

LA FISSION - VINGT ANS APRES

par

John Archibald Wheeler

PALMER PHYSICAL LABORATORY
UNIVERSITE DE PRINCETON

Physique nucléaire théorique et appliqué

Niels Bohr a débarqué à New York, sur le quai de l'Hudson à hauteur de la 57ème rue, par un temps couvert, le dimanche 16 janvier 1939, vers une heure de l'après-midi. Il apportait les observations de Hahn et Strassmann, les explications de Frisch et Meitner et ses propres spéculations. Pour de nombreux chercheurs, son arrivée fut le début d'une époque nouvelle de la physique théorique.

En septembre, la guerre éclata. Des besoins de la défense nationale est née la physique nucléaire appliquée.

La science pure, dans son univers propre, peut-elle être considérée comme un échafaudage de conclusions (CONC) ? La science appliquée, orientée vers l'action, a-t-elle pour objet de fournir des "éléments de décision" ("decision data" : DEDA) ? Si cette distinction (établie par J.W. Tukey) est justifiée, il existe peu de cas où les deux activités aient été aussi intimement mêlées que dans celui de la fission, tout au long de son histoire. Le rappel de quelques faits scientifiques qui se sont produits en différents lieux où l'on travaillait au même but permettra de se faire une idée de l'évolution de la physique de la fission entre janvier 1939 et décembre 1942, puis au cours des vingt dernières années.

DEDA 1. La matière fissile est-elle susceptible d'être enrichie ?

L'uranium naturel est fissile, sous l'action de neutrons lents. Cette propriété est-elle le fait de l'uranium-238 et, par conséquent, la matière fissile est-t-elle impossible à enrichir ? A cette question, Bohr répondit par la négative d'une manière convaincante dès le printemps 1939, en s'appuyant sur la théorie de la fission alors en voie d'élaboration. Le caractère fissile provient de l'uranium-235 qui est 139 fois moins abondant. Aucun élément de décision n'a exercé une influence aussi profonde sur les premières phases du "Projet Uranium". Il impliquait qu'une réaction en chaîne divergente était, en principe, réalisable. Les mots "en principe" contenaient l'idée d'un programme de séparation des isotopes. Mais, l'ampleur des opérations était telle, comme Bohr le disait à l'époque, qu'elle dépassait



John A. Wheeler (Photo Orren Jack Turner)

sait l'imagination; leur accomplissement exigerait les efforts de toute une nation. Bohr s'était trompé : il fallut, en fait, les efforts conjugués de trois nations !

Tout le monde n'accepta pas des conclusions d'une portée aussi grande s'appuyant sur des preuves aussi théoriques, en particulier un théoricien de la physique connu pour sa sagacité. Les doutes que George Placzek avait formulés en 1939 - en les exprimant sous la forme d'un pari de 1 cent contre 18,36 dollars - ne purent être dissipés qu'en 1940 lorsqu'on eut séparé assez de ^{235}U et ^{238}U pour confirmer directement la théorie. Parmi les souvenirs de ce cœur généreux se trouvent un télégramme et un mandat télégraphique de 1 cent envoyés d'Ithaca (New York) en 1940.

DEDA 2. Propriétés fissiles du plutonium

Une réaction neutronique en chaîne ne pouvait hâter le retour à la paix que si elle se produisait à la vitesse d'une explosion dans une masse faible. Si un grand réacteur à neutrons lents pouvait permettre de progresser vers cet objectif immédiat, c'était tout au plus en montrant dès cette époque la validité de la notion de réaction en chaîne.

A peine eut-on compris clairement de quoi il s'agissait qu'il fallut changer de direction. En mai et en mars 1940, L. A. Turner appela l'attention des chercheurs sur certaines conséquences de la théorie de la fission : a) L'espèce nucléaire ^{239}Pu devait être presque certainement fissile ; b) Un réacteur à neutrons lents marchant à l'uranium naturel devait produire ^{239}Pu par synthèse à une vitesse à peu près égale à celle de la destruction de ^{235}U ; c) La séparation chimique de ^{239}Pu devait être plus simple que la séparation isotopique de ^{235}U . Aussi eut-on l'idée de construire un réacteur plutonigène et de fabriquer ce nouvel élément chimique. Ainsi, un troisième concurrent venait rivaliser avec ^{235}U produit par séparation électromagnétique et ^{235}U produit par diffusion gazeuse, pour constituer un stock de matière fissile.

