



Steve Mirsky

7. KRAKEN est née le 13 septembre 1992 au Zoo de Washington, où elle vit toujours. C'est le premier varan de Komodo né en captivité hors d'Indonésie. Elle mesure aujourd'hui 87 centimètres, du museau à la base de la queue, et pèse 22 kilogrammes. Cinquante-quatre autres varans ont ensuite éclos au zoo, des œufs pondus par la mère de Kraken, offerte par l'Indonésie en 1988. Ces varans vivent désormais dans des zoos aux États-Unis, au Japon, en Allemagne, aux Pays-Bas et à Singapour. En France, le parc de Thoiry héberge depuis peu des dragons de Komodo.

national. J'espère voir ainsi si la présence humaine déplace les varans ou les fait disparaître.

J'étudie également la répartition des populations de varans et le niveau de menace qui pèse sur eux en utilisant des pièges placés sur des sites choisis en fonction de leur habitat et des témoignages d'habitants. Ces 20 dernières années, la destruction de l'habitat a causé la disparition de l'espèce dans une zone de 150 kilomètres, le long de la côte Nord-Ouest de Flores. Les populations des côtes Nord et Ouest sont également menacées par la déforestation et, indirectement, par la chasse aux cervidés.

On ne préservera le varan de Komodo que si l'on préserve aussi tout son environnement naturel, auquel il est inexorablement lié. Par exemple, sachant que les dragons de Komodo attirent déjà 18 000 visiteurs chaque année, les régions Sud et Est de l'île, qui abritent des populations dispersées encore inconnues des zoologistes, pourraient être la base d'un plan de protection fondé sur l'écotourisme.

J'espère aussi favoriser la protection du dragon en modifiant l'usage des ressources naturelles. Les autorités locales se sont montrées intéressées par ce projet. Par exemple, l'agriculture sur brûlis pourrait être abandonnée au profit de cultures qui détruiraient moins d'espèces végétales, mais

économiquement intéressantes. De surcroît, en enseignant aux populations locales à fabriquer et à utiliser des briques, on éviterait qu'elles n'abattent les arbres à bois dur.

Le destin des varans de Komodo est aujourd'hui entre nos mains. Les décisions politiques, motivées par des soucis esthétiques, scientifiques ou économiques, peuvent nous mener vers un monde uniforme, mais elles peuvent aussi préserver le foisonnement de la nature et un peu du mystère que les cartographes du Moyen Âge traduisaient sur leurs cartes par l'avertissement : «Ici, il y a des dragons.»

Claudio CIOFI travaille aujourd'hui à la Société zoologique de Londres.

N. VILOTEAU, *Les dragons de Komodo*, Arthaud, 1992.

L. BROUGHTON, *A Modern Dragon Hunt on Komodo*, in *National Geographic*, vol. 70, pp. 321-331, 1936.

David ATTENBOROUGH, *Zoo Quest for a Dragon*, Lutterworth Press, 1957, réédition par Oxford University Press, 1986.

Walter AUFFENBERG, *The Behavioral Ecology of the Komodo Monitor*, University of Florida-University Presses of Florida, 1981.

Dick LUTZ et J. Marie LUTZ, *Komodo : The Living Dragon*, nouvelle édition, Dimi Press, Oregon, 1996.

La métamorphose d'Andreï Sakharov

GENNADY GORELIK

Andreï Sakharov est le «père» de la bombe à hydrogène soviétique. Pourtant il fut lauréat du prix Nobel de la paix pour son combat en faveur des droits de l'homme. Comment s'est-il ainsi transformé ?

« Le nuage devient gris, quitte rapidement le sol et monte en tournoyant, avec des reflets orangés [...] L'onde de choc me claque dans les oreilles et secoue violemment mon corps. Un bruit sourd, prolongé, menaçant retentit, puis s'atténue peu à peu [...] Le nuage, qui remplit maintenant la moitié du ciel, prend alors une couleur noire sinistre. »

Le 12 août 1953, Andreï Dmitrievitch Sakharov devient ainsi le père de la bombe à hydrogène soviétique. La voiture qu'il conduit dans le secteur de l'explosion s'arrête près d'un aigle qui tente en vain de s'envoler : ses ailes sont gravement brûlées. Sakharov s'émeut, et il écrira dans ses Mémoires : « On m'a dit que des milliers d'oiseaux sont détruits à chaque test ; ils s'envolent au moment de l'éclair, mais retombent ensuite, brûlés et aveuglés. »

Les victimes des tests de ses bombes, de plus en plus efficaces, l'ont tourmenté durant toute sa vie, mais ses nombreuses tentatives infructueuses pour limiter les tests l'ont convaincu du peu de contrôle qu'il exerçait sur les armes qu'il avait créées.

