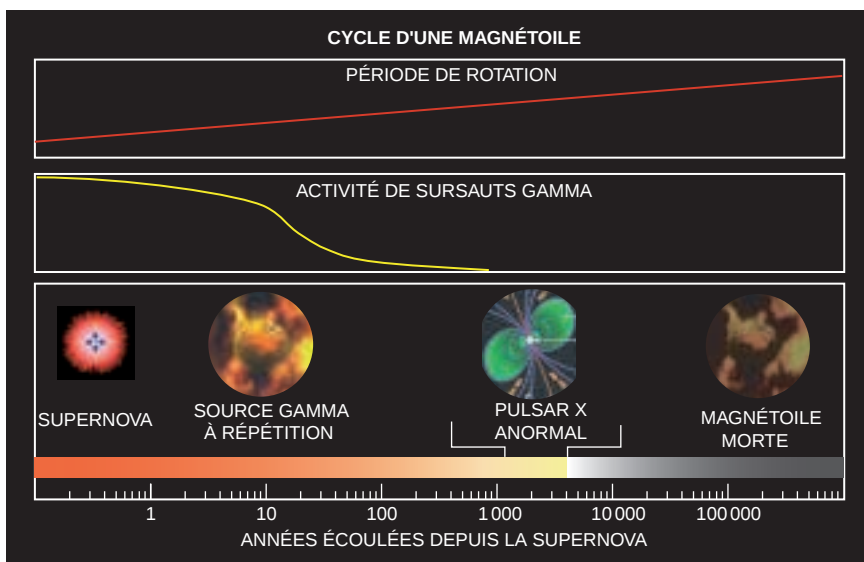




7. UNE MAGNÉTOILE COMMENCE SA VIE en tant que supernova, une explosion d'étoile. Durant l'explosion, l'étoile à neutrons se transforme en une puissante source de rayonnement gamma à répétition. Cette phase dure 10 000 ans environ, après quoi, durant 40 000 ans environ, l'étoile à neutrons devient un pulsar X «anormal», une étoile à neutrons à la rotation particulièrement lente. Finalement, la magnétoile n'émet plus de rayonnement décelable et devient un objet sombre.

de leur lieu de naissance. Les astrophysiciens supputent que le fort champ magnétique des magnétoiles, 1 000 fois plus intense que celui des étoiles à neutrons ordinaires, focalise les neutrons émis juste après l'explosion. Comme un tuyau d'arrosage qui part dans la direction opposée à celle du jet d'eau, par réaction, l'étoile à neutrons résultante est accélérée jusqu'à 1 000 kilomètres par seconde. Les observations confirment la mobilité des magnétoiles : on ne les observe pas au centre des vestiges de leur supernova, mais assez décentrées, voire très éloignées.

Autre caractéristique attendue : les magnétoiles perdraient leur énergie de rotation assez vite par émission d'ondes radio, car le freinage de la rotation est proportionnel au carré du champ magnétique et à l'inverse de la période. La vérification de cette prédiction n'était pas chose aisée, car l'allongement prévu n'est que de deux millisecondes par an. Grâce au satellite X de la NASA Rossi, Ch. Kouveliotou et ses collègues ont observé ce ralentissement.

Le modèle semble en mesure d'expliquer un autre mystère de l'astrophysique, celui des prétendus pulsars atypiques à rayons X. Ces derniers sont des étoiles à neutrons en rotation lente, sans compagnon apparent. Ils sont anormaux, dans le sens où ils sont plus lents que ce que l'on attendrait d'une étoile à neutrons isolée et que leur spectre X est plus mou. S'agit-il de vieilles magnétoiles ? La lenteur de leur

rotation corrobore cette idée, puisque la période de rotation des magnétoiles est supérieure à celle des étoiles à neutrons ordinaires.

Combien y a-t-il de magnétoiles ? Une supernova sur dix donnerait naissance à une magnétoile, c'est-à-dire environ une tous les mille ans (dans une galaxie comme la nôtre, il y a une nouvelle supernova par siècle). La raison n'en est pas très claire, mais cette fréquence est vraisemblablement liée aux détails de l'explosion. L'étoile à neutrons nouvellement formée commence son existence en rotation très rapide, ce qui engendre à l'intérieur de l'étoile un mécanisme qui multiplie son champ magnétique par un facteur compris entre 100 et 1 000. Pendant les 10 000 premières années de sa vie, la magnétoile est une source gamma à répétition, et connaît des périodes d'activité au cours desquelles elle émet soit une succession de sursauts courts et relativement faibles (à des intervalles de quelques années), soit un sursaut majeur (à peu près un par siècle). Elle évolue ensuite en un pulsar à rayons X anormal et reste observable sous cette forme pendant environ 40 000 ans environ. Après cette période, la magnétoile sombre dans l'inactivité et l'obscurité. Elle cesse d'évoluer et rentre dans les rangs des milliards d'objets sombres de notre Galaxie (voir la figure 6).

