases scientifiques une utilisation pertinente et efficace des *essais* « accélérés » sous sollicitations exacerbées ou de *simulation physique* directe par irradiation par particules chargées. Les conditions du nucléaire, particulièrement en matière d'irradiation, limitent considérablement, on l'a dit, les possibilités d'expérimentation en situation réelle, dans l'espace et dans le temps. **Il en découle d'abord que les rares mais irremplaçables moyens d'investigation accessibles dans ce domaine, comme les moyens d'expérimentation « en actif », doivent être précieusement préservés et confortés**, peut-être d'une manière plus volontaire et systématique qu'on ne semble, du fait de leur coût, prêt à le faire aujourd'hui en France ¹ : a-t-on bien, dans ce domaine, évalué, en regard, les coûts futurs de toute nature entraînés par des économies à court terme ?... **De la même façon, doivent être jalousement recensées et mises en état d'être exploitées efficacement toutes les données de retour d'expérience**, venant des réacteurs comme des divers sites d'entreposage, y compris de ceux conçus dans l'optique de la *réversibilité* ; enfin, le passé peut être porteur d'informations sur le futur (étude des *analogues naturels*, en particulier).

Cependant, quoi qu'on fasse dans ce domaine et même si, dans l'absolu, on n'en fera jamais assez, on ne peut en attendre une réponse suffisante aux questions posées. Les possibilités de simulation physique, directe ou indirecte, sont alors un maillon indispensable d'une stratégie scientifique efficace mais, redisons-le, un maillon seulement, dont l'exploitation serait hasardeuse, voire fallacieuse, si elle ne s'appuyait sur une compréhension théorique approfondie des mécanismes et des cinétiques, ce qui nous ramène au point précédent et conforte ses implications structurelles.

3.3 Conséquences structurelles

Il découle de ce qui précède tout un ensemble de conséquences en matière d'organisation, de structuration et de formation.

La plus centrale touche à l'existence même du CEA et à ses responsabilités nationales. Sans même intégrer ici d'autres dimen-

1. Soulignons dès maintenant le souci précisé plus loin (Ch. II) de pouvoir disposer durablement, compte tenu de la fermeture programmée de Phénix, de sources diverses d'irradiation, distribuées de façon un tant soit peu cohérente et opérationnelle, ainsi que de moyens d'investigation à diverses échelles sur matériaux irradiés.

sions, extérieures au champ des matériaux auquel ce rapport se limite, nous ressentons comme indispensable que, du fait de la nécessité cruciale d'intégrer étroitement une problématique scientifique spécifique et les besoins industriels qui la fondent – ceci dans une conjoncture internationale hautement compétitive où la France ne peut s'en remettre à l'aide extérieure –, la responsabilité de la prise en charge de la *spécificité* des problèmes scientifiques et techniques posés, d'abord du fait de l'irradiation, aux matériaux des réacteurs comme à ceux impliqués dans l'entreposage et le stockage des déchets continue d'être assumée par un organisme *spécifique* tel que le CEA. Cette conclusion s'impose à nous, compte tenu des engagements déjà réalisés dans le domaine du nucléaire et de ses implications à court, moyen et long terme, *quelle que soit, redisons-le, l'évolution de la politique énergétique du pays.*

Seule une telle structure, tenant fermement les deux bouts de la chaîne du nucléaire, scientifique et technologique, nous semble être à la mesure des enjeux nationaux dans ce domaine : organisant en son sein et mobilisant en dehors d'elle, selon une stratégie d'ensemble mûrement réfléchie et étroitement concertée au niveau national, les moyens disponibles de la recherche nationale, tant universitaire qu'industrielle, depuis leurs aspects les plus fondamentaux jusqu'à leurs dimensions technologiques, elle pourrait à la fois *précéder* les besoins de l'industrie, en ayant une réelle capacité d'anticipation par rapport à eux, et *mobiliser* largement les efforts scientifiques et techniques du pays. L'expérience de pays voisins est instructive à cet égard : elle condamne par avance toute tentation de s'en remettre, dans le domaine des matériaux du nucléaire, à l'industrie d'un côté pour la recherche technologique et à l'Université de l'autre pour la recherche de base.

