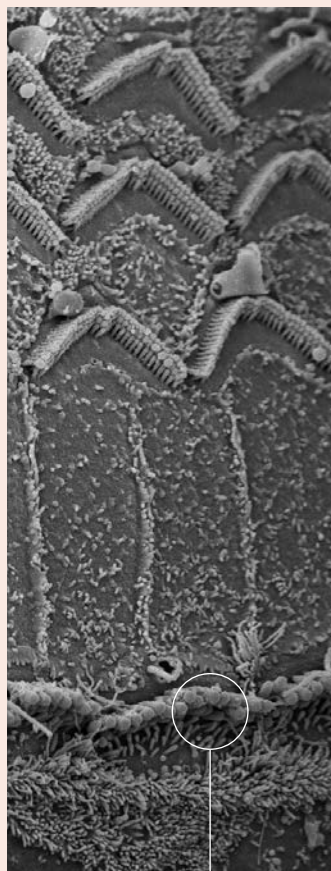


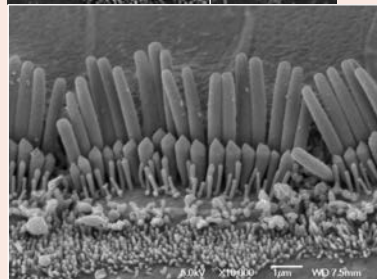
DANS LA COCHLÉE – l'élément de l'oreille interne qui perçoit et analyse les sons –, les cellules auditives sont coiffées chacune d'une touffe de stéréocils parallèles. Que ce soit dans la partie proximale (*en bas*) ou distale (*en haut*), les touffes sont toutes orientées de la même façon par rapport au plan défini par l'épithélium, et définissent ainsi un axe de polarité planaire. Quand des gènes de la polarité planaire sont mutés, l'orientation des touffes les unes par rapport aux autres est perturbée, ce qui peut conduire à des déficits auditifs.

Plus récemment, des études ont établi des liens entre des pathologies neurodéveloppementales ou neurologiques de type autistique ou épileptique et des mutations de gènes de polarité planaire. En mutant ces gènes chez la souris, notre équipe s'attache à comprendre comment la voie de signalisation contrôle la formation et la fonction de nos organes sensoriels et de notre système nerveux. Notamment, certaines régions de notre cerveau telles que l'hippocampe, crucial pour la mémoire, ne finissent leur maturation qu'après la naissance. Des résultats de notre laboratoire suggèrent que des perturbations de certaines formes de mémoire et des comportements sociaux anormaux seraient dus à un mauvais fonctionnement de la voie de polarité planaire (voir la figure page ci-contre). Le rôle des gènes de la polarité planaire s'étendrait donc bien au-delà de l'embryogénèse. Ils participeraient non seulement à la mise en place, mais aussi au maintien des fonctions sensorielles et cérébrales.

– Mireille Montcouquiol et Nathalie Sans
Neurocentre Magendie, INSERM U1215,
université de Bordeaux



© Andrew Forge / UCL / UK



utilisant des souris génétiquement modifiées, l'équipe a découvert que *Frizzled3* était tout à fait capable de remplacer *Frizzled6*, et de fournir un système pileux normal. En revanche, *Frizzled6* n'a pu que partiellement remplacer *Frizzled3* pour orienter la croissance des neurones. Ainsi, les systèmes de polarité planaire de la peau et du cerveau de la souris sont similaires, mais non identiques.

Depuis, l'étude des gènes impliqués dans la polarité planaire se poursuit. Chez les mammifères, par exemple, on recense à présent dix gènes ressemblant au gène *frizzled* de la drosophile, et l'équipe de Jeremy Nathans essaye de comprendre leurs rôles dans le développement. L'étude

de souris mutantes dépourvues d'un ou plusieurs de ces gènes a ainsi révélé que la voie de signalisation *frizzled* intervient dans des aspects très variés du développement tels que le guidage axonal, la croissance vasculaire, le développement de l'oreille interne, la fermeture du tube neural, le développement des reins et l'orientation du pelage. Ce qui soulève toujours plus de questions : cette voie de signalisation interviendrait-elle encore ailleurs ? Comment fonctionne-t-elle ? Des maladies seraient-elles liées à son dysfonctionnement ? Les biologistes sont loin d'avoir fini d'explorer ce qui, au début, ne semblait être qu'un petit groupe de gènes qui peignaient les poils... dans le sens du poil. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Sans et al., Planar cell polarity (PCP) gene mutations in autism spectrum disorder, intellectual disabilities and related deletion/duplication syndromes, dans C. Sala et C. Verpelli (éd.), *Neuronal and Synaptic Dysfunction in Autism Spectrum Disorder and Intellectual Disability*, Academic Press, pp. 189-219, 2016.

D. Devenport, The cell biology of planar cell polarity, *J. Cell Biol.*, vol. 207(2), pp. 171-179, 2014.

Y. Wang et al., When whorls collide : The development of hair patterns in *Frizzled6* Mutant Mice, *Development*, vol. 137, n° 23, pp. 4091-4099, 2010.

P. N. Adler, Planar signaling and morphogenesis in *Drosophila*, *Developmental Cell*, vol. 2, n° 5, pp. 525-535, mai 2002.

W. McGinnis et M. Kuziora, Les gènes du développement, *Pour la Science*, n° 198, avril 1994.

Pourquoi les nazis n'ont pas eu la bombe

Manfred Popp

Hitler n'a pas eu la bombe. Par manque de moyens, disent certains historiens ; parce que ses physiciens l'ont sciemment évitée, selon d'autres. L'examen des textes et des actes des chercheurs avec un œil de physicien nucléaire suggère que la vérité, bien plus subtile, est intermédiaire.

Hitler a causé la mort de dizaines de millions d'Européens. Dès lors, se dit-on avec effroi, s'il avait pu disposer de la bombe atomique, il s'en serait servi ! Que les physiciens allemands des années 1940, pourtant à la pointe mondiale de la physique nucléaire, ne la lui aient pas donnée apparaît donc comme un rai de lumière dans le plus sombre épisode de l'histoire allemande. C'est aussi une énigme, qu'historiens et physiciens travaillent à résoudre depuis plus de soixante-dix ans.