Quel parcours intellectuel a conduit Sakharov à devenir l'avocat acharné des droits de l'homme ? Des documents naguère confidentiels et certains de ses écrits sont aujourd'hui conservés aux Archives Sakharov de Moscou et ils attestent une évolution naturelle, qui s'enracine dans sa participation au programme soviétique d'armement. Pendant des années, Sakharov a jugé que l'Union soviétique devait disposer d'un armement nucléaire et thermonucléaire capable d'éviter une attaque par les

États-Unis. Selon lui, cet équilibre était indispensable pour prévenir une agression de leur part. Sa transformation ne résulte pas de l'émergence d'une idée différente à ce sujet, mais plutôt d'une meilleure connaissance des armes et de la politique militaire.

Un gâteau roulé

Sakharov naît le 21 mai 1921, dans une famille de l'intelligentsia moscovite. Dans son enfance, ses parents donnent l'exemple de la dignité, de l'entraide et du respect du travail. Son père, professeur de physique et auteur de livres de vulgarisation scientifique, est un homme droit et humain. En 1938, à la veille de la guerre contre l'Allemagne, le jeune Andreï entre à l'Université de Moscou. Une faiblesse cardiaque lui évite l'incorporation militaire, mais, désireux de contribuer à l'effort de guerre, il refuse de poursuivre ses études supérieures. C'est donc en tant qu'ingénieur dans une usine de munitions, à Olyanovsk, qu'il invente des systèmes magnétiques pour tester les balles fabriquées. Il rencontre, dans l'usine, Klavdia Vikhireva, une technicienne de laboratoire, qu'il épousera à l'âge de 22 ans.

À cette époque, il résout également quelques problèmes de physique ; son père transmet les solutions à Igor Tamm, le plus influent des physiciens de l'Institut de physique de Moscou, et, au début de l'année 1945, Sakharov est invité à préparer une thèse sous sa direction.

Selon Sakharov lui-même, son destin – et peut-être celui du monde

entier – bascule au cours de la nuit du 6 août 1945, lorsque la première bombe atomique explose sur Hiroshima.

Ses travaux en physique pure sont de premier ordre. Sa théorie sur la propagation des sons dans des liquides contenant des bulles a été très utile pour la mise au point des sonars qui détectent les sous-marins. Il calcule également comment les particules nommées muons catalysent la fusion de deux noyaux atomiques. Les muons remplaceraient les électrons, de sorte que les atomes deviendraient beaucoup plus petits ; on pourrait alors rapprocher davantage les noyaux et, de ce fait, les faire fusionner plus facilement.

Passionné de physique fondamentale, Sakharov refuse deux fois de participer au programme d'armement nucléaire soviétique, mais, un jour de 1948, Tamm et ses collaborateurs, dont Sakharov, reçoivent l'ordre d'étudier la faisabilité d'une bombe à hydrogène.

Dans une bombe atomique, la fission de noyaux lourds, tels que l'uranium 235, en deux fragments, s'accompagne d'une libération d'énergie. À l'inverse, une bombe à hydrogène résulte de la fusion de noyaux légers, le plus souvent du deutérium et du tritium. Ces isotopes de l'hydrogène, dont les noyaux sont respectivement composés de un proton et un neutron, et de un proton et deux neutrons (contre un proton seulement pour l'hydrogène),

1. ANDREÏ SAKHAROV en 1950. Cette année-là, il est assigné à résidence dans une ville secrète soviétique, où il met au point les bombes à hydrogène.



Elena Bonner

libèrent une quantité d'énergie plus grande encore quand ils fusionnent.