Que ceci ne soit pas compris comme un souhait de voir l'industrie du nucléaire se décharger de ses activités de recherche et développement ni la recherche universitaire se désintéresser du nucléaire. Il est, au contraire, essentiel que l'industrie ait sa propre capacité d'expertise, fondée sur une activité propre de recherche, finalisée vers ses problèmes et ses besoins, comme il est indispensable qu'aucun champ de la connaissance ne soit déserté par la recherche universitaire. Ce que nous voulons souligner, c'est l'importance de permettre à un organisme tel que le CEA de pouvoir, en s'appuyant sur sa propre expertise sur les thèmes centraux du nucléaire, dans ses dimensions les plus fondamentales comme les plus appliquées, mettre en œuvre, de façon concertée et contrôlée, une politique nationale cohérente et suivie, organisant l'indispensable mobilisation de l'ensemble des moyens nationaux dans une recherche finalisée vers les besoins du nucléaire.

Qu'il nous soit permis de ce point de vue d'exprimer franchement, dans le domaine qui nous concerne, nos interrogations quant à ce que nous percevons de la manière dont cette responsabilité nationale est aujourd'hui reconnue et exercée. Au sentiment global que, contre toute nécessité bien comprise, quelles que soient les préférences idéologiques ou politiques de chacun, la France a aujourd'hui la recherche quelque peu honteuse dans le domaine du nucléaire s'ajoute **une réelle inquiétude vis-à-vis des hésitations de la politique mise en œuvre par le CEA dans le domaine des matériaux** : une fois révolue la période de la « filière française », où le CEA a su mobiliser des équipes de recherche de base de haute qualité en bonne liaison tant avec l'amont universitaire qu'avec l'aval du développement et des applications, cet organisme a paru tenté de se réfugier, dans le domaine des matériaux, tantôt dans la seule réponse aux demandes à court terme d'EDF ou de COGEMA, tantôt dans une priorité de valorisation de ses savoir-faire auprès des PMI, parfois combinant les deux, **sans vraiment reconnaître dans les faits la priorité du nucléaire ni le rôle national d'initiative et de responsabilité qui lui était dévolu dans ce domaine.**

Ces hésitations pourraient porter gravement préjudice, si elles devaient perdurer, à la fois au renforcement nécessaire, par renouvellement des compétences et attraction des meilleurs talents, des équipes de pointe en recherche de base et à celui des équipes engagées dans une recherche plus technologique, comme à **l'entretien d'un corps, indispensable, d'experts en matériaux du nucléaire** (craintes que n'apaise pas la comparaison hélas facile à faire aujourd'hui au CEA, dans le domaine des matériaux, entre la croissance rapide des effectifs de recherche et développement dans certains secteurs d'activité non-nucléaire, jugés « rentables », et l'inquiétante déplétion de compétences et de moyens dans plusieurs laboratoires centrés, tant en amont qu'à l'aval, sur les problèmes du nucléaire). C'est pourquoi il est urgent, selon nous, de revaloriser, dans le domaine qui nous intéresse, en principe et en pratique, tant la recherche de base que la recherche technologique : il est troublant, de ce point de vue, de devoir craindre que le CEA ne soit dessaisi de la possibilité de conforter sa recherche de base par la conduite de thèses de doctorat ; il l'est tout autant de ne pas y voir reconnues et encouragées autant qu'elles le nécessitent, compte tenu notamment du contexte international, l'activité d'élaboration, d'entretien et de promotion de codes de calcul industriels comme celle de pré-normalisation ou de normalisation.

