

centrale nucléaire ainsi que de l'importance de cette centrale pour le programme futur d'énergie nucléaire du pays considéré.

Si un pays en voie de développement s'intéresse à la possibilité d'utiliser l'énergie d'origine nucléaire, il a intérêt à savoir exactement quelles dispositions il doit prendre en vue de la construction d'une centrale. La situation, les besoins et le stade de développement sont très différents d'un pays à l'autre; toutefois, certaines des mesures à prendre sont les mêmes dans la plupart des cas :

- a) Faire un inventaire complet des ressources nationales en énergie : houille blanche, charbon, pétrole et gaz naturel.
- b) Evaluer la demande d'énergie électrique dans la région et établir un plan à long terme en vue de satisfaire cette demande. (Ceci fait, on saura quelle puissance supplémentaire il faut installer et quand.)
- c) Estimer les dépenses initiales ainsi que les frais de fonctionnement et de production des centrales classiques nécessaires pour satisfaire la demande prévue; les comparer, à titre préliminaire, à ceux d'une centrale nucléaire. (Si cette comparaison montre que les perspectives sont favorables pour la centrale nucléaire, il se peut qu'une comparaison économique détaillée soit justifiée.)

- d) Dans les comparaisons détaillées de l'énergie classique et de l'énergie d'origine nucléaire, tenir compte de plusieurs facteurs tels que le financement, le taux d'intérêt, les montants des dépenses en monnaies nationales et en devises, l'ajustement des prix à la situation du pays et la contribution des divers secteurs de l'économie nationale (industries, services et matériaux).
- e) Si les conclusions d'une analyse économique approfondie sont en faveur de l'énergie d'origine nucléaire, étudier les dispositions à prendre pour le financement de l'entreprise avant de faire, sur le plan international, des appels d'offres fondés sur un cahier des charges détaillé.
- f) Examiner ces offres soigneusement, avec l'aide d'experts et d'ingénieurs-conseils, s'il y a lieu.
- g) S'occuper d'autres questions, telles que la législation atomique, et établir un programme de formation pour le personnel technique.

Il faut prévoir au moins quatre ans pour la construction et la mise en service d'une centrale nucléaire et de deux à trois ans pour les enquêtes et études initiales, contre cinq ans environ pour une centrale thermique classique.

---

## MESURES DE NEUTRONS

Il est assez curieux que les neutrons, qui sont à l'origine de la fission nucléaire et de la production de radioisotopes, et qui ont ainsi ouvert la voie aux multiples applications de l'énergie atomique, figurent toujours parmi les particules les plus difficiles à détecter et à mesurer, ce qui est dû, d'ailleurs, au fait qu'ils ne sont pas chargés électriquement. A l'inverse des particules chargées (électrons, protons ou particules alpha), les neutrons ne provoquent aucune ionisation de la matière qu'ils traversent; leur présence n'est détectée que par des voies indirectes, notamment par le truchement des autres particules avec lesquelles ils entrent en collision et qu'ils mettent en mouvement ou par les modifications chimiques et physiques des matières qui les absorbent.

On avait entrevu le caractère insaisissable du neutron dès 1920, année où Rutherford soupçonna son existence pour la première fois. Il avait envisagé l'existence d'une particule, qui, dépourvue de charge électrique, ne serait nullement affectée par un champ électrique et pourrait traverser facilement des obs-

tacles solides. "Cette particule", avait-il déclaré, "devait pouvoir se déplacer librement à travers la matière ... et il se peut qu'on ne parvienne pas à la confiner dans une enceinte scellée". Il n'est guère surprenant que, lorsque, dix ans plus tard, Bothe et Becker découvrirent un rayonnement extrêmement pénétrant émis par le béryllium bombardé par des rayons alpha, ils supposèrent qu'il s'agissait d'une forme particulière de rayons gamma. Cependant, cette hypothèse ne permettait pas d'expliquer, par les lois connues de la physique, l'interaction de ce rayonnement avec la matière, qu'ont étudiée Joliot et Irène Curie; le mystère ne fut éclairci que lorsque Chadwick parvint à la conclusion que ce rayonnement était constitué de particules non chargées.