Si ces estimations sont justes, il devrait y avoir, à un moment donné, environ dix sources gamma à répétition

dans notre Galaxie. Jusqu'à aujourd'hui, nous en avons trouvé trois, dont deux dans notre Galaxie. Ces derniers mois, Ch. Kouveliotou, E. Mazets et moi-même avons analysé les données de nos expériences et en avons conclu à la présence d'une troisième magnétoile au sein de notre Galaxie. Cet objet, SGR 1627-41, a les mêmes caractéristiques que les trois autres magnétoiles, à savoir la répétition, le spectre énergétique mou, les sursauts courts et une localisation près d'un reste de supernova avec une émission de rayonnement X associée.

Nous avons peut-être ainsi identifié le tiers des magnétoiles de notre Galaxie, mais il est également possible que la théorie surestime légèrement le nombre d'objets de ce type en activité à un moment donné. En astrophysique, un résultat exact à un facteur trois près constitue déjà une approximation satisfaisante.

Des prédictions vérifiables sont souvent le talon d'Achille d'un modèle par ailleurs solide. Faute de prévisions, un modèle peut être impossible à vérifier, mais, dans le cas où des prédictions sont possibles, elles conduisent souvent à l'abandon du modèle, quand les observations les mettent en défaut. Jusqu'à présent, le modèle de la magnétoile a passé avec succès les tests qu'on a pu lui faire subir.

À mesure que le temps passera et que nous en apprendrons davantage sur ces étranges objets grâce à une instrumentation spatiale plus élaborée, nous devons peut-être ajuster la théorie pour incorporer de nouvelles données. Ce modèle constitue pour l'instant la meilleure explication d'une énigme astronomique vieille de vingt ans, en invoquant les champs magnétiques les plus intenses connus de l'Univers.

Kevin HURLEY est astronome à l'Université de Berkeley.

K. HURLEY et al., *Precise Interplanetary Network Localization of a New Soft Gamma Repeater SGR1627-41*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 519, pp. L143, 1999.

K. HURLEY et al., *ASCA Discovery of an X-ray Pulsar in the Error Box of SGR1900+14*, in *Astrophysical Journal Letters*, vol. 510, pp. L111, 1999.

K. HURLEY et al., *A Giant Periodic Flare from the Soft Gamma Ray Repeater SGR1900+14*, in *Nature*, vol. 397, p. 41, 1999.

Réquisitoire contre les simulations nucléaires

CHRISTOPHER PAINE

Le remplacement des essais nucléaires par des simulations numériques a de nombreux inconvénients.

La première utilisation militaire de la bombe atomique, en août 1945, a fait 210 000 victimes à Hiroshima et à Nagasaki. Dans les décennies qui ont suivi, l'urbanisation croissante et l'accroissement de la puissance des armes thermonucléaires ont centuplé leur pouvoir destructeur : aujourd'hui, l'explosion d'une ou deux bombes nucléaires au-dessus de Bombay ou de Tokyo anéantirait 15 millions de personnes.

À la fin de la guerre froide, de nombreux pays ont négocié un traité qui interdit les essais nucléaires : le Traité d'interdiction totale des essais nucléaires limite les recherches sur la fabrication de nouveaux types de bombes, ainsi que les tests de validation des armes entreposées. À lui seul, ce traité ne peut empêcher la dissémination des armes nucléaires, mais il devrait ralentir la mise au point d'armes fondées sur les réactions de fusion.

Bien que l'enjeu soit la fin de la course aux armements nucléaires et une limitation de l'accès à l'arme nucléaire par les petits États guerriers, plusieurs pays tels que les États-Unis, la Russie, la Chine ou l'Inde n'ont toujours pas ratifié le traité. Les États-Unis, notamment, qui avaient naguère prôné le désarmement, sont en queue de peloton dans la lutte contre la prolifération nucléaire. Les signataires du traité examinent l'avancement d'une entrée en vigueur de celui-ci, mais les discussions sont entravées par les hésitations américaines.