La fusion thermonucléaire nécessite le contact de deux noyaux chargés positivement, malgré leur répulsion mutuelle. Yakov Zel'dovich, un brillant physicien qui dirige la recherche théorique pour le programme d'armement nucléaire, propose d'utiliser l'énergie libérée par une réaction de fission pour

provoquer la fusion à l'intérieur d'un tube de deutérium. Ce procédé, surnommé *Truba* (qui signifie «tube» en russe), dérive certainement d'un plan de la «superbombe» américaine transmis aux Soviétiques par le physicien et espion Klaus Fuchs en 1945.

Sakharov utilise ses compétences en physique théorique et en ingénierie pour déceler les inconvénients de

Truba. Il propose un mécanisme radicalement différent, la *Sloika*, du nom d'une pâtisserie russe analogue aux roulés à la confiture : une sphère, composée d'une bombe atomique centrale, est entourée de couches alternées de deutérium et d'éléments lourds, tel l'uranium naturel. Les électrons libérés par l'explosion atomique centrale compriment l'uranium et provoquent la fusion du deutérium. Celle-ci libère des neutrons qui permettent la fission de l'uranium, et ainsi de suite. Les Soviétiques nomment ce processus «sakharisation», littéralement «sucrage» (le mot *sakhar* signifie «sucre», en russe). Vitaly Ginzburg améliore le principe en proposant le deutériure de lithium à la place du deutérium.

Grâce à ces contributions, les Soviétiques rattrapent les Américains, qui ne découvrent les défauts de la «superbombe en tube» qu'en 1950. Stanislaw Ulam et Edward Teller, du Laboratoire de Los Alamos, conçoivent alors, rapidement, un nouveau modèle : la course aux armements thermonucléaires est engagée.

Sakharov, patriote, est fasciné par la physique de la fusion, et il met beaucoup d'ardeur dans ses études de la bombe. Il pense que la «parité stratégique» ou la «dissuasion» empêcheront toute guerre nucléaire. Son investissement émotionnel dans le projet est immense : «La force destructrice monstrueuse, l'échelle de notre entreprise et le prix payé par notre pays pauvre, affamé, déchiré par la guerre [...] tout cela stimulait notre sensibilité et nous incitait à faire un maximum d'efforts pour que les sacrifices – que nous acceptions comme inévitables – ne soient pas vains. Nous étions habités par une véritable psychologie de la guerre.»

Une ville secrète

Toutefois, Sakharov ne perd pas son sens critique : invité à adhérer au Parti communiste, il refuse en raison des crimes commis par le Parti. En mars 1950, Tamm et lui-même sont exclusivement affectés au travail sur la bombe dans une ville secrète où vivent et travaillent les concepteurs d'armes. Ce centre militaire a été construit par des prisonniers de la vieille ville de Sarov, siège d'un célèbre monastère orthodoxe, à environ 500 kilomètres de Moscou. La ville entière, entourée de fils de fer barbelés, est effacée de toutes les cartes. Elle n'est connue que des initiés, notamment sous le nom de



German Goncharov

2. LE VIEUX MONASTÈRE DE SAROV. Sakharov apprit ultérieurement que le centre militaire d'Arzamas-16 avait été construit par des prisonniers de Sarov, une ville renommée pour son monastère orthodoxe, située à environ 500 kilomètres de Moscou.



Vladimir Museum and Archive

3. LE CENTRE DE RECHERCHES où naquit la bombe à hydrogène soviétique. Toute la ville était entourée de fils de fer barbelés et rayée des cartes. Elle était connue sous divers noms de code, notamment Arzamas-16.

code Arzamas-16. Parfois aussi, elle est surnommée Los Arzamas, en référence à la ville américaine où se déroule le projet Manhattan.

Avec les autres physiciens d'Arzamas, Sakharov passe ses journées à affiner les détails de la bombe, mais il trouve le temps de mettre au point une théorie de confinement des plasmas. Les plasmas sont des sortes de gaz où les électrons sont séparés des atomes. Un plasma détruirait n'importe quel mur fait de matière, mais on peut le confiner dans un champ magnétique. Ce principe, à l'origine du réacteur Tokamak, reste aujourd'hui l'idée la plus prometteuse pour produire de l'énergie à partir de réactions contrôlées de fusion. En russe, *tokamak* désigne une chambre à bobine magnétique ayant la forme d'un tore (voir la figure 6).

