

SEANCE DU 23 NOVEMBRE 1947

617

Les applications biologiques des radioéléments artificiels

par M. Frédéric Joliot.

Messieurs,

Le sujet dont je désire brièvement vous entretenir : « Les applications biologiques des radioéléments artificiels » appartient à un domaine déjà vaste : la Physique nucléaire appliquée, dont l'origine remonte peu après la découverte du radium par Pierre et Marie Curie en 1898. C'est, en effet, en observant les brûlures accidentelles provoquées par la manipulation du radium que fut reconnue l'action biologique des rayons γ . De même les premiers chercheurs qui travaillèrent avec les rayons X virent rapidement que la peau pouvait être lésée par cet agent. Ces effets furent aussitôt étudiés par les médecins, biologistes et physiciens et bientôt se développa l'emploi thérapeutique des radiations sous les noms de Röntgen et Curiethérapie.

Dans ces dix dernières années, la découverte des rayonnements de neutrons ainsi que celle des radioéléments artificiels fournirent de nouveaux modes d'action sur les organismes vivants et de fécondes méthodes d'investigation des processus physiologiques.

Tandis que les rayons X et γ sont constitués par des corpuscules photons de même nature que ceux qui constituent la lumière visible, mais transportant une énergie considérablement plus élevée, le rayonnement de neutrons est constitué par des corpuscules matériels animés de grandes vitesses, de masse voisine de celle de l'atome d'hydrogène. Les neutrons sont des particules élémentaires de matière électriquement neutre qui, associés avec les protons, particules élémentaires de matière chargée d'électricité positive, constituent les noyaux des atomes (à l'exception du noyau de l'atome d'hydrogène léger qui ne contient qu'un seul proton).

Pour produire un rayonnement de neutrons, il faudra extraire des corpuscules des noyaux des atomes en bombardant ceux-ci avec des projectiles nucléaires, particules α , protons ou deutérons, animés de grandes vitesses. Lors des chocs intimes, d'ailleurs très rares, entre les projectiles et les noyaux constituant la cible, l'expulsion d'un neutron peut se produire.

Pratiquement, les rayonnements de neutrons sont produits en irradiant, soit du glucinium avec des rayons α ou des deutérons, soit du lithium avec des deutérons. Le développement des techniques des hautes tensions, et surtout de celle de l'appareil « cyclotron », dû au professeur Lawrence aux États-Unis, permet la production de faisceaux très intenses de projectiles capables de provoquer des transmutations, et particulièrement celles s'accompagnant de l'émission de neutrons.

L'action biologique des rayonnements de neutrons fut bientôt reconnue et plusieurs études qualitatives et quantitatives furent entreprises dans de nombreux laboratoires. Je ne puis les exposer dans cette lecture. Toutefois, je signale que l'intérêt de ces études et de l'emploi de ce mode d'action en biologie réside principalement dans les particularités du processus d'absorption de ce rayonnement dans la matière traversée. Ce processus est entièrement différent de ceux concernant les rayons X ou γ . Dans l'organisme, par exemple, l'absorption de l'énergie cinétique du neutron en mouvement rapide s'effectuera par projection des noyaux des atomes qu'il rencontre. Le neutron suivra d'abord une trajectoire rectiligne ne produisant aucun effet ionisant ou chimique, car il est électriquement neutre, puis il rencontrera et pro-

jettera un noyau d'hydrogène, ou de carbone, ou d'oxygène, etc., des molécules constituant l'organisme. Le neutron de vitesse moins grande, dévié de sa route initiale, parcourra de nouveau une certaine distance en ligne droite jusqu'à la prochaine rencontre. Le sommet de chaque cassure de la trajectoire du neutron sera le lieu de départ d'un projectile noyau d'atome, électriquement chargé, et de courte portée, qui agira fortement sur les cellules qu'il traversera. L'organisme irradié par les neutrons sera, à chaque instant, perforé par une multitude d'aiguilles minuscules. Je rappelle que c'est cet effet de projection des noyaux, découvert par M^{me} Joliot-Curie et moi-même, qui a permis d'envisager et de préciser l'existence des neutrons. Ce processus d'absorption, très particulier aux neutrons, a, sans doute, pour conséquence une action biologique générale différente de celle des rayons X ou γ .

Avec M^{me} le professeur Lacassagne nous effectuons des recherches pour comparer quantitativement les actions biologiques de ces divers rayonnements.

J'en arrive à l'emploi des radioéléments artificiels en biologie et en médecine.

Je crois utile tout d'abord de rappeler ce qu'est un radioélément artificiel et le principe général de sa préparation.

Un radioélément artificiel est constitué par des atomes instables qui, au cours du temps et spontanément se transforment en émettant des électrons positifs ou négatifs animés de grandes vitesses capables de traverser environ 1 centimètre d'eau. Ces rayons électroniques sont facilement décelés et dénombrés à l'aide d'appareils spéciaux. Le nombre d'électrons émis par unité de temps est proportionnel au nombre d'atomes radioactifs présents, il décroît exponentiellement au cours du temps, ce qui permet de définir, pour chaque substance, une période de désintégration. C'est le temps nécessaire pour que le nombre d'atomes radioactifs diminue de moitié.

