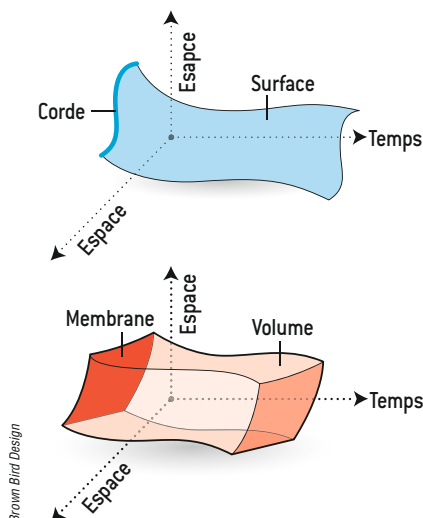


existe l'espace. Si cet univers est de dimension 1, 2, 4 ou 8, les particules de matière comme de force seraient des ondes décrites par un seul type de nombres, à savoir des nombres d'une certaine algèbre de division, où l'addition, la soustraction, la multiplication et la division sont possibles. En d'autres termes, dans ces dimensions, les vecteurs et les spineurs coïncident : les uns comme les autres sont simplement des nombres réels, des nombres complexes, des quaternions ou des octonions, respectivement. La supersymétrie émerge naturellement et fournit ainsi une description unifiée de la matière et des forces. Une simple multiplication décrit les interactions, et toutes les particules (quel que soit leur type) sont décrites à l'aide du même système de nombres.

Mais cet univers-jouet ne peut pas être réel, puisque nous devons prendre le temps en considération. Dans la théorie des cordes, cette considération a un effet très curieux. À tout instant, une corde est un objet unidimensionnel, comme une courbe ou une droite. Mais à mesure que le temps s'écoule, la corde trace une surface bidimensionnelle. On montre que cette évolution modifie les dimensions dans lesquelles la supersymétrie apparaît naturellement, en en ajoutant deux : une pour la corde, et une pour le temps. Au lieu de supersymétrie en dimension 1, 2, 4 ou 8, on obtient une supersymétrie en dimension 3, 4, 6 ou 10.

Or, comme par hasard, les théoriciens des cordes nous disent depuis des années que seules les versions à dix dimensions de la théorie sont cohérentes. Les autres sont entachées de défauts nommés anomalies : quand on calcule certaines grandeurs de deux façons distinctes, on obtient des résultats différents. Il n'y a qu'en dimension 10 que la théorie des cordes pourrait être valide. Mais la théorie des cordes à dix dimensions est, comme nous venons de le voir, la version de la théorie qui utilise les octonions. Si la théorie des cordes est vraie, les octonions ne sont donc plus une curiosité inutile ; ils pourraient apporter un éclairage nouveau sur le fait que la théorie des cordes n'est cohérente qu'en dimension 10. À dix dimensions, les particules de matière et de force sont représentées par le même type de nombres, à savoir les octonions.

Toutefois, ce n'est pas le dernier mot de l'histoire. Récemment, les physiciens se sont mis à aller au-delà des cordes et à considérer les membranes. Par exemple, une membrane à deux dimensions, ou



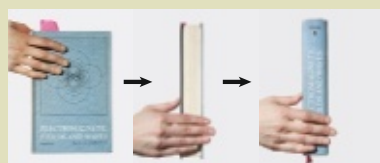
2. DANS LA THÉORIE DES CORDES, des cordes unidimensionnelles décrivent des surfaces bidimensionnelles au cours du temps. Dans la théorie M, des membranes bidimensionnelles décrivent des volumes tridimensionnels. L'ajout de ces dimensions aux huit dimensions des octonions fournit une piste pour expliquer pourquoi ces théories impliquent 10 ou 11 dimensions.

NON-COMMUTATIVITÉ

D'ordinaire, on peut multiplier les nombres dans n'importe quel ordre. Par exemple, 2×3 est égal à 3×2 . Ce n'est plus le cas dans les systèmes de dimensionnalité supérieure, tels ceux des quaternions et des octonions, qui sont non commutatifs. Les quaternions peuvent décrire les rotations en trois dimensions, qui sont aussi non commutatives : si on fait tourner successivement un objet tel qu'un livre autour d'axes différents, le résultat dépend de l'ordre des rotations. Sur la première ligne, on retourne d'abord le livre verticalement, puis on le fait tourner d'un quart de tour : la tranche apparaît. Sur la ligne du bas, on inverse les opérations, et c'est le dos qui apparaît.



Une rotation d'axe horizontal, suivie d'une rotation d'axe vertical.



Les deux rotations dans l'ordre inverse.

2-brane, ressemble à tout instant donné à une nappe. À mesure que le temps passe, elle décrit un volume tridimensionnel dans l'espace-temps.