C'est seulement en redonnant à son activité propre, dans toutes ses dimensions, une véritable priorité au nucléaire que le CEA pourra à la fois revivifier ses *relations industrielles*, mobiliser efficacement les *ressources universitaires* et jouer un rôle moteur dans les *collaborations internationales*. C'est, peut-être, ce qui permettrait aux relations tripartites (CEA, EDF, Framatome) de s'appuyer sur des échanges plus nourris entre chercheurs et ingénieurs de base et aux collaborations entre le

CEA et l'Université-CNRS ¹, d'être plus riches, plus suivies, plus systématiques et mieux structurées qu'elles ne le sont actuellement. Il en irait de même en matière de *collaborations internationales*. Il ne fait guère de doute que, dans le domaine des matériaux comme dans l'ensemble des secteurs du nucléaire, **la recherche sur le moyen et surtout le long terme se fera de plus en plus dans le cadre de collaborations non seulement européennes (dans l'esprit, notamment, des « réseaux européens » prônés par la Commission des Communautés Européennes) mais internationales. En même temps, la compétition s'est ouverte sur le plan international et le marché des compétences scientifiques et techniques est, lui aussi, devenu mondial. Dans le domaine qui nous concerne, la France a un capital considérable dont il importe de ne pas dilapider l'héritage** : qu'il s'agisse de la physique de l'irradiation, de la mécanique de la rupture ou de la métallurgie du vieillissement, du comportement du crayon combustible ou de la technologie de la vitrification, de la mécanique des géomatériaux ou de la physico-chimie du confinement et du transport..., la France occupe, on le verra, non seulement en Europe mais aussi par rapport aux deux nations les plus avancées que sont les USA et le Japon, une position plus qu'honorable, souvent de pointe. Pour autant, le rôle qu'elle joue, de fait, dans la compétition scientifique internationale, dans la structuration des collaborations européennes ou dans la participation à des coopérations internationales, dans les faits le plus souvent sous leadership américain, n'est pas à la mesure de ces potentialités. De nouvelles possibilités existent aujourd'hui, notamment à l'échelle européenne. Pourquoi pas, par exemple, un réseau européen de recherche sur le thème des matériaux du nucléaire ? Ces possibilités, comme d'autres, seraient sûrement mieux exploitées si le potentiel national était lui-même mieux structuré, sur l'ensemble des registres concernés : **l'affirmation non ambiguë de la responsabilité nationale et de la mission centrale du CEA dans la mise en œuvre d'une politique nationale, mobilisant largement le potentiel universitaire et industriel pour ce qui touche aux sciences et techniques du nucléaire** (compte tenu, bien sûr, de la mission spécifique de l'ANDRA), **serait là aussi, selon nous, la condition clé de cette structuration.**

Il ne nous revient pas de préciser plus avant les indispensables structures de concertation et d'orientation générale, reflétant l'ensemble des compétences nationales, tant dans l'industrie qu'à l'Université-CNRS, qui seraient alors nécessaires pour définir les programmes à long terme et permettre au CEA de remplir durablement, dans l'intérêt commun,

1. collaborations dont on souhaite en particulier que le Groupement NOMADE, axé sur la recherche de nouvelles matrices pour les déchets (cf. III-B), associant aussi EDF et COGEMA, fournisse une réalisation exemplaire.

une telle responsabilité et une telle mission nationales. Qu'il nous suffise d'en suggérer l'idée, en espérant que ce besoin, clairement ressenti à partir du seul domaine des matériaux, trouve quelque écho dans les autres secteurs concernés par le nucléaire et débouche sur une réflexion d'ensemble et une action résolue dans ce sens.

