

Le programme de constantes nucléaires de l'AIEA – son rôle au sein de la communauté nucléaire et les services qu'il rend aux pays en développement

par J.J. Schmidt et A. Lorenz

INTRODUCTION

Les constantes de physique nucléaire, ou plus brièvement les constantes nucléaires, englobent l'ensemble des résultats quantitatifs de la recherche en physique nucléaire, qu'il s'agisse de la réaction nucléaire, de la structure du noyau ou de la décroissance radioactive. Toutes les branches des sciences et des techniques nucléaires font un ample usage de ces constantes, mais ce sont surtout les constantes neutroniques et les données relatives à la décroissance radioactive qui jouent un rôle prédominant. On trouvera ci-après quelques exemples montrant l'importance capitale des constantes nucléaires dans le développement des sciences et des techniques nucléaires. La fission induite par les neutrons, qui permet de produire de l'énergie dans les réacteurs nucléaires à fission, s'exprime quantitativement sous la forme de constantes dépendant de l'énergie neutronique. La réaction de fusion entre les deutérons et les tritons, sur laquelle on se fonde actuellement pour concevoir les réacteurs à fusion, s'exprime en termes de constantes nucléaires. Les phases de décroissance radioactive des nucléides issus des produits de fission et des isotopes des actinides déterminent la quantité d'énergie et l'intensité d'irradiation alpha, bêta et gamma qui sont les données quantitatives de base sur lesquelles se fondent la gestion des déchets, le blindage des centrales ainsi que la comptabilité des matières nucléaires fissiles et l'application des garanties.

LA SECTION DES CONSTANTES NUCLEAIRES DE L'AIEA

L'augmentation de la demande en informations indispensables au développement des sciences ou techniques nucléaires et, parallèlement, le fait que les expériences de physique nucléaire entreprises dans le monde entier permettent d'établir un très grand nombre de constantes ont rendu nécessaire une coopération internationale dans la compilation, l'échange et la diffusion de ces constantes. C'est ainsi que, dès 1964, l'AIEA, estimant qu'il fallait instaurer un système d'échange international des constantes neutroniques, a créé un programme de constantes nucléaires. Ce programme devait servir de base à la création d'un centre international des constantes dont le fonctionnement est aujourd'hui assuré par la Section des constantes nucléaires de l'AIEA (AIEA/SCN).

J.J. Schmidt dirige la Section des constantes nucléaires de la Division de la recherche et des laboratoires de l'AIEA; A. Lorenz est adjoint au chef de cette Section.

La situation de l'AIEA/SCN a toujours été particulière, dans la mesure où la Section s'occupe de tous les aspects des sciences et des techniques nucléaires. Initialement destiné à répondre essentiellement aux besoins en constantes neutroniques des constructeurs de réacteurs thermiques et de réacteurs à fission à neutrons rapides, le programme de constantes nucléaires de l'AIEA s'est élargi au cours des quelques dernières années; vu l'importance de plus en plus grande accordée aux programmes nucléaires dans les divers pays du monde tout comme au niveau international, il traite aujourd'hui l'ensemble des constantes nucléaires. A l'heure actuelle, ce programme porte non plus seulement sur les constantes neutroniques dont l'étude intéresse essentiellement la production d'énergie nucléaire, mais également sur les données relatives à la réaction nucléaire, à la structure du noyau et à la décroissance, ces constantes étant indispensables à la mise au point de méthodes et de techniques nucléaires plus perfectionnées; enfin, il traite également des constantes atomiques et moléculaires nécessaires dans le domaine de la physique des plasmas et de la technologie de la fusion. Mais on relèvera surtout qu'au cours de ces dernières années l'AIEA/SCN a considérablement renforcé son assistance en matière de constantes nucléaires et son encouragement à la recherche en ce domaine dans les pays en développement, lesquels s'intéressent de plus en plus à l'énergie nucléaire comme aux autres applications nucléaires et formulent — par conséquent — des demandes de plus en plus nombreuses. En bref, l'AIEA/SCN est désormais considérée comme le centre de constantes nucléaires chargé de coordonner, au niveau international, à la fois une partie de la recherche et la compilation, l'échange et la diffusion de constantes nucléaires précises. En outre, on attend d'elle qu'elle assure la communication de ces constantes — qui proviennent essentiellement des pays industrialisés — aux pays en développement, et qu'elle favorise les échanges entre les Etats de l'Est et de l'Ouest Membres de l'AIEA.

LE COMITE INTERNATIONAL DES CONSTANTES NUCLEAIRES

Le programme de constantes nucléaires de l'Agence a son propre organe consultatif permanent, le Comité international des constantes nucléaires (CICN). Ce sont donc les besoins des principaux pays nucléaires (industrialisés et en développement) Membres de l'Agence qui orientent le programme et les activités de l'AIEA/SCN.

Le CICN a été créé en 1967 par l'AIEA en tant que comité permanent de l'Agence avec les objectifs suivants: premièrement, promouvoir la coopération internationale à tous les stades des activités relatives aux constantes présentant un intérêt général pour les programmes d'énergie nucléaire ainsi que pour les autres applications pacifiques des sciences et des techniques nucléaires; deuxièmement, conseiller le Directeur général de l'AIEA en matière de constantes. Ce comité, actuellement limité à treize membres, est composé d'éminents spécialistes des Etats Membres de l'AIEA ayant d'importantes activités en matière de constantes nucléaires. Pour ce qui est des pays non représentés au sein du CICN, 40 agents de liaison assurent la communication entre les chercheurs de ces pays et le CICN, par l'entremise de l'AIEA/SCN. Cette dernière assure le secrétariat du CICN sous la responsabilité du chef de la section, qui occupe parallèlement les fonctions de secrétaire scientifique du CICN. Le Comité se réunit environ tous les 18 mois.

