

minces couches où les propriétés du vent solaire changent brusquement.

Les mesures effectuées par les sondes qui ont précédé *Ulysse* ont démontré que de telles ondes de choc accélèrent parfois les particules considérablement. Voilà pourquoi les particules énergiques apparaissent régulièrement dans le voisinage de la Terre, deux fois par rotation solaire : l'axe magnétique du Soleil étant un peu incliné vers l'écliptique, notre planète reçoit alternativement un vent solaire lent, issu des environs de l'équateur solaire, et un vent rapide venant d'abord d'une calotte polaire, puis de l'autre ; les alternances engendrent les ondes de choc, et les particules rapides.

Entre la Terre et Jupiter, la sonde *Ulysse* a observé de nombreuses concentrations de particules énergiques associées à de telles ondes de choc.

Toutefois, après avoir quitté les basses latitudes, elle cessa d'observer des ondes de choc, parce qu'elle était dans une région où le vent solaire, émis par les calottes polaires du Soleil, est toujours rapide. Pourquoi enregistrerait-elle encore des bouffées régulières de particules énergiques ? Les astrophysiciens étudient ce mystère. Notamment, une équipe du CEA analyse les électrons des rayons cosmiques.

D'autres types de particules solaires énergiques restent également à étudier. Quand des champs magnétiques de directions opposées se rencontrent, une situation qui se produit communément près du Soleil, les deux champs opposés s'annulent, et l'énergie magnétique est transférée aux particules chargées, à proximité. La nature de certaines particules énergiques détectées indique qu'elles provenaient de régions de la basse atmosphère solaire, où l'annihilation de champs est fréquente. Il reste à élucider comment ces particules y ont été accélérées.

Les « rayons cosmiques anormaux » sont également des particules qui sont accélérées dans l'héliosphère. Ce sont initialement des atomes neutres du gaz interstellaire (de l'hélium, de l'azote ou de l'oxygène), qui dérivent lentement dans l'héliosphère. Leur neutralité élec-

trique leur permet de traverser le champ magnétique qui barre l'accès de l'héliosphère interne à la plupart des autres particules. Cependant, au voisinage du Soleil, ces atomes sont ionisés par le rayonnement solaire ou par des collisions avec des ions du vent solaire. Les ions formés sont alors immédiatement happés par le champ magnétique environnant, et ils s'éloignent du Soleil, avec les autres particules. En révélant la nature des ions happés, la sonde *Ulysse* donnera une meilleure compréhension de l'évolution des ions piégés au sein de l'héliosphère et de la nature des atomes qui peuplent l'espace interstellaire.

Avant la mission *Ulysse*, on pensait que l'accélération des ions happés, et la création de rayons cosmiques anormaux, avaient lieu dans l'onde de choc qui limite l'héliosphère, une frontière fixe où le vent solaire ralentit brusquement et s'échauffe. La sonde *Ulysse* a démontré que des ondes de choc qui se propagent à l'intérieur du choc frontalier accélèrent aussi les ions happés.

Le nombre de ces ondes de choc, et de la plupart des phénomènes enregistrés par la sonde *Ulysse* pendant son premier tour polaire de l'héliosphère, varie périodiquement avec une période de onze ans, égale à celle de l'activité solaire.

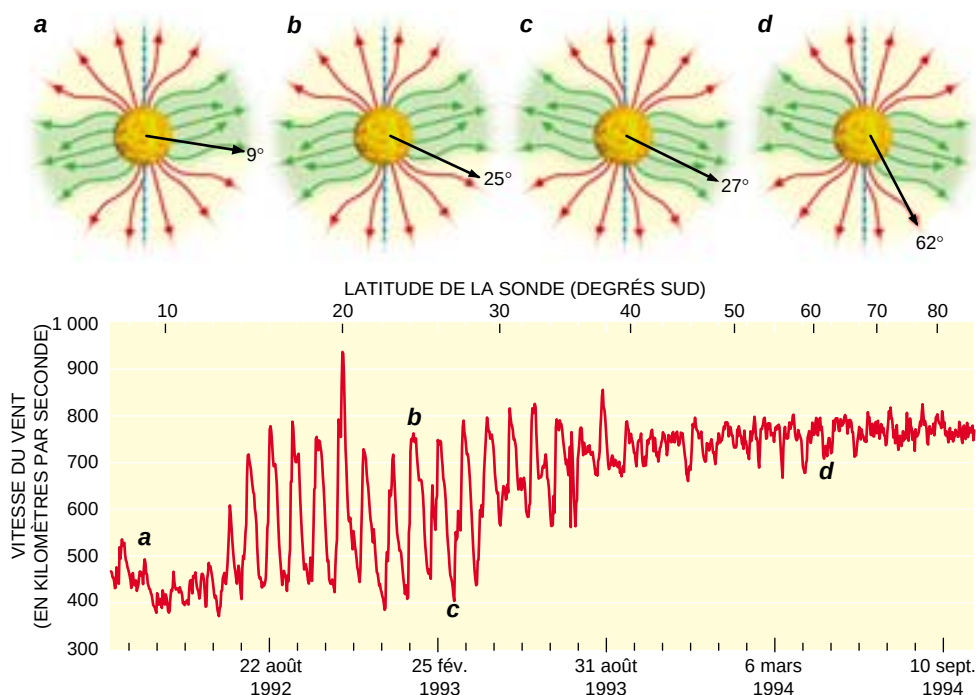
Par un heureux hasard, la sonde est passée au-dessus des deux pôles en 1994 et en 1995, quand le Soleil était calme ; les conditions aux calottes polaires du Soleil semblaient très simples. Quand la sonde repassera au-dessus des pôles, en 2000 et en 2001, l'activité du Soleil sera maximale. L'équipe d'astrophysiciens qui pilote *Ulysse* est impatiente de découvrir les modifications de l'espace péri-solaire à ce moment. La sonde fonctionne très bien ; elle envoie continuellement ses résultats de mesures vers la Terre, tout en tournant autour du Soleil. Les astrophysiciens ont déjà beaucoup appris, mais ils s'attendent encore à des moissons de résultats importants.

Edward SMITH et Richard MARSDEN sont coordinateurs scientifiques de la mission *Ulysse*.

The High Latitude Heliosphere, sous la direction de R.G. Marsden, Kluwer Academic Publishers, 1995.

R.G. MARSDEN et E.J. SMITH, *Ulysses : Solar Sojourner*, in *Sky and Telescope*, vol. 91, n° 3, pp. 24-31, mars 1996.