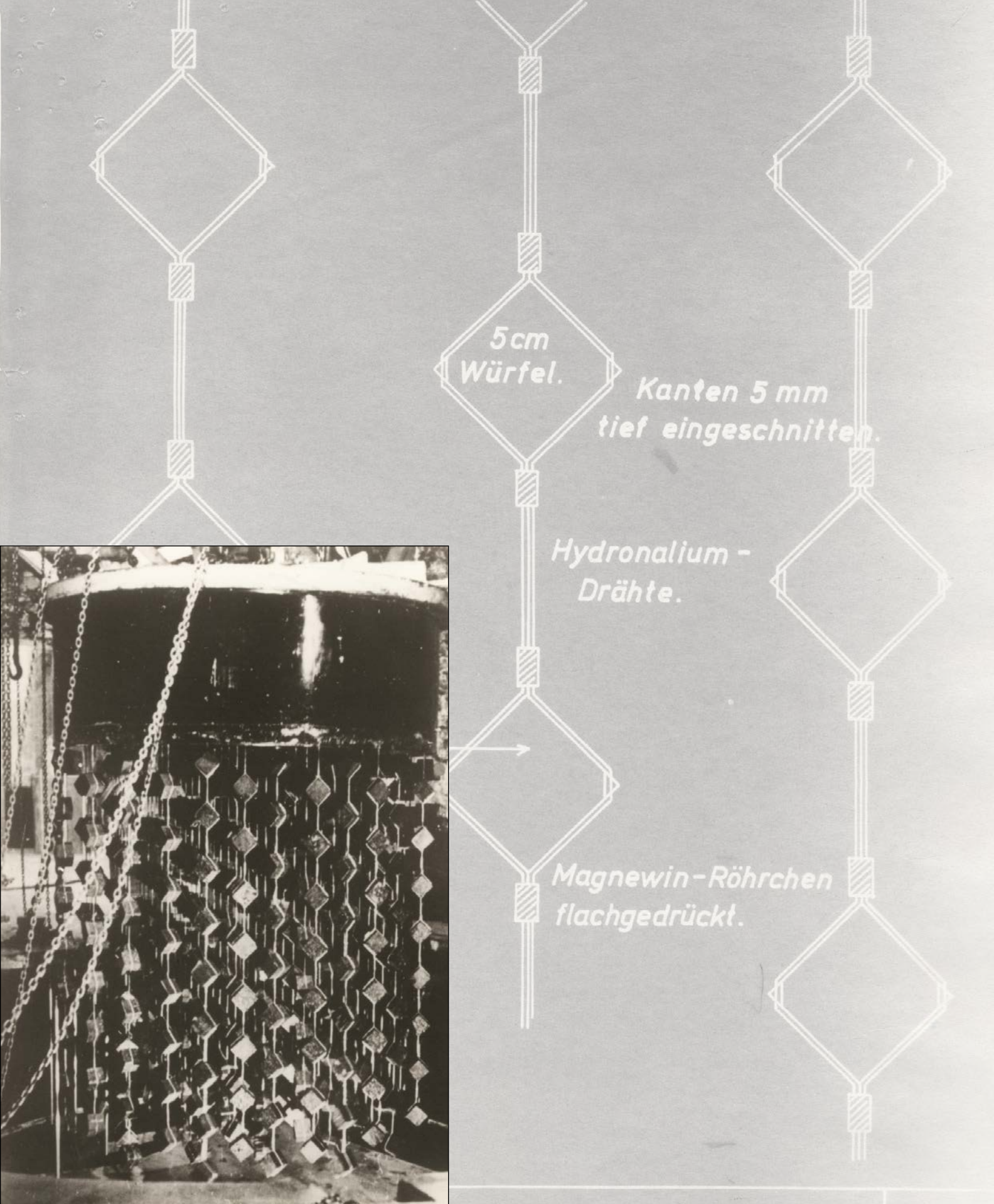
Les historiens américains et britanniques furent les premiers à tenter d'écrire l'histoire de l'*Uranprojekt* – le « Projet uranium » que l'État nazi avait lancé en 1939 pour explorer l'« utilité de l'énergie des noyaux atomiques ». Sur le plan scientifique, ce projet était mené par l'*Uranverein* – le « club uranium » –, cent chercheurs de haut niveau rassemblés autour de Werner Heisenberg, l'un des pères de la théorie quantique. Longtemps, l'histoire de l'*Uranverein* est restée l'affaire exclusive des historiens américains et

L'EXPÉRIENCE ALLEMANDE B8
a eu lieu en 1945 à Haigerloch, dans une cave à bière réaménagée en laboratoire. Il s'agissait d'explorer dans quelle mesure un réacteur contenant 664 cubes d'uranium plongés dans l'eau lourde pouvait évoluer vers la criticité, c'est-à-dire vers une réaction en chaîne incontrôlée. Résultat : pour cela, le réacteur aurait dû être 1,5 fois plus gros !

L'ESSENTIEL

- Les États-Unis ont développé une arme atomique parce qu'ils craignaient que les nazis n'en disposent eux aussi.
- En réalité, les physiciens allemands confondaient le principe d'un réacteur nucléaire avec celui de la bombe, de sorte qu'ils n'ont pas travaillé sérieusement à son développement.
- L'analyse des documents secrets du projet de recherche nucléaire allemand montre que, contrairement à ce que pensent les historiens, les physiciens allemands ignoraient le principe de fonctionnement de la bombe à uranium.

© Deutsches Museum



britanniques. Leurs collègues allemands avaient bien pire à traiter que l'échec d'un projet de recherche, aussi terrible soit-il.

L'*Uranprojekt* confrontait les Alliés à un curieux paradoxe éthique : leurs chercheurs avaient développé la bombe atomique pour rattraper les physiciens allemands, lesquels étaient souvent leurs anciens professeurs, collègues ou camarades d'étude... Toutefois, en réalité, la course à la bombe dans laquelle ils s'étaient crus engagés n'avait pas eu lieu. Eux qui vivaient dans la sécurité d'une démocratie avaient travaillé avec acharnement afin de lâcher le monstre atomique dans le monde, tandis que leurs collègues allemands, qui survivaient dans l'insécurité d'une dictature inhumaine, n'avaient travaillé qu'à la mise au point d'un réacteur nucléaire...

Pas de bombe faute de moyens ?

Le premier livre jamais écrit sur l'*Uranverein* est celui de Samuel Goudsmit, intitulé *Alsos* et publié en 1947. Né en Hollande, ce physicien nucléaire dirigea l'opération Alsos, menée par l'armée américaine pour occuper dès que possible les installations de l'*Uranverein*, arrêter ses membres, les interroger et mettre en sécurité leurs documents. Dans son livre, il écrivit que les Allemands avaient travaillé pendant la guerre à un réacteur et non à une bombe, car ils n'avaient pas compris la différence...