3.4 Formation

Ceci a également des conséquences sur les besoins de *formation*, à divers niveaux. La première urgence est le besoin impérieux de s'attacher activement, en espérant qu'il en est encore temps, à la reconstitution du brillant corps d'*experts en matériaux du nucléaire*, actuellement de fait en cours d'extinction, qui a pendant toute une période, joué, largement grâce au CEA, un rôle essentiel dans l'essor de l'industrie nucléaire nationale. **Seule une politique volontaire et de long terme**, couvrant, depuis la préservation d'enseignements spécialisés de haut niveau à la formation par la recherche et à l'acquisition d'une expérience industrielle significative, tous les maillons de la formation de la relève indispensable, **pourra peu à peu contenir la véritable hémorragie de compétences qui se produit aujourd'hui sous nos yeux**. Il ne nous appartient pas de préciser les éléments ni les moyens d'une telle politique ; peut-être appelle-t-elle, entre autres mesures, une redéfinition des missions de l'INSTN ou de ses relations avec l'Université et les Grandes Écoles ? Qu'il nous suffise ici **d'alerter avec force les pouvoirs publics sur le fait que la politique et les moyens déployés aujourd'hui ne sont pas, dans ce domaine, à la hauteur de la gravité de cette situation et de l'importance des enjeux nationaux qui lui sont attachés, dans le contexte de compétition internationale ouverte que nous avons déjà évoqué.**

À d'autres niveaux, divers besoins de formation se font aussi sentir : celui de la formation d'ingénieurs spécialistes, peut-être par des formations courtes (mastères, DRT...) prolongeant des formations généralistes, ceci tant pour notre pays que pour les pays étrangers qui n'attendent pas que des centrales « clés en mains » quand ils choisissent une solution française (où trouve-t-on, chez nous, l'équivalent des départements de génie nucléaire qui, malgré une certaine décroissance, subsistent encore dans nombre d'universités à l'étranger ?...); celui de la prise en compte de la dimension internationale dans la formation, comme, réciproquement, **du renforcement des capacités d'accueil, notamment en post-doctorat, d'étudiants étrangers**; celui de l'introduction de la dimension du nucléaire dans les écoles d'ingénieurs, en fonction de leur spécialité (ne pas oublier les problèmes de stockage dans une école de géologie, de la radioactivité dans une école de phy-

sique ou du vieillissement dans une école de mécanique...), comme dans la formation des enseignants, à divers niveaux, à commencer par celui qui permettrait au simple citoyen de se former une opinion mieux raisonnée sur les problèmes de société touchant au nucléaire (voir sur ces questions le rapport sur la radiochimie). L'urgence, sur ces plans, pour être moindre que celle qui s'attache à la préservation de l'expertise soulignée plus haut, n'en est pas moins réelle si l'on veut bien prendre en compte la longueur des temps de réponse qui accompagnent toute action de formation.

3.5 Préservation du patrimoine

Une dernière remarque, dans le même registre, mérite d'être formulée. Elle a trait à la préservation du *patrimoine des connaissances*. L'industrie nucléaire est jeune mais son expérience, précieuse, est déjà considérable. **Il est, dans ce domaine, tout particulièrement indispensable**, alors que se pose le problème du renouvellement de la capacité d'expertise et tant que c'est encore possible, **de capitaliser l'acquis**, positif et négatif, dans tous les domaines (et dans tous ses détails, condition essentielle de son utilité ultérieure) **et de le structurer pour le rendre transmissible** aux nouvelles générations de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens (*cf.* Ch. II) : monographies scientifiques et techniques, bases de données, systèmes experts..., c'est, dans le domaine des matériaux du nucléaire, tout un ensemble de moyens matériels qui doit accompagner le renouvellement des moyens humains en matière d'expertise.

4 – Conclusions liées aux retombées hors nucléaire et aux problèmes génériques posés par les matériaux du nucléaire

La spécificité du nucléaire, nous l'avons souligné, est forte et lourde d'implications mais elle n'est pas, tant s'en faut, contradictoire, dans le domaine des matériaux, avec l'existence d'importantes retombées, tant scientifiques que techniques, en dehors du nucléaire ni avec le fait que nombre de ses thématiques scientifiques, qui comptent parmi les plus actuelles de la science et du génie des matériaux, soient communes à bien d'autres domaines. Cette dualité a, elle aussi, diverses implications dont nous voudrions commenter, pour terminer, les plus importantes.