C'est donc 12 ans après la prédiction de Rutherford que le neutron fut découvert : immédiatement après, il devint l'instrument d'exploration de l'atome le plus précieux. Ainsi, découvert en 1932, le neutron était utilisé en 1934 pour la production de radioisotopes d'éléments stables; en 1939, il provo-

quait la fission de l'atome d'uranium en laboratoire et, à la fin de 1942, il permettait de réaliser la première réaction en chaîne autoentretenu et la libération contrôlée d'énergie nucléaire. Il existe peu d'exemples de découvertes d'une particule qui aient entraîné des progrès scientifiques aussi révolutionnaires en l'espace d'une seule décennie.

Au cours des vingt dernières années, le neutron a été à l'origine de nouvelles découvertes dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires et ses applications se sont étendues considérablement. Cette évolution, à son tour, a accru le besoin de méthodes permettant de détecter les neutrons rapidement et de mesurer leur nombre volumique et leur énergie avec une certaine précision. Il est nécessaire aussi d'établir le rapport entre une dose donnée de neutrons et les effets qu'elle produit sur diverses matières, ce qui exige une évaluation exacte de la dose. Cette évaluation est devenue particulièrement importante en raison des dangers que présentent les rayonnements neutroniques au point de vue biologique. Etant donné que les dangers de radioexposition inhérents à l'exploitation d'un réacteur sont dus principalement aux neutrons émis pendant le processus de fission, la dosimétrie des neutrons (c'est-à-dire la mesure des doses neutroniques) est devenue une des conditions primordiales de la sécurité des activités ayant trait à l'énergie atomique.

## Principes fondamentaux

Les méthodes de détection et de mesure des neutrons, cependant, sont complexes et ne sont pas encore tout à fait au point pour la grande variété des tâches qui requièrent des mesures exactes. La plupart des méthodes éprouvées sont fondées sur l'un des deux principes exposés ci-après. En premier lieu, la création de radioactivité artificielle par le bombardement des atomes au moyen de neutrons constitue la base de ce que l'on appelle les méthodes de mesure des neutrons par activation. Ces derniers produisant des radioisotopes lorsqu'ils sont absorbés par des éléments stables, la quantité d'activité induite dans une matière peut indiquer le nombre des neutrons heurtant ladite matière. En outre, comme l'induction de la radioactivité est liée au niveau d'énergie des neutrons, cette méthode peut aussi être utilisée pour mesurer cette énergie.

En second lieu, les neutrons éjectent des protons (noyaux des atomes d'hydrogène) lorsqu'ils traversent des matières hydrogénées et on peut mesurer le flux des neutrons en comptant les protons de recul. Cette méthode peut, elle aussi, être utilisée pour mesurer l'énergie des neutrons, car, les deux espèces de particules ayant des masses à peu près égales, presque toute l'énergie des neutrons est transmise aux protons à la suite de ces collisions.

Les protons étant des particules chargées, on peut facilement compter et mesurer leurs énergies grâce à toute une série de détecteurs de rayonnements. Il existe tout d'abord les détecteurs fondés sur les phénomènes d'ionisation. Les impulsions électriques produites par l'ionisation (qui est causée par les particules chargées ou des rayonnements électromagnétiques) sont enregistrées par des instruments électroniques et sont ensuite comptées et analysées de manière à indiquer la quantité et l'énergie des rayonnements. Les compteurs Geiger et les chambres d'ionisation sont des exemples bien connus de ce type de détecteur. Les impulsions peuvent également provenir des scintillations que les rayonnements ionisants produisent dans certaines matières. Là encore, le comptage électronique des scintillations (ou plutôt des impulsions qu'elles engendrent) sert à détecter et à mesurer les rayonnements. Le détecteur fondé sur ce principe est connu sous le nom de compteur à scintillations. Il existe encore d'autres types de détecteurs - par exemple, les appareils fondés sur les dommages causés par les rayonnements dans les solides et ceux qui utilisent les effets des rayonnements sur une émulsion sensible.

La mesure du flux (c'est-à-dire du nombre de particules traversant une région donnée par unité de temps) et celle de la répartition selon l'énergie (lorsque les particules ont des niveaux d'énergie différents) sont les deux aspects principaux de l'étude des caractéristiques d'un champ neutronique. La mesure de la dose de rayonnements neutroniques transmise à une matière est une chose quelque peu différente. Ce que l'on mesure généralement, c'est l'énergie communiquée à la matière par les neutrons, en d'autres termes, la dose absorbée. Pour les études biologiques en particulier, c'est la dose absorbée, et non le flux de neutrons total, qui importe réellement. La mesure de la dose de neutrons absorbée a pris récemment une grande importance, notamment pour la sécurité des réacteurs, mais l'on n'est pas encore parvenu à surmonter entièrement les obstacles qui empêchent d'obtenir des mesures exactes.