Malgré ce témoignage clé, la version dominante de l'histoire de l'*Uranverein* est celle de l'historien américain Mark Walker (*Nazi Science: Myth, Truth, And The German Atomic Bomb*, 2001). Selon lui, le projet de bombe atomique allemande aurait échoué parce que sa réalisation dépassait les possibilités économiques du III^e Reich dans les conditions de la guerre ; une réalité que le gigantisme du Projet Manhattan – le projet américain de bombe atomique – confirme.

Outre la version de Mark Walker, deux livres opposés dans leurs conclusions, mais bien documentés, ont paru : celui de l'historien américain Thomas Powers, qui fait de Heisenberg un héros de la résistance (*Heisenberg's war*, 1993), et celui de son collègue Paul Rose, pour qui Heisenberg aurait plutôt été un nazi incapable qui aurait voulu développer la bombe, mais aurait échoué (*Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project*, 2001). Tout physicien nucléaire s'étonne que deux versions aussi opposées

■ L'AUTEUR



Manfred POPP, physicien nucléaire, a longtemps dirigé le programme de recherche nucléaire civil allemand.

puissent être déduites des mêmes sources. En fait, toutes deux sont plausibles, mais la réalité est probablement intermédiaire.

Le premier livre d'un historien allemand n'a paru qu'en 2005. Dans son ouvrage *Hitlers Bombe*, Rainer Karlsch décrit les activités de l'*Uranverein* de façon plus correcte sur le plan scientifique que Mark Walker. Il surprend toutefois en affirmant qu'à la fin de la guerre, le *Heereswaffenamt*, c'est-à-dire le Bureau central pour la production d'armes de l'armée allemande – la *Wehrmacht* – aurait développé et testé des bombes à fusion en tant que petites armes tactiques. Ses arguments n'ont convaincu aucun physicien.

Quoi qu'il en soit, Paul Rose et Rainer Karlsch sont tous deux convaincus que les physiciens allemands savaient calculer la masse minimale de matière fissile nécessaire pour produire une bombe, ce que l'on nomme la masse critique, et qu'ils l'avaient fait dans le cas du plutonium. Pour sa part, Mark Walker estime cela possible. Selon ces historiens, les chercheurs de l'*Uranverein* auraient découvert quasi en même temps que les physiciens alliés que, pendant le fonctionnement d'un réacteur à uranium, un nouvel élément comptant 94 protons – l'« élément 94 » – se forme. Ils auraient alors déduit de la

WERNER HEISENBERG est à la fois l'un des plus grands physiciens théoriciens du XX^e siècle, un père de la théorie quantique, un chercheur mal vu par les nazis et, avec Carl Friedrich von Weizsäcker, l'un des premiers dirigeants de l'*Uranprojekt*, un projet qu'il a contribué à concentrer sur la physique d'un réacteur nucléaire, plutôt que sur celle de la bombe. Par volonté d'évitement implicite, semble-t-il.

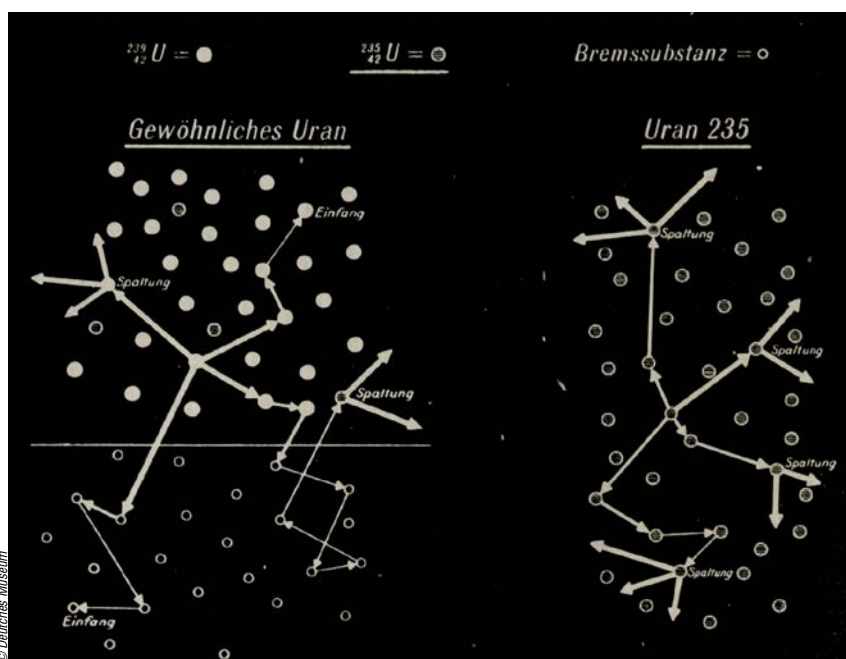


théorie nucléaire du physicien danois Niels Bohr que cet élément est plus fissile que l'uranium 235, l'isotope d'uranium le plus fissile. Or cela semble très improbable d'un point de vue scientifique.

L'élément 94 n'a été découvert qu'en 1941 aux États-Unis, où il fut nommé plutonium, et les chercheurs allemands ne l'apprirent qu'en 1946. Comment aurait-il pu en être autrement ? Leurs réacteurs expérimentaux ne pouvaient produire de plutonium ! Jeremy Bernstein, un physicien qui a beaucoup publié sur l'*Uranprojekt*, s'est demandé pourquoi les chercheurs allemands n'avaient pas, comme leurs collègues américains, créé quelques microgrammes de plutonium dans l'un de ces accélérateurs circulaires – un cyclotron – que l'on emploie tant en physique nucléaire. Au cours des années 1930 en effet, plusieurs pays européens en avaient construit, mais l'Allemagne n'en possédait pas. Elle aurait pu réquisitionner les cyclotrons de la France et du Danemark occupés, mais rien ne fut entrepris en ce sens. Les chercheurs allemands ne pouvaient donc connaître les propriétés de l'élément 94, ce qui exclut qu'ils aient pu calculer une masse critique de plutonium.