4.1 Aspects thématiques et méthodologiques

Sur les plans thématique et méthodologique, il est clair, comme on l'a déjà souligné, que les progrès de connaissances réalisés pour la compréhension des effets d'irradiation bénéficient à la science des matériaux dans son ensemble, du fait de la variété des échelles qu'ils concernent : pour n'en citer que quelques exemples, rappelons à quel point les théories de la formation et de la diffusion de défauts ponctuels ou des transitions de phases tout autant que les méthodes de calcul *ab initio* ou de dynamique moléculaire, aujourd'hui employées dans les secteurs les plus divers, ont bénéficié de travaux réalisés sur une motivation nucléaire, notamment liée à la maîtrise de l'irradiation (*cf.* Ch. I-B). Il en va de même d'approches non spécifiquement dédiées aux problèmes du nucléaire mais d'abord développées dans ce cadre, peut-être parce que le besoin y était plus pressant ou l'exigence plus élevée, qui ont progressivement diffusé dans d'autres secteurs de pointe, comme, notamment, l'aéronautique : c'est particulièrement le cas de l'approche locale de la rupture (*cf.* Ch. II), née et développée autour du nucléaire français (groupe Beremin), aujourd'hui à l'œuvre dans des domaines variés, ou, à un moindre degré, de la modélisation mécanique des transformations de phase en plasticité ou encore de plusieurs aspects de la corrosion.

Plus largement, il existe de nombreuses thématiques de grande actualité qui, pour être centrales et fortement marquées de caractères spécifiques dans le domaine du nucléaire, ne sont pas moins importantes dans des secteurs aussi variés que les transports, notamment aéronautiques, l'industrie chimique, voire le génie civil ou environnemental... **Il en est particulièrement ainsi, du fait des préoccupations croissantes en matière de maîtrise de la durabilité des structures, du thème générique du vieillissement des matériaux**, c'est-à-dire de la modification (qui n'est pas toujours, soulignons-le, une altération) de leurs propriétés, sous l'effet de lentes modifications microstructurales et de leur environnement, **et de la prévision de leur réponse à long terme** : la détermination des mécanismes d'endommagement, celle des cinétiques et de la stabilité des évolutions, y compris dans l'optique de la pratique d'essais accélérés pertinents, les thématiques de la « tolérance au dommage » et de l'évaluation non destructive, ou même la problématique des phénomènes de transport et de rétention, concernent, à des degrés divers, bien d'autres domaines que le nucléaire. **Il en va de même des thèmes de la corrosion ou de la fatigue thermomécanique et plus généralement de tout ce qui relève de la mise en jeu de phénomènes couplés**, activés par la combinaison de sollicitations différentes. Invariablement se présentent alors, sur le plan méthodologique, **les mêmes nécessités de modélisation multi-échelle**, inspirées surtout cette fois par le souci de minimiser les coûts d'expérimentation.

tation et de validation, et même si, le plus souvent, elles ne nécessitent plus, comme pour l'irradiation, de partir de l'échelle atomique.