Ulysse est présentée sur le réseau Internet à l'adresse : <http://ulysses.jpl.nasa.gov/> and at <http://helio.estec.esa.nl/ulysses/welcome.html>, et <http://www.ifctr.mi.cnr.it/ulysses>



5. LA VITESSE DU VENT SOLAIRE a été mesurée par la sonde *Ulysse*. Elle varie selon la latitude de la sonde (flèches noires) et selon l'orientation des pôles magnétiques du Soleil. Tant que la sonde était aux basses latitudes (a), elle ne rencontra que des vents équatoriaux lents (en vert). À des latitudes australes supérieures, la sonde s'est heurtée à des vents polaires rapides (en jaune) quand le Soleil tournait son pôle magnétique Sud vers la sonde (b) et à des vents lents quand ce pôle s'écartait (c). Puis, près de l'axe des pôles, les vents étaient continuellement rapides (d).

Lise Meitner et la fission nucléaire

RUTH LEWIN SIME

En critiquant des résultats expérimentaux et en indiquant les expériences à mener, Lise Meitner, exilée en Suède, fit découvrir la fission nucléaire à Fritz Strassmann et à Otto Hahn. Pourtant, seul ce dernier reçut le prix Nobel.

Tous les historiens savent qu'à la fin de l'année 1938 la surprise de la communauté scientifique fut générale quand des physiciens et des chimistes découvrirent qu'un neutron pouvait dissocier le noyau d'un atome. Aucune théorie physique n'avait prévu la fission nucléaire, et les découvreurs n'imaginaient pas que la fission nucléaire servirait à fabriquer des bombes ou à construire des centrales nucléaires.

La grande question d'histoire des sciences est de savoir qui a découvert la fission nucléaire. Elle a été longtemps débattue. La physicienne Lise Meitner et deux chimistes, Otto Hahn et Fritz Strassmann, ont travaillé pendant quatre ans, dans leur laboratoire de Berlin, avant de découvrir le phénomène. Pour échapper à la persécution des juifs par les nazis, Lise Meitner a fui l'Allemagne en 1938. Peu après, Otto Hahn et Fritz Strassmann annonçaient leur découverte ; quelques semaines plus tard, Lise Meitner et son neveu Otto Frisch publièrent l'interprétation théorique de la fission. Pourtant, Otto Hahn fut le seul lauréat du prix Nobel de chimie de 1944, décerné en 1945.

On suppose que Fritz Strassmann n'obtint pas le prix Nobel parce qu'il était le plus jeune de l'équipe et que les comités Nobel récompensent en général des scientifiques confirmés, plus âgés. En revanche, Lise Meitner avait la même expérience professionnelle qu'Otto Hahn. Pourquoi a-t-elle été exclue ? Pendant longtemps, Otto Hahn expliqua que la découverte reposait uniquement sur des expériences de

chimie qui avaient été réalisées après le départ de Lise Meitner. Ni elle, ni aucun physicien n'avaient contribué à son succès ; peut-être même l'avaient-ils retardé, affirmait-il.

Fritz Strassmann, dans l'ombre d'Otto Hahn, n'était pas de cet avis. Selon lui, Lise Meitner avait été leur guide intellectuel, et elle l'était restée après son départ de Berlin, par la correspondance régulière qu'elle avait avec Otto Hahn. Les documents récemment analysés par les historiens des sciences accréditent la thèse de Fritz Strassmann. Les publications scientifiques, tout d'abord, montrent combien les recherches qui menèrent à la découverte de la fission étaient pluridisciplinaires. Ce sont des questions de physique nucléaire qui ont été à l'origine de ces travaux ; des données et des hypothèses relevant à la fois de la chimie et de la physique les firent progresser dans la bonne (ou parfois la mauvaise) direction. De plus, des lettres privées révèlent que Lise Meitner apporta une contribution précieuse à la découverte.

Dans des circonstances normales, les comités Nobel auraient certainement reconnu sa contribution, mais plus rien n'était normal pendant la guerre. La politique antisémite du régime nazi chassa Lise Meitner de son laboratoire et de son pays, l'empêchant de cosigner avec Otto Hahn et Fritz Strassmann la publication de la découverte de la fission. Par crainte du pouvoir, Otto Hahn prit ses distances avec Lise Meitner et avec la physique juste après la découverte. Quelques années plus tard, les comités Nobel entérinèrent

cette injustice : des documents récemment publiés montrent que les comités ignoraient à quel point la découverte résultait d'une coopération étroite entre chimistes et physiciens, et qu'ils n'ont pas compris qu'Otto Hahn avait écarté Lise Meitner, non pas pour des raisons scientifiques, mais par opportunisme.

Lise Meitner s'exprima peu en public sur cette affaire, mais, en privé, elle disait qu'Otto Hahn « avait simplement oublié le passé », l'époque où ils avaient été des collègues et même des amis. Sans doute pensait-elle qu'avec le temps justice lui serait rendue, mais il fallut attendre 50 ans.

Les recherches sur l'uranium

Née à Vienne, où elle fit ses études, Lise Meitner s'installa à Berlin en 1907, alors qu'elle avait 29 ans. Elle fit équipe avec Otto Hahn, un chimiste de son âge, pour étudier la radioactivité, c'est-à-dire le mécanisme par lequel un noyau se transforme en un autre par émission de particules alpha (des noyaux d'hélium) ou bêta (des électrons). En 1918, ils découvrirent le protactinium, un élément radioactif de numéro atomique égal à 91 (il se trouve juste avant l'uranium dans la Classification périodique des éléments). Leurs carrières progressèrent de la même façon, et ils restèrent égaux tant sur le plan scientifique que professionnel : ils étaient tous deux professeurs à l'Institut de chimie Kaiser Wilhelm, Otto Hahn dirigeait le département de radiochimie et Lise Meitner celui de physique.

Au cours des années 1920, Otto Hahn explora les techniques de radiochimie, tandis que Lise Meitner s'intéressa à la physique nucléaire. Selon Otto Hahn, les recherches que fit Lise Meitner pendant cette période valurent une renommée internationale à l'Institut (bien plus que ses propres travaux). Sa notoriété et sa nationalité autrichienne protégèrent Lise Meitner lorsque Hitler accéda au pouvoir en 1933 : contrairement à la plupart des autres juifs, elle conserva son poste. Malgré le grand nombre de ses étudiants qui étaient de fervents nazis, elle ne partit pas d'elle-même, car elle était trop passionnée par la physique.