La piste de la bombe à uranium 235

Il leur restait donc à suivre la piste de la bombe à uranium, mais, là non plus, ils ne firent pas le nécessaire. L'idée, celle du Projet Manhattan, consiste à établir une réaction en chaîne explosive dans l'uranium. Pour cela, il faut, plutôt qu'employer des neutrons ralentis comme y poussait l'intuition physicienne dans les années 1940, employer des neutrons de haute énergie, donc rapides. En effet, les physiciens pensaient plutôt à employer des neutrons lents parce que leur probabilité de déclencher une fission est 500 fois plus élevée que celle des neutrons rapides. Cependant, les neutrons rapides déclenchent des fissions bien plus vite, de sorte que lancés dans une population d'uranium 235 assez dense, ils déclenchent une réaction en chaîne explosive : la fission d'un premier noyau bombardé par un neutron produit des neutrons qui déclenchent plusieurs nouvelles fissions, etc. Pour cette raison, avec des neutrons rapides, la réaction en chaîne peut se développer avant que la dilatation de l'explosif nucléaire due à la chaleur n'ait fait chuter la densité d'atomes



DANS UN DESSIN DE 1942, HEISENBERG a schématisé, sans le dire explicitement, les réactions en chaîne dans un réacteur (à gauche) et dans une bombe (à droite). Dans le cas du réacteur, un neutron émis par un atome d'uranium 235 fissionné parvient dans le modérateur, un milieu inerte où les collisions avec les atomes le ralentissent (en bas). Il déclenche alors la fission d'un autre atome d'uranium. Dans une bombe en revanche, les fissions successives sont directement déclenchées par les neutrons qu'émettent les atomes d'uranium 235 fissionnés.

fissiles au point d'arrêter le processus. Évaluer la densité minimale d'uranium 235 nécessaire revient à calculer la masse critique. Pour cela, encore faut-il connaître la probabilité de déclenchement d'une fission par un neutron rapide. En termes de physicien, cela revient à mesurer les « sections efficaces » de l'uranium 235 bombardé par des neutrons rapides. Rien n'indique que l'*Uranprojekt* l'ait fait.

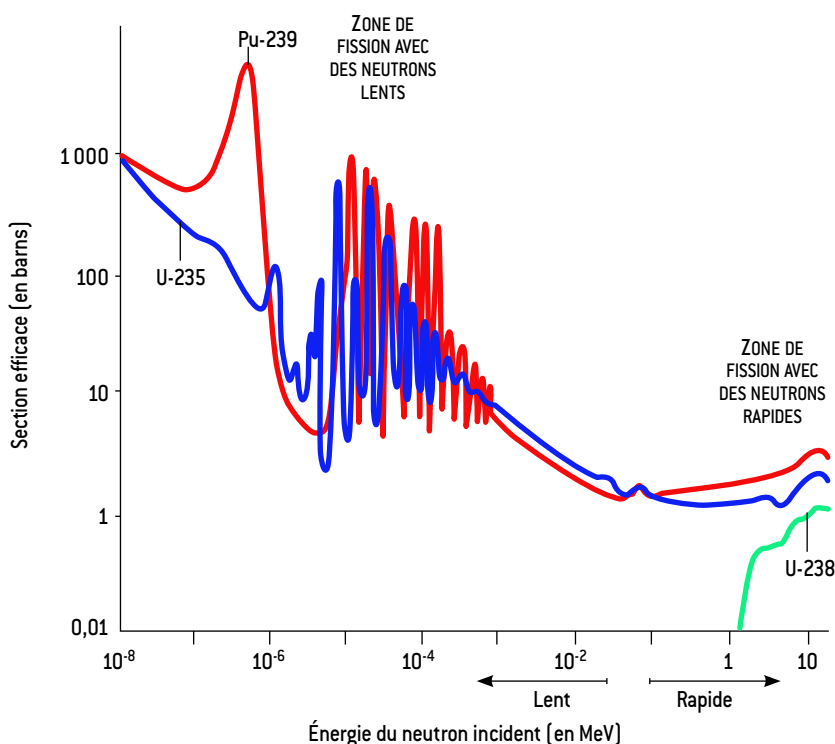
Ses physiciens ne se sont préoccupés en fait que des sections efficaces immédiatement utiles au fonctionnement d'un réacteur : celles de l'uranium naturel bombardé par des neutrons lents. Comme Niels Bohr avait montré que l'uranium 238 ne peut être fissionné par des neutrons de cette énergie (voir la figure page 74), on se concentrait sur les fissions de l'uranium 235, dont l'abondance naturelle n'est que de 0,7202 %...

Lorsque l'on bombarde de l'uranium naturel avec des neutrons rapides, les fissions de l'uranium 235 sont noyées dans celles, bien plus nombreuses, de l'uranium 238. Une séparation isotopique assez poussée pour obtenir des échantillons suffisamment enrichis en uranium 235 aurait pu permettre aux physiciens allemands d'obtenir la section efficace de l'uranium 235 bombardé par des neutrons rapides. Elle ne fut pas réalisée.

Pour déterminer la section efficace de l'uranium 235, les chercheurs de l'*Uranverein* auraient aussi pu prendre une autre voie. Josef Mattauch de l'institut Kaiser Wilhelm de chimie était un spécialiste de la spectroscopie de masse des isotopes. Il aurait pu séparer quelques microgrammes d'uranium 235, puis on s'en serait servi pour déterminer les sections efficaces utiles dans les cyclotrons de Paris ou de Copenhague. Rien ne fut entrepris en ce sens.

Or aucun historien n'a remarqué que l'*Uranverein* ne connaissait pas les sections efficaces nécessaires au calcul des masses critiques de bombes à l'uranium ou au plutonium, ni qu'il avait la possibilité de les déterminer, mais ne l'a pas fait !

L'autre condition nécessaire à la construction de la bombe est de connaître son principe de fonctionnement. L'*Uranverein* la remplissait-il ? Les rapports secrets de recherche allemands nous renseignent à ce propos : il semble que non. Jusqu'en 1942, ses chercheurs les adressaient au *Heereswaffenamt*, leur donneur d'ordre. Il est frappant de constater que dans toute cette masse de documents, de nombreuses fois copiés à la machine afin d'informer les membres de l'*Uranverein*, très peu concernent la bombe.



LES PROBABILITÉS DE COLLISION D'UN NEUTRON AVEC UN ATOME D'URANIUM 235 (en bleu) ou de plutonium 239 (en rouge), c'est-à-dire les sections efficaces de ces éléments, sont cent fois plus grandes à basse énergie (neutrons lents) qu'à haute énergie (neutrons rapides), ce qui a amené les chercheurs de l'*Uranverein* à estimer que la bombe nécessitait une réaction en chaîne déclenchée et entretenue par des neutrons lents. En réalité, construire une bombe nécessite un échauffement assez rapide de la matière fissile pour que des neutrons rapides y soient produits et y entraînent une réaction en chaîne explosive avant que sa dilatation ne l'interrompe...