L'une des principales difficultés tient à ce que les rayonnements neutroniques sont souvent accompagnés de rayonnements gamma et que la mesure de la dose totale ne permet pas de déterminer aisément la contribution des neutrons à cette dose. Les effets de ces deux formes de rayonnements étant souvent différents, il est nécessaire d'avoir des méthodes de mesure qui permettent de déceler les rayons gamma et d'évaluer la dose neutronique.

Depuis quelque temps, on considère généralement qu'il est urgent d'améliorer les méthodes et les instruments de mesure des neutrons pour protéger les travailleurs de l'industrie atomique, notamment le personnel des réacteurs, contre les rayons neutroniques et pour permettre aussi de mieux compren-

dre la relation dose-effet. Un certain nombre d'accidents survenus dans des réacteurs au cours des dernières années ont montré combien il est important de pouvoir recourir à des méthodes efficaces permettant d'identifier rapidement les personnes exposées aux rayonnements neutroniques et aux rayons gamma et d'évaluer avec précision la dose reçue ; mais, si les méthodes de mesure de la dose gamma sont bien au point, les procédés de mesure des neutrons laissent encore à désirer. Des atomistes se sont penchés sur ces problèmes et ont estimé qu'il faudrait dans ce domaine un échange de renseignements aussi large que possible sur les méthodes actuelles de mesure, ainsi qu'un échange d'idées sur les améliorations qui pourraient leur être apportées. Dans plusieurs pays, un gros effort est déployé en vue d'améliorer les méthodes et instruments de mesure des neutrons et le progrès des recherches pourrait être sensiblement accéléré par une étude comparative des méthodes expérimentales employées. Une telle étude serait également utile pour la normalisation des méthodes et instruments de mesure.

## Colloque de Harwell

Un colloque sur la détection et la dosimétrie des neutrons et la normalisation des sources neutroniques, organisé par l'Agence internationale de l'énergie atomique, a eu lieu, du 10 au 14 décembre 1962, à Harwell (Royaume-Uni). Il a réuni 280 spécialistes venus de 27 pays et représentant cinq organisations internationales.

En souhaitant la bienvenue aux participants, M. Vick, Directeur de l'Institut de recherches nucléaires de Harwell, a fait observer que toute l'activité de l'institution de Harwell était consacrée aux applications des neutrons "qui ont été découverts ou, peut-être plus exactement, inventés ou imaginés" il y a une trentaine d'années par sir James Chadwick, qui, tout récemment encore, était membre à temps partiel de l'Atomic Energy Authority du Royaume-Uni.

Prenant la parole au nom du Directeur général de l'Agence lors de la séance d'ouverture, M. Sanielevici, Directeur par intérim de la Division de la recherche et des laboratoires, a évoqué la découverte du neutron et le rôle qu'elle a joué dans le développement de l'énergie atomique. Les mesures des particules nucléaires de haute énergie, a-t-il souligné, revêtent une importance croissante dans l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. En ce qui concerne les neutrons, leurs applications pratiques dans l'industrie, la biologie et la médecine ainsi que dans les travaux de recherche se sont multipliées à un rythme si rapide que la mise au point des méthodes de mesure n'a pas été à même de suivre cette évolution ; il convient donc de déployer des efforts plus soutenus pour perfectionner les techniques et instruments de mesure des neutrons. M. Sa-