En plus des fonctions consultatives qu'il occupe au titre du programme de constantes nucléaires de l'AIEA, le CICN, pour faciliter la coopération internationale en matière de constantes nucléaires, s'attache, en rapport étroit avec l'AIEA/SCN, à coordonner un certain nombre d'activités de portée internationale dans ce domaine. Toute une série de fonctions dévolues à l'AIEA/SCN se retrouvent dans les responsabilités qui sont celles du Comité, qu'il s'agisse d'évaluer les besoins en constantes nucléaires ou la disponibilité de ces constantes, ou encore de coordonner la mesure, le calcul, la collecte, l'échange et la diffusion de ces données.

LA COOPERATION INTERNATIONALE ENTRE LES CENTRES DES DONNEES

En 1970, sous l'égide de l'AIEA/SCN, quatre centres régionaux de données neutroniques se sont mis d'accord sur une répartition géographique de leurs responsabilités et sur un échange de données neutroniques expérimentales grâce à un système automatique pouvant être utilisé sur des ordinateurs différents, baptisé EXFOR. Ces centres de données sont les suivants:

- le Centre de compilation de données neutroniques de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (qui fait aujourd'hui partie de la banque de données de l'AEN), situé à Saclay (France), et qui dessert essentiellement les pays industrialisés d'Europe occidentale et le Japon;
- le Centre national de recherche sur les sections efficaces neutroniques (devenu Centre national des constantes nucléaires) du Laboratoire national de Brookhaven (Etats-Unis) qui dessert les Etats-Unis et le Canada;
- le Centre de constantes nucléaires de l'URSS, qui fait partie de l'Institut de physique et d'énergétique d'Obninsk et qui dessert l'URSS; et enfin
- la Section des constantes nucléaires de l'AIEA située à Vienne (Autriche) qui dessert essentiellement les pays en développement d'Asie (à l'exception du Japon), d'Afrique, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, d'Europe orientale ainsi que l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

Chacun de ces quatre centres d'information a pour mission de compiler toutes les données neutroniques expérimentales intéressant la zone qu'il dessert, de communiquer ces données aux autres centres en utilisant le modèle convenu et de répondre aux demandes en constantes neutroniques formulées par les utilisateurs de la zone desservie. Toutes les opérations sont complètement informatisées. Grâce au système d'échange des données, tout utilisateur, où qu'il réside, peut avoir accès à l'ensemble des constantes neutroniques expérimentales disponibles.

En revanche, l'échange et la diffusion sans restriction des constantes neutroniques évaluées par le truchement du "réseau à quatre centres", qui faisaient également partie des objectifs, ont mis plus de temps à se concrétiser. Néanmoins, l'utilisateur peut d'ores et déjà se procurer sans condition la plupart des fichiers de données neutroniques évaluées dont on dispose à l'heure actuelle. En vue de coordonner à l'échelle internationale la compilation, l'échange et la diffusion des constantes nucléaires neutroniques, l'AIEA/SCN, pour sa part, organise tous les ans des réunions entre ces quatre centres d'information.

Plus récemment, du fait de l'importance croissante du rôle que jouent les techniques nucléaires et les applications isotopiques et afin de rendre plus rationnelles la collecte des données et leur diffusion aux utilisateurs, on a été amené à créer de nouveaux réseaux de centres chargés de rassembler les constantes relatives à la réaction nucléaire des particules chargées, à la structure du noyau et à la décroissance.

LES BIBLIOTHEQUES ET PUBLICATIONS INFORMATISEES DE L'AIEA/SCN DANS LE DOMAINE DES CONSTANTES NUCLEAIRES

Grâce à l'effort de coopération fourni par les centres de données, l'AIEA/SCN a pu recueillir la plupart des constantes nucléaires existant dans le monde entier. En dehors de la bibliothèque EXFOR des données neutroniques expérimentales et des données relatives à la réaction nucléaire, qui comporte aujourd'hui 2 600 000 constantes numériques, l'AIEA/SCN dispose à l'heure actuelle de quelque quarante bibliothèques de constantes évaluées, périodiquement remises à jour, qui vont du grand fichier très général au fichier

Bibliothèques informatisées de constantes nucléaires constituées par l'AIEA/SCN

A. Bibliothèque de valeurs expérimentales de constantes nucléaires	Nombre de constantes numériques enregistrées
Bibliothèque de l'EXFOR	2 600 000
<hr/>	
B. Bibliothèques de constantes nucléaires évaluées	
1. Sections efficaces types	15 000
2. Fichiers généraux sur les sections efficaces de neutrons	700 000
3. Rendements, sections efficaces et constantes relatives à la décroissance des isotopes des produits de fission	500 000
4. Constantes nucléaires relatives à la dosimétrie des neutrons dans les réacteurs	40 000
5. Constantes nucléaires relatives à l'évaluation des dégâts par rayonnement	7 000
6. Données sur les sections efficaces de neutrons et sur la décroissance nucléaire des actinides	50 000
7. Données spécifiques multigroupes sur les sections efficaces de neutrons	40 000
8. Paramètres de résonance des neutrons	100 000
9. Constantes relatives à la structure du noyau et à la décroissance	350 000
10. Masses atomiques	2 000
	<hr/>
	1 800 000
<hr/>	
Total (A + B)	4 400 000

restreint concernant des applications très spécialisées. Ces bibliothèques renferment 1 800 000 données numériques dont on trouvera la répartition au tableau ci-dessus. Une petite équipe d'informaticiens attachée à l'AIEA/SCN met au point et exploite les programmes nécessaires au traitement de ces données sur ordinateur et effectue également toutes les opérations d'entrée et de sortie relatives à ces données.