En décembre 1939, Heisenberg écrivit ainsi un premier rapport entièrement consacré à l'énergie nucléaire. On n'y trouve qu'une unique phrase sur la bombe, ou plus exactement sur un réacteur transformé en bombe: «L'enrichissement d'uranium 235, qui permet de construire des réacteurs très compacts, serait aussi la seule méthode d'obtention d'un explosif dont la puissance dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle des explosifs conventionnels.»

Avant d'écrire cela, Heisenberg avait estimé que pour créer un tel réacteur explosif, il faudrait de nombreux kilogrammes d'uranium 235, une entreprise qu'il qualifiait d'«horrible», puisque l'on ne parvenait alors à séparer les isotopes que par microgrammes. Ainsi, la «bombe» – en réalité un réacteur censé exploser – semblait à Heisenberg pensable, mais irréalisable. Dans la partie détaillée de son rapport, il décrit l'explosion. L'énergie des neutrons qu'il donne – 300 électrons-volts – est 10 000 fois plus petite que celle des neutrons rapides nécessaires en réalité. Du reste, Samuel Goudsmit,

Jeremy Bernstein, Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarqué à juste titre que la bombe correspondante ne serait pas plus puissante qu'une bombe conventionnelle! De son côté, Mark Walker semble déduire de la phrase de Heisenberg que le principe correct de la bombe était connu...

À ce stade, soulignons que, pour un physicien nucléaire de l'époque, l'emploi de neutrons lents pour obtenir une explosion avait un sens. Dès 1934, le physicien italien Enrico Fermi avait en effet découvert que les neutrons d'énergie réduite déclenchent des réactions nucléaires plus efficaces (voir la figure ci-dessus). Le fait que, pour produire une réaction en chaîne explosive, il faille en réalité employer des neutrons rapides n'apparaît que si l'on étudie la thermodynamique de la réaction.

Un autre élément suggère que l'*Uranverein* ne connaissait pas le principe de fonctionnement de la bombe. Paul Müller, doctorant sous la direction de Heisenberg, a calculé les valeurs des paramètres physiques à atteindre pour déclencher une explosion nucléaire: il a conclu qu'il faudrait enrichir l'uranium 235

à 70 % et qu'il y aurait un grand besoin de modérer l'énergie des neutrons. Si le premier résultat semble bon, le second l'annule car, dans une bombe, les modérateurs sont des poisons. Une erreur que Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarquée. Walker, pour sa part, n'a tenu aucun compte du rapport de Müller, le seul exclusivement consacré aux explosifs nucléaires...

Une troisième preuve surgit de la lettre que Karl Wirtz écrivit à l'Office des brevets du Reich. Cet important collaborateur de Heisenberg y décrit une plaque d'uranium 235 d'une surface de un mètre carré et épaisse de quelques millimètres insérée entre deux couches modératrices de l'énergie des neutrons. Or il écrit que ce dispositif peut soit servir de source de chaleur inépuisable, soit exploser avec une violence extrême. Ainsi, pour les physiciens de l'*Uranverein*, un réacteur et une bombe étaient censés fonctionner sur le même principe et avaient la même forme.

Le rapport de 1942 au Heereswaffenamt

Une autre incompréhension semble avoir durablement influencé le travail des historiens: elle est liée à l'interprétation du rapport de 1942 au Heereswaffenamt. Ce document, écrit en préparation d'une réunion décisive pour le soutien à l'*Uranprojekt*, est extraordinairement précieux, car il détaille les connaissances qu'avaient alors les physiciens du projet. Une fois de plus, Mark Walker y découvrit une phrase semblant indiquer que la masse critique était connue: «Pour allumer l'explosif, on doit pouvoir en rassembler en un même lieu de 10 à 100 kilogrammes». Un intervalle qui correspond de façon impressionnante à celui qui venait d'être fixé aux États-Unis: de 2 à 100 kilogrammes.

Toutefois, les explications physiques présentées dans la partie détaillée du rapport mettent clairement en évidence une conception fausse du principe de la bombe. Dès la table des matières, celle-ci est présentée comme un cas particulier de réacteur! Plus loin, alors que l'on présente les processus de production des neutrons, seuls ceux importants pour les réacteurs sont cités. Rien n'est dit sur la production de neutrons rapides pour fissionner l'uranium 235.

Comme ce rapport était très difficile à obtenir, beaucoup d'auteurs se sont fiés

à Mark Walker. Seuls Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarqué l'erreur commise, mais, pour des raisons incompréhensibles, ils ont supposé que cet intervalle de valeurs se rapportait à une bombe à plutonium, un élément pourtant inconnu de l'*Uranverein*... Pendant plus d'un quart de siècle, les documents destinés au *Heereswaffenamt* sont passés pour une preuve de l'existence de connaissances suffisantes sur le fonctionnement d'une bombe. Ceux qui adoptaient ce point de vue – celui de Mark Walker – n'étaient pas gênés par le fait que le calcul de la masse critique soit le seul aspect non rapporté dans le rapport : « Peu importe qui a procédé à cette estimation et comment elle a été faite », écrit-il.

Il est étonnant que cette erreur de Mark Walker n'ait pas été aperçue : l'intervalle de 10 à 100 kilogrammes correspond bien en effet à la masse de matière fissile du réacteur que décrit Heisenberg : un réacteur ralentissant les neutrons, comme nombre de réacteurs actuels. Or de tels réacteurs ne peuvent exploser comme une bombe... Il se pourrait que Wirtz ait calculé cet intervalle à l'occasion de sa lettre au Bureau des brevets du Reich. Étant donné la très haute densité de l'uranium ($19,1 \text{ g/cm}^3$), une plaque de un mètre carré et de quelques millimètres d'épaisseur de cet élément pèse en effet entre 10 et 100 kilogrammes. L'*Uranverein* avait donc calculé la masse critique d'un réacteur et croyait qu'avec de l'uranium suffisamment enrichi, un tel réacteur se muerait en bombe atomique...