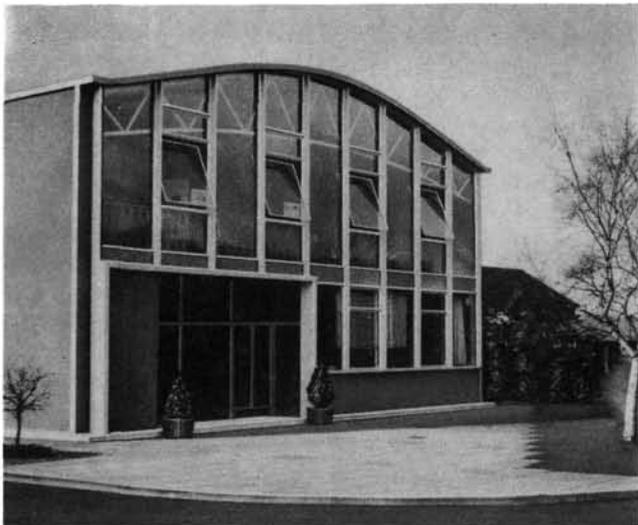
nielevici a fait observer que le colloque de Harwell était destiné à faire le point des progrès réalisés dans la détection et la dosimétrie des neutrons et la normalisation des sources neutroniques ainsi qu'à tracer les grandes lignes des travaux à entreprendre. Il a souligné que le colloque envisagerait tous les aspects de la dosimétrie des neutrons, à l'exception, cependant, des questions concernant les effets biologiques des rayonnements neutroniques et la relation entre la dose et l'effet. Il a fait savoir qu'un colloque sur les effets biologiques de l'exposition au rayonnement neutronique serait organisé par l'AIEA en octobre 1963.

Plus de 100 mémoires ont été présentés au colloque. Les sujets étaient groupés sous trois grandes rubriques : mesures des caractéristiques du champ neutronique, dosimétrie, étalonnage et normalisation. Les neuf séances ont été présidées par les personnalités suivantes : MM. Aten Jr. (Pays-Bas), Bruner (Etats-Unis), Crocker (Royaume-Uni), Delattre (France), Droste (République fédérale d'Allemagne), Ivanov (URSS), Marley (Royaume-Uni), Persano (Italie) et Thomas (Danemark).

La plupart des mémoires avaient trait aux différents aspects de la mesure des caractéristiques du champ neutronique. Ils se divisaient en deux groupes, l'un consacré aux mesures du flux et l'autre aux mesures spectrométriques, c'est-à-dire aux mesures des énergies et de leur distribution. De nombreux mémoires abordaient le problème de la mesure des neutrons de grande énergie (neutrons rapides) ; quelques autres se rapportaient aux neutrons de faible énergie (thermiques) et aux neutrons intermédiaires. Les mesures des neutrons rapides sont particulièrement difficiles. De par leurs effets biologiques, ces rayonnements comptent, en effet, parmi les plus dangereux. Les protons de recul, qui transportent la majeure partie de l'énergie des neutrons, deviennent des agents d'ionisation extrêmement puissants et, étant donné que les neutrons peuvent parcourir de longues distances avant d'entrer en collision avec les noyaux atomiques et d'expulser ainsi des protons, les neutrons rapides peuvent produire une ionisation intense en profondeur dans la matière irradiée.

## Mesures du flux

Dans un mémoire, A. Goodings et D. L. Roberts (Royaume-Uni) ont décrit quelques réalisations récentes concernant les instruments de détection de neutrons de haute énergie. D'après eux, les chambres d'ionisation présentent certains avantages par rapport aux autres méthodes de mesure du flux neutronique car elles permettent une lecture pour ainsi dire instantanée dans des conditions d'opération extrêmement pratiques. Les auteurs ont passé en revue des travaux récemment entrepris par l'Atomic



Cockcroft Hall, Harwell, où s'est tenu le colloque de l'AIEA sur la détection et la dosimétrie des neutrons

Energy Authority du Royaume-Uni, touchant la mise au point de nouveaux détecteurs à fission qui mesurent le flux de neutrons d'après le nombre des fissions nucléaires produites.

Quelques autres mémoires avaient également trait aux compteurs à fission, mais la plupart de ceux qui concernaient les mesures du flux portaient sur les applications du principe de l'activation. Etant donné que l'induction de la radioactivité dans une substance donnée ne se produit que si les neutrons ont une énergie supérieure au "seuil" de la réaction, l'application du principe de l'activation a permis de mettre au point des détecteurs à seuil grâce auxquels on peut déterminer à la fois le flux et l'énergie des neutrons. I. Heertje et A. H. W. Aten Jr. (Pays-Bas) ont déclaré que, dans de nombreux cas, les détecteurs à seuil sont souvent d'un emploi plus commode que toutes les autres méthodes de mesure des flux de neutrons rapides. Cette méthode exige, cependant, que l'on puisse mesurer facilement l'activité totale de la matière irradiée et que l'on ait des données suffisamment précises sur les variations de la section efficace en fonction de l'énergie des neutrons, c'est-à-dire sur la chance qu'ont les neutrons d'être absorbés par la matière, dans la mesure où cette chance dépend de leur énergie.