Sur demande, l'AIEA/SCN peut extraire de ses bibliothèques de grandes quantités de données nucléaires et les diffuser sous toute une série de formes qui vont du relevé succinct intéressant un type de constantes très particulier au fichier complet sur bande magnétique, en passant par toute la documentation de référence (catalogues, inventaires des condi-

tionnements, résumés, etc.). Enfin, pour faire connaître les services qu'elle offre ainsi que les mises à jour de ses fichiers et ses nouvelles acquisitions, la Section envoie plusieurs fois par an à tous les utilisateurs de la zone qu'elle dessert un bulletin d'information (Nuclear Data Newsletter).

Le CINDA, index de la littérature sur les constantes neutroniques publié une fois par an par l'AIEA pour le compte des centres d'information précités constitue sans doute la mieux connue de ces publications réalisées grâce aux efforts conjoints de ces centres. Résultat d'une compilation systématique de la littérature sur la physique des neutrons publiée dans le monde entier, le CINDA représente un manuel complet et constamment mis à jour de l'ensemble des références relatives à la mesure, au calcul et à l'évaluation des constantes neutroniques; pour les chercheurs et les ingénieurs, c'est désormais un outil de travail indispensable. Les données contenues dans le CINDA, dont le fichier central est tenu par la banque de données de l'AEN, sont totalement informatisées et mises à jour par les quatre centres de données neutroniques; elles constituent également l'index de la bibliothèque internationale des constantes neutroniques expérimentales (EXFOR).

La Section publie trois séries de rapports: le rapport annuel "Progress in Fission Product Nuclear Data" (Progrès accomplis dans les constantes nucléaires relatives aux produits de fission) qui contient des renseignements sur les activités entreprises en matière de mesure, de compilation et d'évaluation des données sur les produits de fission; le rapport semestriel "Compilations and Evaluations of Nuclear Structure and Decay Data" (Compilations et évaluations des constantes de structure du noyau et de décroissance), qui informe des publications disponibles en ce domaine, et la WRENDA, "World Request List for Nuclear Data" (liste des demandes du monde entier en matière de constantes nucléaires), qui paraît en général deux fois par an et qui répertorie les demandes de 15 à 20 Etats Membres de l'AIEA désireux de recevoir des constantes nucléaires à jour sur les réacteurs à fission et à fusion et sur l'application des garanties.

Agissant en tant que secrétariat du CICN, l'AIEA/SCN coordonne l'enregistrement et la diffusion des documents du CICN qui, dans l'ensemble, sont essentiellement des rapports techniques fournis par les Etats Membres sur des sujets intéressant les constantes nucléaires. Parallèlement, l'AIEA/SCN utilise la série des rapports du CICN pour publier ses propres rapports. L'AIEA/SCN se charge également de la traduction en langue anglaise de certaines publications et de certains rapports d'origine soviétique sur les constantes nucléaires et de diffuser ces documents dans le monde entier. En règle générale, les actes des réunions organisées par l'AIEA/SCN sont publiés sous la forme de rapports techniques de l'AIEA dans la série des documents techniques de l'Agence (IAEA-TECDOC).

Il peut arriver, dans le cas d'une forte demande d'information sur toute une gamme de données précises, qu'un manuel soit le meilleur moyen de diffuser ces données. C'est ainsi que l'AIEA/SCN a élaboré et publié en 1974 [1] un manuel sur les sections efficaces d'activation nucléaire destiné à répondre aux demandes en constantes relatives aux multiples applications des techniques d'analyse par activation nucléaire.

LES SERVICES OFFERTS AUX PAYS EN DEVELOPPEMENT

La Section des constantes nucléaires de l'Agence joue le rôle d'un carrefour où les connaissances et les compétences pratiques en matière de constantes nucléaires et dans les domaines connexes passent des pays industrialisés vers ceux des pays en développement qui s'intéressent au nucléaire. Ceci implique:

- la communication, sur demande, de constantes nucléaires vérifiées et de l'information qui s'y rapporte, accompagnée de conseils qui en assurent un emploi approprié;

- la compilation des constantes nucléaires fournies par les pays en développement et leur diffusion internationale par l'intermédiaire des réseaux de centres;
- la promotion de comités et de centres de constantes dans les pays en développement les plus importants (par exemple l'Argentine, le Brésil, l'Inde, la Roumanie);
- une formation, donnée à l'Agence, visant à entraîner des spécialistes nucléaires de pays en développement (du Brésil et de Roumanie, par exemple) à la constitution et à l'utilisation de bibliothèques de constantes nucléaires informatisées;
- une politique d'aide et de promotion en matière de mesure et d'évaluation des constantes nécessaires, et ce grâce à des contrats de recherche et à la fourniture de matières et d'isotopes très purs permettant d'effectuer ces mesures. A l'heure actuelle, des laboratoires de recherche d'Argentine, du Bangladesh, du Brésil, d'Egypte, de Grèce, de Hongrie, de l'Inde, du Pakistan, de Pologne, de Roumanie, de Turquie et de Yougoslavie ont déjà reçu une assistance de ce genre;
- l'organisation, à l'intention de spécialistes de 25 à 30 pays en développement et en collaboration avec le Centre international de physique théorique de Trieste, de cours de formation bi-annuels sur l'utilisation de la théorie nucléaire en matière de calcul de constantes et sur les méthodes d'évaluation et de traitement par ordinateur de ces constantes [2, 3].

En résumé, l'AIEA/SCN offre aujourd'hui gratuitement les services de ses centres de données aux chercheurs de quelque quarante Etats Membres, essentiellement des pays en développement. L'AIEA/SCN est ainsi parvenue à faire prendre conscience, dans tous les pays du monde, des besoins qui se font sentir en matière de constantes nucléaires tant dans le domaine de la science que de celui de la technologie.

LES BESOINS DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES NUCLEAIRES EN MATIERE DE CONSTANTES NUCLEAIRES

D'une manière générale, on peut dire que l'application des théories de la réaction nucléaire, du rayonnement et des isotopes dans les sciences et les techniques exige une connaissance précise des constantes. C'est pourquoi cette connaissance joue un rôle dans un grand nombre de programmes nucléaires de l'Agence et de ses Etats Membres. On trouvera aux paragraphes suivants un résumé succinct de ces besoins dans des domaines particuliers.