Alors qu'en théorie des cordes, nous devons ajouter deux dimensions à la séquence classique 1, 2, 4 et 8, il nous faut maintenant en ajouter trois. Ainsi, quand nous avons affaire à des membranes, nous devrions nous attendre à ce que la supersymétrie émerge naturellement en dimensions 4, 5, 7 et 11. Et comme avec la théorie des cordes, une surprise nous attendait : les chercheurs affirment que la théorie M (où le « M » correspond entre autres à « membrane ») nécessite 11 dimensions, ce qui implique qu'elle fasse naturellement appel aux octonions. Hélas, personne ne comprend suffisamment bien la théorie M pour en écrire les équations fondamentales (le M signifie aussi bien « mystérieuse » !). Il est difficile de prédire la forme exacte qu'elle prendra.

Les octonions font-ils partie de la nature ?

À ce stade, insistons sur le fait que la théorie des cordes et la théorie M n'ont pas encore fait de prédictions que des expériences pourraient tester. Ce ne sont pour l'instant que de beaux rêves. Notre Univers ne nous semble pas avoir 10 ou 11 dimensions, et nous n'avons pas observé de symétrie entre particules de matière et particules d'interaction. David Gross, l'un des principaux spécialistes de la théorie des cordes, estime actuellement à 50 pour cent les chances de découvrir des preuves de supersymétrie au LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN. Les sceptiques pensent qu'elles sont beaucoup plus faibles que cela. L'avenir nous le dira.

Étant donné cette incertitude, nous sommes encore loin de savoir si les octonions ont une importance fondamentale pour la compréhension du monde qui nous entoure, ou s'ils ne sont que de la belle mathématique. Bien sûr, la beauté mathématique en soi est un objectif noble, mais cela serait encore plus merveilleux s'il s'avérait que les octonions font partie intégrante de la nature. Comme le prouvent l'histoire des nombres complexes et beaucoup d'autres développements mathématiques, cela ne serait pas la première fois que des inventions purement mathématiques apportent aux physiciens les outils dont ils auront ultérieurement besoin.

HISTOIRE DES SCIENCES

Du Trésor américain au projet Manhattan

En 1943, le Département américain de la Guerre a emprunté 13 000 tonnes d'argent au gouvernement pour mettre au point la première bombe atomique.

Cameron REED

Le projet Manhattan – nom de code du projet américain de construction d'une bombe atomique pendant la Seconde Guerre mondiale – présente tous les ingrédients d'une superproduction cinématographique : des personnalités hors du commun, plus de 100 000 seconds rôles, une science d'avant-garde, de l'espionnage et des intrigues diplomatiques, le tout sur fond d'un conflit mondial et de la grave menace que l'Allemagne nazie soit la première à produire l'arme la plus puissante au monde. Des milliards de dollars ont été investis dans la construction d'énormes installations secrètes visant à produire des matériaux pour une arme dévastatrice dont rien ne garantissait qu'elle fonctionnerait.

Comme tout scénario bien ficelé, le projet Manhattan comprend aussi des intrigues secondaires, qui ont suscité moins d'analyses historiques que les principales implications scientifiques, techniques, éthiques et géopolitiques du développement des armes nucléaires. C'est le cas du programme *Silver*. Ce dernier, qui nécessita d'emprunter 13 000 tonnes d'argent au Trésor américain dans le plus grand secret, a pourtant joué un rôle essentiel dans la course à la production des dizaines de kilogrammes d'uranium enrichi nécessaires à la fabrication de l'arme de destruction massive.

En 1942, le projet secret du gouvernement américain de construire « la bombe » est transmis au Département de la Guerre. Le principal problème du nouveau quartier militaire dédié à ce projet, le MED (*Manhattan Engineer District*), est de trouver les moyens de produire suffisamment d'ura-

nium enrichi en uranium 235 – l'isotope fissionable de l'uranium – pour réaliser une bombe atomique. Début 1942, seules des quantités de l'ordre du milligramme d'uranium 235 ont été isolées, et l'on ignore si les méthodes de laboratoire utilisées pourront être transposées à l'échelle industrielle.

L'une d'elles, la spectrométrie de masse, semble particulièrement prometteuse : elle consiste à séparer les deux isotopes (uranium 235 et 238) contenus dans l'uranium naturel en fonction de leur masse grâce à un champ électromagnétique. Toutefois, James Marshall et Kenneth Nichols, les deux ingénieurs militaires à la tête du projet, s'aperçoivent vite que la production du champ électromagnétique nécessitera un grand nombre d'aimants, et donc des quantités considérables de cuivre pour construire leurs bobinages. Or le cuivre, utilisé dans les douilles d'obus, est une matière première prioritaire pendant la guerre. Les deux hommes ont alors l'idée d'utiliser l'argent comme substitut. Le Congrès a autorisé l'utilisation de 78 000 tonnes d'argent du ministère des Finances à des fins militaires ; en outre, en employer une partie pour la bombe éviterait de détourner de grandes quantités de cuivre – deux énormes atouts pour préserver le secret autour du projet.