Les expériences d'Enrico Fermi et de ses collègues, à Rome, l'intéressaient tout particulièrement. Ces physiciens bombardaient les divers éléments chimiques avec des neutrons et ils observaient que les noyaux cibles changeaient peu : le neutron incident expulsait généralement un proton ou une particule alpha du noyau cible, rien de plus. Les noyaux lourds absorbaient parfois un des neutrons incidents ; dans le cas d'un élément radioactif, le noyau lourd se désintégrait en émettant invariablement un rayonnement bêta, se transformant en l'élément immédiatement supérieur dans la Classification périodique des éléments.

Toutefois, lorsque Enrico Fermi irradiait l'élément le plus lourd, l'uranium, avec des neutrons, il observait la formation de plusieurs nouveaux éléments émetteurs de rayonnement bêta, mais aucun n'avait les propriétés de l'uranium ou des éléments voisins. Il supposa prudemment qu'il avait synthétisé de nouveaux éléments situés au-delà de l'uranium : les «transuraniens». Les scientifiques du monde entier étaient fascinés.

Lise Meitner avait vérifié les résultats d'Enrico Fermi. Ces travaux correspondaient parfaitement à ses domaines d'intérêt et de compétence : elle fut l'une des premières femmes à faire partie de l'élite scientifique allemande et l'une des plus éminentes spécialistes de physique nucléaire de son temps. Toutefois, pour étudier ces nou-

veaux éléments transuraniens, il lui fallait le concours d'un radiochimiste expérimenté. D'abord réticent, Otto Hahn finit par accepter de l'aider, et Fritz Strassmann, chercheur à l'Institut de chimie analytique, se joignit à eux. Les trois scientifiques avaient des points de vue politiques convergents : Lise Meitner n'était pas aryenne, Otto Hahn était antinazi et

Fritz Strassmann avait refusé de faire partie de la Société chimique allemande liée au Parti national-socialiste, de sorte qu'il ne pouvait plus travailler ailleurs qu'à l'Institut.

Vers la fin de 1934, ils montrèrent que les émetteurs de rayonnement bêta observés par Enrico Fermi ne pouvaient être attribués à



1. LISE MEITNER (vers 1930 ; elle avait alors une cinquantaine d'années) fut un des physiciens les plus éminents de son temps. Bien qu'elle ait fumé et qu'elle ait été exposée à des substances radioactives durant toute sa carrière, elle vécut jusqu'à 90 ans.

© Atelier Lotte Meitner-Grat, Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

aucun des éléments connus et qu'ils se comportaient comme les éléments transuraniens semblaient devoir le faire : quand on les séparait chimiquement de l'uranium, on les retrouvait associés aux éléments de transition, tels le platine et le rhénium ; les transuraniens sont effectivement situés dans les mêmes colonnes de la Classification périodique que les éléments de transition, et l'on pouvait donc s'attendre à ce qu'ils aient les mêmes propriétés chimiques. Comme Enrico Fermi, les scientifiques berli-

nois admirent que ces émetteurs étaient des transuraniens.

Cette idée fausse était fondée sur une hypothèse physique et sur une hypothèse chimique, dont on démontra, plusieurs années plus tard, qu'elles étaient erronées : d'une part, les physiciens avaient alors observé que seules des modifications mineures se produisaient lors des réactions nucléaires, de sorte qu'ils n'envisageaient même pas la possibilité de la fission, c'est-à-dire de la dissociation d'un noyau en deux autres noyaux de tailles voisines ;

d'autre part, les chimistes croyaient que les éléments transuraniens étaient des éléments de transition, parce que le thorium et l'uranium réagissaient comme des éléments de transition.

Des réactions de désintégration complexes

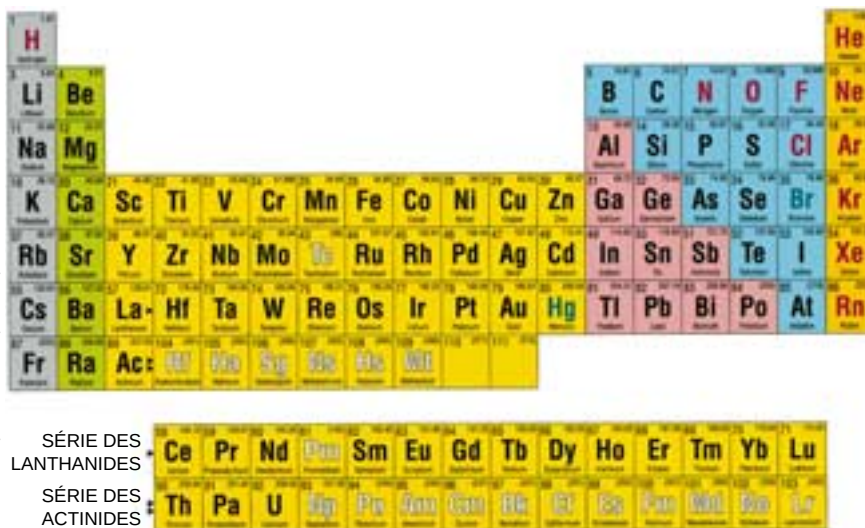
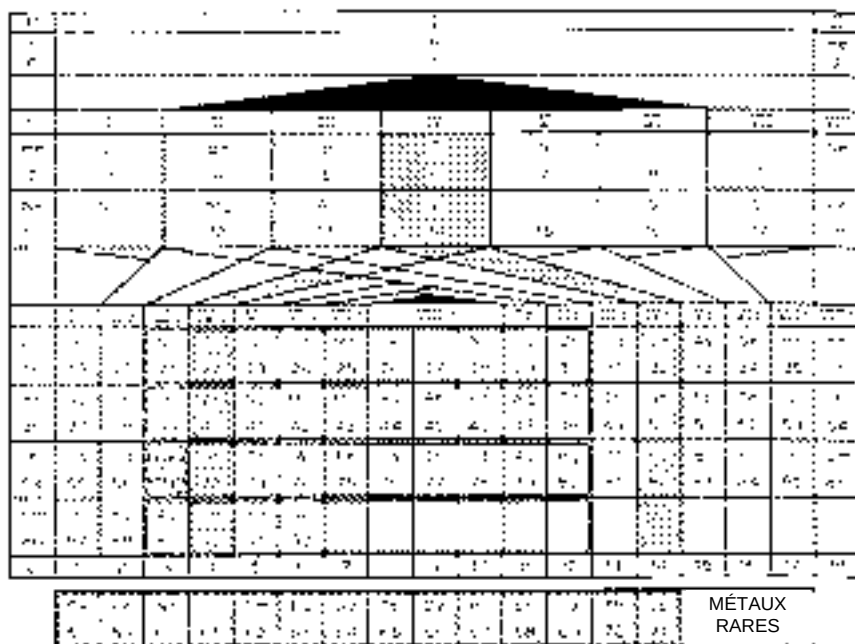
Les deux hypothèses erronées se confortaient, orientant les recherches sur une fausse piste pendant plusieurs années. Après la découverte de la fission, Otto Hahn accusa les physiciens d'avoir prétendu que les modifications du noyau étaient négligeables et d'avoir ainsi retardé la découverte de la fission. Les chimistes doutaient moins de la théorie alors en vigueur que les physiciens, qui détectaient des incohérences.