Les radioéléments artificiels sont, pour la plupart, des isotopes instables n'existant pas dans l'écorce terrestre, des éléments chimiques ordinaires que nous connaissons bien. Par exemple, le radiophosphore de période de désintégration de 14 jours environ a rigoureusement les mêmes propriétés chimiques que le phosphore inactif, stable ordinaire. Lorsqu'un atome de ce radiophosphore se désintègre en émettant un électron, il se transforme en un atome de soufre.

Le principe général de la préparation d'un radioélément artificiel consiste, comme nous l'avons montré M^{me} Joliot-Curie et moi-même, à irradier l'élément chimique à transformer par un rayonnement convenable. Les rayons α ou noyau de l'atome d'hélium, les protons, les deutérons, et principalement les neutrons, ont été utilisés. En irradiant, par exemple, de l'aluminium avec des rayons α , on forme un radiophosphore de période 2 m. 55 émettant des électrons positifs, tandis qu'en irradiant du soufre avec des neutrons rapides, on forme un autre radiophosphore de période 14 jours 3 émettant des électrons négatifs. Je ne puis m'étendre sur les divers processus de formation. On sait actuellement préparer environ 400 radioéléments artificiels, isotopes des éléments chimiques stables connus; les périodes de décroissance s'échelonnent de la fraction de seconde à quelques dizaines de milliers d'années.

Aussitôt après que nous eûmes réussi les premières synthèses de radioéléments nous avons proposé l'emploi de ceux-ci pour l'étude de certains problèmes chimiques et biologiques. Neuf années après ces premiers résultats, on compte un nombre considérable d'applications et en faire une bibliographie complète est déjà un gros travail.

SEANCE DU 23 NOVEMBRE 1943

619

Ce sont les applications employant la méthode des indicateurs radioactifs qui sont de beaucoup les plus nombreuses et sur lesquelles j'insisterai plus particulièrement.

La méthode des indicateurs radioactifs est ancienne et s'appliquait déjà aux radioéléments naturels. Hevesey et Paneth en firent les premiers de judicieux emplois. Rappelons brièvement le principe de cette méthode. Considérons un mélange d'atomes radioactifs et d'atomes inactifs qui leur sont isotopes. Ces atomes actifs et inactifs se comporteront rigoureusement de la même façon dans toutes les opérations chimiques, physiques et biologiques que nous pourrons leur faire subir. Les atomes radioactifs sont indiscernables des atomes actifs isotopes jusqu'au moment où ils se désintègrent en émettant un rayonnement. Considérons un mélange de radiophosphore et de phosphore inactif, tous les deux sous forme de phosphate de soude, par exemple. Effectuons une précipitation incomplète du phosphore à l'état de phosphate triargentique. Nous observons que l'activité spécifique du mélange initial est restée la même dans la phase solide et dans la phase liquide, c'est-à-dire encore que le rapport du nombre d'atomes de phosphore radioactif au nombre d'atomes de phosphore inactif est rigoureusement le même dans les deux phases (1). Un grand nombre de cas analogues avec des éléments divers ont été étudiés et l'on a toujours constaté, comme l'on devait s'y attendre, puisqu'il s'agit d'atomes isotopes, la constance de l'activité spécifique dans les différentes phases. Introduisons un tel mélange dans une substance aussi complexe soit-elle, contenant déjà ou non des atomes inactifs identiques à ceux du mélange introduit (nous entendons par mélange, les atomes de phosphore actif et de phosphore inactif à l'état de phosphate, par exemple). Faisons subir à la substance des opérations de natures diverses, la divisant finalement en plusieurs parts solides, liquides ou gazeuses. La mesure de la radioactivité de la totalité, ou d'une fraction connue de chacune des parts, indique la quantité d'atomes du mélange initial introduit, présente dans chacune d'elles. Les atomes radioactifs ont joué qualitativement et quantitativement le rôle d'indicateurs du sort des atomes isotopes avec lesquels ils furent introduits. Remarquons que les produits de désintégration des atomes actifs, en général de nature chimique différente, sont en quantité impondérable et leur action sur le comportement de l'ensemble du système peut être négligée. Dans les applications ordinaires de cette méthode, les activités spécifiques des éléments employés sont de l'ordre de 1 atome indicateur radioactif pour 10^{10} à 10^{15} atomes isotopes inactifs. La sensibilité de cette méthode est souvent extrêmement élevée, étant liée à l'extrême sensibilité des mesures de radioactivité. L'indicateur radioactif peut indiquer la présence de petites fractions de microgrammes, le centième et même le millième de γ .

Dans les applications biologiques, il faut toutefois que la quantité d'indicateur radioactif introduite soit suffisamment faible pour ne pas modifier, par l'effet du rayonnement, le processus physiologique étudié. Les effets des radiations doivent être étudiés dans chaque cas séparément et les doses, que l'on introduira ensuite, devront être très inférieures à celle qui produit

(1) L'activité spécifique est plus exactement le rapport du nombre d'atomes actifs au nombre d'atomes inactifs multiplié par la constante de désintégration des atomes actifs. C'est encore le nombre de rayons émis par unité de temps par atome inactif (c'est-à-dire très sensiblement par atome de mélange).

les effets physiologiques. Celles-ci varient considérablement suivant la recherche effectuée. On donne parfois l'exemple suivant : dans l'étude du métabolisme des phospholipides chez la souris, une dose de 36.10^{-6} curies de phosphore par souris, au maximum, est utilisable dans le cas où le cerveau est étudié. Si l'étude porte sur le sang et le muscle, cette dose est ramenée à 10.10^{-6} curies, tandis que la moitié est utilisable dans le cas du foie; enfin, pour les travaux effectués sur les chromosomes, des taux beaucoup plus faibles doivent être introduits, 30 p. 100 de ceux-ci étant déjà altérés par l'introduction d'une dose de 8.10^{-6} curies (2).