Conception des réacteurs à fission

C'est surtout dans le domaine de la conception des réacteurs à fission que l'on a besoin de constantes nucléaires précises, notamment sur les sections efficaces de neutrons. Les paramètres utilisés dans la conception des réacteurs, qu'il s'agisse du facteur de multiplication effectif K_{eff} , de la masse critique, de l'enrichissement du combustible, de la dimension critique du réacteur, du flux neutronique, du rapport de surgénération, des coefficients de sûreté ou des caractéristiques cinétiques et dynamiques, sont calculés au moyen d'équations mathématiques dans lesquelles on utilise comme grandeurs de base les sections efficaces neutroniques et d'autres constantes nucléaires.

Quant à la nature et au rang de priorité des constantes nucléaires dont on a besoin en matière de conception de réacteurs à fission, la réponse est donnée par le spectre d'énergie neutronique du réacteur et les matières et matériaux utilisés. En règle générale, on a besoin de connaître la valeur des sections efficaces neutroniques de tous les matériaux et matières du réacteur, et ce pour l'ensemble du spectre d'énergie neutronique couvert par ce réacteur.

Dans un réacteur thermique, les vitesses de réaction se situent entre 0,01 et 1 eV; le spectre neutronique des réacteurs rapides est beaucoup plus étendu: il peut recouvrir une gamme s'étendant d'environ 1 à 10 MeV, mais il se situe d'ordinaire entre 1 keV et plusieurs MeV.

En conséquence, la détermination des caractéristiques d'un réacteur thermique passe obligatoirement par la connaissance des sections efficaces de fission, de capture et de diffusion élastique, en particulier dans la faible gamme d'énergie située entre 0 et 1 eV, ainsi que par la connaissance des propriétés des premiers niveaux de résonance des matières fertiles et fissiles.

Dans le cas des réacteurs rapides, il importe de connaître, en plus des constantes relatives à la fission, à la capture et à la diffusion élastique les données suivantes: les paramètres de résonance pour toute la plage de résonance, les sections efficaces relatives à la diffusion inélastique, les réactions à forte énergie (n,p), (n, α), (n,2n), (n,3n), et enfin la répartition angulaire et énergétique des neutrons émis, le tout dans la gamme d'énergie keV-MeV.

Dans le cas des diverses variantes de conception des réacteurs thermiques et des réacteurs rapides, il importe de connaître les sections efficaces neutroniques pour toute une gamme de matériaux et d'isotopes, tels que:

isotopes fissiles	uranium 233 et 235, plutonium 239 et 241;
isotopes fertiles	uranium 238, plutonium 240, thorium 232;
matériaux de structure	fer, chrome, nickel, zirconium;
fluides de refroidissement	eau légère, eau lourde, hélium, dioxyde de carbone, sodium;
modérateurs	eau légère, eau lourde, beryllium, carbone;
barres de commande	bore, tantale;
blindages	fer, plomb, baryum, silicium;
combustibles	oxygène pour les combustibles à base d'oxyde, carbone pour les combustibles à base de carbure,

pour ne mentionner que les éléments les plus importants.

A l'heure actuelle, les calculs relatifs à la théorie des réacteurs effectués sur ordinateur sont si poussés qu'ils permettent, à condition toutefois de disposer de données suffisamment détaillées et exactes sur les sections efficaces neutroniques, de prévoir avec précision les caractéristiques physiques des réacteurs à fission. Toutefois, si l'on connaît désormais suffisamment bien les constantes relatives aux sections efficaces neutroniques à faible énergie dont il faut disposer pour pouvoir concevoir un réacteur thermique, en revanche on connaît encore mal les sections efficaces des neutrons rapides qui constituent les éléments principaux des réacteurs rapides [4]. Des recherches sont actuellement entreprises dans ce sens, notamment par les pays qui construisent des surgénérateurs rapides.

Gestion des produits de fission et des déchets d'actinides

Etant donné le développement récent de programmes nucléaires dans de nombreux pays, avec toutes les conséquences qu'ils comportent: construction de réacteurs de puissance, d'installations de production de combustible et de retraitement chimique, transport de combustible nucléaire frais et de combustible irradié, etc., on se penche aujourd'hui de plus en plus sur le problème que pose l'accumulation des matériaux de fission et des actinides produits dans les réacteurs. Hormis quelques applications spécifiques qui se résument à

l'utilisation de la désintégration alpha du plutonium 238 et du curium 244 en tant que source de chaleur dans les batteries nucléaires des satellites terrestres, ni les produits de fission et ni la plupart des actinides ne peuvent être réutilisés dans un réacteur (sauf, éventuellement, dans le cas de l'incinération des actinides dans des réacteurs spéciaux), et il faut donc les éliminer. A cet égard, certains Etats Membres procèdent actuellement à des recherches expérimentales et théoriques dans les domaines suivants:

- accumulation des produits de fission et des actinides dans les réacteurs et incidences de cette accumulation sur le fonctionnement des réacteurs;
- dégagement de chaleur (ou chaleur résiduelle) consécutif à l'arrêt du réacteur, résultat d'une désintégration α , β et γ des produits de fission et des nucléides des actinides ainsi que de fissions induites par des neutrons (α, n), instantanés ou différés;
- problèmes à court terme concernant le blindage des produits de fission et des actinides au cours de la manipulation, du retraitement et du transport du combustible; et enfin
- risques à long terme de radioactivité des produits de fission et des déchets d'actinides et risque de criticité présenté par les déchets d'actinides susceptibles de constituer une source neutronique en cas de fission spontanée et de réaction (γ, n) et (α, n).