Nichols rencontre le sous-secrétaire d'État aux finances le 3 août 1942, pour se renseigner sur la possibilité d'emprunter 5 000 tonnes d'argent aux caves du Trésor. Le projet est lancé. Une des premières démarches du colonel Leslie Groves, nommé directeur militaire du MED en septembre 1942, est d'acquiescer un vaste terrain isolé dans l'Est du Tennessee qui répond aux critères pour y

implanter des installations d'enrichissement. L'armée expulse un millier de familles pour prendre possession d'une zone de près de 250 kilomètres carrés, à une trentaine de kilomètres de Knoxville, pour y établir le site, nommé Clinton Engineer Works, puis Oak Ridge après la guerre. C'est là que doit être construite l'usine de séparation électromagnétique des isotopes. Son nom de code : Y-12. L'entreprise est colossale : la construction de Y-12 nécessite 67 millions d'heures de travail, effectuées par près de 20 000 employés. Le complexe compte plus de 200 bâtiments et emploie 5 000 personnes pour l'exploitation et la maintenance. La plupart n'auront aucune idée du projet auquel ils contribuent jusqu'à l'annonce par le président Truman qu'une bombe a été larguée sur Hiroshima.

Des cyclotrons et des calutrons

Le besoin d'une telle quantité d'argent à Y-12 est une conséquence de la physique qui sous-tend la spectrométrie de masse. En optique, la spectrométrie consiste à séparer les différentes longueurs d'onde qui constituent la lumière à l'aide d'un prisme. De même, la spectrométrie de masse sépare les atomes ou molécules ionisés en fonction de leur masse, et c'est un champ magnétique qui joue le rôle de prisme. Les spectromètres de masse utilisés à Oak Ridge – les calutrons – sont dérivés du cyclotron, inventé en 1931 par le physicien américain Ernest Lawrence et pour lequel il reçut le prix Nobel.

Le dispositif original de Lawrence n'avait aucun rapport avec l'enrichissement de l'uranium. Il l'avait inventé en réponse à une crise



© Underwood & Underwood/Corbis

1. LES LINGOTS D'ARGENT du Trésor américain, ici transportés de New York au dépôt de métaux précieux de West Point, dans l'État de New York, vers 1937. En 1942, le Congrès américain autorisa l'utilisation de

78 000 tonnes d'argent à des fins militaires. La même année, le Département de la Guerre commença à retirer en secret des tonnes d'argent du dépôt pour le projet Manhattan, à l'origine de la première bombe atomique.

qui touchait la recherche en physique nucléaire. Pour étudier les noyaux atomiques, on bombardait des atomes cibles avec des projectiles adéquats – des particules alpha (noyaux d'hélium) –, afin de déclencher des réactions. Toutefois, dans les années 1920, les particules alpha, obtenues par désintégration radioactive naturelle de certains éléments chimiques, étaient de basse énergie et, par conséquent, repoussées par les protons des noyaux cibles, même de masse moyenne. Aussi les expérimentateurs étaient-ils limités à des éléments cibles légers tels que l'aluminium et le magnésium. Pour étudier des noyaux plus lourds, il leur fallait un moyen d'accélérer leurs projectiles.

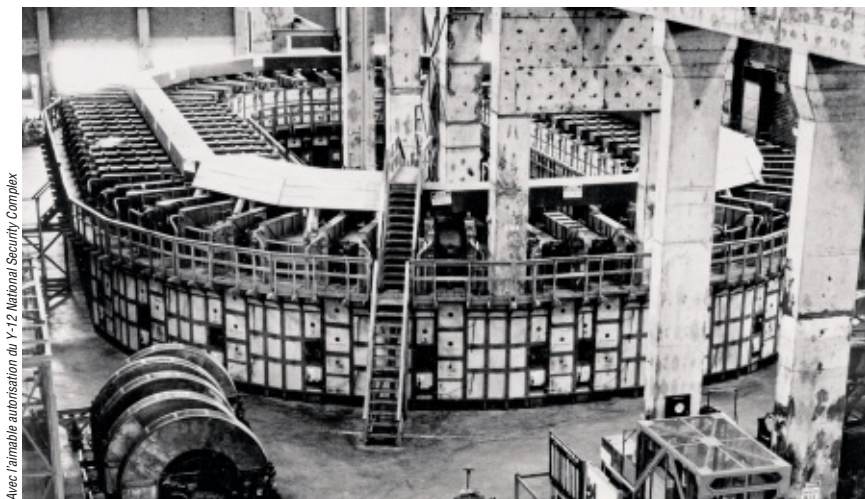
Le cyclotron de Lawrence avait apporté une telle solution : ce type d'accélérateur circulaire utilise un champ magnétique intense et un champ électrique alternatif. Injecté en son centre, un faisceau de particules char-

gées est courbé par le champ magnétique et suit une trajectoire circulaire qui traverse périodiquement le champ électrique. Chaque passage dans le champ électrique augmente la vitesse – et donc l'énergie – des particules, et accroît le rayon de leur trajectoire dans le champ magnétique. Les particules suivent ainsi des trajectoires en spirale jusqu'à ce qu'elles heurtent les parois externes de l'enceinte, recouvertes des atomes cibles. Le premier cyclotron de Lawrence mesurait environ 13 centimètres de diamètre. La version de 1939, de 1,5 mètre de diamètre, nécessitait, pour la création du champ magnétique, un aimant de 200 tonnes.