La méthode des indicateurs radioactifs peut, d'une part, permettre d'entreprendre des recherches avec plus de rapidité, de finesse et de précision. Elle peut, d'autre part, et c'est là son intérêt principal, constituer l'unique méthode permettant de résoudre certains problèmes.

C'est probablement en biologie que cette méthode a rendu et rendra les plus grands services.

Ce sont les études du métabolisme d'éléments divers chez les plantes et les animaux qui donnèrent lieu au plus grand nombre de travaux. Les éléments qui furent utilisés sont principalement le phosphore, le sodium, l'iode, le chlore, le brome, l'arsenic, le soufre, le fer. Jusqu'à ces derniers temps, le carbone ne pouvait être utilisé en raison de la brièveté de sa durée de vie (carbone de masse 11, période 21 minutes). On sait actuellement préparer un carbone actif de masse 14 dont la vie moyenne est de quelques dizaines de milliers d'années, mais sa préparation demande de très longues durées d'irradiation et une forte intensité de rayonnement (cyclotron).

Jusqu'à la découverte de la radioactivité artificielle, l'étude des phénomènes suivant lesquels divers éléments engagés dans les molécules diverses étaient assimilés, répartis dans les tissus des organismes vivants, transformés en d'autres molécules et finalement éliminés, ne pouvait être effectuée que par les méthodes de la chimie courante. Il était, dans la plupart des cas, nécessaire d'introduire dans l'organisme des quantités importantes d'éléments, permettant les dosages chimiques, et il est évident qu'un tel procédé perturbait le plus souvent les processus chimiques et physiologiques de ces organismes. Les résultats expérimentaux ainsi obtenus ne donnaient que rarement des renseignements certains sur le métabolisme normal étudié. En second lieu, il n'était pas possible, par les procédés jusqu'alors employés, de distinguer ces éléments introduits dans l'organisme de ceux de même nature chimique qui y sont normalement présents. Par exemple, le phosphore, qui est éliminé en excès sur la normale par un animal après l'administration de cet élément, est composé d'atomes de phosphore déjà contenus dans l'animal, atomes qui furent déplacés et, par une partie du phosphore, donné à l'animal. Connaître les parts des phosphores de ces deux origines est impossible par toute autre méthode que celle des indicateurs. Il suffira d'administrer du phosphore inactif mélangé en proportion connue au phosphore actif pour distinguer nettement les deux parts. La mesure de l'activité du phosphore dans les produits d'élimination, urines et fèces, donne directement la part du phosphore administré qui a été éliminé. Le dosage chimique du phosphore fournit l'ensemble des deux parts.

Je ne peux citer que quelques exemples de recherches. Ce sont les belles études sur la nutrition des plantes et particulièrement l'étude des mouvements

(2) Le Curie de radioélément émet par seconde dans tout l'espace $3,7 \times 10^{10}$ rayons.

SEANCE DU 23 NOVEMBRE 1943

621

dans la plante du phosphore introduit à l'état de phosphate dans le sol. La méthode photographique fut utilisée avec succès pour déceler la présence du phosphore actif dans les diverses régions de la plante. Il suffit d'appliquer, par exemple, une feuille contenant le phosphore actif sur une plaque photographique pour obtenir l'image fixe des lieux de localisation de ces éléments. Chez les animaux, le métabolisme d'élément comme le phosphore, l'arsenic, le soufre, le fluor, l'iode, pour des temps variables après l'administration, a déjà donné des renseignements importants. L'influence de la nature des molécules contenant l'élément, sur la fixation et l'élimination de cet élément, a aussi été étudiée. Les résultats de ces études peuvent avoir des conséquences immédiates en médecine.

Des travaux de conséquence très importante ont été effectués avec le fer radioactif par Whipple et Harlow en Amérique. Il s'agit de l'étude du sort de l'élément fer dans les animaux normaux et anémisés. Ces expériences concernent le métabolisme du fer. On sait que le fer, dans l'organisme normal, est fortement lié; l'absorption et l'élimination sont très faibles. Les expériences ont montré qu'une rapide absorption du fer a lieu seulement dans les organismes anémisés. Le fer absorbé presque exclusivement par le système gastro-intestinal est transporté dans le plasma, aux centres producteurs de globules rouges, où il est incorporé dans l'hémoglobine en très peu de temps. Il n'y a pas d'échange entre le fer de l'hémoglobine et le fer du plasma. On peut doser, dans le sang, la nouvelle hémoglobine contenant le fer radioactif. Le fer est entièrement entré dans l'hémoglobine 4 à 7 heures après son administration chez le chien anémié. Les globules rouges radioactifs peuvent être facilement pris à un animal et introduits dans un autre, ceci permettant d'étudier quantitativement la chute de l'hémoglobine.

Concernant les échanges d'éléments entre plasma et globules rouges, on a pu observer des différences considérables suivant l'élément. Les globules sont perméables au chlore. MM. Feyel, Sûs et moi-même nous avons montré qu'il en est de même pour l'iode ionique. En quelques minutes, chez le lapin, après l'injection d'iodure de sodium radioactif, l'iode est passé au maximum possible dans les globules.