Pour pouvoir entreprendre de telles recherches, il faut pouvoir disposer d'un grand nombre de constantes nucléaires précises, ce que fait ressortir partiellement le tableau ci-après, qui indique le nombre de nucléides à prendre en compte:

Type de nucléides	Nombre total de nucléides	Importance
Produits de fission	800	≥ 50
Actinides	200	> 30

Ce choix repose notamment sur l'adoption de critères comme des périodes de longue durée, de hauts rendements et des valeurs élevées de sections efficaces de capture et de fission. Les nombreux nucléides dont la période est de courte durée n'ont d'importance qu'à court terme; il s'agit par exemple de produits de fission à courte période intervenant dans les calculs de chaleur résiduelle. Ils n'ont pas été pris en compte dans la catégorie des éléments importants.

Les besoins en constantes nucléaires se résument donc de la façon suivante [4]:

pour la partie interne du réacteur: pour les produits de fission: toutes les sections efficaces neutroniques, en particulier les sections de capture, les rendements et les constantes de neutrons différés relatives aux produits de fission; pour les actinides: toutes les sections efficaces neutroniques, et notamment les sections de fission et de capture; gamme d'énergie: de 0 à 15 MeV;

à l'extérieur du réacteur: données sur la désintégration α , β et γ , et sur la désintégration par fission spontanée, périodes, énergies et intensités du rayonnement tant des produits de fission que des actinides; réactions (γ, n) et (α, n) particulière - ment pour les éléments à numéro atomique faible.

Pour répondre à ces besoins, un certain nombre de pays poursuivent actuellement d'intenses recherches expérimentales et théoriques.

Garanties nucléaires

En règle générale, les constantes nucléaires nécessaires dans ce domaine concernent essentiellement les techniques d'essais non destructives. Nous avons retenu à cet égard deux exemples qui reflètent bien les nécessités actuelles. C'est ainsi que pour pouvoir déterminer avec précision la composition isotopique d'un combustible nucléaire en mesurant le taux de combustion, notamment par le calcul du rendement des rayons gamma d'énergie comprise entre 1 keV et plusieurs MeV de certains produits de fission (par exemple le ruthénium 103, le césium 134, le lanthane 140, le césium 144, le praséodyme 144), la précision doit être de 1% [4]. Elle est également de 1% dans un autre cas: le calcul des rendements pour une désintégration alpha en rayons gamma des plutonium 238, 239, 240 et 241 dans le dosage par spectrométrie gamma des isotopes du plutonium entrant dans la composition d'un combustible [4]. Or les données expérimentales de rendement dont on dispose actuellement sont encore loin de cette précision.

Conception des réacteurs à fusion

A l'heure actuelle, les études et la recherche sur les réacteurs à fusion font appel à un nombre bien plus élevé de constantes neutroniques que de données sur les particules chargées. Les réacteurs à fusion utilisant une réaction $T(d,n)$ sont effectivement une source importante de neutrons de 14 MeV dont le flux, au niveau de la paroi interne du plasma, est d'une ampleur comparable à celle du flux obtenu dans les réacteurs à fission à flux neutronique élevé. Ces neutrons pénètrent dans la couche de lithium et, en ralentissant, produisent une énergie qui se situe essentiellement entre 5 et 14 MeV. L'existence d'une telle gamme d'énergie présente donc un très grand intérêt. Cette gamme n'ayant qu'une importance très limitée dans le cas des réacteurs surgénérateurs rapides, un certain nombre de sections efficaces de réactions sont mal connues, et c'est cette lacune qu'il importe de combler [4]. Les réactions (n,p) , (n,d) , (n,α) , (n,T) , $(n,^3\text{He})$, $(n,2n)$ ainsi que la répartition angulaire et énergétique des particules secondaires émises prend également beaucoup d'importance. Les matériaux pour lesquels on doit disposer, entre autres données, de ces constantes, (pour pouvoir calculer l'économie de neutrons, les dégâts par rayonnement et les taux de transmutation) sont essentiellement des matériaux pouvant entrer dans la construction des réacteurs à fusion tels que le titane, le vanadium, le chrome, le manganèse, le fer, le nickel, le zirconium, le niobium, le molybdène et le tungstène. La réaction $(n,2n)$ qui intervient dans les matériaux de la paroi primaire présente un intérêt particulier dans la mesure où elle provoque une multiplication des neutrons disponibles pour la surgénération du tritium au niveau de la couche de lithium. Dans cette couche, le lithium est produit par les réactions $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ et $^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$.

On cherche aujourd'hui activement à déterminer avec précision la mesure dans laquelle ces réactions dépendent de l'énergie des neutrons et à expliquer les nombreuses réactions concurrentes qui se produisent entre ces neutrons et les deux isotopes du lithium à des niveaux d'énergie neutronique de l'ordre du MeV. Dans le cas de la réaction $^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$, qui est la réaction de surgénération la plus importante, on recherche actuellement une précision de 5 à 10% [4]; mais les données expérimentales dont on dispose n'atteignent qu'une précision de 25%, ce qui rend particulièrement peu fiables les résultats de toutes les prévisions sur la surgénération du tritium.

LES CONSTANTES NUCLEAIRES REQUISES EN MATIERE D'APPLICATION DES ISOTOPES ET DU RAYONNEMENT DANS LES SCIENCES NUCLEAIRES

Contrairement aux besoins qui se font sentir dans le domaine de la production de l'énergie nucléaire et qui sont plutôt homogènes, la gamme des constantes nécessaires dans le

domaine des applications des sciences nucléaires est plus diversifiée et particulièrement hétérogène, dans la mesure où le champ de ces applications est très vaste. Ces besoins se font notamment sentir dans des domaines aussi divers que la dosimétrie nucléaire à des fins médicales, le diagnostic et le traitement, la chimie nucléaire, la géoscience, l'archéologie, l'hydrologie, les recherches sur l'environnement et l'astrophysique [5]. On trouvera ci-après un aperçu de certaines des applications les plus importantes et de l'usage qui y est fait des constantes.