Le choix de la substance à irradier - à laquelle on donne la forme d'une feuille que l'on place sur le passage des neutrons - revêt, bien entendu, une importance de tout premier ordre; plusieurs mémoires ont été consacrés à la description d'expériences réalisées avec différentes matières. W. G. Cross (Canada) a étudié l'emploi de magnésium, de titane, de fer, de nickel et de zinc; W. L. Zijp (Pays-Bas) a décrit l'emploi du titane comme détecteur à seuil

pour la dosimétrie des flux de neutrons rapides. Deux atomistes britanniques, N. Adams et J. A. Dennis, ont fait état de nouvelles méthodes d'emploi de feuilles d'or et d'indium pour l'examen des fuites de rayonnements dans les ensembles critiques, tandis que quatre savants norvégiens (D. Grimeland et ses collaborateurs) ont présenté un mémoire sur la mesure des flux de neutrons par activation de cristaux d'iodure de sodium. On a fait remarquer que le sodium convenait particulièrement aux mesures du nombre volumique des neutrons.

Parmi les innovations en matière de mesure du flux, deux spécialistes allemands, R. Hosemann et H. F. H. Warrikhoff ont avancé une théorie de la "pile à neutrons" fondée sur des expériences réalisées avec une espèce nouvelle de détecteur connue sous le nom de "pile à rayons gamma". Les "piles à rayonnements" appartiennent à une catégorie de détecteurs qui transforment directement l'énergie des rayonnements en énergie électrique, l'électricité produite servant de base à la mesure des rayonnements. L'électricité est constituée par les particules chargées qui sont éjectées par les atomes sous l'action des rayonnements. Le détecteur se compose de deux électrodes, placées dans une cellule sous vide et produisant des quantités variables de particules chargées lorsqu'elles sont exposées aux rayonnements. Si, par exemple, la production de particules chargées (électrons libérés par les rayons gamma, par exemple) d'une électrode est supérieure à celle de l'autre, il y aura transfert net d'électrons entre les deux électrodes, si bien que le système acquerra une certaine charge. On a suggéré que ce principe pourrait aussi être utilisé pour la mise au point d'un détecteur de neutrons où une électrode exposée produirait beaucoup plus de particules chargées (protons, par exemple) que l'autre. Pour le revêtement des électrodes, on peut utiliser du bore, qui libère des particules alpha lorsqu'il est frappé par des neutrons, ou bien certaines substances hydrogénées qui dégagent des protons.

G. Perriot (France) a décrit un autre type de détecteur possible, fondé sur les variations de la résistivité électrique des solides soumis au rayonnement neutronique. Des expériences préliminaires ont permis de sélectionner un certain nombre de solides susceptibles d'être utilisés comme détecteurs.

D'autres participants ont donné un aperçu des méthodes et des instruments de mesure du flux utilisés à l'heure actuelle dans d'importants centres dotés de réacteurs. A. Charbonnel (France) a décrit les appareillages de détection et les techniques de comptage utilisés au Service des grandes piles expérimentales à Saclay. U. Farinelli (Italie) a exposé les méthodes utilisées dans le réacteur Ispra-2, tandis que cinq autres savants italiens (M. Bresesti et

ses collaborateurs) ont décrit des expériences de dosimétrie des neutrons rapides au moyen de détecteurs à seuil dans les réacteurs Ispra-1 et Avogadro.

## Energie des neutrons

Les mesures spectrométriques - mesures des énergies neutroniques et de leur distribution dans un champ donné - ont aussi fait l'objet de plusieurs mémoires. Une étude d'ensemble, présentée par un groupe de spécialistes français et belges, a passé en revue l'évolution récente des techniques de spectrométrie des neutrons rapides émis par les réacteurs. Ces techniques faisaient aussi l'objet de deux mémoires présentés par R. Wallace (Etats-Unis) et E. L. Stolyarova (URSS).