Les problèmes relatifs au fonctionnement de certaines glandes endocrines ont aussi été attaqués. Le corps thyroïde, en raison du rôle joué par l'iode dans ses sécrétions hormonales, a pu être étudié et, là encore, de nombreux résultats ont été obtenus. En particulier, on a constaté l'extrême rapidité de la fixation de l'iode ionique dans la thyroïde, quelques minutes suffisant pour obtenir le maximum. Les expériences ont été faites à mon laboratoire sur des animaux normaux et hypophysectomisés. Des injections d'iode radioactif ont déjà été utilisées pour établir un diagnostic sur le fonctionnement du corps thyroïde chez l'homme. Un tube détecteur d'électrons est placé sur la poitrine du patient devant la région occupée par le corps thyroïde et l'on note, en fonction du temps à partir de l'époque de l'injection, le nombre d'électrons détectés par le tube. Ce nombre est proportionnel à la quantité d'iode fixée par la thyroïde.

Enfin, on a réussi à préparer la vitamine B 1 contenant le soufre radioactif de période 88 jours. L'étude montre que 10 p. 100 de celle-ci est détruite chaque 24 heures dans le corps humain.

Un grand problème vient d'être entrepris par Hastaing. Il concerne le métabolisme des hydrocarbures, leur synthèse étant faite à l'aide de ^{14}C de très grande vie. Depuis 6 mois, nous irradiions, à l'aide du cyclotron du

Collège de France, les substances convenables en vue de préparer ce produit précieux.

Je crois avoir montré, par ces quelques exemples choisis parmi tant d'autres, la généralité et la fécondité des applications des radioéléments artificiels. Ces applications paraissent simples à réaliser, mais, en réalité, elles nécessitent une mobilisation importante de matériel et de chercheurs ayant des connaissances variées. L'association de chercheurs expérimentés, représentants de chacune des disciplines engagées par l'application particulière, est indispensable si l'on désire atteindre des résultats valables. En particulier en biologie, il est nécessaire d'associer étroitement les activités du biologiste, du physicien et du chimiste, *et de ne s'attaquer au début qu'à des problèmes simples*. On conçoit tout le bénéfice qui peut être tiré pour ce genre de recherches de l'association de formes de pensées souvent très différentes et se complétant.

COMITÉ SECRET

— A quinze heures cinquante-cinq minutes, l'ordre du jour étant épuisé, la séance publique est levée et l'Académie se constitue en Comité secret.

— A seize heures cinq minutes, la séance est levée.

Le Gérant : J. CAROUJAT.

LE NOUVEAU CENTRE DE RECHERCHES FONDAMENTALES EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE A ORSAY ET LA FORMATION DES CHERCHEURS *

Je voudrais tout d'abord vous dire combien m'a été agréable votre invitation de participer à cette réunion. J'en aurais beaucoup regretté, étant alors en mauvaise santé, de n'avoir pu venir à Lindau en 1952, en compagnie d'Irène Joliot-Curie. J'ai gardé le souvenir de la joie qu'elle avait exprimée à son retour, d'avoir passé des moments très agréables et intéressants avec ses collègues Prix Nobel et vous comprendrez ma douleur de ne pas être avec elle aujourd'hui.

Je désirerais vous entretenir de la création récente d'un important Centre de Recherches fondamentales en physique nucléaire à Orsay, dans la vallée de Chevreuse, au sud de Paris, et vous confier quelques réflexions sur l'importance des nécessités techniques toujours plus volumineuses et complètes sur la pensée créatrice du chercheur.

Il s'agit, certes, de questions concernant un domaine de la science, la physique nucléaire, s'inscrivant dans une situation particulière à un pays. Je pense toutefois que, par de nombreux aspects, ces questions se présentent non seulement pour la physique nucléaire, mais pour d'autres sciences, et en divers lieux ; elles concernent essentiellement la Recherche fondamentale.

* Cette conférence a été prononcée au cours de la rencontre des Prix Nobel de Chimie qui s'est tenue à Lindau sur le lac de Constance, en Allemagne, du 20 juin au 3 juillet 1952.

Certaines des idées qui y sont développées se retrouvent également dans le discours en français international de l'Association française pour l'année 1952, et dans un article paru dans la revue *L'Age nucléaire* (septembre 1952).

Si, mal me peut aujourd'hui, que les problèmes que pose la technique, que les moyens d'investigation présents qu'elle met à la disposition de la science, favorisent et stimulent la Recherche fondamentale, il est juste de dire que partout dans les grandes innovations technologiques ont eu leur origine dans les connaissances acquises et les découvertes effectuées dans les laboratoires de recherche fondamentale. En bref, la science et la technique se développent mutuellement et des liaisons se créent entre elles. Ces liaisons, à mon avis, ne doivent s'établir entre l'indépendance des Recherches fondamentales. Les laboratoires qui s'adonnent à celles-ci s'efforceraient sans cesse d'accroître nos connaissances des phénomènes naturels, de découvrir la nature, sans que le choix des sujets de recherches soit dicté par un souci d'application. Toute connaissance nouvelle a toujours, ici ou là, une application pratique.

C'est pourquoi les établissements industriels, publics et privés, doivent porter un grand intérêt aux recherches fondamentales et aider à leur développement dans la plus grande indépendance possible, sans souci de rentabilité immédiate. Cette conception n'a pas nécessairement pour conséquence, de la part du savant, un manque d'intérêt déterminé pour toute application pratique que ferait apparaître à ses yeux une connaissance nouvelle ; mais il me semble qu'il serait préjudiciable, à ce moment, d'orienter l'activité du laboratoire de recherche pure vers la mise en œuvre de l'application. C'est aux laboratoires correspondants de recherche appliquée de s'attaquer au problème en liaison avec les laboratoires de recherche fondamentale.