En novembre 1952, la première bombe thermonucléaire américaine explose. Neuf mois plus tard, la *Sloïka* est prête. Cependant, à la dernière minute, le physicien Viktor Gavrilov, qui connaît la météorologie, envisage la propagation des retombées radioactives de l'explosion et ses conséquences sur les populations voisines. Personne n'a songé à ce problème, mais les physiciens évaluent rapidement la configuration des retombées et concluent qu'il faut évacuer des milliers de personnes. La recommandation est suivie d'effet, bien que, comme Sakharov l'apprend ensuite des autorités, ce type de manœuvre provoque généralement 20 à 30 morts.

Le test de la *Sloïka* est un succès : l'énergie libérée est environ 20 fois supérieure à celle de la bombe d'Hiroshima. En quelques mois, Sakharov devient, à l'âge de 32 ans, le plus jeune physicien élu à l'Académie des sciences soviétique, il reçoit le prix Staline et est promu Héros du travail socialiste (il le sera encore à deux reprises). Le gouvernement soviétique nourrit de grands espoirs à l'égard de Sakharov : il est brillant, sans être ni juif (contrairement à Zel'dovich et Ginzburg) ni compromis sur le plan politique (contrairement à Tamm).

Comme le rayon d'action de la *Sloïka* ne peut être augmenté indéfiniment, Sakharov et Zel'dovich imaginent un nouveau mécanisme, où des photons engendrés par une réaction de fission initiale compriment un tube et déclenchent ainsi la fusion à l'intérieur de celui-ci. La puissance d'une telle bombe, proche de celle

conçue par Ulam et Teller, est directement fonction de la longueur du tube utilisé.

Les éclats volent

Les physiciens d'Arzamas-16 discutent assez librement de politique, et ils disposent des publications de l'Ouest, tel le *Bulletin of the Atomic Scientist*, qui traite des dimensions sociales de l'énergie nucléaire et qui montre l'influence des chercheurs occidentaux sur la politique de leur pays. Sakharov est alors influencé par Leo Szilard, inventeur de la réaction en chaîne à l'origine de la bombe atomique, mais devenu militant antinucléaire. Les écrits d'Albert Einstein, de Niels Bohr et d'Albert Schweitzer l'influencent également.

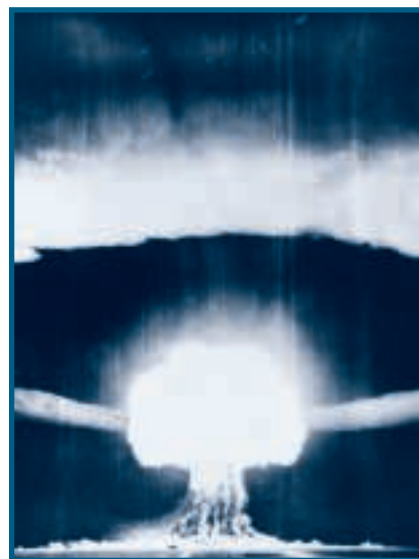
En 1955, le directeur administratif d'Arzamas-16 informe les autorités des opinions politiques dangereuses de Sakharov. Par exemple, il refuse d'être élu au Conseil des députés du peuple, une assemblée législative d'Arzamas. Ce comportement «dangereux» empirera.

En novembre 1955, l'onde de choc de l'explosion d'une des nouvelles bombes à hydrogène tue un soldat dans une tranchée qui s'effondre et un enfant dans une maison qui est soufflée. Sakharov est bouleversé. Lors du banquet de célébration, il déclare : «Que tous nos systèmes explosent avec le succès d'aujourd'hui, mais toujours sur des sites de test, et jamais sur des villes.» Le maréchal Mitrofan Nedelin lui rétorque que les scientifiques doivent se contenter de fabriquer les bombes et laisser les militaires décider de l'endroit où ils les font exploser. Cette remarque ne remet pas Sakharov en place : il apprend alors la génétique, afin de savoir combien de cancers et combien de mutations seront dus aux essais nucléaires.