K. W. Geiger (Canada) a exposé une méthode de mesure des spectres de neutrons à l'aide d'un télescope à protons de recul, en insistant sur les avantages qu'elle présente par rapport à la méthode de mesure des traces laissées par ces protons dans une émulsion nucléaire. La méthode des émulsions nucléaires peut être utilisée pour déceler et mesurer tous les rayonnements ionisants parce que les traces laissées dans l'émulsion par les particules chargées ou les rayonnements électromagnétiques sont comparables aux effets de la lumière sur l'émulsion d'une plaque photographique. M. Geiger a expliqué que le télescope à protons de recul a été construit pour servir de spectromètre de neutrons afin de pallier les inconvénients et d'éviter les pertes de temps qu'entraîne l'analyse des traces des protons de recul dans l'émulsion. Dans cet appareil, les protons de recul traversent un télescope-compteur et sont ensuite absorbés par un cristal scintillant. Des instruments électroniques permettent de mesurer l'énergie dégagée par les protons dans le scintillateur.

S. Passe (France) a présenté un mémoire sur la mesure des spectres de neutrons rapides à l'aide d'émulsions nucléaires.

A. Narath et P. Koeppe (Allemagne) ont fait ressortir que l'on pourrait éviter l'opération longue et fastidieuse qui consiste à examiner au microscope les films impressionnés par les neutrons si l'on disposait d'un matériel d'exploration et de comptage automatique, dont ils ont décrit un modèle expérimental.

Comme indiqué précédemment, l'un des problèmes propres à la mesure des neutrons est dû au fait que le rayonnement neutronique s'accompagne souvent d'un rayonnement gamma. La principale méthode de différenciation de ces deux rayonnements est l'analyse spectrométrique, qui permet, par exemple, de séparer les impulsions produites par chacun d'eux. C. C. Dorochenko et E. L. Stolyarova (URSS) ont décrit une méthode permettant de discriminer les impulsions dans un détecteur à scintillations, fondée sur

le principe que les scintillations ont une durée différente selon le type de la particule excitatrice. Un autre atomiste soviétique, V. I. Ivanov, a décrit une autre méthode, qui consiste à diriger les impulsions dues aux protons de recul (provenant de collisions avec les neutrons) et aux électrons (éjectés des orbites atomiques par les photons des rayons gamma) vers des canaux différents du circuit électronique.

E. F. Bennett (Etats-Unis) a présenté un mémoire sur les méthodes de séparation des rayons gamma dans un compteur proportionnel (fondé essentiellement sur le principe de l'ionisation). La séparation est possible du fait de la différence qui existe entre la longueur de la trajectoire d'un électron (éjecté par un rayon gamma) et celle d'un proton de recul (produit par un neutron), cette dernière étant beaucoup plus courte. En conséquence, les ions produits par les protons de recul arrivent en une bouffée relativement compacte, tandis que les ions produits par les électrons qui traversent le compteur sont dispersés sur une distance beaucoup plus grande. Ce phénomène produit à son tour divers types d'impulsions dont la différence est rendue à la lecture électronique.

B. Brunfelter, J. Kockum et N. Starfelt (Suède) ont passé en revue plusieurs méthodes de discrimination fondées sur les différentes formes des impulsions provoquées par les scintillations dues aux neutrons et aux rayons gamma. Dans un autre mémoire, G. Doring, R. Jansson et N. Starfelt (Suède) ont fait ressortir que les scintillateurs organiques, qui séparent les rayons gamma parasites d'après la forme des impulsions, permettent de mesurer des spectres de neutrons dont les énergies dépassent 0,5 MeV.

## Mesures de la dose

Au cours de la discussion consacrée à la mesure des doses de neutrons, G. S. Hurst et R. H. Ritchie (Etats-Unis) ont présenté un principe général de dosimétrie des rayonnements. Ils ont souligné que jusqu'à présent la dosimétrie des rayonnements reposait essentiellement sur la mesure de l'énergie totale absorbée par gramme de matière située dans la région sensible du détecteur. Ce principe a été appliqué avec succès pour mesurer les doses de rayonnements ionisants absorbées par différentes matières pour une gamme étendue d'énergies. Toutefois, avec la généralisation des applications des différents types de rayonnements, qui exige une meilleure protection de l'homme contre ces rayonnements, il convient de caractériser l'interaction des rayonnements et de la matière de diverses manières. Ceci est particulièrement nécessaire dans le domaine de plus en plus complexe de la radiobiologie. Les auteurs ont souligné que, grâce aux nouveaux progrès de la radiophysique, les méthodes de dosimétrie sont beaucoup plus nombreuses qu'auparavant. Ils ont donné

des formules théoriques qui permettent d'envisager les divers aspects et phases du transfert d'énergie des rayonnements à la matière irradiée.