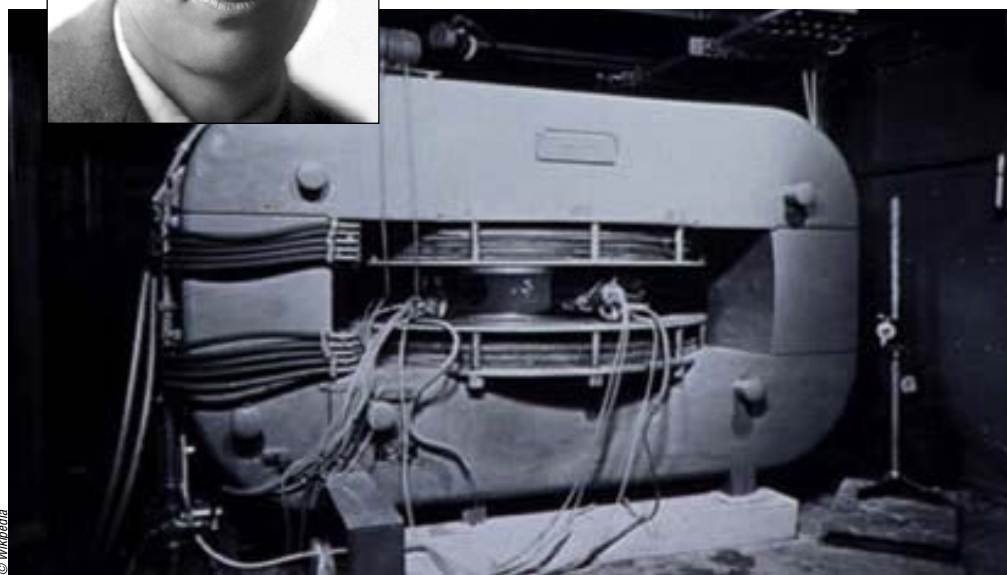
Une fois ce fait réalisé, on peut aussi s'expliquer les affirmations non vérifiées mais durables de l'après-guerre selon lesquelles Heisenberg évoquait pendant la guerre une masse critique de 50 kilogrammes. Pendant la conférence de février 1942, il montra dans sa communication introductive une représentation schématique des phénomènes à l'œuvre pendant les réactions de fission avec de l'uranium naturel (à gauche sur la figure page 73) ou de l'uranium 235 (à droite). Et pour la première fois, aucun modérateur n'est représenté dans la version avec de l'uranium 235. Il semble donc que le principe correct de la bombe soit signifié, mais, dans le texte du rapport, il n'est aucunement question d'obtenir la fission à l'aide de neutrons rapides. Après la guerre, Heisenberg a affirmé avoir toujours su que la bombe n'était possible qu'avec l'aide de neutrons rapides. Pour



LE SYNCHROTRON DE PARIS, construit par Frédéric Joliot-Curie (ci-dessus), aurait pu servir à l'*Uranverein* à produire du plutonium ou à déterminer les sections efficaces de l'uranium 235 ou du plutonium 239, mais les physiciens allemands ne l'ont pas exploité, même si l'un d'entre eux avait été envoyé à Paris afin de contrôler l'usage de la machine.

autant, jusqu'à la fin de la guerre, il n'a jamais évoqué cette possibilité avec qui que ce soit et, après, il n'a jamais avoué son échec à construire la bombe atomique. Heisenberg n'était pas près du but. Il commençait tout juste à comprendre la physique de la bombe, alors qu'aux États-Unis, les physiciens la maîtrisaient déjà en 1940. Et il n'a pas fait un pas de plus !

Même le troisième et dernier directeur du projet uranium, Walther Gerlach, ne connaissait pas les nouvelles réflexions de Heisenberg. C'est ce que prouve sa lettre de novembre 1944, dans laquelle il répond au reproche selon lequel l'*Uranverein* travaillerait trop peu à de petites bombes atomiques transportables en fusée : « malheureusement », écrit-il, la « multiplication turbulente » des neutrons ne serait possible qu'à partir de plusieurs tonnes d'uranium et en utilisant un modérateur. Goudsmit a publié cette lettre pour prouver que, jusqu'à la fin de la guerre, l'*Uranverein* avait un concept de bombe inadéquat. Toutefois, Mark Walker a affirmé que Gerlach décri-



ait des essais de réacteur. C'est illogique, non seulement à cause du contexte de la lettre, mais aussi pour une raison évidente : après une « multiplication turbulente » des neutrons, il ne reste pas grand-chose d'un réacteur...

Mon analyse des documents disponibles donne raison à Goudsmit qui, dès 1947 disait pour résumer que l'*Uranverein* n'avait pas compris la différence entre une bombe et un réacteur nucléaire. Goudsmit était bien placé pour porter un tel jugement puisque, physicien nucléaire lui-même, il

s'était lié d'amitié avec Heisenberg avant la guerre, maîtrisait l'allemand, connaissait les documents qu'il avait rassemblés, pouvait en évaluer le contenu, avait vu de nombreux laboratoires allemands et arrêté et interrogé lui-même leurs chercheurs... Sa relation aux Allemands était cependant très chargée, puisque ses parents avaient été assassinés à Auschwitz.

Le retour à l'opinion de Goudsmit a en plus l'avantage de rendre leur cohérence à tous les éléments connus. Ainsi, on comprend aujourd'hui pourquoi les physiciens allemands n'ont pas essayé de déterminer les sections efficaces de la fission par des neutrons de haute énergie à l'aide d'un cyclotron : ils ignoraient que les neutrons rapides étaient essentiels au principe d'une bombe !

Point remarquable, tous nos arguments peuvent être vérifiés à l'aide d'une autre source : la transcription des écoutes de Farm Hall. À l'été 1945, les Alliés enfermèrent les physiciens les plus importants de l'*Uranverein* dans cette grande maison rurale (voir la photo ci-contre) afin de les écouter parler à leur insu. Leurs réactions à l'annonce de l'explosion de la bombe de Hiroshima sont significatives : certains, tels Otto Hahn, furent immensément soulagés de ne pas avoir construit la bombe ; d'autres furent affligés dans leur patriotisme de constater que la physique nucléaire allemande était dépassée.

Pendant les jours qui suivirent, ces physiciens essayèrent fébrilement de comprendre le fonctionnement de la bombe, mais la faiblesse du contenu de leurs échanges frappe. Interrogé par Hahn, Heisenberg reconnaît ne jamais avoir calculé la masse critique, ce qu'il a effectué à Farm Hall. Lors de sa première tentative, il commet d'énormes erreurs de calcul et obtient une masse critique d'une tonne... Comme il s'était trompé dans la détermination du volume d'une sphère d'uranium à partir de son rayon, son véritable résultat aurait dû être 13 tonnes ! En écoutant l'enregistrement, les deux grands experts de la bombe atomique de l'époque qu'étaient Edward Teller (souvent présenté comme le père de la bombe à hydrogène) et Hans Bethe, le directeur du département théorique du Projet Manhattan, conclurent que Heisenberg tentait ce calcul pour la première fois, de sorte qu'il commettait toutes les erreurs de débutant

par lesquelles eux aussi étaient passés. Les tentatives des chercheurs allemands pour deviner les sections efficaces de la fission de l'uranium 235 remplissent de nombreuses pages de transcription de Farm Hall. Elles prouvent leur ignorance.