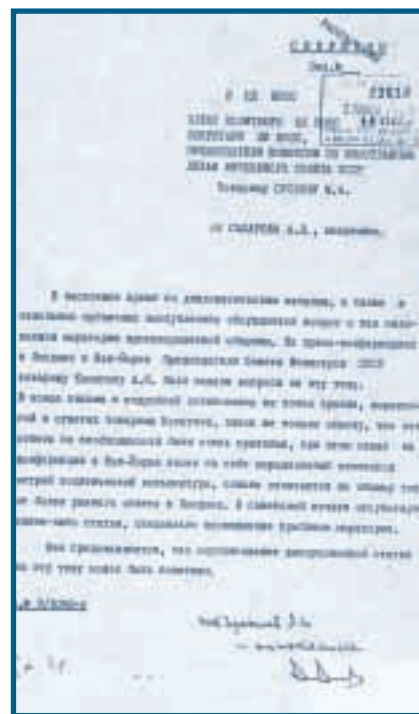
En 1957, la presse américaine annonce la conception d'une bombe «propre», avec peu d'éléments de fission et aucune retombée radioactive. Néanmoins Sakharov calcule qu'une bombe «propre» d'une mégatonne (l'équivalent d'un million de tonnes de TNT) provoquerait dans le monde 6 600 morts par cancer ou par mutation au cours d'une période de 8 000 ans, en raison de l'interaction des neutrons de l'explosion et de l'azote atmosphérique (cette interaction forme du carbone 14 radioactif). En 1958, il écrit, dans le journal soviétique *Energie atomique*, que les essais atmosphériques de toute

bombe à hydrogène – «propre» ou non – sont dangereux.

Le premier secrétaire du Parti communiste soviétique, Nikita Khrouchtchev, cautionne cet article à des fins politiques : en mars 1958, il annonce la suspension des essais nucléaires soviétiques. En revanche, Sakharov ne



4. *SLOÏKA*, une bombe à hydrogène fondée sur une idée de Sakharov, fut testée en 1953 à Semipalatinsk, en Sibérie. La photographie montre le champignon atomique et l'onde de choc.



5. DANS CETTE LETTRE, Sakharov demande à son gouvernement (la première page est reproduite) l'autorisation de publier un article où sont décrits les dangers des missiles antibalistiques. L'autorisation lui est refusée, Sakharov écrit alors un essai qui parvient à l'Ouest.

joue pas avec les résultats de ses études ; il se préoccupe sincèrement des victimes qui s'ajoutent à toutes les personnes qui souffrent et meurent déjà dans le monde. L'impunité de ces crimes le contrarie : comment prouver qu'un décès est dû à des radiations ?

Dans son livre intitulé *Sur l'avenir nucléaire*, Teller publie la même année l'évaluation faite par la majorité des experts américains et soviétiques : la dose de radiations émises lors des essais sera environ 100 fois inférieure à celles produites par d'autres sources, tels les rayons cosmiques ou les examens radiographiques médicaux. Selon lui, les radiations dues aux essais diminuent l'espérance de vie d'environ deux jours, tandis qu'un paquet de cigarettes quotidien la réduit 1 000 fois plus. «On a prétendu, conclut-il, qu'il ne faut pas mettre de vie humaine en danger. N'est-il pas plus réaliste, et plus conforme aux idéaux de l'humanisme, de tendre vers une vie meilleure pour toute l'humanité ?» Pour Sakharov, cette affirmation ressemble au proverbe soviétique : «Quand on fend du bois, les éclats volent.» Dès lors, il se sent responsable de toute mort provoquée par les retombées des essais.

Pendant le moratoire soviétique, les Américains et les Britanniques poursuivent leurs essais. Après six mois d'interruption, Khrouchtchev, furieux, ordonne la reprise des essais. Sakharov convainc alors Igor Kurchatov, le responsable scientifique du programme nucléaire, d'expliquer à

Khrouchtchev les avantages des simulations et des expériences à petite échelle : Khrouchtchev rejette le conseil. Quand Sakharov réitère sa demande, en 1961, Khrouchtchev lui répond de laisser la politique à ceux qui y comprennent quelque chose.

En 1962, Sakharov apprend que deux modèles de bombes à hydrogène très similaires vont être testés. Il tente d'éviter un des essais en utilisant toutes ses ressources. En vain. Lorsque la deuxième bombe explose, il pose le front sur son bureau et pleure.