J'ai cru utile de situer la recherche fondamentale vis-à-vis des recherches appliquées et industrielles à un moment où l'on invoque à tort souvent, certes pour des raisons louables, — mais aussi pour d'autres qui le sont moins — la Recherche Scientifique pour résoudre toutes nos difficultés. Personnellement, je suis bien convaincu qu'il est juste de voir dans le développement de la science la source essentielle du progrès, mais encore faut-il que les applications qu'en font parfois les hommes ne constituent pas des détournements de sa vocation, qui est de découvrir la Vérité et servir l'Humanité.

N'y a-t-il pas un grand risque, si l'on s'écarte pas suffisamment l'opinion publique sur ces distinctions entre ceux qui servent la science et ceux qui en font de mauvais usages, de lui voir perdre la confiance qu'elle a dans la science et, finalement, de s'opposer à son développement ? Pour l'accomplissement de cette mission d'éducation, les scientifiques ont une responsabilité particulière : en y consacrant une partie de leur temps, ils servent encore la science.

Cette confiance dans la science est encore très forte, dans mon pays comme dans beaucoup d'autres, et il est admis en général que ce n'est qu'au prix d'un développement intense de celle-ci qu'une nation peut vivre heureux, que c'est par le rayonnement de sa pensée et la diffusion de ses réalisations originales qu'elle justifie sa libre existence parmi les autres nations créatrices.



Pour ce qui concerne la Physique nucléaire, des efforts importants, certes encore insuffisants, ont été entrepris dans mon pays depuis la Libération du territoire. D'autres domaines de la Science aussi ont bénéficié d'efforts qui, sans être de la même importance, permettent un nouvel essor.

Pour les recherches fondamentales en Physique nucléaire, la réalisation récente à Orsay du groupe des laboratoires dont j'ai la charge, est un des exemples de l'effort consenti par les pouvoirs publics.

Il s'agit de laboratoires bien équipés pour l'étude des phénomènes nucléaires, disposant de générateurs de projectiles nucléaires de hautes et moyennes énergies. L'énergie maximale d'exploration est d'environ 150 millions d'électron-volts pour les protons obtenus à l'aide d'un synchrocyclotron. En langage abrégé de laboratoire, nous dirons que nous sommes spécialisés dans le domaine des basses et moyennes énergies ; domaine certes déjà très exploré mais toujours très important à prospecter. Dans ces laboratoires sont rassemblés la majeure partie du personnel, chercheurs et techniciens, et du matériel principalement à Paris, du Laboratoire Curie de la Faculté des Sciences, du Laboratoire de Physique et de Chimie Nucléaire du Collège de France et du Laboratoire des Grottes

assants permanents du Centre National de la Recherche Scientifique.

Nous disposons donc, au départ, d'un important capital et ceci m'aurait, avant d'aller plus loin dans la description du groupement d'Orsay, à exposer les raisons qui ont conduit à la réalisation de celui-ci et son origine.

Il y a tout d'abord le prodigieux développement des applications de la physique nucléaire et, en premier lieu, de l'énergie atomique.

Toujours plus nombreuses sont les demandes de spécialistes de haut niveau émanant des nouveaux laboratoires ou centres de physique nucléaire français et des établissements publics et privés travaillant soit pour l'énergie atomique, soit pour les applications des radioéléments artificiels. Les scientifiques qui, comme nous, travaillent dans le cadre universitaire, doivent accomplir une double mission, celle de promouvoir les recherches scientifiques, en y comprenant la formation des chercheurs destinés à travailler dans nos laboratoires et à répondre au mieux aux demandes de personnel émanant de l'extérieur, et celle d'enseigner la physique nucléaire aux étudiants de l'Enseignement supérieur. La contribution à l'accomplissement de cette double mission des laboratoires que j'ai cités plus haut s'écrirait insuffisante pour de nombreuses raisons parmi lesquelles la dispersion et le manque de places interdisant le recrutement des jeunes chercheurs et Techniciens de puissants équipements modernes.

Pour ce qui concerne l'origine, c'est au Laboratoire Curie de l'Institut du Radium qu'il faut la trouver. La physique nucléaire doit beaucoup à ce laboratoire créé, il y a environ quarante ans, par la Faculté des Sciences de Paris, à la demande de Marie Curie.

Tous ceux qui ont travaillé sous la direction de ce grand savant portent les marques de son enseignement, tant du point de vue scientifique que du point de vue humain. C'est au Laboratoire Curie que j'eus pour la première fois le bonheur de travailler avec Henri Curie, assistant de sa mère ; nous devons, par la suite, associer nos efforts dans la plupart de nos travaux. Après la mort de Marie Curie, en 1934, André Debierne, ancien collaborateur de Pierre et Marie Curie, put

La direction du laboratoire et fut nommé professeur Dugué à cette époque, en dépit d'un agrégatisme et de l'existence d'une carrière à Armand, destinée aux gros traites chimiques. Le laboratoire Curie marquait de l'existence pour les chercheurs et restait pour installer des générateurs de projectiles transmutants dont disposaient depuis quelques années plusieurs laboratoires à l'étranger. En 1932, quittant le Laboratoire Curie, je pus, comme professeur au Collège de France, faire mettre en chantier un cryotron d'arrivon 38 tonnes, pour équiper le nouveau laboratoire attaché à la Chaire de Physique et Chimie moléculaires que venait de créer le Collège de France. A peu près à la même époque, je fis créer par le Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.) le Laboratoire de Synthèse Atomique où furent installés des accélérateurs haute-tension.