Les scientifiques berlinois tentèrent de séparer les transuraniens présumés, dont la radioactivité est très faible, de l'uranium et de ses produits de désintégration, dont la radioactivité naturelle est bien supérieure. Après avoir irradié des échantillons d'uranium avec des neutrons, ils les dissolvaient, puis séparaient de la solution les composés qui avaient les propriétés chimiques des métaux de transition (généralement en les précipitant avec des métaux de transition). Le précipité était un mélange de plusieurs émetteurs bêta que les chimistes de l'équipe berlinoise entreprirent d'identifier.

En deux ans, ils identifièrent deux réactions parallèles de désintégration bêta, qu'ils nommèrent mécanisme 1 et mécanisme 2 (voir l'encadré page 83). Les éléments envisagés dans ces réactions avaient les mêmes propriétés que les éléments transuraniens, et la concordance entre les schémas théoriques et les observations chimiques semblait si bonne que le doute était difficile. Dans les articles publiés en 1936 et en 1937, Otto Hahn et ses collègues jugeaient «indubitable» l'existence de ces éléments transuraniens et affirmaient : «Le sujet est clos.»

Toutefois, les mesures des chimistes allaient à l'encontre des théories des physiciens. Lise Meitner avait bien du mal à élaborer une théorie des mécanismes nucléaires qui soit cohérente avec les résultats obtenus par les chimistes et les radiochimistes, et avec ses propres mesures.

Quand les physiciens de Berlin bombardèrent de l'uranium avec des neutrons rapides, ils obtenaient cer-



2. LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE des éléments conduisit les chimistes des années 1920 et 1930 (en haut) à penser que les éléments de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium se comportaient comme des éléments de transition : ils semblaient se trouver dans les mêmes colonnes que les éléments de transition. Après la découverte de plusieurs éléments transuraniens dans les années 1940, Glenn Seaborg découvrit que les éléments de la famille des actinides forment une seconde série de terres rares homologues des lanthanides. L'élément 109 fut nommé meitnerium en 1994. En bas, on a représenté le tableau périodique des éléments de 1995.

tains produits ; quand ils utilisaient des neutrons thermiques (très lents), ils obtenaient les mêmes produits, mais en plus grande quantité. Puisque les neutrons lents augmentaient le rendement, Lise Meitner en conclut qu'il s'agissait d'un mécanisme de capture de neutrons (après la découverte de la fission, les résultats furent réinterprétés de façon totalement différente). Lise Meitner identifia également un troisième processus de désintégration, plus court et fondé sur une capture de neutrons moyennement lents.

Elle s'étonnait pourtant qu'un même isotope, l'uranium 238, capte les neutrons de trois façons différentes. Elle pressentait que les mécanismes 1 et 2 étaient incorrects, car elle comprenait mal comment la capture d'un seul neutron engendrait une instabilité telle qu'il faille quatre ou cinq émissions bêta pour stabiliser le noyau. Pis encore, pourquoi les deux longues chaînes de désintégrations bêta suivaient-elles des chemins parallèles durant plusieurs étapes ? La théorie ne donnait aucune réponse. Dans une publication de 1937, Lise Meitner concluait que les résultats étaient «difficilement conciliables avec les concepts de la structure du noyau».

Après la découverte de la fission, les physiciens et les chimistes comprirent que les mécanismes 1 et 2 étaient en fait des réactions de fission : l'uranium se scinde en fragments très radioactifs, qui se désintègrent lentement en émettant des rayonnements bêta (comme l'uranium peut se scinder de diverses façons, les voies de désintégration possibles sont nombreuses). Lise Meitner considérait le mécanisme 3 comme le plus plausible, ce qui était correct : l'isotope de l'uranium 239 formé par capture d'un neutron se désintègre par émission bêta en un élément de numéro atomique égal à 93. En 1940, cet élément fut identifié par Edwin McMillan et Philip Abelson ; c'est le neptunium. Si les Berlinoises avaient détecté le neptunium, ils auraient trouvé que cet élément appartient aux terres rares et ils auraient compris que les produits des mécanismes 1 et 2 n'étaient pas des transuraniens. Malheureusement, ils ne pouvaient pas le détecter, car leurs sources de neutrons n'étaient pas assez intenses.

Leur principale erreur fut d'étudier uniquement les éléments qui se comportaient comme des métaux de transition et de négliger les autres familles. En 1938, à Paris, Irène Curie et Pavel Savitch utilisèrent une technique

différente pour analyser le mélange de sous-produits de l'uranium ; ils découvrirent un composé très radioactif, mais ne purent en établir les propriétés chimiques : sa formation augmentait quand on bombardait les éléments à l'aide de neutrons thermiques, comme elle devait le faire pour des éléments transuraniens. Quand, en octobre 1938, l'équipe de Berlin s'intéressa à la réaction étudiée par Irène Curie et Pavel Savitch, Lise Meitner avait déjà été contrainte de quitter l'Allemagne pour Stockholm. Otto Hahn et Fritz Strassmann analysèrent seuls la substance radioactive découverte par Irène Curie : selon eux, il s'agissait d'un isotope du radium.

L'identification du baryum

Lise Meitner et Otto Hahn s'écrivaient fréquemment : le courrier entre Stockholm et Berlin était acheminé en une journée. Lise Meitner ne pensait pas que l'élément obtenu était du radium, car, pour former du radium, le noyau d'uranium aurait dû émettre deux particules alpha. D'après le bilan des énergies mises en jeu, elle pensait que le choc d'un neutron thermique ne pouvait produire l'expulsion d'une seule particule alpha ni, *a fortiori*, de deux. En novembre 1938, elle se rendit à l'Institut Niels Bohr, à Copenhague, où elle eut une entrevue avec Otto

La découverte de la fission

L'équipe de Berlin découvrit qu'un grand nombre d'émetteurs bêta (des noyaux radioactifs qui émettent des électrons) se forment lorsque des neutrons entrent en collision avec des noyaux d'uranium. Les chimistes proposèrent deux cascades de réactions de désintégration entre des éléments qu'ils croyaient plus lourds que l'uranium.