Pour atteindre ce nouvel objectif, des efforts furent déployés bien avant qu'il ne fût possible de prouver directement, par les procédés de la chimie des corps radioactifs, que ^{239}Pu était fissile. Cette preuve - lorsqu'on l'obtint en 1942 - accéléra encore la course à la fabrication de ^{239}Pu . Cette course fut encore stimulée par la visite, au milieu de 1942, d'un groupe d'hommes de science britanniques soucieux de recueillir les résultats des travaux sur la fission dans les deux ans et non après deux décennies.

DEDA 3 et 4. Fission par neutrons rapides et absorption par résonance

De même que certaines caractéristiques de la structure du noyau eurent des incidences sur le programme général du "Projet Plutonium", d'autres influèrent sur l'étude détaillée d'un réacteur nucléaire à neutrons lents. On comprit clairement que les neutrons de fission, alors qu'ils sont encore rapides, ont de bonnes chances d'entrer en collision avec des noyaux de ^{238}U . Les fissions supplémentaires causées par ces collisions tendent à augmenter "le facteur de multiplication k" de la réaction en chaîne essentiellement due aux neutrons lents. Pour accroître cet "effet de neutrons rapides", il était souhaitable de concentrer l'uranium du réacteur en un réseau de sphères ou cylindres de grandes dimensions, c'est-à-dire en une disposition que Szilard et Wigner avaient déjà recommandée en vue de diminuer un effet parasite. Il y a une

bonne probabilité qu'au cours du ralentissement, l'énergie des neutrons soit ramenée à l'une des énergies de résonance du noyau composé $^{238}\text{U} + n = ^{239}\text{U}$ et qu'il y ait capture. Cette absorption par résonance et l'effet de neutrons rapides résistaient alors et résistent encore aux efforts déployés pour les mettre sous forme de lois. On en est toujours réduit à les caractériser par des paramètres empiriques. Ces paramètres des réacteurs et certains autres - "éléments de décision" d'un type particulier - sont définis par la théorie, déterminés par l'expérience et utilisés pour rendre optimum la configuration du réseau.

L'étude du premier réacteur de puissance zéro fut achevée à l'automne de 1942. La construction progressait normalement. Les énergies de nombreux participants étaient mobilisées en vue de ce qui devait suivre. Pour sa part, ce 2 décembre, l'auteur séjournait à Wilmington où il représentait le Groupe de Chicago auprès du Bureau d'études de Du Pont. Il faut résoudre de nombreux problèmes lorsque l'on étudie un réacteur de grande puissance. La physique de la fission est essentielle pour la solution de deux de ces problèmes : celui du réglage et celui de l'empoisonnement du réacteur.

DEDA 5. Durée de vie effective d'une génération

Le réglage de la puissance totale et de la distribution d'énergie dans un réacteur à haut flux de neutrons aurait pu être beaucoup plus difficile qu'il ne l'est effectivement. Il aurait pu se faire que l'intervalle effectif entre une génération de la chaîne des neutrons et la suivante fût égal au temps nécessaire pour le ralentissement et la capture du neutron, c'est-à-dire de l'ordre de la milliseconde. Dans ce cas, un accroissement fortuit, même léger, du facteur de multiplication k au-dessus de l'unité aurait entraîné dans l'espace d'une minute une augmentation de puissance prenant des proportions catastrophiques. Or, grâce aux neutrons retardés émis par certains produits de fission, la durée de vie effective d'une génération n'est pas de l'ordre de la milliseconde mais de l'ordre de plusieurs minutes. La sécurité dans le réglage du réacteur pouvait donc être assurée.