En 1963, en revanche, Sakharov gagne une bataille. À cette époque, Khrouchtchev est affaibli par l'échec de ses réformes agricoles et industrielles, ainsi que par le désaccord avec la Chine. Quand Sakharov propose de renoncer aux essais les plus dangereux – les essais à ciel ouvert –, son idée est acceptée par les autorités. Le Traité d'arrêt limité des essais dans l'atmosphère, les mers et l'espace est signé à Moscou, le 5 août, par les États-Unis, l'URSS et le Royaume-Uni (la France ne le signe pas !). Sakharov est à juste titre fier de sa contribution ; les effets dangereux des essais à ciel ouvert cessent de le tourmenter.

Après ce succès, Sakharov abandonne le programme sur la bombe, mais il considère que son action politique, en matière d'armement, n'est pas inutile. Simultanément, il revient à ses premières amours : la science pure. Par exemple, il identifie les conditions susceptibles d'expliquer l'excès de

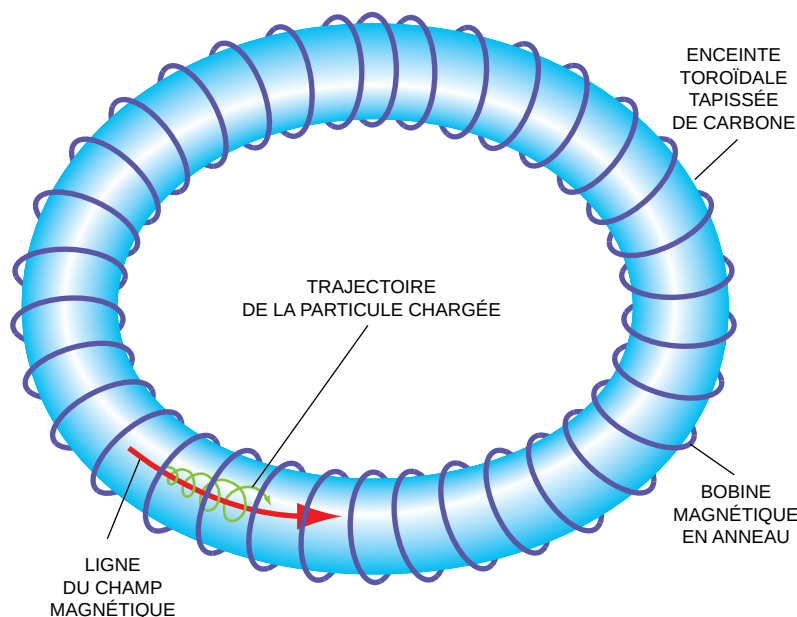
matière par rapport à l'antimatière dans l'Univers (voir *L'asymétrie de la matière*, par Helen Quinn et Michael Witherell, *Pour la Science*, janvier 1999). Vladimir Kartsev, un jeune physicien qui lui demande alors une préface pour un ouvrage de vulgarisation scientifique, se souvient d'un homme très heureux, plein d'énergie et d'idées.

Alea jacta est

En 1966, alors que Leonid Brejnev est au pouvoir depuis deux ans, Sakharov signe une pétition contre une dangereuse tentative de réhabilitation de Staline. En décembre de la même année, il participe à une manifestation en faveur des droits de l'homme. Sa lettre de soutien aux dissidents, adressée au gouvernement, lui vaut une importante diminution de salaire et la perte de l'un de ses postes administratifs.

Sa vision du monde se radicalise. En juillet 1967, il invite par courrier secret le gouvernement à accepter le moratoire sur le système de missiles antibalistiques proposé par les États-Unis parce qu'une course aux armements augmenterait la probabilité d'une guerre nucléaire. Il sollicite également l'autorisation de publier dans un journal soviétique un manuscrit de dix pages pour aider «les scientifiques américains à modérer les plus véhéments d'entre eux». L'analyse de cet article montre que Sakharov se considère encore comme un expert dévoué aux «intérêts essentiels de la politique de défense soviétique». Voyant cette autorisation refusée, Sakharov conclut que les autorités soviétiques sont inconscientes du danger qu'elles font courir au monde.

Au début de 1968, Sakharov commence l'écriture de ses *Réflexions sur le progrès, la coexistence pacifique et la liberté intellectuelle*, où il décrit le grave danger d'une guerre thermonucléaire et aborde d'autres sujets, telles la pollution, la surpopulation et la guerre froide. Il défend l'idée que la liberté intellectuelle – et, plus généralement, les droits de l'homme – représente l'unique base de la sécurité internationale, et il appelle à la convergence du socialisme et du capitalisme vers un système qui combinerait les meilleurs aspects des deux systèmes. Sakharov ne cache pas ces idées : ses textes sont dactylographiés par des secrétaires d'Arzamas-16 qui, automatiquement, en font une copie qui est transmise au KGB.