Dans ce vaste domaine d'une forte actualité, par essence *pluridisciplinaire*, où la combinaison de la physico-chimie et de la mécanique est tout particulièrement nécessaire mais reste sous-développée, les efforts sont encore partiels et dispersés, les théories embryonnaires, les approches séparées et les méthodologies hésitantes. **On soulignera notamment, dans cet esprit, le besoin de développer de nouvelles synergies dans des domaines tels que la « mécanique-corrosion » (cf. II-3.4) ou encore la « physico-chimio-mécanique » des argiles (cf. III-F) ;** on pourrait en dire autant pour d'autres matériaux, tels que les polymères ou les bétons, les céramiques ou les verres... On ressent nettement sur ces différents thèmes à la fois le besoin de rapprocher des cultures et des communautés disjointes et de permettre une élévation du niveau scientifique général et un élargissement des points de vue, mais aussi celui de focaliser les efforts sur des sujets précis et des recherches finalisées aux enjeux industriels clairement explicités. Dans cette optique, il est évident que les préoccupations du nucléaire et celles d'autres secteurs industriels ont tout à gagner à se rapprocher pour mobiliser les énergies et les compétences de la recherche universitaire, tant en sciences de base qu'en sciences de l'ingénieur.

Sans vouloir reproduire à l'identique des schémas qui ont peut-être fait leur temps, on ne peut s'empêcher d'évoquer à ce sujet le bénéfice scientifique et technique qui a pu être tiré, il y a vingt à trente ans, **dans le sens d'un rapprochement des communautés et d'une mobilisation universitaire sur des problèmes scientifiques à forts enjeux industriels**, de plusieurs appels d'offres de la DGRST et d'Actions thématiques programmées (ATP) du CNRS dans le domaine des matériaux de structure. De manière plus significative encore, le GRECO (Groupement de recherches coordonnées) « Grandes Déformations et Endommagement » du CNRS a, dans les années 80, permis de rapprocher plus d'une vingtaine d'équipes universitaires relevant de disciplines alors fort éloignées, d'élever leur niveau de connaissances et de conforter leurs moyens d'investigation et de les mobiliser, dans des sous-ensembles plus fortement structurés, financés et finalisés, dans des coopérations industrielles multilatérales, dont le nucléaire n'était pas absent, sur les thèmes de la mise en forme et de la rupture à chaud. Il serait fort opportun, nous semble-t-il, que ce type d'expérience, qui a marqué de la meilleure façon toute une génération de mécaniciens et de métallurgistes français, revive sous les formes adaptées pour répondre aux nouveaux besoins scientifiques et techniques sur les thèmes qui ont été décrits ci-dessus.

4.2 Aspects technologiques et industriels

L'amélioration de la connaissance, fondée sur des caractérisations et des modélisations plus fines et performantes, et de la maîtrise de l'utilisation des matériaux existants est nécessaire. Elle n'est pas suffisante. **La science des matériaux, comme, au contraire des conceptions et des pratiques anglo-saxonnes, notre pays tarde à le reconnaître, notamment dans le domaine de l'éducation, doit se prolonger et renouveler en permanence son inspiration dans le génie des matériaux, axé sur le développement de nouveaux matériaux.** Ceci vaut particulièrement dans le domaine encore jeune du nucléaire où l'élucidation des mécanismes et des phénomènes et la définition des fonctions attendues des matériaux sont encore loin d'être abouties. **La mise au point de nouveaux matériaux y est une nécessité vitale :** c'est toujours une entreprise de longue haleine, faite de beaucoup de connaissances et de réflexion mais aussi de tâtonnements et de pragmatisme, d'essais et de retour d'expérience, de patience et d'obstination.

Au fil des décennies, les matériaux du nucléaire ont, de ce point de vue, fait l'objet, particulièrement pour les centrales, de remarquables développements, dont les retombées hors nucléaire, effectives ou potentielles, sont considérables (cf. Ch. II). Ce processus est cependant loin d'être achevé, même dans les domaines où il est le plus avancé : d'une part, toute compréhension améliorée des comportements réels (vieillesse, corrosion, rôle de l'irradiation...) porte en germe, pour peu que l'on adopte une véritable « démarche matériaux » qui fasse dialoguer en permanence microstructures et propriétés d'usage, le développement de nuances améliorées, d'autre part, l'intégration au niveau du choix ou de la conception de matériaux de critères attachés à l'ensemble du cycle nucléaire, du fonctionnement en centrale au démantèlement et au stockage-entreposage des déchets, est encore loin d'être complète.