Le calutron de Lawrence est construit selon le même principe, mais sans champ électrique alternatif : des molécules ionisées de tétrachlorure d'uranium, préalablement accélérées par un champ électrique, sont libérées dans une enceinte circulaire où un champ

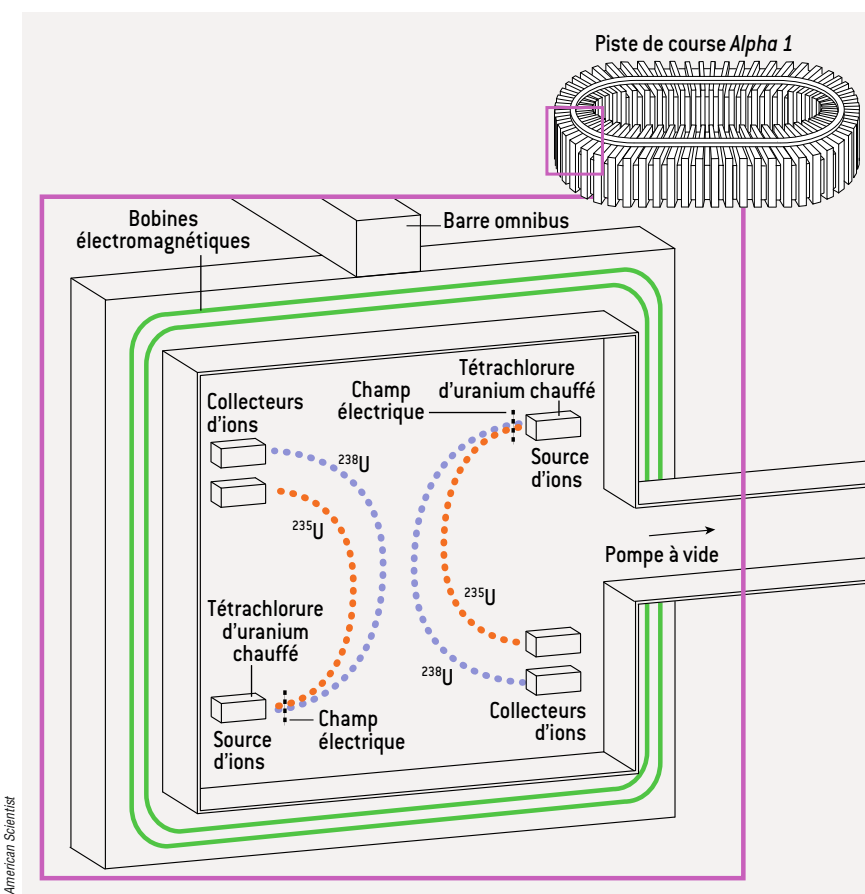
magnétique intense courbe leur trajectoire sans modifier leur vitesse. Leur trajectoire est ainsi circulaire et son rayon dépend de divers paramètres : l'intensité du champ magnétique, le degré d'ionisation des particules, leur vitesse initiale et, surtout, leur masse. Le rayon de l'orbite d'un ion est d'autant plus grand que sa masse est élevée. Ainsi, à partir d'uranium naturel, le calutron sépare les ions de l'isotope fissile de masse atomique 235, l'uranium 235, un isotope rare qui ne représente que 0,7 pour cent de l'uranium naturel, et ceux de l'isotope courant, non fissile, de masse atomique 238. L'écart entre les deux faisceaux est maximal après une demi-orbite seulement, c'est donc là que les isotopes sont recueillis (*voir la figure 3*). Ensuite, l'uranium 235 est séparé chimiquement des molécules de tétrachlorure.

Si la méthode est simple sur le papier, sa mise en pratique à Oak Ridge l'est beaucoup



Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

2. À L'USINE Y-12, LES CALUTRONS, enceintes qui, à partir d'uranium naturel, séparaient l'uranium fissile (^{235}U) nécessaire pour fabriquer la bombe de l'uranium non fissile (^{238}U), étaient groupés en énormes « pistes de course » pour optimiser la production.



American Scientist

3. DANS UN CALUTRON, du tétrachlorure d'uranium était vaporisé par chauffage, ce qui créait des ions de charge positive. Accéléré par un champ électrique, le faisceau d'ions pénétrait dans une enceinte à vide où il était courbé par le champ magnétique créé par un solénoïde – une bobine d'argent parcourue d'un courant. L'uranium 238, de masse atomique légèrement supérieure à celle de l'uranium 235, conduit à une trajectoire moins courbe que l'uranium 235, ce qui sépare les deux isotopes.

moins. Par exemple, pour trier les ions de tétrachlorure d'uranium, le champ magnétique doit être parfaitement uniforme. En outre, une grande proportion d'ions s'écrasent sur les parois internes des enceintes et doivent être récupérés en raclant les parois. Dès lors, le rendement de collecte n'est que d'environ dix pour cent. Par ailleurs, les variations thermiques des vitesses initiales des faisceaux. Et pour compliquer encore les choses, la différence de masse entre les deux isotopes est si faible (un pour cent), que leur séparation nécessite un champ magnétique extrêmement puissant. Enfin, les faisceaux ioniques, de même charge, se repoussent l'un l'autre, ce qui écarte leurs trajectoires des courbes idéales. Cet effet limite la production à 100 milligrammes d'uranium 235 par enceinte et par jour. Pour produire les 50 kilogrammes nécessaires pour une bombe atomique, Y-12 doit ainsi s'équiper de plus de 1 000 enceintes, dont la plupart contiennent plusieurs sources d'ions.