DEDA 6. Empoisonnement dû au xénon

Il était aussi important d'éviter l'arrêt du réacteur que de prévenir son emballement. Les produits de la fission nucléaire devaient eux-mêmes absorber des neutrons. Mais dans quelle mesure ? Les produits de fission stables avaient fait l'objet d'une étude assez approfondie pour dissiper toute crainte d'un empoisonnement du réacteur par ces produits. Cependant, on ne pouvait exclure la possibilité qu'il existât un absorbant radioactif de neutrons en se fondant sur la seule expérience acquise

avec un réacteur de puissance zéro. Dans un réacteur de ce genre, la teneur d'un produit de fission à courte période est négligeable par rapport à sa concentration dans un réacteur plutonigène de dimensions normales.

Pour faire la part d'un poison insoupçonné, fallait-il donner aux réacteurs de Hanford des dimensions plus grandes que celles qui paraissaient nécessaires ? Les ingénieurs du génie chimique savent que tout ce qui risque d'aller mal finira par aller mal si l'on ne prend pas toutes les précautions voulues. George Graves, un vétéran des recherches sur le nylon chez Du Pont, fit le point de tout ce que l'on savait et de tout ce que l'on ignorait encore sur les produits de fission susceptibles d'être des poisons. Il prit ensuite la courageuse décision de dépenser plusieurs millions de dollars supplémentaires et de consacrer un temps précieux à la construction de réacteurs de 25 % plus grands qu'il n'était théoriquement nécessaire.

Les tubes périphériques n'étaient pas chargés d'uranium lorsque, le 27 septembre 1944, les barres de réglage furent lentement retirées du premier réacteur de Hanford jusqu'au point critique. L'eau du Columbia, froide à l'entrée, sortit chaude. Du plutonium fut fabriqué pendant plusieurs heures sans incident. Ensuite, la réactivité de la pile se mit à baisser. Il fallut retirer progressivement les barres de réglage pour que la réaction en chaîne auto-entretenu pût se poursuivre. Enfin, les barres étant tout à fait retirées, il ne resta plus aucun excédent de réactivité et la réaction s'arrêta. La température de l'eau n'était pas plus élevée à la sortie qu'à l'entrée.

Qu'est-ce qui n'allait pas ? La réaction avait-elle provoqué dans les tubes le dépôt de quelque absorbant de neutrons contenu dans l'eau du fleuve ? Ou y avait-il dans les tubes des fuites par lesquelles l'eau s'était répandue dans toute la matrice en graphite du réacteur ? Alors que l'on cherchait à imaginer toutes les explications possibles, la réactivité de la pile se remit à croître. Il fallut réintroduire les barres pour la maintenir sous contrôle. La température de l'eau à la sortie redevint normale et la fabrication de plutonium reprit. Quelques heures plus tard, le facteur de multiplication diminua de nouveau et le réacteur s'arrêta.

Quiconque s'était occupé pendant des mois de l'empoisonnement par les produits de fission et avait étudié les rapports périodiques sur les travaux du laboratoire, situé à quelques kilomètres de distance, ne pouvait manquer de donner de cet incident une explication raisonnable. Un produit de fission non absorbant, ayant une période de quelques heures, se désintègre en donnant un produit de filiation dangereux pour les neutrons. Ce poison a lui-même une

période de quelques heures et, à son tour, donne naissance à une troisième espèce nucléaire, non absorbante et peut-être même stable. Si cette explication était juste, il suffisait d'examiner le tableau des nucléides pour constater que l'ascendant était ^{135}I , d'une période de 6,68 heures, et le produit de filiation ^{135}Xe , d'une période de 9,13 heures. Moins d'une heure après, Fermi apporta des données précises sur la réactivité qui confirmaient cette explication. Trois heures ne s'étaient pas écoulées que l'on était parvenu à deux autres conclusions : a) La section efficace de ^{135}Xe pour l'absorption des neutrons thermiques est d'environ 150 fois supérieure à celle du nucléide le plus absorbant que l'on connût alors, ^{113}Cd ; b) Chaque noyau de ^{135}Xe ou presque, produit dans un réacteur à haut flux, happe un neutron au passage. Ainsi, le xénon était venu, hôte inattendu et indésirable, empoisonner le fonctionnement de la pile. Pour y remédier, il fallait disposer d'une réactivité supplémentaire.