Ceci vaut d'autant plus pour les matériaux intervenant dans l'aval du cycle, matériaux pour lesquels on peut se demander (cf. III-E) si l'on n'a pas aujourd'hui trop tendance à définir le cahier des charges en fonction des seuls matériaux disponibles, **en sous-estimant de la sorte les possibilités d'innovation et de développement de matériaux nouveaux capables de répondre au mieux aux fonctions attendues.** Il est vrai que, particulièrement pour les matériaux à bas coût, comme les matériaux cimentaires, les industriels du domaine peuvent trouver le marché que leur offre l'aval du cycle trop étroit pour justifier de s'y engager très loin ; cela implique que les acteurs du nucléaire fassent leur la « démarche matériaux » et s'engagent eux-mêmes résolument dans la mise au point des produits voulus : on peut espérer qu'alors les producteurs de matériaux ne leur refuseront pas les collaborations nécessaires.

5 – Conclusion

Résumons : porteurs d'une grande part des enjeux économiques et sociétaux attachés à la maîtrise de l'énergie nucléaire, les matériaux du nucléaire proposent à l'intelligence humaine en général et à la société française en particulier des défis scientifiques et techniques aussi stimulants qu'incontournables. La France a, dans ce domaine, des compétences mais aussi des responsabilités particulières.

Il lui faut d'abord reconnaître la spécificité des problèmes scientifiques et techniques posés et y apporter des réponses spécifiques, ceci sur divers plans :

- sur le plan thématique, il faut avant tout approfondir la compréhension des mécanismes élémentaires de l'irradiation et de leurs effets méso- et macroscopiques sur la microstructure et les propriétés des matériaux, notamment des isolants et des polymères ; développer les méthodes et moyens de simulation numérique partant de l'échelle atomique et les intégrer dans des modélisations multi-échelle ; éclaircir les principes de quantification des effets d'irradiation ;

- sur le plan méthodologique, il importe de fonder sur des bases scientifiques l'utilisation des « essais accélérés » et de l'irradiation par particules chargées ; de préserver et conforter les moyens d'expérimentation « en actif » ; de recenser et rendre exploitables les données de retour d'expérience et, plus généralement, de préserver et structurer le patrimoine des connaissances acquises dans le domaine du nucléaire ;

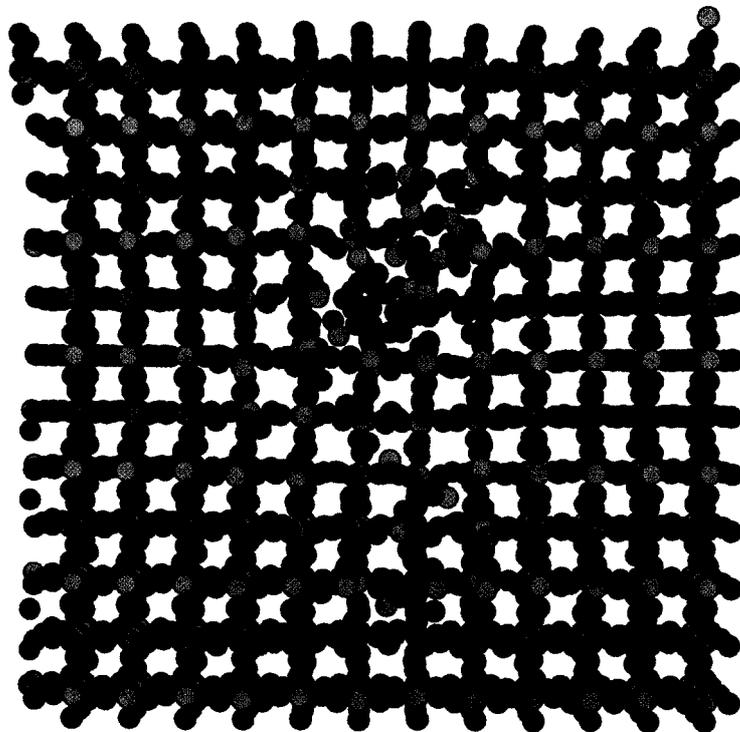
- sur le plan structurel, il est essentiel de permettre au CEA, en s'appuyant sur sa propre expertise sur les thèmes centraux du nucléaire, dans ses dimensions les plus fondamentales comme les plus appliquées, de mettre en œuvre, de façon concertée et contrôlée, une politique nationale, cohérente et suivie, de mobilisation de l'ensemble des moyens nationaux disponibles, dans l'industrie comme dans l'Université-CNRS, pour une recherche finalisée vers les besoins du nucléaire ; ceci passe par la revalorisation en son sein, sur les thèmes centraux du nucléaire, tant de la recherche de base que de la recherche technologique ; sur cette base, il pourra revivifier ses relations industrielles, en anticipant sur les besoins de l'industrie, mieux mobiliser l'indispensable concours de la recherche universitaire et du CNRS et faire en sorte que la France joue le rôle moteur qui lui revient dans le concert européen et dans les collaborations internationales, dans un contexte de compétition ouverte ;