Mécanisme 1



Mécanisme 2

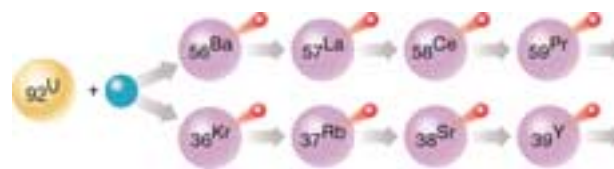


Ils identifièrent aussi une autre réaction plus simple :

Mécanisme 3



Lise Meitner considérait que le mécanisme 3 était le plus vraisemblable, et l'on démontra ultérieurement qu'elle avait raison. La longueur des mécanismes 1 et 2, ainsi que leur parallélisme la gênaient. Finalement, lorsque Otto Hahn et Fritz Strassmann identifièrent qu'un des produits de la réaction était du baryum, Lise Meitner et Otto Frisch comprirent que le noyau d'uranium s'était scindé en un noyau de baryum et un noyau de krypton, déclenchant une série d'émissions bêta :



C'est ce mécanisme qui était correct. Lise Meitner et Otto Frisch proposèrent le terme de fission nucléaire pour ce phénomène, en publièrent la première explication théorique et donnèrent une estimation de l'énorme quantité d'énergie que libère la fission.

Jared Schiedmann Design

Pourquoi Lise Meitner n'a pas eu le prix Nobel

Considéré comme la récompense suprême pour un scientifique, le prix Nobel confère aux personnes qui le reçoivent un prestige sans égal, une renommée nationale et internationale. Les autorités leur accordent les crédits qu'elles réclament pour leurs recherches ; on les consulte à tout propos, sur des questions scientifiques, sociales ou politiques.

Quand il décerne un prix, le Comité Nobel se fait le porte-parole de la communauté scientifique internationale. Dans la plupart des cas, ses décisions ne sont pas contestées. Rarement, des protestations s'élèvent : c'est le cas lorsque les scientifiques estiment que la récompense n'est pas méritée ou n'a pas été attribuée à la personne la plus qualifiée. Le prix Nobel qui a honoré Otto Hahn pour sa découverte de la fission fait partie de ces prix contestés pour la seconde raison : alors qu'elle a pris une part active à la découverte de la fission, Lise Meitner n'a pas été récompensée en même temps qu'Otto Hahn. Aujourd'hui, les archives des comités Nobel sont ouvertes aux historiens qui ont cherché à comprendre cette décision.

Les résultats d'Otto Hahn et de Fritz Strassmann furent publiés dans la revue allemande *Naturwissenschaften*, au début de l'année 1939, alors que Lise Meitner s'était déjà réfugiée en Suède. Comme ils ne pouvaient pas publier leur interprétation théorique des expériences de l'équipe de Berlin dans une revue allemande, Lise Meitner et Otto Frisch firent paraître leur article dans la revue anglaise *Nature*. La publication séparée de ces deux articles com-

mença à creuser un fossé entre chimie et physique, expérimentation et théorie, Allemands et émigrés. En Suède, Lise Meitner trouva refuge à l'Institut Nobel de physique expérimentale. Manne Siegbahn, directeur de cet institut, présidait aussi le Comité Nobel de physique. Or, s'il procura à Lise Meitner un bureau à l'institut et un salaire, il l'isola de la communauté scientifique et la tint écartée du cercle des physiciens.

Les prix Nobel de sciences physiques sont décernés par l'Académie royale des sciences de Suède après trois étapes où interviennent des comités Nobel de physique et de chimie, des représentants de l'Académie, et enfin tous les académiciens réunis au grand complet. Les comités, composés de cinq membres, tous suédois, évaluent un petit groupe de candidats. L'Académie prend sa décision après avoir écouté un résumé de chaque dossier de candidature.

Les recherches sur la radioactivité ont toujours été soumises au Comité de chimie, lequel connaissait Otto Hahn et Lise Meitner, dont les dossiers avaient déjà été évalués à plusieurs reprises pour leurs travaux en radiochimie. Au début de l'année 1939, le Comité Nobel de chimie reconnut implicitement l'importance de la découverte de la fission quand le biochimiste Theodor Svedberg, son président, proposa qu'Otto Hahn, seul ou avec Lise Meitner, reçoive le prix. Selon lui, même si Lise Meitner n'avait pas participé directement à la découverte, elle pourrait être récompensée en raison de sa contribution antérieure au travail de l'équipe. Il mentionna également l'article publié dans *Nature*, mais, apparemment, il

ne l'avait pas compris ou ne l'avait pas lu attentivement. Ainsi, il nota que le modèle de la goutte liquide de Bohr avait été utilisé pour expliquer la fission, mais il ne mentionna pas que Lise Meitner et Otto Hahn furent les premiers à appliquer ce modèle à la fission. Cette interprétation erronée du rôle de Bohr revint régulièrement dans les rapports ultérieurs sur la fission.

Pendant la guerre, les conditions d'attribution des prix Nobel ont été perturbées. Ajourné en 1940, annulé en 1941 et 1942, reporté en 1943, le prix fut à nouveau attribué à partir de 1944. La suspension de l'attribution n'empêcha pas les comités de continuer à évaluer des candidats. En 1940 et 1941, les anciens prix Nobel Arthur Compton et James Franck proposèrent Otto Hahn et Lise Meitner pour le prix Nobel de physique. En 1941, le Comité de physique déclara que le travail d'Otto Hahn et de Lise Meitner était du ressort de la chimie.



Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

1. OTTO HAHN ET LISE MEITNER, photographiés ici dans leur laboratoire à l'Université de Berlin, vers 1910, travaillèrent ensemble et furent amis de 1907 jusqu'en 1938, quand Lise Meitner dut fuir en Suède pour échapper aux nazis.

Simultanément, le Comité de chimie était arrivé à la conclusion que seul Otto Hahn méritait le prix pour «sa» découverte. Durant toutes les années où le prix a été reporté, la candidature d'Otto Hahn fut maintenue.