S. Rosenblum qui avait découvert au laboratoire Curie la structure fine des rayons α transporta son activité principale dans un laboratoire du C.N.R.S. où il fit construire par la suite un très grand aimant permanent (70 tonnes), destiné à la spectroscopie α d'extrême précision. Irène Joliot-Curie, en 1948, devint directrice du laboratoire Curie et lui donna une impulsion nouvelle.

La collaboration, toute naturelle, des laboratoires dont je viens de parler, commença à porter ses fruits. Puis ce fut la guerre et l'occupation du territoire.



En dépit des difficultés déjà ressenties avant ces événements, dues à la dispersion des lieux d'activité, celle-ci reprit intensément dès la Libération et, en 1950, ces laboratoires étaient sursaturés par l'afflux des étudiants et chercheurs attirés vers les sciences nucléaires. Nous manquions de place pour répondre aux demandes, et le cryotron ainsi que les deux accélérateurs haute-tension dont nous disposions, ne pouvaient suffire pour entreprendre de nouvelles recherches. Il était particulièrement impossible de réaliser les extensions nécessaires aux emplacements mêmes des laboratoires dont nous avions le charge, et il fallait envisager d'importantes constructions nouvelles dans la banlieue parisienne et les équiper de généra-

teurs modernes et puissants. Parmi les grands établissements dont dépendaient nos laboratoires, la Faculté des Sciences de Paris possédait le plus en mesure de prendre l'initiative des réalisations. Irène Joliot-Curie proposa à la Faculté des Sciences un projet très élaboré d'acquisition d'équipement, dont un gyroscopion de 150 millions d'Electron-volts (yves), et de construction de locaux dans la région parisienne et, sous l'impulsion du Doyen Charlet, des crédits importants furent accordés. Un personnel technique comprenant des ingénieurs de qualité fut accordé à titre spécial pour assurer l'installation et le fonctionnement du nouvel équipement. Le gyroscopion trouva son site convenablement à la Société Philips en Hollande et la Faculté fit l'acquisition d'un vaste terrain de plus de 100 hectares à Orsay, au sud de Paris, dont une partie fut destinée à la construction de laboratoire de physique nucléaire.

La situation que j'ai résumée ci-dessus commandait impérieusement ces réalisations. Nous nous trouvions en retard du rang de place, dans la situation paradoxale de disposer de plus de cadres (plus d'une soixantaine de docteurs et chercheurs) que de jeunes chercheurs.

Enfin, notre projet était de rassembler à Orsay l'ensemble du personnel et de l'équipement présente dans les laboratoires de Paris dont nous avions la charge. Je citerai à ce propos quelques phrases du rapport que présentait Irène Joliot-Curie aux autorités dont elle dépendait :

La construction de l'Institut de Physique Nucléaire et Radioactivité de la Faculté des Sciences de Paris permettra :

1. — De donner une nouvelle orientation à la recherche en Physique Nucléaire et en Radiochimie par des moyens puissants et modernes.
2. — De développer l'enseignement de la physique et de la chimie nucléaires.
3. — De regrouper certains laboratoires du ministère de l'Éducation nationale, notamment de transférer le Laboratoire Curie et ses annexes et le Laboratoire de l'aimant permanent.
4. — D'accueillir des professeurs et des étudiants étrangers dans le cadre des échanges scientifiques.

268 *Travaux choisis de Frédéric Joliot-Curie*

travaux qui a été, dès sa création, dans les traditions du Laboratoire.

Frédéric Joliot-Curie, jusqu'à sa mort en mars 1956, a été par excellence collaborateur du Laboratoire Curie. Messeurs Bouché, Feilac, Riou, se donnaient sans ménagement à la réalisation de ce programme.

M. Bouché quitta le Laboratoire Curie en 1955. Nommé Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble, il participe à la création d'une activité nouvelle en physique nucléaire et émerge atomique dans cette ville.

En juillet 1955 fut décidée la construction d'une première tranche des bâtiments à Orsay. Les avantages de ce lieu sont nombreux. Il se trouve à proximité du Centre d'Etudes Nucleaires du Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) et du Centre de Recherches du CNRS, à Clif-sur-Yvette, ce qui a permis la création de quels favoris pu contribuer en 1945 et en 1948. Les communications avec Paris sont assurées, par la ligne de métro suburbaine reliée au métropolitain parisien et la distance à parcourir n'est que de 25 km.

Le cadre naturel, en pleine verdure, où règne le calme, est favorable aux recherches fondamentales. Toutefois, le sol argileux nécessitait un piquetage très serré du terrain qui, par place, devait supporter des charges très lourdes comme celles des accélérateurs et des protections en béton contre les dangers des rayonnements. Il fallut environ six mois pour que les bâtiments commencent à peiner à émerger du sol. Frédo Joliot-Curie qui avait tant donné de ses forces pour la réalisation de cette œuvre ne put hélas, avoir la joie d'assister à cette naissance. Ses fidèles collaborateurs redoublèrent d'efforts pour que les travaux ne subissent pas de retard et, dès septembre 1956, je fus appelé par la Faculté des Sciences, à poursuivre, en leur compagnie, l'œuvre qui nous tenait tant à cœur. Un an plus tard, en août 1957, la construction de la première tranche des bâtiments était achevée et une partie importante du gros et du petit équipement était en place. Le synchrotron était en montage. La majeure partie des physiciens du Laboratoire Curie et du Laboratoire de physique et de chimie nucléaires et du personnel technique et administratif venait occuper le nouveau Centre.