1 152 enceintes à construire

Début 1943, Groves autorise la construction de cinq unités d'enrichissement *Alpha-I*, contenant chacune 96 enceintes (et bobines) carrées. Les enceintes sont empilées en configurations ovales nommées « pistes de course » (voir la figure 2). Mais les enceintes situées dans les coudes des pistes sont difficiles à réguler. À l'automne 1943, quatre pistes de course *Alpha-II*, rectangulaires cette fois, sont ajoutées au dispositif, contenant également 96 enceintes et utilisant des bobines en forme de D. Les dispositifs *Alpha* ne fournissant un enrichissement en uranium 235 que de 15 pour cent, Groves approuve en outre la construction de huit unités *Bêta*, plus petites, qui enrichissent à leur tour l'uranium sorti des unités *Alpha* pour atteindre 90 pour cent, la qualité militaire requise pour la bombe (la dernière unité *Bêta* n'entrera en service qu'une fois la guerre terminée, fin 1945). Finalement, les neuf unités *Alpha* et les huit *Bêta* contiennent un total de 1 152 enceintes.

C'est là qu'entre en jeu l'argent du ministère des Finances. Le métal est nécessaire pour produire les bobines des solénoïdes géants des calutrons. Dans les unités *Alpha*, compte tenu de la vitesse que l'on peut donner aux ions, si l'on veut séparer d'au moins un centimètre les trajectoires des deux isotopes, les solénoïdes doivent engendrer un champ magnétique d'intensité suffisante pour imposer aux ions des trajectoires d'environ trois mètres de diamètre. Ce sera donc la taille des bobines, qui, avec 30 enroulements chacune, devront être alimentées d'un courant de 30 000 ampères pour fournir le champ requis. Au pic de son activité, durant l'été 1945, le site de Clinton Engineer Works consummera ainsi environ un pour cent de toute l'électricité produite aux États-Unis, dont une grande partie circule dans les bobines d'argent des unités d'enrichissement.

Le ministre de la Guerre Henry Stimson fait officiellement la demande de cet argent dans une lettre au ministre des Finances Henry Morgenthau le 29 août 1942, indiquant que le projet « est d'une nature très secrète ». Sa lettre stipule que l'argent doit être titré à 0,999, qu'il restera aux États-Unis, et que tout le métal précieux reçu par le Département de la Guerre sera restitué en quantité, forme et titre identiques à l'endroit d'où il aura été prélevé. La date limite de restitution est fixée à cinq ans après réception, à moins qu'une notification écrite du Trésor raccourcisse ce délai pour des raisons connexes aux besoins monétaires des États-Unis. Stimson assure Morgenthau que le métal ne sera utilisé que dans des usines du gouvernement.

Le Département de la Guerre retire au total plus de 400 000 lingots d'environ 31,1 kilogrammes d'argent titré à plus de 0,999 (moins de 1 pour 1 000 d'impuretés) du dépôt de métaux précieux de West Point, dans l'État de New York. Le 30 octobre 1942, les premiers lingots sont transportés par camion une centaine de kilomètres au Sud, jusqu'à une installation de la *U.S. Metals Refining Company*, à Carteret, dans le New Jersey. Le jour suivant, l'usine commence à couler les lingots en billettes, de longues barres cylindriques moulées pesant environ

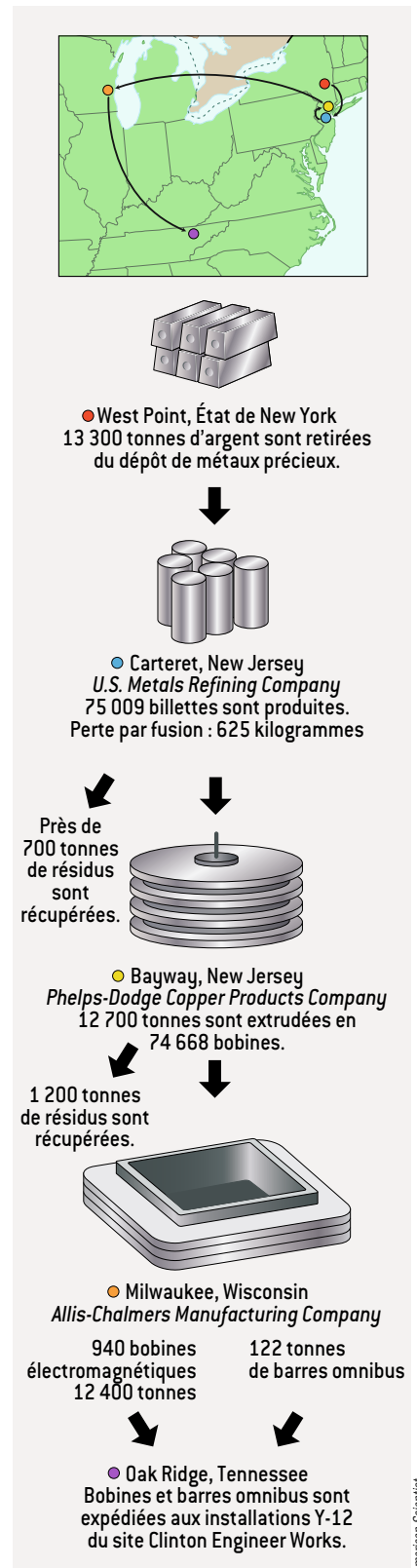
180 kilogrammes chacune. En janvier 1944, un peu plus de 75 000 billettes ont été coulées, pour une masse totale approchant les 14 000 tonnes. Ce poids dépasse les quelque 13 000 tonnes retirées du Trésor, car avant le coulage des billettes, les machines, outils, hauts-fourneaux, ateliers et zones de stockage de l'usine de raffinage ont été démantelés et raclés pour récupérer les résidus d'argent accumulés précédemment.