Cette réactivité, on l'avait sous la main. On chargea les tubes supplémentaires. La fabrication de plutonium reprit. Progressivement, la cadence de la production augmenta. Un autre réacteur fut mis en service, puis un troisième.

DEDA 7. Fission spontanée

^{239}Pu provenant de l'usine de séparation chimique de Hanford et ^{235}U produit par les deux procédés de séparation isotopique arrivèrent peu à peu à Los Alamos. Cependant, il serait impossible de constituer un ensemble supercritique avec une masse de l'un ou de l'autre métal à la plus grande vitesse réalisable à l'époque s'il se produisait un préallumage du fait d'une forte production naturelle de neutrons par le métal lui-même. Les travaux que Flerov et Petrjak avaient faits en 1939 montraient que l'uranium naturel subit spontanément la fission. Mais n'était-il pas raisonnable de considérer le noyau pair-pair de ^{238}U comme stable par rapport à ^{235}U ? Dans l'affirmative, il faudrait attribuer à ^{235}U presque toute la fission observée. S'il en était ainsi, la période de fission de ^{235}U ne devait pas être supérieure à $6 \cdot 10^{13}$ ans. Le nombre de neutrons produits par ^{235}U serait alors suffisamment élevé pour que la question du préallumage se pose. Cette hypothèse ne fut pas vérifiée. Les mesures directes faites par Segré et ses collaborateurs sur les quantités substantielles d'isotopes séparés, dont on disposait déjà, donnèrent, pour la fission spontanée, des périodes de $1,8 \cdot 10^{17}$ ans pour ^{235}U contre $8 \cdot 10^{15}$ ans pour ^{238}U , et $5,5 \cdot 10^{15}$ ans pour ^{239}Pu contre $1,2 \cdot 10^{11}$ ans pour ^{240}Pu (période mesurée plus tard). Quelle que soit l'explication, les noyaux fissiles avec leurs masses impaires étaient plus stables que l'on n'avait pensé. L'assemblage était réalisable. Le 16 juillet 1945 vit le premier essai, le

début de l'ère des armes nucléaires et le commencement de la fin de la guerre dans le Pacifique.

DEDA 8. Fission induite par des neutrons de 14 MeV

Le premier essai d'un véritable engin thermonucléaire eut lieu dans l'atoll d'Elugelab (atoll d'Eniwetok), le 1er novembre 1952. Des neutrons de 14 MeV y furent produits en grand nombre. Dans l'ère nouvelle des engins thermonucléaires, l'efficacité de ces neutrons pour produire la fission rapidement est devenue - et est restée depuis - un important "élément de décision".

Moins de trois ans plus tard s'ouvrit la première Conférence de Genève sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. Un grand nombre de renseignements, précédemment secrets, sur les processus de fission y furent rendus publics, ce qui provoqua un renouveau d'intérêt.

Exposé dépouillé de la physique de la fission dans son état actuel

Dans un exposé plus complet que cet article, on rappellerait toutes les découvertes sur la fission qui ont eu lieu avant et depuis 1955 et on rendrait à chacun son dû. Mais il me faut me borner à l'essentiel. D'ailleurs, le contraste n'en sera ainsi que plus frappant entre l'idée que l'on se faisait de la fission le 16 janvier 1939 et la connaissance que l'on a maintenant de ce phénomène. Il est difficile d'imaginer dans quelle mesure on aurait pu se rapprocher des conclusions indiquées ci-après s'il n'y avait eu ni 2 décembre 1942 ni technologie nucléaire.

CONC 1. La fission par un neutron pour lequel $E_{cin} < 5$ MeV passe par le stade intermédiaire de la formation d'un noyau composé

Lorsqu'un neutron ou toute autre particule d'énergie modérée frappe un noyau, le projectile peut :

- a) conserver la majeure partie de sa quantité de mouvement en traversant le noyau ("réaction directe");
- b) céder suffisamment d'énergie pour qu'il se forme un noyau composé.