Dans un mémoire sur les aspects pratiques de la dosimétrie des neutrons, quatre autres savants américains (C. C. Gamertsfelder et ses collaborateurs) ont décrit un dosimètre utilisable là où des accidents de réacteurs sont à craindre. L'appareil se compose de feuilles d'indium et d'or, placées au centre d'un cylindre de paraffine. Les auteurs ont aussi donné des précisions sur une méthode qui permet d'identifier rapidement les personnes exposées à des doses importantes de neutrons au cours d'un accident de réacteur. On détecte les rayonnements émis par le sodium activé de l'organisme en plaçant un tube Geiger ordinaire contre l'abdomen de l'individu exposé, que l'on fait ensuite pencher en avant. Cette méthode a été particulièrement utile pour dépister les personnes exposées après le récent accident de criticité de Hanford.

S. Hagsgård et C. C. Widell ont décrit la méthode couramment utilisée à l'AB Atomenergi (Suède) pour mesurer la dose individuelle d'exposition aux neutrons rapides. En l'occurrence, on compte les traces laissées sur une émulsion nucléaire à l'aide d'un microscope et d'un écran sur lequel on projette l'image. Pour les doses élevées de neutrons, on utilise un dosimètre constitué d'une feuille de phosphore revêtue de cadmium, d'une feuille d'or revêtue de cadmium et d'une feuille d'or nu.

D. Nachtigall (Allemagne) a décrit des appareils à piles servant aux mesures courantes des débits de dose locaux, et il a fait remarquer que, si ces instruments sont assez sensibles, leur réponse n'est pas proportionnelle à la dose. Il a examiné comment on pouvait surmonter cette difficulté.

Deux spécialistes roumains, J. Apostol et M. Oncesco, ont présenté un mémoire sur la dosimétrie des neutrons émis par les sources utilisées dans l'industrie du pétrole. Ils ont dit qu'à cet égard on pouvait surmonter les difficultés inhérentes aux champs de rayonnements mixtes en mesurant les doses de rayons gamma au moyen de dosimètres classiques à piles et en établissant le rapport entre la dose de neutrons et la dose de rayons gamma.

H. H. Rossi (Etats-Unis) a fait remarquer que les chambres d'ionisation sont, en raison de leur simplicité et de leur régularité de fonctionnement, considérées comme des instruments très commodes pour la dosimétrie des rayonnements. C'est le cas, notamment, de la chambre d'ionisation équivalente au tissu, dans laquelle une partie des matières à irradier réagit aux rayonnements comme le ferait un tissu de l'organisme; cette chambre peut servir à mesurer les doses absorbées pour une gamme étendue

de d'intensités de rayonnement et de dose. Toutefois, comme leur réponse est universelle, ces instruments ne séparent pas les doses dues aux différents rayonnements que comportent les champs mixtes. Ils ne peuvent être utilisés que dans les champs de rayonnements relativement purs et il faut donc les compléter par d'autres appareils si l'on veut évaluer de façon satisfaisante un champ mixte.

W. Abson et R. P. Henderson (Royaume-Uni) ont dit que pour le contrôle individuel de l'exposition à des rayonnements mixtes (neutrons et rayons gamma), la mesure idéale est celle qui indique la dose maximum en rems (roentgen-equivalent man) reçue par un organisme humain exposé au même rayonnement que l'instrument de mesure. Les chambres d'ionisation remplies de gaz et à parois équivalentes au tissu peuvent être utilisées pour la mesure de la "dose tissulaire due aux collisions primaires" des neutrons rapides, mais cette mesure ne donne pas la dose maximum en rems à l'organisme, car celle-ci dépend des processus de collisions multiples et de l'efficacité biologique relative (EBR) qui correspond à la nature et à l'énergie des rayonnements ionisants secondaires produits dans le corps par les neutrons rapides. Les auteurs ont dit que l'on pourrait mettre au point d'autres types de chambres d'ionisation de manière à obtenir une réponse aux neutrons qui remplirait assez exactement les conditions voulues pour une indication de la dose en rems. Ils ont donné à cet égard des détails sur la construction et les caractéristiques d'une chambre remplie d'hydrogène à haute pression.