Analyse par activation nucléaire

Le recours à cette méthode présuppose la connaissance des sections efficaces d'activation nucléaire des neutrons, des particules chargées et des photons et des constantes relatives aux périodes radioactives ainsi qu'aux niveaux d'énergie et d'intensité des radiations secondaires émises. A cet égard nous mentionnerons entre autres le projet du Département de la recherche et des isotopes de l'AIEA sur l'analyse par activation neutronique des polluants de cuir chevelu de l'homme. Ce projet vise à mesurer le degré de la pollution de l'environnement due aux substances toxiques non radioactives. Ces recherches impliquent la connaissance des valeurs optimales des sections efficaces d'activation neutroniques, des périodes radioactives ainsi que des niveaux d'énergie et d'intensité des rayons gamma pour tous les isotopes des éléments suivants: arsenic, argent, brome, cadmium, chlore, cuivre, mercure, potassium, manganèse, sodium, antimoine, sélénium et zinc.

Techniques des traceurs isotopiques

Les techniques des traceurs isotopiques font appel à la connaissance des périodes radioactives et des propriétés caractéristiques de la décroissance des radioisotopes utilisés comme traceurs. Entre autres exemples, nous mentionnerons l'emploi du tritium et d'autres radioisotopes dans les recherches hydrologiques sur les eaux de surface et l'utilisation des radioisotopes d'iode dans le domaine du diagnostic médical.

Production de radioisotopes

L'évaluation du meilleur taux de production et du meilleur degré de pureté d'un radioisotope que l'on souhaite produire passe par l'examen des réactions qui conduisent à la production de cet isotope; toutefois, il faut également tenir compte des réactions concurrentes, qui entraînent la production d'autres isotopes non désirés. A titre d'exemple, nous mentionnerons la production de plutonium 238 pur que l'on utilise comme source de chaleur dans la conversion thermo-électrique des simulateurs cardiaques [5]. On peut produire du plutonium 238 par irradiation neutronique du neptunium 237 dans un réacteur, selon la réaction suivante:



Des réactions concurrentes telles que



se produisent simultanément et donnent du plutonium 236 par désintégration β du neptunium 236. Cet isotope constitue un sous-produit indésirable dans la mesure où il émet des rayons gamma d'une plus grande énergie et d'une intensité plus élevée que les rayons émis par le plutonium 238, dont les rayons se situent généralement à un niveau

inférieur à 150 keV et que l'on peut aisément blinder. C'est la raison pour laquelle il convient d'optimiser l'énergie obtenue par l'irradiation des neutrons, de façon à ne produire du plutonium 236 que dans des limites tolérables. Et pour définir les conditions optimales de l'irradiation, il faut connaître les sections efficaces des réactions précitées avec les matériaux de structure du réacteur.

Irradiations des particules nucléaires

En matière d'irradiation nucléaire, il faut connaître les sections efficaces des interactions des particules nucléaires incidentes et du noyau des spécimens à irradier ainsi que la répartition angulaire et énergétique des particules émises et des radiations produites par ces interactions.

Nous mentionnerons à cet égard une application biomédicale caractéristique, à savoir le traitement du cancer par une irradiation neutronique du tissu atteint. On utilise des cyclotrons pour produire les neutrons, notamment par la réaction ${}^9\text{Be}(d,n)$. Pour ce faire, il convient de connaître la section efficace de cette réaction ainsi que le rendement et la répartition angulaire et énergétique des neutrons émis pour toute une gamme d'épaisseur de cible et pour des énergies des deutérons allant jusqu'à 50 MeV. Il faut en outre connaître les sections efficaces et la répartition des particules secondaires pour toutes les interactions possibles des neutrons de 15 à 50 MeV résultant de la réaction ${}^9\text{Be}(d,n)$ et des principaux éléments constitutifs du corps humain (hydrogène, carbone, azote, oxygène, phosphore et calcium), de façon à prévoir la répartition des doses d'irradiation sur la partie irradiée du corps. A cet égard ce sont surtout les constantes neutroniques qui nous font encore défaut.

L'ÉVALUATION DE LA SITUATION ET DES BESOINS EN MATIÈRE DE CONSTANTES NUCLEAIRES

Face aux demandes de plus en plus nombreuses de constantes nucléaires précises formulées par la communauté scientifique et technique, on a vu, au cours des vingt dernières années, les centres de données, les laboratoires de recherche et les utilisateurs du monde entier conjuguer leurs efforts dans le cadre de toute une série de comités nationaux et internationaux. Cette collaboration a pour but de définir et d'évaluer de manière critique les besoins qui se font sentir en matière de constantes et d'entreprendre, de promouvoir, et de coordonner la production et la diffusion systématiques des constantes nécessaires.

LA LISTE MONDIALE DES DEMANDES D'INFORMATION EN MATIÈRE DE CONSTANTES NUCLEAIRES (WRENDA)

C'est grâce à cette coopération qu'a pu être établie une liste informatisée connue sous le nom de WRENDA. L'AIEA/SCN gère le fichier central de WRENDA, se charge de sa mise à jour en y introduisant les informations fournies par de 15 à 20 Etats Membres et en publie une édition tous les deux ans pour le compte des quatre centres de données. La dernière livraison de la liste, WRENDA 79/80 [4], contient près de 1800 demandes de mesures et d'évaluations portant essentiellement sur les neutrons. Ces demandes, qui émanent de chercheurs chargés de la conception de réacteurs à fission, de réacteurs à fusion et de systèmes de garanties, ont été examinées et sélectionnées par des comités nationaux avant d'être soumises à l'AIEA. Le Comité international des constantes nucléaires (CICN) de l'Agence et le Centre de compilation des données neutroniques (CCDN) de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE tiennent constamment à jour l'état des demandes en

standards de données et, d'une manière générale, toutes les autres données ayant une importance capitale.