L'analogue classique du noyau composé est un ensemble de particules qui agissent les unes sur les autres pendant un temps si long qu'elles perdent toute mémoire du mécanisme qui les a réunies. Le système quantique diffère de l'analogue semi-classique en ce que le nombre d'états d'un moment angulaire donné J n'est pas, d'une manière générale, proportionnel à $(2J + 1)$. En conséquence, la distribution angulaire des produits de réaction n'est pas entièrement indépendante de la direction. La possibilité que le noyau composé se débarrasse de son énergie par

réémission d'un neutron, rayonnement ou fission dépend, non seulement de l'énergie, mais encore de la valeur J et de la parité.

Des études récentes ont montré que le type de réaction directe se produit avec une probabilité considérable ou même prédomine sur la formation d'un noyau composé, dans beaucoup de cas, mais non dans le cas de la fission provoquée par des neutrons ayant une énergie cinétique inférieure à 5 MeV. En outre, quelle que soit la réaction, si elle se produit à une résonance bien isolée dont les propriétés caractérisent les niveaux du noyau immédiatement supérieur et inférieur, on dit par définition qu'il s'agit d'une réaction passant par le stade intermédiaire de la formation d'un noyau composé.

CONC 2. Le noyau composé se fissionne selon des voies diverses

En physique moléculaire, on a l'habitude d'une répartition de l'énergie de la molécule entre une énergie de rotation et une énergie de vibration, d'une part, et une excitation électronique, d'autre part. Cette répartition est définie par une surface qui donne l'énergie électronique en fonction des coordonnées nucléaires. De même, en physique nucléaire, une voie de fission correspond à une certaine répartition de l'énergie du noyau composé entre le mouvement collectif et l'excitation nucléonique ou "intrinsèque". Des transitions non radiatives se produisent dans des molécules polyatomiques et dans des noyaux. Le noyau passe d'une répartition de l'énergie à une autre. Par conséquent, une voie de fission est ordinairement une notion qui n'est définie que dans le domaine limité de l'espace de configuration collectif dans lequel le noyau passe au-dessus - ou en dessous - d'une barrière de potentiel, c'est-à-dire se fissionne.

CONC 3. Les fluctuations de la largeur du niveau de résonance de la fission renseignent sur le nombre de voies de fission possibles

Comparons le noyau composé à une salle de spectacle, et un état de résonance à une onde sonore stationnaire. En ce cas, la probabilité par seconde d'une fission selon la k ème voie A_{fk} - ou la largeur partielle $\Gamma_{fk} = \hbar A_{fk}$ du niveau de résonance de la fission - est comparable à la fraction du son sortant chaque seconde par une petite fenêtre donnée. Cette fraction varie en fonction de la résonance autour d'une certaine valeur moyenne $\langle \Gamma_{fk} \rangle$, selon la relation qui existe entre la "fenêtre" et le noeud de l'onde.

Dans la pratique, on ignore par quelle voie la fission s'est produite dans le cas habituel où la fission a été provoquée par des neutrons lents (son sor-

tant par plusieurs fenêtres !). La largeur totale observée du niveau de résonance de la fission est la somme $\Gamma_f = \Gamma_{f_1} + \Gamma_{f_2} + \dots$ des contributions de chacune des voies. En pourcentage, les fluctuations de cette largeur d'un niveau à l'autre sont faibles lorsque le nombre de voies qui contribuent effectivement à la réaction est grand; ces fluctuations sont fortes lorsque ce nombre est petit. Ainsi, pour les noyaux fissiles les mieux connus, les fluctuations de cette largeur indiquent que le nombre de voies qui contribuent effectivement à la réaction est compris entre 1 et 4. Les résultats des expériences sont encore trop fragmentaires pour permettre d'établir une corrélation nette entre ce nombre et le nombre de ces voies, d'après le rendement déterminé à partir de la valeur absolue de la largeur moyenne $\langle \Gamma_f \rangle$.