W. B. Beverly, R. S. Caswell et V. Spiegel Jr. (Etats-Unis) ont décrit certains problèmes relatifs à la réponse d'un dosimètre à compteur proportionnel selon l'énergie des neutrons rapides. Pour la dosimétrie des neutrons en présence de rayons gamma, on emploie souvent un dosimètre à compteur proportionnel, à parois en polyéthylène et rempli d'éthylène. Cet appareil accepte et mesure les fortes impulsions dues aux particules de recul, tandis qu'il rejette les faibles impulsions dues aux électrons secondaires provenant des rayons gamma. Les auteurs ont suggéré des moyens pour améliorer l'exactitude de ces mesures.

## Etudes d'ensemble et normalisation

Outre les mémoires examinant des problèmes donnés ou des méthodes et des instruments particuliers, plusieurs études d'ensemble sur les pratiques actuellement suivies ont été présentées au cours du colloque. P. Delattre et A. Prosdoci mi ont décrit l'activité du groupe de travail "Dosimétrie" d'Euratom. Un mémoire présenté par A. Rossi et le personnel du Centre de recherches nucléaires SORIN exposait les travaux de dosimétrie exécutés à ce Centre. Y. Droulers a rendu compte de l'orientation des

méthodes de mesure des flux et doses de neutrons et rayons gamma, en fonction des expériences en pile faites au Centre d'études nucléaires de Grenoble (France), tandis que R. Beaugé a exposé la dosimétrie des neutrons au Service d'études de protections de piles de Fontenay-aux-Roses. L.K. Burton et A. E. Souch ont étudié les mesures des neutrons rapides dans les génératrices nucléaires industrielles au Royaume-Uni. J. Romanko et W.E. Dungan (Etats-Unis) ont examiné les méthodes analytiques et expérimentales couramment employées dans une installation nucléaire type pour définir et mesurer les spectres des flux de neutrons.

La dernière séance du colloque a été consacrée aux méthodes d'étalonnage des instruments de mesure des neutrons et de normalisation des sources neutroniques. Quatre spécialistes français (E. Calvet et autres) ont exposé une méthode d'étalonnage des appareils de dosimétrie des neutrons, fondée sur la mesure de la chaleur provoquée dans une substance par l'absorption de neutrons; étant donné que l'on obtient ainsi la mesure exacte de l'énergie communiquée par les neutrons à la substance irradiée, il est possible d'étalonner les instruments de dosimétrie habituellement utilisés en comparant les mesures qu'ils donnent aux indications fournies par un microcalorimètre, instrument capable de mesurer des variations de température extrêmement faibles.

On pourrait normaliser les mesures à l'aide d'appareils d'étalonnage et de mesure. On y parviendrait également en normalisant les sources de neutrons; si l'on connaît avec précision l'intensité d'une source, on peut utiliser celle-ci pour contrôler

l'exactitude des mesures faites à l'aide d'un appareil particulier. La préparation de sources étalons, dont on connaît avec exactitude le débit de neutrons d'après des mesures dites absolues, est donc une tâche importante. Plusieurs mémoires ont été présentés concernant les méthodes de mesure absolue, la fabrication d'étalons et la comparaison des mesures.

Il s'agit là d'un domaine dans lequel la collaboration internationale s'impose. La normalisation des mesures des rayonnements est une des principales activités scientifiques de l'Agence internationale de l'énergie atomique; elle constitue une partie importante des travaux qui sont exécutés à son laboratoire de Seibersdorf.

A l'issue du Colloque de Harwell, l'Agence a convoqué un groupe d'étude de la normalisation des instruments de mesure des neutrons. Le groupe, qui s'est réuni sous la présidence de M. R.H. Ritchie, du Laboratoire national d'Oak Ridge (Etats-Unis), et auquel ont participé des spécialistes du Canada, de la France, du Royaume-Uni et de l'Union soviétique, a fait le point de la situation actuelle en ce qui concerne la normalisation des sources de neutrons et des mesures de flux et de doses; il a formulé certaines propositions relatives à la création de centres de comparaisons pour l'étalonnage des instruments de mesure des neutrons. Les recommandations du groupe d'étude aideront l'Agence à déterminer les dispositions à prendre pour normaliser les mesures de neutrons dans les centres nucléaires de divers Etats Membres.