Une semaine après ce premier exercice, Heisenberg avait progressé. Dans un exposé, il explicita tous les points essentiels de la physique d'une bombe nucléaire, s'interrogeant en particulier sur la question de sa puissance, qu'il sous-estima encore. Les connaissances divulguées pendant cet exposé furent souvent présentées comme la preuve de la pertinence des idées des physiciens allemands, mais celles-ci n'ont été acquises qu'après la guerre et au vu et au su des réalités manifestées à Hiroshima.

Les comptes rendus des enregistrements de Farm Hall confirment donc ce que dicte l'étude attentive des documents : l'*Uranverein* ignorait le principe d'une bombe nucléaire. Les fautes de débutant de Heisenberg traduisent qu'il n'avait jamais fait ces calculs auparavant. Son séminaire à Farm Hall montre aussi qu'une semaine de travail lui suffit pour parvenir au principe fondamental de la bombe. Tout cela contredit l'affirmation de Paul Rose suivant laquelle il n'en était pas capable, ainsi que la théorie de Thomas Powers selon laquelle il aurait réussi très tôt. On peut donc en déduire ce qu'aucun historien

En 1937, le journal de la SS accuse Heisenberg d'être un « Juif blanc » soutenant des théories « non allemandes »

n'a vu : durant toute la guerre, Heisenberg n'a pas réfléchi sérieusement à la bombe pendant toute une semaine !

Trente à quarante ans après la guerre, j'étais devenu le directeur du programme fédéral allemand de recherche nucléaire, donc en quelque sorte le successeur de Gerlach. Quelque chose d'étonnant m'apparut dans la façon de travailler de l'*Uranverein*. Quand on aborde un terrain technique inconnu, il est normal d'explorer plusieurs pistes à la fois. Avec le temps, on concentre les ressources sur les voies intéressantes avant, finalement, de les consacrer à la plus prometteuse.



Or, au sein de l'*Uranverein*, c'est le contraire qui s'est produit. Au cours des années, le nombre de réacteurs expérimentaux et de procédés explorés a augmenté, ce que les historiens ont attribué à des faiblesses dans la conduite du projet. Toutefois comme aucune tentative de rassemblement des moyens n'a jamais eu lieu, il semble vraisemblable que le projet n'était pas orienté vers le succès. Pas sérieusement.

Or beaucoup de ses chercheurs – surtout les plus jeunes – pouvaient craindre, en cas d'arrêt de leur projet, de ne pas être réaffectés à d'autres recherches, mais envoyés au front... Les petites équipes dispersées menant des projets partiels dont ils faisaient partie représentaient donc autant de chances de rester en vie. Pendant que des millions d'Européens tombaient au combat, mouraient dans les villes bombardées

ou se faisaient assassiner dans les camps, leurs petits instituts installés en province pouvaient pour l'essentiel continuer à faire de la recherche librement. Même si les moyens personnels et financiers étaient ridicules par rapport à la tâche fixée, ils étaient bien plus importants que dans les trente années précédentes, marquées par la première guerre mondiale et la crise de 1929. Un gros projet centralisé aurait détruit cette idylle et serait devenu moralement dangereux.

De fait, même Abraham Esau, que le *Heereswaffenamt* avait chargé en 1939 d'initier l'*Uranprojekt*, avait conseillé à ses collègues



LE MANOIR DE FARM HALL fut la prison dorée, mais secrètement équipée de microphones, de dix des physiciens les plus importants de l'*Uranverein*. Les conversations entre physiciens, notamment le jour où ils apprirent l'explosion de Hiroshima, suggèrent qu'à la fin de la guerre, les meneurs de l'*Uranprojekt* ignoraient toujours comment obtenir une bombe nucléaire.

d'éviter de parler de la bombe: «S'il devait être possible de construire une bombe atomique, vous serez forcés au travail. Et si deux ans après le début du projet, aucune bombe n'est là, alors vous serez perdus.» Tous les chercheurs et les cadres responsables craignaient donc de lancer un grand projet. Si l'on avait considéré que la bombe pouvait être obtenue en un temps raisonnable, le projet en aurait été lancé. Sans doute est-ce pourquoi il était préférable pour les physiciens allemands de ne pas se pencher trop intensément sur la physique de la bombe...

Assez générale au sein de l'*Uranverein*, cette attitude caractérisait tout particulièrement Heisenberg. Il y avait des raisons pour cela! En juillet 1937, le journal de la SS l'avait accusé d'être un «Juif blanc» – pour les nazis, quelqu'un censé se comporter comme un Juif sans l'être – parce qu'il pratiquait une physique «non allemande», à savoir la relativité et la physique quantique. Or la parution d'une attaque dans ce journal pouvait signifier un internement, puis la mort en camp de concentration... Heisenberg parvint à obtenir sa réhabilitation de Heinrich Himmler, le dirigeant de la SS, mais cela prit une année entière d'interrogatoires... Sans doute fut-il sauvé par les interventions de son collègue Ludwig Prandtl qui, en tant que directeur de l'institut Kaiser Wilhelm pour la recherche en dynamique des fluides jouait un rôle particulièrement important dans la montée en puissance de la *Luftwaffe*, l'armée de l'air

allemande. Sans doute est-ce à cette époque qu'il devint clair pour Heisenberg que l'on ne pouvait taire au régime nazi que ce que l'on ignorait. Comme le suggère son efficacité scientifique à Farm Hall, ne jamais avoir recherché sérieusement le principe de fonctionnement correct de la bombe pendant la guerre n'était pas la marque d'une incompetence, mais plutôt celle d'une clairvoyance.

Cela répond finalement à une question que se poseront peut-être certains physiciens: même si le fait de s'occuper d'une bombe irréalisable en un temps raisonnable pouvait passer pour du temps perdu, la curiosité si intense des physiciens allemands aurait dû les pousser à essayer de trouver quels phénomènes se produisent dans une telle machine infernale. Leur peur des nazis fut manifestement plus forte que leur curiosité.