CONC 4. La hauteur de la barrière relative à une voie de fission détermine le rendement de cette voie

Plaçons dans chaque fenêtre de la salle un tronçon de conduite d'air, chaque conduite ayant une section différente. Dans ce cas, une conduite donnée ne transmet efficacement un son vers l'extérieur que lorsque la fréquence du son dépasse une certaine limite critique. Cette fréquence critique varie d'une conduite à l'autre. Il en est de même en matière de fission. Prenons la moyenne de la largeur partielle caractéristique d'une voie donnée pour plusieurs résonances, divisons par l'espace moyen entre les résonances et multiplions par 2π . Le résultat est le rendement de cette voie. Pour une énergie sensiblement supérieure à la barrière de fission relative à cette voie, on avait démontré dès 1939 que le rendement avait, comme valeur, l'unité. Bien en dessous de la barrière, le rendement diminue exponentiellement en fonction de l'énergie (fission spontanée). La somme des rendements pour l'ensemble des voies de fission indique le nombre des voies qui contribuent effectivement à la réaction, d'après le rendement (N_f).

CONC 5. Les périodes de fission spontanée sont plus longues d'un facteur de 10^2 à 10^4 pour les noyaux A impair que pour les noyaux pairs-pairs voisins

Ainsi, la voie la plus basse pour un noyau caractérisé par $K = 7/2$, par exemple, (A impair) peut manifestement avoir une barrière moins élevée que la voie la plus basse pour un noyau caractérisé par $K = 0$. Les paires d'orbitales nucléoniques des plus basses énergies donnent $K = 0$ pour toutes les élongations du noyau; mais il est impossible d'obtenir $K = 7/2$, quelle que soit l'élongation, pour les états d'énergie les plus bas à une particule.

CONC 6. Hausses et baisses dans la section efficace de fission au voisinage de un MeV marquent

respectivement l'accès à de nouvelles voies de fission et l'accès à de nouvelles voies de réémission de neutrons

Si nous conservons l'analogie de la salle de spectacle, la fraction du son sortant des conduites à travers la façade nord augmente lorsque la fréquence s'élève suffisamment pour permettre de transmettre par une conduite nouvelle de cette façade. La fraction décroît lorsqu'une autre conduite d'une autre façade commence à transmettre. Une voie de réémission de neutrons - par opposition à une voie de fission - est analogue à une conduite de longueur infinie. Elle ne transmet rien au-dessous du seuil.

CONC 7. La distribution angulaire des produits de fission est déterminée par le moment angulaire total J du noyau composé, sa projection M sur un axe donné, et le moment angulaire K de la configuration de fission allongée dans le sens d'un axe de symétrie de rotation approximatif

Le moment angulaire K ne reste pas constant pendant un temps assez long par rapport au temps du passage immédiat au-dessus de la barrière. Pour un niveau de résonance donné, il diffère habituellement d'une voie à l'autre, et on le détermine le plus aisément à partir de la distribution angulaire elle-même.

CONC 8. Le col qui relie les produits de fission naissants s'étend et reprend le travail des forces coulombiennes jusqu'au moment où il s'amincit et se brise

a) L'énergie cinétique des produits de fission qui se séparent est inférieure de plusieurs dizaines de MeV à l'énergie de sphères en contact. b) Cette énergie cinétique varie grandement d'un événement (fission) à l'autre. c) Ce qui suit semble énoncer, d'une manière appropriée, les observations relatives à l'émission de neutrons par les différents produits. Le travail d'extension ne contribue pas à exciter les noyaux de la matière nucléaire (pas de "chauffage"). Quelquefois, la rupture du col se produit beaucoup plus près d'un produit naissant que d'un autre. Le premier produit conserve trop peu d'excitation pour qu'il puisse émettre ne fût-ce qu'un seul neutron. La totalité du col ou presque se joint à l'autre produit qui alors est excité et émet plusieurs neutrons.

Physique au-delà de la barrière

La physique de la fission "au-delà de la barrière" semble constituer une source de connaissances nouvelles sur l'analogie nucléaire de la transition moléculaire et sur le mécanisme des échanges entre l'excitation collective et l'excitation nucléonique.