Toute demande portée sur cette liste fournit des renseignements sur le paramètre demandé du nucléide en question, sur la gamme d'énergie qui intéresse le demandeur, le degré de précision et le rang de priorité souhaités ainsi que sur l'origine et la justification de cette demande.

Voici un exemple typique de demande:

Objet de la demande: 3 lithium 6 (n, triton) alpha
Energie: 1 keV--3MeV
Degré de précision: 1%
Rang de priorité: 1
Pays d'origine: Etats-Unis d'Amérique
Demandeur: C.E. Till, Argonne National Laboratory
P.B. Hemming, US Department of Energy
Remarques: Un degré de précision de 3% serait utile; les mesures doivent permettre de reproduire les contours de la courbe réelle.
Justification: En vue d'une utilisation comme norme.

Le tableau suivant fait apparaître la façon dont la répartition des demandes entre les principaux domaines d'application s'est modifiée entre l'édition 76/77 et l'édition 79/80 de WRENDA.

Domaine d'application	WRENDA 76/77	WRENDA 79/80
Fission	1 194	1 210
Fusion	328	449
Garanties	150	121
Total	1 672	1 780

Le nombre des demandes relatives aux réacteurs à fission n'a pratiquement pas changé; et si le nombre des demandes relatives aux produits de fission a baissé, on relève une augmentation des demandes sur les dégâts par rayonnements, le blindage et les actinides secondaires. C'est dans le domaine de la fusion nucléaire que l'on note, par ailleurs, une évolution importante du nombre des demandes, puisque celui-ci s'est accru de plus de 100 unités, ce qui reflète l'intérêt croissant que les chercheurs manifestent à l'égard des problèmes de fusion. Par rapport à l'édition précédente de la liste, le mouvement des demandes n'en demeure pas moins très important, puisque 465 demandes apparaissant dans l'édition WRENDA 76/77 ont été retirées et 487 modifiées; enfin, la dernière édition compte 573 demande nouvelles, soit, *grosso modo*, un tiers.

Indépendamment du fait qu'elle permet de définir les vides qu'il convient de combler en matière d'information nucléaire, la liste WRENDA présente l'avantage de regrouper et de résumer de manière concise les besoins qui existent actuellement dans ce domaine; qui

plus est, elle a également permis de stimuler et de coordonner la mesure des constantes. Enfin, l'AIEA/SCN s'en sert pour justifier l'aide qu'elle fournit à certains petits pays ou à certains pays en développement en matière de mesure des constantes.

LES REUNIONS SCIENTIFIQUES

Il est un autre moyen de définir de manière exhaustive les besoins du moment en matière de constantes nucléaires dans un domaine précis d'application et de voir dans quelle mesure ces besoins sont satisfaits: c'est l'organisation de réunions scientifiques, qui permettent à l'AIEA/SCN de faire se rencontrer les utilisateurs et les producteurs de ces constantes. Les réunions organisées dans un passé récent ont permis d'étudier notamment les constantes nucléaires relatives aux produits de fission [6, 7], aux isotopes transactiniens [8, 9], à la dosimétrie des réacteurs nucléaires [10] et à la technologie des réacteurs à fusion [11].

En plus de ces réunions dont l'objectif essentiel est de permettre une évaluation simultanée de la situation et des besoins en constantes, l'AIEA/SCN organise des réunions scientifiques classiques ayant pour objet l'examen d'un thème donné intéressant les constantes ou d'un domaine, voire de plusieurs domaines, d'application. Il s'agit en l'occurrence de réunions élargies comme les conférences sur les constantes neutroniques pour les calculs de réacteurs organisées en 1966 et en 1970 [12 et 13] et la Conférence sur les constantes nucléaires pour la science et la technologie organisée en 1973 [5], ou de réunions plus restreintes de spécialistes portant sur les normes relatives aux constantes [14, 15], la compilation et l'évaluation des constantes [16, 17] et les propriétés des sources neutroniques [18], ou encore de petites réunions de consultants [19, 20, 21].

LA COORDINATION DES RECHERCHES: ROLE DE L'AIEA/SCN

Dans le cadre des responsabilités qui incombent à l'AIEA et aux termes desquelles elle a pour mission d'aider les Etats Membres à promouvoir l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, l'AIEA/SCN apporte depuis dix ans son appui à des programmes de recherche en allouant des crédits à la mesure et à l'évaluation des constantes nucléaires. Il peut s'agir en l'occurrence soit de contrats ou d'accords de recherche avec des équipes indépendantes, soit de programmes coordonnés auxquels participent un certain nombre de laboratoires des pays en développement tout comme des pays industrialisés. En ce qui concerne les décisions à prendre quant au financement et à la coordination de ces programmes, l'Agence se fonde sur les recommandations du CICN, sur les conclusions et les recommandations des réunions scientifiques organisées par l'AIEA/SCN et sur les listes de demandes d'information WRENDA.

C'est ainsi qu'à la suite des recommandations formulées par la première réunion du Groupe consultatif de l'Agence sur les constantes nucléaires des isotopes transactiniens [8], deux programmes coordonnés ont été mis sur pied en 1977 avec la participation de huit pays industrialisés (République fédérale d'Allemagne, France, Italie, Japon, Suède, Royaume-Uni, Etats-Unis et URSS), trois pays en développement (Inde, Israël, et Roumanie) et une organisation internationale (le Bureau central des mesures nucléaires de la Commission des communautés européennes). L'objet du premier de ces deux programmes est de comparer les méthodes et les résultats des différentes évaluations des constantes neutroniques relatives aux actinides. En réalité, son objectif est double puisqu'il vise à améliorer la précision des évaluations des constantes neutroniques relatives aux actinides de façon à pouvoir calculer de manière plus précise l'accumulation et la combustion des actinides dans un réacteur à fission et, parallèlement, former les participants des pays en développement à l'évaluation des constantes qui présentent un intérêt particulier au regard

des programmes d'énergie nucléaire de leurs pays. Les évaluations faites par les participants sont incorporées dans la Bibliothèque de l'AIEA sur les constantes nucléaires relatives aux actinides.