6. PLAN d'un réacteur Tokamak, d'après une idée et un dessin de Sakharov. Le plasma composé des noyaux de deutérium et de tritium est confiné par le champ magnétique toroïdal. Il atteint ainsi une température et une pression suffisantes à la fusion.

À la fin avril, Sakharov transmet cet essai radical au samizdat, le système de presse clandestine ; puis, deux mois plus tard, il l'envoie à Leonid Brejnev (qui en avait déjà connaissance grâce au KGB). En juillet, l'article est diffusé par la BBC et publié dans le *New York Times*. Sakharov se souvient avoir écouté l'émission de la BBC avec satisfaction : «Les jeux étaient faits».

Sakharov est alors assigné à résidence à Moscou et empêché de se rendre à Arzamas-16, où il a pourtant passé 18 ans de sa vie. Il reste un triple Héros du travail socialiste, qui, de surcroît, connaît les secrets les plus sensibles de la nation : il n'est limogé du programme de recherches sur la bombe que l'année suivante. Peu après, sa femme meurt d'un cancer, le laissant avec ses trois enfants, dont le plus jeune a 11 ans. Sakharov fait don de toutes ses économies à un centre anticancéreux et à la Croix-Rouge soviétique.

Il lui reste toutefois 20 ans à vivre, pendant lesquels il rencontre Elena Bonner, dont il tombe éperdument amoureux ; il reçoit le prix Nobel de la paix en 1975, passe sept années en exil à Gorki, et, paradoxalement, est élu au parlement soviétique sept mois avant sa mort.

«Si je me sens libre, affirme-t-il, c'est uniquement parce que seule mon analyse morale concrète fonde mon action.» Au cours des années 1970, l'un de ses collègues, Vladimir Ritus, lui demande pourquoi il s'était tant exposé. Sakharov répond : «Qui d'autre que moi aurait pu le faire?» Son destin et son travail sur la bombe à hydrogène lui avaient imposé des choix, il avait choisi.

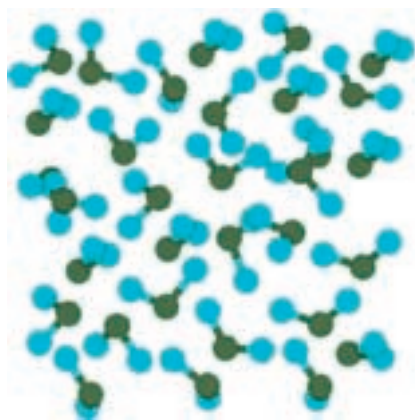
Gennady GORELIK est chercheur au Centre de philosophie et d'histoire des sciences de l'Université de Boston.

S. DRELL et L. OKUN, *Andreï Dmitrievich Sakharov*, in *Physics Today*, vol. 43, pp. 26-36, août 1990.

Alfred A. KNOPE, *Andreï Sakharov : Mémoires*, traduit du russe par Richard Lourie.

Sakharov Remembered : A Tribute by Friends and Colleagues, sous la direction de Sidney D. Drell et Sergei P. Kapitza, American Institute of Physics, 1991.

New Light on Early Soviet Bomb Secrets, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 49, n° 11, novembre 1996.



La taille des molécules

ROLAND LEHOUCQ

Les liquides sont peu compressibles, forment des gouttes et s'évaporent. De ces observations, le physicien déduit la taille d'une molécule.

Les gaz sont compressibles, pas les liquides, répète-t-on au collège. Si les liquides sont si peu compressibles, c'est que leurs molécules sont presque jointives : en supposant que les molécules sont des sphères dures, deux molécules sont séparées par une distance environ égale à leur taille. Pour connaître la taille d'une telle molécule, il suffit ainsi de déterminer la distance entre deux molécules voisines.

Nous allons estimer cette distance de façon indirecte en tenant compte du fait que si deux molécules sont jointives, c'est qu'elles s'attirent.