Même les bleus de travail des ouvriers ont été passés à l'aspirateur. Des gardes armés vérifient à chaque étape que toutes les ébarbures ont été récupérées. La récupération des résidus d'argent est si efficace que près de 700 tonnes seront recueillies à Carteret et restituées au Trésor en plus de l'argent emprunté. À cela s'ajouteront 1 200 tonnes, récupérées dans l'usine de fabrication des bobines. Le total est bien supérieur à la quantité d'argent empruntée au Trésor qui n'a pu être restituée (cinq tonnes perdues au fil des différentes étapes de transformation des lingots en bobines).

Le périple secret des 400 000 lingots

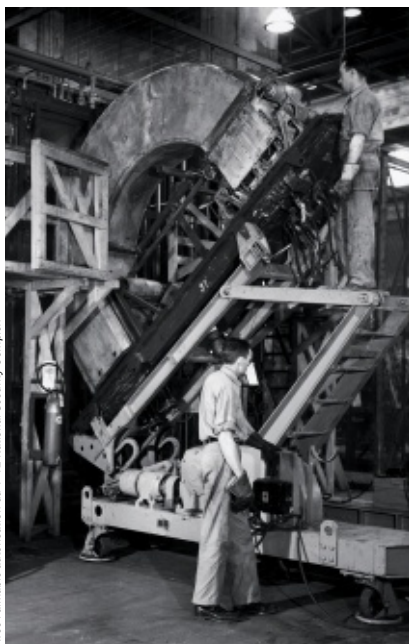
Une fois coulées, les billettes sont acheminées par la route quelques kilomètres plus au Nord, jusqu'à une usine de la *Phelps Dodge Copper Products Company* de Bayway, toujours dans le New Jersey. Là, elles sont chauffées et extrudées en bandes de 8 centimètres de large, 15 millimètres d'épaisseur et 12 à 15 mètres de long. Après refroidissement, les bandes sont laminées à froid pour obtenir différentes épaisseurs selon les spécificités des diverses bobines d'aimants requises, puis façonnées en bobines serrées de la taille de gros pneus de voiture.

4. DES LINGOTS D'ARGENT du Trésor aux aimants de l'usine Y-12, la route était longue : transportés par camions du dépôt de West Point, dans l'État de New York, à une usine du New Jersey, ils étaient fondus en billettes, puis extrudés en bobines dans une usine voisine, avant d'être acheminés par train dans le Wisconsin, où les bobines électromagnétiques destinées au projet Manhattan étaient enfin produites. Ainsi, 940 électroaimants furent construits et transportés en train jusqu'au site Y-12.



Plus de 74 000 bobines sont produites. La plupart sont expédiées dans le Wisconsin pour la fabrication des aimants, mais quelque 120 tonnes sont envoyées directement à Oak Ridge pour être façonnées sur le site en près de 9 000 « barres omnibus » – des barres conductrices qui alimentent les solénoïdes en courant. Durant leur manufacture, des gardes armés, munis de morceaux de papier, rattrapent la poussière d'argent produite lors de l'usinage des pièces pour qu'il soit refondu et réutilisé.

Les bandes de bobine sont acheminées par rail du New Jersey au Wisconsin, par chargements de six wagons scellés et gardés 24 heures sur 24. À la *Allis-Chalmers Manufacturing Company* de Milwaukee, les bobines sont déroulées et assemblées avec des soudures à l'argent pour former des bobines plus longues, puis enfin enroulées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants. Entre février 1943 et août 1944, 940 aimants sont enroulés. Chacun contient en moyenne environ 13 tonnes d'argent. Ces aimants sont alors acheminés jusqu'à Oak Ridge dans des wagons plats.



6. UN OUVRIER retire une enceinte d'un calutron du site Y-12 afin d'en extraire l'uranium. Les ouvriers devaient racler les parois des enceintes pour récupérer l'uranium qui n'avait pas atteint les collecteurs d'ions.

Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

La première piste de course *Alpha* entre en service le 13 novembre 1943, mais son exploitation initiale est de courte durée : les bobinages entrent en court-circuit parce qu'ils sont trop serrés et que de la matière organique a contaminé une huile isolante. L'exploitation est suspendue, et 80 aimants *Alpha-1* sont renvoyés à Milwaukee pour qu'ils soient réusinés. La deuxième piste *Alpha* entre en service le 22 janvier 1944, et la première est reconstruite le 3 mars. Fin janvier 1945, neuf pistes de course *Alpha* contenant 864 calutrons et six pistes *Bêta* contenant 216 calutrons fonctionnent dans huit gros bâtiments du complexe Y-12.

De la bombe *Little Boy* à... la médecine

L'isotope 235 s'accumule peu à peu à Oak Ridge. En avril 1945, les installations Y-12 n'ont produit que 25 kilogrammes d'uranium de qualité militaire et, toutes méthodes d'enrichissement confondues (d'autres méthodes ont été développées sur d'autres sites), les quantités augmentent d'environ 200 grammes par jour. À la mi-juillet, les installations ont produit un peu plus de 50 kilogrammes. À ce stade, Y-12 a consommé environ 1,6 milliard de kilowattheures d'électricité, soit à peu près 100 fois l'énergie libérée par *Little Boy*, la bombe larguée sur Hiroshima le 6 août 1945. Presque chaque atome d'uranium 235 entrant dans la confection de *Little Boy* provient des calutrons de Lawrence. Fin 1946, la production cumulée de Y-12 s'élève à un peu plus de 1 000 kilogrammes d'uranium 235, l'équivalent d'environ 15 bombes d'Hiroshima.

Fin 1946, la méthode de séparation de l'uranium par diffusion gazeuse obtient un bien meilleur rendement que le processus électromagnétique, si bien que l'enrichissement de l'uranium est arrêté en décembre dans tous les bâtiments de Y-12, sauf un. Mais c'est seulement le 1^{er} juin 1970 que le dernier lingot d'argent du projet Manhattan est restitué à West Point, quelques semaines avant la mort de Groves : certains calutrons de Y-12 sont restés en service, utilisés pour d'autres éléments du tableau périodique.



© Ed Westcott / Avec l'aimable autorisation de l'AMSE, Oak Ridge

5. LE GOUVERNEMENT AMÉRICAIN avait embauché de jeunes bachelières pour faire fonctionner les calutrons sur le site Y-12. Les jeunes femmes étaient formées à surveiller les compteurs et à régler les cadrans, mais on ne leur avait pas dit ce que produisaient les calutrons.



Avec l'aimable autorisation du Y-12 National Security Complex

7. LE SITE SECRET CLINTON ENGINEER WORKS, dans l'Est du Tennessee, où fut construit le complexe électromagnétique Y-12. Fin 1945, plus de 1 100 calutrons étaient en service sur le site.



Avec l'aimable autorisation de la Milwaukee County Historical Society

8. À LA ALLIS-CHALMERS MANUFACTURING COMPANY, dans le Wisconsin, les bobines d'argent étaient déroulées, soudées, puis enroulées autour des corps de bobine en acier des boîtiers d'aimants.

Après la guerre, de nombreux calutrons sont rééquipés avec des bobinages en cuivre, mais pas les calutrons de l'usine pilote. Ceux-là fonctionnent jusqu'en 1974 (avec 60 tonnes d'argent dans les bobinages de leurs aimants autres que ceux de l'uranium, dont certains sont utilisés dans le réacteur à graphite du tout proche Laboratoire national d'Oak Ridge. L'installation crée des marqueurs radioactifs pour certains examens médicaux. D'autres calutrons développés pour le projet Manhattan séparent des isotopes stables jusqu'en 1998 ; ensuite, l'arrivée de sources meilleur marché d'isotopes impose la fin de l'exploitation. La fermeture de ces installations est une des raisons de l'actuelle pénurie d'isotopes médicaux aux États-Unis.

Les deux visages du projet Manhattan

Aujourd'hui, les installations Y-12 d'Oak Ridge sont toujours en service en tant que Complexe de la sécurité nationale du ministère de l'Énergie, sous contrat avec la *Babcock & Wilcox Company*. Elles ont été récemment reconverties en site de récupération et de stockage de matériaux nucléaires. Un rapport datant de 2010 de la *Nuclear Posture Review*, qui définit la stratégie nucléaire américaine pour les prochaines années,

prône également la construction d'une nouvelle installation de traitement de l'uranium sur le site Y-12, qui pourrait être opérationnelle en 2021.

Souhaitons qu'Oak Ridge, de même que les deux autres sites du projet Manhattan – Los Alamos, au Nouveau-Mexique, et Hanford, dans l'État de Washington – restent accessibles pour aider les générations futures à explorer et comprendre le projet. Los Alamos centralisait les recherches scientifiques du projet, et Hanford mettait en œuvre une autre stratégie pour obtenir un matériau fissile : la synthèse, dans des réacteurs géants, de plutonium à partir d'uranium.