Le nouveau Centre d'Orsay 269

Je consacrai dans les semaines qui suivirent les services de C. Curie et de Radiochimie, en attendant la réalisation de la deuxième tranche des constructions à Orsay, dont une première urgente commencerait immédiatement.



L'ensemble des chercheurs est réparti actuellement en cinq groupes, couvrant en partie sur les principaux équipements :

- 1. Groupe du synchrotron ;
- 2. Groupe des cyclotrons ;
- 3. Groupe des Hélium-3 ;
- 4. Groupe de Spectroscopie nucléaire ;
- 5. Groupe de chimie, indiquant, isotopes, etc.

Dans ces groupes les chercheurs font les projets des expériences et étudient les programmes, de découverte ; ils proposent les sujets de séminaires.

Une section d'enseignement examine les problèmes de l'enseignement dit de 3^e cycle de l'enseignement supérieur résumés, et qui a pour but de permettre à des étudiants ayant les certificats de licences généraux de suivre, durant une année, un enseignement d'un haut niveau sans être tenu par un certificat de spécialité, physique nucléaire dans notre cas.

Pour ce qui nous concerne, nous avons jugé qu'il était profitable pour la recherche de rompre avec l'esprit scolaire en remplaçant les manipulations classiques, en salle sous surveillance, par la fréquentation du laboratoire en incorporant les étudiants dans les équipes de chercheurs en cours d'expérience. Un système de rotation leur permet de prendre contact avec la science « qui se fait » dans les principales activités de la physique nucléaire.

Il s'agit de jeunes gens ayant déjà une culture assez poussée, et qui ont déjà manipulé à l'Université au cours de leur

1. L'auteur décrit ici les principaux groupes de l'Orsay : Synchrotron de 150 MeV ; Cyclotron de 7 MeV ; Projets de cyclotrons à énergie variable ; Centre de chimie nucléaire ; Spectromètre à neutrons et spectroscopie de masses (voir le Préface).

enseignement de 2^e cycle. Ce système, par les concours plus
intenses qu'il crée avec les universitaires, permet de porter un
jugement plus juste sur leurs qualités de futurs chercheurs.
S'ils entrent à l'université du Certificat de spécialité (3^e cycle),
ils peuvent, durant une deuxième année, effectuer une recher-
che personnelle, en vue d'une thèse de doctorat 3^e cycle. Les
élèves du 3^e cycle peuvent recevoir des bourses permettant
aussi de recourir parmi les diverses classes sociales.

Le Centre National de la Recherche Scientifique, sur
proposition de sections de spécialistes élus, accorde des bours-
ses de stagiaires de recherches à des candidats qui veulent se
destiner à la recherche. Après une ou deux années d'étude en
R.S. Les grades supérieurs de ces allocations de bourses du C.N.R.S. sont :
attachés de recherches, chargés de recherches, maîtres de re-
cherches, directeurs de recherches, permettant de faire une
carrière dans la recherche scientifique.

Actuellement travaillent dans notre groupe à Orsay et à
Paris, environ 250 personnes, dont 90 chercheurs qualifiés et
150 techniciens, ce qui représente de gros effectifs pour un
laboratoire de recherches fondamentales.

Ces effectifs croîtront notablement jusqu'en 1960, date à
laquelle nous prévoyons l'achèvement de la deuxième tranche.

Des liens s'établissent avec le Centre de Saclay du C.E.A.
où un service de recherches fondamentales, disposant d'un
important équipement, travaille avec succès. Nous avons à
même de suivre, et même de participer sans succès à
prochainement être entreprises à Saclay avec le grand sym-
posium à propos de 2,5 milliards d'électrons-voies.

Des liens existent déjà avec le groupe de l'École Normale
Supérieure qui construit et installe, sur le même terrain de la
Fazille à Orsay, un accélérateur linéaire à électrons, prévu
pour atteindre au maximum la très haute énergie d'environ
un milliard d'électrons-voies.

Nous sommes donc en droit d'avoir confiance dans l'ave-
nir de ces groupes. Pour ce qui concerne celui qui est l'objet
de cet exposé, il profite de traditions qui se sont montrées
fécondes. Celle par exemple de compter sur un rôle très actif

de la chimie dans l'expérimentation en physique nucléaire.
Les exemples sont nombreux où la découverte de phénomènes
nucléaires n'a pu être menée à bien que par des méthodes
issant indirectement, étroitement liées, la chimie et la physique :
la radioactivité artificielle, la fusion de l'hydrogène, en sont
des exemples.

Nous nous efforçons de conserver les traditions si précieuses
de nos maîtres de la radioactivité. Il est hasardeux d'im-
poser en radioactivité, domaine qui risque de paraître
facile et sensible désert aux physiciens nucléaires non
pétrifiés.