Ainsi, les historiens ont répandu sur l'histoire de l'*Uranverein* une épaisse couche d'erreurs, malgré les objections de nombre de physiciens américains et allemands. Ma conclusion est simple: les chercheurs du III^e Reich ignoraient comment construire la bombe atomique; dès lors, ils n'ont rien entrepris pour en construire une. Certes, le réacteur qu'ils ont essayé de faire fonctionner aurait pu être une première étape vers la bombe au plutonium. Toutefois, comme ils méconnaissaient la physique de la bombe, les recherches qu'ils menaient n'avaient en réalité qu'un objectif civil. Ce ne furent donc pas des limites économiques qui évitèrent que Hitler ne se retrouve doté d'une bombe atomique; en tout cas, les physiciens allemands n'ont jamais été près d'en obtenir une. En réalité, ces derniers ont fait un grand détour pour éviter d'avoir à construire une bombe nucléaire. La véritable raison de l'échec de l'*Uranverein* est la terreur que lui inspièrent les nazis.

Ainsi, nous pouvons avoir une pensée consolatrice: c'est bien l'effrayante inhumanité du régime nazi qui l'a privé d'arme nucléaire. Sous un régime démocratique, les chercheurs allemands auraient sans doute travaillé avec zèle à la bombe et peut-être avec la même efficacité que ceux du Projet Manhattan. Troublé d'être le découvreur de la fission nucléaire, Otto Hahn a sans doute prononcé les mots pouvant clore le débat sur l'*Uranverein*: «Je remercie Dieu à genoux de nous avoir évité de développer la bombe à uranium.» ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Popp, *Misinterpreted documents and ignored physical facts: The History of « Hitler's atomic bomb »*, *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, vol. 39, pp. 265-282, 2016.

B. C. Reed, *The Physics of the Manhattan Project*, Springer, 2015.

Rainer Karlsch, *Hitlers Bombe. Die geheime Geschichte der deutschen Kernwaffenversuche*, Dva, 2005.

Paul Rose, *Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, 1939-1945*, University of California Press, 2001.

Hans Bethe, *The German uranium project*, *Physics Today*, vol. 53(7), pp. 34-36, 2000.

Mark Walker, *Nazi Science: Myth, Truth, and the German Atomic Bomb*, Perseus, 1995.

Mark Walker, *German National Socialism and the Quest for Nuclear Power, 1939-1949*, Cambridge University Press, 1995.

Otto Hahn, *Mein Leben*, Bruckmann, 1968.

LOGIQUE & CALCUL

Vers du calcul sans coût énergétique

De nouvelles expériences sur de petits calculs confirment qu'un minimum d'énergie est nécessaire pour les effectuer. Mais la maîtrise du calcul réversible pourrait rendre caduc cet obstacle thermodynamique.

Jean-Paul DELAHAYE

L'information est-elle un concept physique comme l'énergie ou la masse, ou un concept purement mathématique qui n'a de sens que pour des êtres doués d'intelligence et qui n'intervient directement dans aucune loi proprement physique ?

En thermodynamique, on se pose cette question depuis longtemps et plus particulièrement depuis que l'on a noté des similarités entre la notion d'entropie physique,

née au XIX^e siècle avec Rudolf Clausius, et la notion d'entropie mathématique, dont la théorie de l'information de Claude Shannon a proposé une première version, complétée par Andreï Kolmogorov.

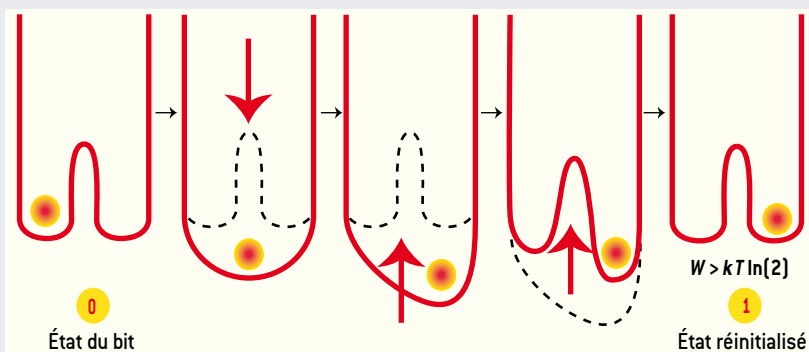
La question est directement liée à celle du coût minimal des opérations de calcul, qui détermine le devenir à long terme de tous nos dispositifs informatiques. Mais elle est aussi importante sur un plan philosophique, pour savoir si la physique doit devenir une

théorie matérielle de l'information. Où en sommes-nous aujourd'hui sur ces questions ?

Nos microprocesseurs chauffent, ce qui est devenu un problème avec la miniaturisation des circuits. Plus précise que la « loi de Moore » qui prédit un doublement de la puissance de calcul des puces informatiques tous les 18 mois, la « loi de Koomey » indique que, grâce à la miniaturisation, le nombre d'opérations de calcul par joule dépensé double tous les 18 mois environ. L'étude des chiffres

Le principe de Landauer testé avec succès

Le principe de Landauer énonce que lorsqu'une opération logique irréversible est menée, par exemple effacer une information dans une mémoire d'ordinateur, alors une certaine énergie est inévitablement dépensée ; à l'issue de l'opération, elle se retrouve sous forme de chaleur dans l'environnement du dispositif. Ce principe est discuté depuis 1961. C'est seulement depuis 2012 que l'on a réussi à mener des expériences suffisamment précises pour le tester (voir les quatre références de la bibliographie signalées par un astérisque).



La plupart des expériences consistent à créer une mémoire de un bit en piégeant une particule dans un double puits de potentiel (trait rouge). Selon que la particule est dans le premier puits ou le second, un 0 ou un 1 est mémorisé. Si la particule est en 0, on peut de façon réversible (donc sans coût en énergie) la déplacer en 1. De même, si elle est en 1, la laisser en 1 n'a aucun coût. En revanche, si l'on veut que, quelle que soit sa position initiale (pas forcément connue), elle se retrouve en 1 (réinitialisation), alors le processus (ci-contre) exige un minimum d'énergie. Quatre expériences concluant en faveur du principe de Landauer ont été menées depuis 2012 : à chaque fois, en s'y prenant au mieux, la réinitialisation exige un minimum d'énergie qui correspond à celui donné par le principe de Landauer ($kT \ln(2)$, T étant la température absolue et k la constante de Boltzmann).