Jusqu'à ce que l'Institut Kaiser Wilhelm soit bombardé, au début de l'année 1944, Otto Hahn et Fritz Strassmann continuèrent à identifier des fragments de fission. La publication de leurs résultats dans des revues allemandes renforça l'idée que la découverte avait ouvert un vaste champ de recherches, raison supplémentaire pour le Comité Nobel de récompenser Otto Hahn. Toutefois, en 1937, Hitler avait interdit à ses concitoyens d'accepter un prix Nobel (le Comité avait décerné le prix Nobel de la paix, en 1935, au dissident pacifiste allemand Carl von Ossietzky). En 1944, le Comité Nobel de chimie proposa Otto Hahn pour le prix, mais l'Académie décida de reporter la décision à l'année suivante.



2. OTTO FRISCH ET LISE MEITNER furent les premiers à expliquer, en 1939, le mécanisme de la fission. En Angleterre, en 1940, Otto Frisch et son collègue émigré Rudolf Peirls comprirent l'intérêt de la fission nucléaire pour la fabrication d'armes et contribuèrent au lancement du projet de bombe atomique des Alliés.

En 1945, après la défaite de l'Allemagne, les Alliés ont arrêté et emprisonné, à Farm Hall, en Angleterre, Otto Hahn et neuf scientifiques liés à des degrés divers au projet allemand de bombe atomique. C'est alors, le 6 août, au moment même où le Comité Nobel devait rendre sa décision pour les prix de 1944 et 1945, qu'une bombe atomique fut lâchée sur Hiroshima. Après l'explosion de la bombe, les membres du comité jugèrent nécessaire de réévaluer la découverte et d'étudier les contributions des Alliés au projet Manhattan. Deux camps s'opposaient : ceux qui voulaient attribuer le prix 1944 à Otto Hahn et ceux qui voulaient reporter la décision. Le vote de l'Académie trancha en faveur de la première proposition.

Restait la possibilité que Lise Meitner et Otto Frisch soient récompensés par le prix Nobel de physique. En 1945, Oskar Klein, professeur de physique théorique de l'Université de Stockholm, avait proposé ces deux candidats. Bien que le rapport d'Erik Hulthén ait été négatif, la décision fut reportée. L'année suivante, les deux candidats furent à nouveau proposés par Oskar Klein, par Niels Bohr et par Egil Hylleraas, professeur de physique à l'Université d'Oslo : ils soutenaient que Lise Meitner et Otto Frisch avaient fourni l'explication théorique des résultats expérimentaux d'Otto Hahn et Fritz Strassmann.

En 1946, l'évaluation des deux candidats fut à nouveau confiée à Erik Hulthén. Malheureusement, son rapport ne fut ni rigoureux, ni exhaustif. Il ne mentionna ni le rapport officiel du gouvernement américain sur le

Projet Manhattan, ni celui du gouvernement britannique sur les projets de bombe atomique, ni l'article publié dans *La Revue de physique moderne* rédigée en 1940 par Louis Turner : ces rapports soulignaient pourtant tous la contribution théorique de Lise Meitner et d'Otto Frisch. Le rapporteur entretint aussi l'idée que Bohr avait élaboré la théorie de la fission : Niels Bohr s'était peut-être inspiré de l'article de Lise Meitner et d'Otto Frisch pour élaborer sa théorie, mais c'est lui qui devait être recommandé pour le prix Nobel de physique.

Divers facteurs personnels et sociaux se sont conjugués pour écarter Lise Meitner du prix Nobel. L'un des facteurs serait qu'elle n'avait pas de bonnes relations avec Manne Siegbahn, le président du Comité de physique. Elle n'avait pas été très bien accueillie dans son institut et se préparait à partir. De surcroît, la communauté scientifique pensait, bien plus

qu'aujourd'hui, que les femmes scientifiques sont soit des subordonnées, soit des incompetentes.

Enfin, les rivalités et la compétition pour obtenir des fonds faisait rage dans la petite communauté des physiciens suédois. En 1945-1946, le gouvernement suédois cherchait à maîtriser l'énergie nucléaire à des fins tant civiles que militaires. Manne Siegbahn et Erik Hulthén, tous deux membres des «comités suédois pour l'énergie nucléaire», étaient chargés d'allouer les fonds de recherche à des instituts... qu'ils dirigeaient. Oskar Klein, un des fervents avocats de Lise Meitner et d'Otto Frisch espérait recruter les deux physiciens pour un nouvel institut de recherche en physique nucléaire qui était en cours de construction à l'Université de Stockholm. Ce nouvel institut représentait un concurrent sérieux pour Manne Siegbahn en termes de ressources et de prestige.

Avec le temps, le début de l'histoire de la fission devint une sorte de conte de fées, celui d'une découverte faite par un chimiste, dans un domaine où l'Allemagne a traditionnellement été pionnière, par un Allemand qui n'avait pas été nazi, par un scientifique «pur» qui avait découvert la fission nucléaire, mais n'avait jamais travaillé sur la bombe. Dans cette glorification de l'Allemagne et de lui-même, Otto Hahn ne fit aucune place à Lise Meitner.

Elisabeth CRAWFORD
CNRS - Institut d'histoire des sciences
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Hahn le 13 novembre. Cette rencontre fut tenue secrète pour qu’Otto Hahn ne soit pas accusé de collaborer avec les juifs émigrés. Plus tard, Otto Hahn ne la mentionna jamais, mais elle était consignée dans son agenda personnel. Au cours de la discussion, Lise Meitner refusa d’admettre que l’on obtenait du radium. C’est le message qu’Otto Hahn rapporta à Fritz Strassmann, resté à Berlin.

Selon Fritz Strassmann, Otto Hahn lui aurait dit que Lise Meitner avait insisté pour qu’ils vérifient la nature de l’élément qu’ils prenaient pour du radium : « Nous accordions tant d’importance à son opinion que nous avons immédiatement procédé à des expériences de contrôle. » Ils voulaient vérifier la présence de radium en le combinant avec du baryum stable et en séparant le complexe ainsi obtenu du mélange réactionnel. Ayant échoué, ils durent conclure que ce qu’ils avaient pris pour du radium n’était qu’un isotope radioactif inconnu du baryum, un élément bien plus léger que l’uranium et non un transurannique.