Les chercheurs qui fréquentent les laboratoires de tradi-
tions anciennes profitent souvent à leur insu de ce que j'appel-
le des réflexes cachés. Les idées émises parfois au labora-
toire par les maîtres et travailleurs, encore vivants ou disparus
reviennent périodiquement dans les entretiens et pénètrent
consamment ont inconsciemment dans la pensée des cher-
cheurs plus jeunes. Au cours d'un travail, ces acquisitions faci-
litent l'interprétation correcte et parfois la découverte. On
comprend mieux pourquoi telle découverte avait plus de
chances d'être faite dans tel laboratoire.

Devant l'importance des applications de la physique
nucléaire, on crée, en beaucoup d'endroits, des centres de re-
cherches nouveaux qui ne disposent pas, au départ, d'un capi-
tal de spécialistes ayant une bonne formation. Si ces créations
sont indispensables et bonnes, il serait peu rentable qu'elles se-
lassent, les crédits dans leur ensemble étant limités, au détrim-
ent des laboratoires de grandes traditions où tant de décou-
vertes ont été faites.

Il faut veiller à favoriser le développement de certains
et les doter de l'équipement le plus moderne. Ils servent à
cette condition en mesure d'accroître rapidement la produc-
tion et de fournir aux centres de création récente les cadres
capables de transmettre les bonnes traditions.

★

Je voudrais, avant de conclure, vous faire part de quel-
ques réflexions que les conditions du travail de recherche
actuel nous ont suggérées.

Depuis plus de 30 ans que je travaille au laboratoire, j'ai été témoin de la transformation, d'abord assez lente et minime, explosive, des conditions de travail de ceux qui s'occupent à la recherche fondamentale en physique nucléaire.

Il y a vingt ans à peine, l'artillerie utilisée pour explorer les moyens atomiques pouvait tenir dans un flacon de quelques centimètres cubes. J'elbe ou telle expérience ayant donné des résultats d'une extrême importance, ne nécessitant qu'un petit espace, quelques mètres carrés et un matériel peu volumineux. Le chercheur, dont la mentalité à mon avis doit être semblable à celle d'un artiste, se sentait proche du phénomène étudié. L'observation était assez directe. Le chercheur pouvait donner libre cours à son originalité créatrice. Il pouvait sans grande crainte ni risques pour ses compagnons du laboratoire, progresser par sursauts successifs et atteindre le but. Parfois, un coup de génie, tel le poète, Temporaire vers la découverte.

La recherche fondamentale avait, dans une certaine mesure, le caractère artisanal si favorable à l'épanouissement de la personnalité.

La nécessité d'explorer de plus en plus profondément la matière a conduit à inventer des moyens techniques de plus en plus puissants, dont beaucoup sont volumineux et complexes. Rapidement l'artillerie lançant les projectiles : haute-tensions, cyclotron, bétaïron, synchrotron, synchrotron, appareils volumineux et lourds, prit place dans les laboratoires. Un personnel technique nombreux devint indispensable pour assurer leur fonctionnement.

Un centre moderne de recherche fondamentale en physique nucléaire présente, à première vue, au visiteur non averti, un caractère industriel. Le chercheur ne s'isque-t-il pas de se sentir écrasé par ce déploiement certes indispensable, d'appareils énormes et coûteux, dont le prix de quelques heures de fonctionnement s'élève à des dizaines même des centaines de milliers de francs. Il ne se sent plus libre de procéder par sursauts comme autrefois. Il est si responsable, si fortement engagé pour entreprendre un travail. Expérimental avec peu de chances de succès, simplement et pour voir, présente maintenant de réelles difficultés et pourrait la découverte n'est-elle pas souvent une surprise ?

Dans cette transition de l'échelle artisanale à l'échelle industrielle, il me semble indispensable d'être conscient des dangers et de trouver les conditions d'utilisation de l'équipement qui n'étrangleront pas la personnalité du chercheur. On ne peut faire oeuvre originale à la chaîne.

Les conditions actuelles ont aussi une forte répercussion sur la direction des recherches et la gestion administrative d'un centre. La notion de directeur de laboratoire s'est effacée profondément modifiée. Le directeur est astreint à accomplir des tâches multiples et variées qui l'éloignent de la recherche et des chercheurs.

Depuis que notre groupe d'Orsay fonctionne, je me suis attaché, avec mes collaborateurs, à l'étude de ce problème de transition qui me semble capital pour l'avenir de la recherche.

Il serait prématuré de tirer des conclusions vraiment valables de notre expérience encore trop récente et très incomplète. La solution ne dépend pas uniquement de nous, mais des autorités dont nous dépendons nous-mêmes dans le cadre des règles et lois qui nous régissent.

Pour le moment, nous tentons de répartir les responsabilités entre quelques collaborateurs, chacun d'eux exerçant son activité dans un domaine dont l'ampleur est à l'échelle humaine. Il doit ainsi être en mesure d'être en étroite contact avec les chercheurs et de se fonder lui-même à la recherche.

La coordination est assurée lors des réunions périodiques entre exécutifs collaborateurs et le directeur du Centre. Il s'agit là d'une solution qui n'est pas nouvelle et qui est en usage dans des établissements ayant d'autres vocations que la nôtre. Le problème que je viens d'examiner avec ses conséquences sur la recherche, n'est pas particulier au groupe dont j'ai actuellement la direction.

Combien il serait utile que les savants qui ont des responsabilités analogues confrontent leur expérience. Un congrès les réunissant porterait ses fruits et ce serait, pour tous les participants, une occasion nouvelle de servir la science.