– sur le plan de la formation, il est urgent de reconstituer un corps d'experts en matériaux du nucléaire, actuellement de fait en cours d'extinction ; il faut introduire la dimension du nucléaire dans l'enseignement supérieur, notamment, en fonction de leur spécialité, dans les écoles d'ingénieurs, et renforcer les capacités d'accueil, en particulier en post-doctorat, d'étudiants étrangers.

Simultanément à la reconnaissance de la spécificité du nucléaire, il importe d'identifier et développer ce qu'ont de générique diverses thématiques émergentes, fortement pluridisciplinaires, soulevées par les matériaux du nucléaire. Il s'agit en premier lieu du vieillissement des matériaux, du suivi et de la prévision de leur réponse à long terme sous sollicitations couplées (corrosion et mécanique, fatigue thermomécanique...) et de la modélisation multi-échelle de la durabilité des structures.

Sur ces thèmes, il faut œuvrer au rapprochement de cultures et de communautés encore trop éloignées, notamment de mécaniciens, de chimistes et de physico-chimistes : les préoccupations du nucléaire et celles d'autres secteurs industriels ont tout à gagner à se rapprocher pour mobiliser les énergies et les compétences de la recherche universitaire, tant en sciences de base qu'en sciences de l'ingénieur. Dans le même esprit, il faut développer, dans le domaine de la recherche comme de l'éducation, le génie des matériaux, axé sur la mise au point de nouvelles nuances et de nouveaux matériaux. Pour le nucléaire, cela concerne tout autant l'intégration, au niveau du choix ou de la conception de matériaux, de critères attachés à l'ensemble du cycle que le développement de matériaux nouveaux, notamment dans tout l'aval du cycle. Ceci passe, là aussi, par d'étroites collaborations entre nucléaire et non nucléaire.

Reconnaître et traiter à la fois la spécificité et le caractère générique des problèmes posés par les matériaux du nucléaire : telle est la condition d'une formation et d'une mobilisation efficaces des talents, pour le bénéfice commun de la science, du génie et de l'industrie des matériaux dans leur ensemble.



© Tec & Doc - La photocopie non autorisée est un délit

Fig. I-B.4 – Simulation par dynamique moléculaire d'une cascade de déplacements dans un cristal de zircon ($ZrSiO_4$) produite par une collision ayant cédé 2 keV au premier atome frappé ; les atomes d'oxygène figurent en rouge, ceux de silicium en jaune et ceux de zirconium en bleu. Au centre de la figure, on remarque une zone amorphisée incluse dans la structure cristalline non perturbée (J.P. Crocombette, CEA-Saclay 1998).