Les historiens débattront sans fin pour savoir si le projet Manhattan a vraiment contribué à abréger la Seconde Guerre mondiale ou permis d'éviter une invasion sanglante du Japon. Le fait d'accélérer la fin de la guerre valait-il le coût en victimes civiles et les dégâts en termes d'image et d'autorité morale de l'Amérique ? Quoi qu'il en soit, le projet Manhattan a été la plus grande entreprise mondiale de « Big Science ». Il a influencé des événements à court et à long terme comme aucune autre initiative scientifique de l'histoire. Le projet et son programme *Silver* sont des modèles de ce que la science et l'ingénierie, conduites par des professionnels compétents, peuvent accomplir quand le besoin se fait pressant. ■

L'AUTEUR



Cameron REED est professeur de physique au *Alma College* à Alma dans le Michigan, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Reed, *The Physics of the Manhattan Project*, Springer, 2010.

C. Reed, *Bullion to B-Fields: the Silver Program of the Manhattan Project*, *Michigan Academician*, vol. 39, n° 3, pp. 205-212, 2009.

Le site Web du Complexe de sécurité nationale Y-12 propose de nombreuses archives : www.y12.doe.gov

LOGIQUE & CALCUL

La culturomique

L'étonnant corpus de textes créé récemment par une équipe internationale de chercheurs dévoile des phénomènes linguistiques insoupçonnés.

Jean-Paul DELAHAYE



De nombreuses informations, concernant le monde physique, culturel ou social sont trop coûteuses à collecter : il n'est pas envisageable par exemple de savoir combien de personnes connaissent le nom de Kurt Gödel et le sujet de ses recherches. Alors que pour évaluer le nombre de personnes qui connaissent une personnalité très en vue, nous pouvons opérer par sondage, pour une personnalité scientifique à la notoriété moindre, il faudrait, pour un résultat fiable, un échantillon de plusieurs dizaines de milliers de personnes... ce qui revient trop cher. On a pallié aujourd'hui ce problème en utilisant un énorme corpus de données comportant cinq millions de livres !

Sonder ou tout prendre en compte ?

Les sondages donnent accès à des informations globales sur de grands ensembles impossibles à explorer de manière exhaustive : groupes humains, populations animales, objets sortant d'une chaîne de production, etc. Malheureusement, les sondages ne voient pas les faibles fréquences.

Pour des statistiques fines, il nous faut procéder autrement et nous savons que les élections sont le seul moyen pour mesurer l'importance des petits partis. Sans les approches exhaustives ou presque exhaustives, de nombreux faits restent invisibles ou impossibles à mesurer. L'infor-

matique élargit le champ des variables évaluables : elle offre des capacités de stockage massif d'informations, elle réalise des collectes de faits, de chiffres et d'images à grande échelle et les automatise. Elle donne aussi des moyens de traitement numériques ultrarapides pour l'exploration des gigantesques bases de données. Plusieurs domaines de recherche sont nés ou ont été renouvelés. Ainsi, la fouille de données (*data mining*) conçoit des méthodes pour extraire l'information pertinente des masses inouïes de données enregistrées sur les supports numériques et la technologie des moteurs de recherche sur Internet se fonde sur des bases d'informations stockées sur les disques durs de centaines de milliers d'ordinateurs des *datacenters*, information mise à jour en permanence, puis manipulée instantanément pour répondre aux milliards de requêtes des utilisateurs que nous sommes tous.

De nombreuses disciplines scientifiques (toutes ?) sont concernées. Citons la météorologie où les réseaux de collectes d'information et les outils de calcul sont perfectionnés sans relâche ; la géographie et la démographie, qui disposent de tableaux chiffrés de plus en plus variés et nombreux ; l'économie, elle aussi soumise à une multiplication des informations mises à sa disposition ; la biologie et la génétique, avec ces centres de données de séquences qui sont devenus un outil quotidien des chercheurs ; les mathématiques avec, par exemple, la base de suites numériques de Neil Sloane.

La linguistique utilise depuis longtemps les outils informatiques. La constitution de corpus de textes donne une vision objective des langues parlées ou écrites. La réunion de tous les textes d'un auteur permet l'étude statistique du vocabulaire d'un écrivain et de ses habitudes stylistiques.

Les conclusions sont parfois étonnantes : Dominique Labbé, après analyse des œuvres de Molière et de Corneille, prétend que les 16 œuvres principales de Molière ont été écrites par Corneille, thèse qui, sans faire l'unanimité, s'appuie sur des arguments sérieux.

Cinq millions de livres

Un pas vient d'être franchi dans la taille des corpus linguistiques auquel la science informatique donne accès : une base de 5 195 769 livres a été constituée.

Ces livres, qui proviennent des bibliothèques de 40 universités, ont été numérisés par la Société *Google* ; ils représentent quatre pour cent de la totalité des livres jamais publiés. Les ouvrages ont été sélectionnés parmi 12 millions de livres numérisés en prenant en compte la qualité de la numérisation et des informations générales, les « métadonnées », dont on dispose sur eux. Le corpus ainsi constitué comporte 500 milliards de mots. C'est énorme : en lisant un livre chaque jour pendant 50 ans, vous n'en aurez parcouru que 18 000, soit 0,36 pour cent du corpus constitué. Les textes mis bout à bout, à raison de dix symboles par centimètre,