Le deuxième programme se propose la mesure et l'évaluation des paramètres de la décroissance (périodes, spectres α et γ) des isotopes des actinides. Ce programme vise la mise au point de jeux de constantes extrêmement précises et logiques sur la décroissance susceptibles de répondre aux besoins en matière d'analyse des combustibles nucléaires, de garanties, de détermination de la masse ainsi que de l'élaboration et de l'application de normes relatives aux radioisotopes.

REGARDS SUR L'AVENIR

Les pays en développement s'intéressant de plus en plus à l'énergie nucléaire et aux applications des sciences nucléaires, il leur faut renforcer leur potentiel scientifique et technique dans ce domaine. Cela exigera un effort accru pour que l'expérience et les technologies exigées en matière de mesure nucléaire puissent leur être transmises, et pour que soit assurée la formation de leurs chercheurs aux méthodes et aux techniques nucléaires. Cela exigera en outre une meilleure coordination des travaux des chercheurs qui, dans bon nombre de ces pays, sont très souvent isolés et dispersés. Comme le montre la dernière livraison de WRENDA, il reste encore beaucoup à faire dans certains domaines des constantes. Etant donné le rôle des mesures pour l'entraînement des chercheurs à des méthodes et à des techniques pouvant recevoir de multiples applications, et du fait qu'un certain nombre de pays en développement disposent des installations nécessaires à ces mesures, il conviendrait que s'instaure à l'avenir une coopération infiniment plus vaste. Dans le cadre de cette coopération, on pourrait également envisager des jumelages entre des équipes de spécialistes appartenant à des pays en développement et à des pays industrialisés, qui mettraient en commun leurs travaux de recherches dans ce domaine absolument capital des constantes nucléaires.

Références

- [1] Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections, Coll. Rapports techniques no.156, STI/DOC/10/156, AIEA, Vienne (1974).
- [2] Nuclear Theory for Applications (C.R. du Cours organisé conjointement par la SCN/AIEA et le Centre international de physique théorique de Trieste, Trieste, 1978), Rapport technique IAEA-SMR/43, Vienne (1980).
- [3] Nuclear Theory for Applications (C.R. du Cours interrégional de perfectionnement organisé conjointement par la SCN/AIEA et le Centre international de physique théorique de Trieste, Trieste, 1980), Rapport technique (en cours de publication).
- [4] WRENDA 79/80, "World Request List for Nuclear Data", édité par D.W. Muir, SCN/AIEA, INDC(SEC)-73/URSF (octobre 1979).
- [5] Nuclear Data in Science and Technology (C.R. Colloque, Paris 1973), STI/PUB/343, AIEA, Vienne (1973).
- [6] Fission Product Nuclear Data (C.R. de réunion d'un Groupe d'études, Bologne 1973), Rapport technique IAEA-169, AIEA, Vienne (1974).
- [7] Fission Product Nuclear Data (C.R. de réunion d'un Groupe consultatif, CEN Petten, Pays-Bas, 1977), Rapport technique IAEA-213, AIEA, Vienne (1978).
- [8] Transactinium Isotope Nuclear Data (C.R. de réunion d'un Groupe d'étude, Karlsruhe 1975), Rapport technique IAEA-186, AIEA, Vienne (juin 1976).
- [9] Transactinium Isotope Nuclear Data (C.R. de réunion d'un Groupe consultatif, CEN-Cadarache, France, 1979), Rapport technique IAEA-TEC-DOC-232, AIEA, Vienne (en cours de publication).
- [10] Neutron Cross-Sections for Reactor Dosimetry (C.R. de réunion d'un Groupe de consultants, Vienne 1976), Rapport technique IAEA-208, AIEA, Vienne (1978).

- [11] Nuclear Data for Fusion Reactor Technology (C.R. de réunion d'un Groupe consultatif, Vienne 1978), Rapport technique IAEA-TEC-DOC-223, AIEA, Vienne (1979).
- [12] Neutron Data for Reactors (C.R. Conf., Paris 1966), STI/PUB/140, AIEA, Vienne (1967).
- [13] Deuxième Conférence internationale sur les constantes nucléaires pour réacteurs (C.R. Conf., Helsinki 1970), STI/PUB/259, AIEA, Vienne (1970).
- [14] Nuclear Standards for Neutron Measurements (C.R. Colloque, Bruxelles 1967), Rapport technique IAEA-107, AIEA, Vienne (1968).
- [15] Neutron Standard Reference Data (C.R. Colloque, Vienne 1972), STI/PUB/371, AIEA, Vienne (1974).
- [16] An International Neutron Data System (C.R. Colloque, Brookhaven 1969), Coll. Rapports techniques no.100, AIEA, Vienne (1969).
- [17] Neutron Nuclear Data Evaluation (C.R. Colloque, Vienne 1971), Coll. Rapports techniques no.146, AIEA, Vienne (1973).
- [18] Neutron Source Properties (C.R. de réunion d'un Groupe de consultants, Debrecen, Hongrie, mars 1980) Rapport du CICN (en cours de publication).
- [19] "Meeting on the status of $\bar{\nu}$ data for the main fissile nuclides", AIEA, Vienne, juin 1970, (voir "Revue d'énergie atomique", 10, 4 (1972) p. 637).
- [20] Prompt Fission Neutron Spectra (C.R. de réunion d'un Groupe de consultants, Vienne 1972), STI/PUB/329, AIEA, Vienne (1972).
- [21] Delayed Neutron Properties (C.R. de réunion d'un Groupe de consultants, Vienne, mars 1979), INDC(NDS)-107/G+Special (1979).