En décembre 1938, juste avant Noël, Otto Hahn annonça à Lise Meitner que l’élément isolé était du baryum. Le

résultat était gênant, car « l’uranium ne peut évidemment pas se dissocier en libérant du baryum ! » ; trouverait-elle quelque « explication miracle » à ce « résultat épouvantable » ? Par retour du



Fritz Strassmann

3. FRITZ STRASSMANN participa avec Lise Meitner et Otto Hahn à la découverte de la fission nucléaire. Ses connaissances en chimie analytique furent décisives lors de l’identification du baryum. Pendant la guerre, il eut une position antinazie courageuse.

courrier, Lise Meitner répondit qu’elle envisageait difficilement que le noyau se soit brisé, mais qu’on ne devait pas affirmer catégoriquement qu’un tel événement est impossible. Otto Hahn considéra sans doute cette lettre comme son plus beau cadeau de Noël : Lise Meitner avait refusé que l’élément trouvé soit du radium, mais elle acceptait l’hypothèse du baryum et considérait que ce résultat n’était pas en contradiction avec la théorie.

Plus tard, Otto Hahn prétendit que, si Lise Meitner avait encore été à Berlin, elle l’aurait détourné de l’hypothèse du baryum et l’aurait empêché de découvrir la fission. Pourtant, la lettre de Lise Meitner, qu’Otto Hahn avait toujours en sa possession, montre le contraire. Cette lettre le réconforta à ce point qu’après l’avoir reçue, et seulement après, il ajouta un paragraphe à l’article où il publiait l’identification du baryum : il émettait l’hypothèse que le noyau d’uranium s’était scindé en deux. Lise Meitner était profondément déçue de ne pas partager avec eux cette « belle découverte », mais tous savaient qu’ils ne pouvaient associer une « non-aryenne » à la publication.



Deutsches Museum, Munich

4. CES APPAREILS DE PHYSIQUE furent utilisés par l’équipe de Berlin de 1934 à 1938 pour les travaux qui aboutirent à la découverte de la fission nucléaire. À partir de 1950 et pendant une trentaine

d’années, ils ont été exposés dans un musée sous l’étiquette « Plan de travail d’Otto Hahn » ; les panneaux explicatifs mentionnaient rapidement Fritz Strassmann, mais pas du tout Lise Meitner.

La révision de la théorie nucléaire

À Noël, Lise Meitner rendit visite à un ami dans l'Ouest de la Suède ; son neveu Otto Frisch, physicien à l'Institut Niels Bohr, les rejoignit. Tous deux considéraient le noyau comme une goutte, mais ils comprirent alors que la goutte était animée de vibrations et prête à se scinder en deux. Otto Frisch comprit que la tension superficielle d'un noyau aussi gros que celui de l'uranium était très faible. Lise Meitner calcula de tête le défaut de masse et en déduisit une estimation de l'énorme énergie libérée lors de la fragmentation du noyau. Tous les éléments d'une nouvelle théorie se mettaient en place. La communauté des physiciens adopta le terme de « fission » que proposaient Lise Meitner et Otto Frisch, et Niels Bohr utilisa leurs travaux comme point de départ pour généraliser la théorie que les deux découvreurs avaient ébauchée.

La découverte du baryum par Otto Hahn et Fritz Strassmann fut publiée en janvier 1939 ; Lise Meitner et Otto Frisch publièrent leur interprétation quelques semaines plus tard. Contrairement à ce qui s'était réellement passé, la découverte de la fission n'apparut pas comme le fruit d'une coopération entre physiciens et chimistes, et l'on pouvait désormais croire que la fission avait été découverte par des chimistes, les physiciens s'étant contentés d'interpréter le phénomène.

Au cours des semaines qui suivirent la découverte, Otto Hahn profita de la situation. Il savait que Lise Meitner avait dû émigrer et qu'elle avait pleinement participé à la découverte, mais il ne pouvait pas le dire, car il craignait pour sa personne et pour sa carrière : il avait peur que l'on ne découvre que Fritz Strassmann et lui avaient continué à travailler avec Lise Meitner après son départ de Berlin. Il décida que la découverte de la fission résultait des seules expériences chimiques qu'il avait réalisées avec Fritz Strassmann en décembre 1938. En février 1939, il écrivit à Lise Meitner : « Nous n'avons pas fait de physique et nous nous sommes contentés de faire des séparations chimiques jusqu'à isoler le baryum. » Il qualifia la fission de « don du ciel » qui les protégerait, lui et son institut.

Toutefois Otto Hahn n'aurait pas eu besoin de renier Lise Meitner et la



Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

5. DANS LES ANNÉES 1920, Lise Meitner, professeur et chef du département de physique de l'Institut de chimie Kaiser Wilhelm, devint une spécialiste renommée de physique nucléaire. Cette photographie, prise en 1920 au cours d'une visite de Niels Bohr à Berlin, rassemble plusieurs de ses plus proches collègues et amis ; près de la moitié ont reçu un prix Nobel. Au premier rang, de gauche à droite : Otto Stern (prix Nobel en 1943), James Franck (1925), Niels Bohr (1922) ; le deuxième en partant de la droite est Gustav Hertz (1925). À la droite de Lise Meitner et derrière elle, Otto Hahn (1944) et George de Hevesy (1943).

physique pour que le « miracle » se produise. Au printemps 1939, les militaires allemands s'intéressèrent de près aux applications potentielles de la nouvelle découverte et, dès l'été 1939, Otto Hahn et son institut étaient protégés.

La mise au point de la bombe atomique confirma l'importance de la fission, et Otto Hahn devint célèbre. Dans l'Allemagne de l'après-guerre, il fut une personnalité renommée, couronné par un prix Nobel, considéré comme un Allemand qui n'avait pas cédé aux nazis, qui n'avait pas construit de bombe. Pourtant, il fut injuste avec Lise Meitner : pas une seule fois dans ses nombreuses publications, ni dans ses interviews, ni dans ses mémoires, ni dans ses autobiographies, il ne mentionna la place prépondérante de Lise Meitner dans l'équipe de Berlin ni leur collaboration après son exil. Il mourut à Göttingen en 1968, à 89 ans.

En Suède, durant la guerre, Lise Meitner occupa une fonction très modeste. D'après ses amis, elle aurait eu le prix Nobel si elle avait émigré dans un autre pays. En 1943, elle fut invitée à Los Alamos pour travailler sur la bombe atomique, mais elle refusa. Après la guerre, elle fut brièvement célébrée aux États-Unis et en

Angleterre, où elle symbolisait – à tort – une réfugiée juive ayant échappé aux nazis en emportant le secret de la bombe atomique. Elle était réservée et détestait la publicité. Elle ne rédigea aucune autobiographie et n'autorisa personne à écrire une biographie. En 1960, elle quitta Stockholm pour Cambridge, en Angleterre, où elle mourut en 1968, quelques jours avant son 90^e anniversaire. Elle disparut près de 30 ans avant que ses travaux ne soient enfin reconnus.