SURFACES MINIMALES

Les molécules d'un liquide s'attirent pour former des gouttes, formes qui résultent de la tension de surface du liquide, dont on observe les effets par une expérience facile à imaginer. Tirons sur un film d'eau étendu dans un cadre métallique dont un côté est mobile (voir la figure 1). À cette traction, qui tend à augmenter la

surface du film, s'oppose la tension superficielle. Pour un cadre de un centimètre de largeur, on équilibre la tension superficielle (T) par un poids dont la masse est égale à 0,145 gramme (dans la pratique, le montage est différent, mais le principe est identique).

Pourquoi les liquides répugnent-ils à ce que leur surface augmente ? Une molécule située à l'intérieur du liquide est attirée par toutes ses voisines de la même façon, de sorte que la force résultante qui s'exerce sur elle est nulle en moyenne (voir la figure 2a). En revanche, une molécule située en surface est frustrée : elle est attirée par les molécules de l'intérieur, mais comme il n'y a pas de molécules au-dessus de la surface, une force attire cette molécule vers l'intérieur du liquide (voir la figure 2b). Il s'ensuit que l'énergie de liaison d'une molécule de surface est inférieure à celle d'une molécule de l'intérieur. Pour amener une molécule en surface il faut donc dépenser de l'énergie. La création d'une interface requiert ainsi une énergie proportionnelle à l'augmentation de l'aire. Le quotient de l'énergie dépensée par l'aire créée est la tension superficielle (notée T , c'est une énergie par unité de surface ou une force par unité de longueur).

Ainsi, en l'absence de forces extérieures, un volume de liquide adoptera spontanément la forme qui minimisera son énergie, donc sa surface. De ce point de vue, la forme sphérique est la meilleure : à volume constant, c'est celle qui a la surface minimale. C'est la forme que prend le whisky du Capitaine Haddock lorsqu'il se trouve en impesanteur dans la bande dessinée *On a marché sur la Lune* ou celle que prennent des petites gouttes de mercure par exemple, pour lesquelles la gravité est négligeable.

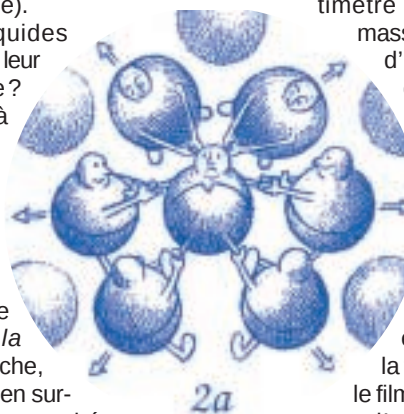
Quelle énergie a-t-on dépensé pour augmenter de un centimètre carré la surface du film d'eau ? Cette énergie, ou travail, est mesurée par la descente du poids qui équilibre la tension superficielle quand la surface augmente de un centimètre carré. Le travail d'une

masse m quand on la déplace d'une hauteur h est mgh , où g est l'accélération de la pesanteur. Ici, le travail est égal à 0,145 gramme multiplié par g multiplié par un centimètre, soit $1,42 \times 10^{-5}$ joule par centimètre carré. Attention, nous avons mesuré par cette expérience le double de la tension superficielle, car le film d'eau a deux interfaces avec l'air, il exerce donc une tension superficielle double.

L'ÉVAPORATION

Une dernière observation nous permettra d'évaluer la taille d'une molécule : les liquides s'évaporent. Les molécules d'un liquide s'agitent frénétiquement et la vitesse d'agitation moyenne augmente avec la température du liquide. Les molécules qui ont une énergie cinétique (caractéristique de l'agitation) supérieure à l'énergie qui les lie à leur voisines (énergie de liaison) peuvent s'échapper : le liquide s'évapore et il se transforme en gaz.

Habituellement, pour évaporer un liquide, on le chauffe, ce qui revient à augmenter la vitesse des molécules, donc leur énergie cinétique. On pourrait, par la pensée, séparer les molécules avec un couteau bien affûté : on découperait un volume du liquide en tranches d'épaisseur égale à la distance d entre les molécules. Pour un cube de un centimètre de côté il y a $1/d$ tranches (où d est en centimètre). Pour isoler toutes les molécules, il faut aussi effectuer $1/d$ découpes dans les deux directions perpendiculaires



2a



1