Ruth LEWIN SIME est professeur de chimie à l'Université de Sacramento.

Lise MEITNER, *Looking Back*, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 20, pp. 1-7, novembre 1964.

Otto R. FRISCH, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, 1979.

Fritz KRAFFT, *Im Schatten der Sensation : Leben und Wirken von Fritz Strassmann*, Verlag Chemie, Weinheim, 1981.

Ruth LEWIN SIME, *Lise Meitner : A Life in Physics*, University of California Press, 1996.

Elisabeth CRAWFORD, Ruth LEWIN SIME et Mark WALKER, *A Nobel Tale of Postwar Injustice*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 9, pp. 26-32, septembre 1997.

L'acoustique picoseconde

HUMPHREY MARIS

À l'aide d'ultrasons de très haute fréquence, on teste les connexions des circuits intégrés.

Depuis quelques décennies, les ingénieurs apprennent à construire des objets miniatures. Les circuits intégrés, par exemple, sont fabriqués à partir de minces couches de silicium que l'on enrichit d'impuretés judicieusement placées, afin de provoquer l'effet transistor ; au-dessus du semi-conducteur ainsi dopé, une succession de couches métalliques et de couches isolantes assurent les connexions des transistors. Certaines de ces couches ont une épaisseur de seulement dix milliardièmes de mètre. La qualité et l'efficacité de ces circuits et les performances des systèmes où ces circuits sont incorporés, dépendent de l'épaisseur et de la régularité des diverses couches.

L'épaisseur des couches est généralement comprise entre cinq nanomètres (ou milliardièmes de mètre) et quelques micromètres. Pour les couches les plus minces, l'épaisseur doit être connue à moins d'un dixième de nanomètre, c'est-à-dire moins que la taille d'un atome. Les mesures d'épaisseur, excessivement difficiles, se font par des techniques qui détruisent les échantillons : on les coupe perpendiculairement à la surface des couches, et on observe par la tranche.

Pour obtenir des épaisseurs précises, la plupart des fabricants contrôlent en permanence les conditions de fabrication comme la température, l'hygrométrie et la pression, sacrifiant périodiquement des composants afin de les analyser en cours de fabrication.

En 1985, afin d'étudier le comportement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs, nous avons envoyé une brève impulsion lumineuse sur un film métallique déposé à la surface d'un échantillon ; puis, quand nous avons envoyé une seconde impulsion lumineuse, nous avons constaté que la surface réfléchissait la lumière de façon périodique, au cours du temps ; nous avons ainsi découvert que la surface vibrait et qu'elle était parcourue par des

ondes de pression de longueur d'onde égale à 50 nanomètres environ. Personne n'avait envisagé que des ondes sonores de fréquence aussi élevée et de durée aussi brève puissent être émises.

Une technique naturelle

Après cette découverte, nous avons mis au point une technique qui utilise ces émissions extraordinairement brèves pour étudier les structures microscopiques, tels les films métalliques des composants électroniques.

Notre technique reprend le principe de l'écholocation des chauve-souris. En 1912, l'ingénieur Hiram Maxim, connu pour ses avions et son invention de la mitrailleuse, proposa que les chauve-souris détectent les insectes volants à l'aide d'ondes de pression inaudibles pour l'oreille humaine ; il supposa que ces ondes étaient des ondes de basses fréquences, produites par les battements de leurs ailes. Toutefois de telles ondes, avec leur grande longueur d'onde, sont diffractées par les petits objets, et non réfléchies : la théorie de Maxim expliquait mal comment les chauve-souris captent les très faibles échos réfléchis par leurs proies.

En 1920, à l'Université de Cambridge, Hamilton Hartridge proposa alors que les ondes émises soient des ultrasons, c'est-à-dire à des ondes de pression à des fréquences supérieures à celles des sons les plus aigus perceptibles par l'oreille humaine. Puis, en 1938, à Harvard, George Pierce et Donald Griffin détectèrent ces émissions. Depuis ces études, les zoologistes ont enregistré les ondes inaudibles émises par de nombreux animaux, tels les dauphins et certains oiseaux. Même des insectes utilisent ce principe : les gerris, les tourniquets et les autres gyrins qui glissent à la surface des eaux douces utilisent la réflexion des ondes produites lors de leur déplacement sur l'eau pour localiser les objets.

Le sonar des chauve-souris est remarquablement perfectionné. Les déplacements de l'animal décalent la fréquence de l'écho reçu par rapport à celle du signal émis en raison de l'effet Doppler, le même effet qui change la hauteur du son d'une ambulance quand elle s'éloigne d'un observateur, après s'en être approché rapidement : la chauve-souris utilise ce décalage pour déterminer la direction et la vitesse de ses proies (le même effet permet aux policiers de détecter les excès de vitesse des automobilistes). En outre, à l'intérieur de chacune des séquences émises, la chauve-souris varie la fréquence du son. Cette modulation aide l'animal à analyser le signal reçu et à identifier sa proie, en déterminant sa forme, sa taille, la fréquence de battement de ses ailes.

Pour déterminer sa distance à un insecte, la chauve-souris doit achever l'émission du signal ultrasonore avant que l'écho ne revienne. Comme la vitesse du son dans l'air est égale à 330 mètres par seconde, les ultrasons ne mettent qu'un cinquantième de seconde pour atteindre un insecte situé à une distance de 3,30 mètres et revenir. Lorsqu'un insecte est ainsi détecté, la chauve-souris émet des séquences d'ultrasons de plus en plus courtes (jusque moins d'une milliseconde), afin de localiser l'insecte à mieux qu'un mètre près.

Les mesures d'épaisseur des très petites structures métalliques sont encore plus difficiles, car la vitesse du son dans l'aluminium atteint 6 000 mètres par seconde : l'aller et retour d'une onde sonore à travers une couche métallique d'un cent millionième de mètre dure seulement trois billionnièmes de seconde. Pour effectuer des mesures sonar sur de tels objets, nous avons dû trouver un moyen de créer des impulsions ultrasonores qui durent moins d'un billionième de seconde.

Pour transmettre des sons dans les liquides ou dans les solides, les phy-