Sous la conduite de Bill Clinton, l'armée américaine se déclare prête à envisager un avenir sans essais nucléaires, mais elle veut d'abord des armes perfectionnées. Afin d'évaluer

et de perfectionner l'arsenal nucléaire, le gouvernement et la majorité républicaine du Congrès américain soutiennent un «programme de gestion et de surveillance scientifique des arsenaux», qui associe, comme le programme français, des simulations numériques de pointe et de nombreuses expériences de laboratoire ; ce programme doit, selon ses partisans, donner aux États-Unis la capacité d'effectuer des simulations tridimensionnelles détaillées d'explosions nucléaires.

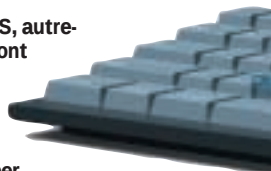
Une directive du Congrès, dissimulée dans une loi budgétaire de la défense, a créé ce programme en 1993. Le budget alloué est géré par le Bureau des programmes de défense du ministère de l'Énergie ; sur 15 ans, 420 milliards de francs devraient être dépensés. C'est près de trois fois le coût du Projet Manhattan (le projet de construction des premières bombes atomiques, lors de la Seconde Guerre mondiale) ou de la mission Apollo. Le gouvernement américain dit avoir besoin d'une capacité d'«expérimentation virtuelle» pour garantir le transport et l'entreposage des armes nucléaires en toute sécurité par temps de paix, et aussi pour connaître l'efficacité des armes qui seraient construites en cas de conflit.

Les essais virtuels remplaceraient, au moins partiellement, les explosions souterraines. Ils montreraient comment modifier les armes nucléaires pour changer leurs performances et pourraient servir à la mise au point d'armes nouvelles, qui pourraient être testées immédiatement en cas de sortie rapide du Traité d'interdiction des essais. Ce gros programme a clairement pour but d'apaiser des forces électorales qui s'opposent à l'interdiction des essais. Il

est risqué, car si ses objectifs ambitieux ne sont pas atteints, les opposants au traité auront de nouvelles raisons d'exiger le report de la ratification du traité jusqu'à ce que l'efficacité des simulations soit démontrée.

Même si le programme atteint ses buts, il est contestable à bien des égards. D'un point de vue diplomatique global, le lancement d'un programme d'essais virtuels fait perdre une occasion importante de désarmement : on se lance dans un nouveau programme militaire, au lieu de tendre vers un désarmement nucléaire global. Pourtant les États-Unis furent l'un des architectes principaux du traité, qui limitait à cinq le nombre de puissances nucléaires reconnues en échange de l'engagement pris par ces puissances de réduire leurs programmes nucléaires militaires. Avec le programme de surveillance, cependant, le ministère américain de l'Énergie cherche à accroître les capacités de conception d'armes nucléaires que l'interdiction des essais tente justement de contraindre. Pis encore, le programme risque de pousser les pays sans force nucléaire ni capacité de calcul à effectuer des essais nucléaires. Enfin il prône des collaborations, sur des thèmes stratégiques, entre les laboratoires militaires américains et la communauté scientifique internationale : autrement dit, le programme de surveillance accroît les risques de prolifération nucléaire.

1. LES ESSAIS NUCLÉAIRES, autrefois effectués sous terre, sont aujourd'hui interdits par un traité international. Plusieurs pays ont des programmes de simulation de ces essais à l'aide de superordinateurs et de lasers puissants.





Ordinateurs et laboratoires

Le ministère américain de l'Énergie a conçu le programme de surveillance pour éviter les essais nucléaires, mais il a simultanément donné aux États-Unis un moyen de réactiver ses laboratoires militaires. La communauté nucléaire des États-Unis, et ses alliés au Congrès, ont lutté contre l'interdiction des essais pendant toute la guerre froide, mais, en septembre 1992, le Congrès a finalement interdit les tests nucléaires, fixant le 30 septembre 1996 comme date limite des essais américains et comme début d'une négociation d'un traité international d'interdiction des essais. B. Clinton a prolongé deux fois le moratoire unilatéral américain et, en août 1995, il a pris la décision de chercher une «solution zéro» – une interdiction de toutes les explosions expérimentales, quelle que soit les réactions nucléaires utilisées. Cette année-là, les laboratoires américains de recherche sur les armes nucléaires – Los Alamos, Sandia et Lawrence Livermore – n'avaient plus effectué de tir expérimental depuis près de trois ans.

Les budgets alloués aux activités nucléaires militaires décroissaient depuis dix ans, et les personnels des arsenaux nucléaires pensaient à changer d'activité ; toutefois le programme de surveillance a relancé les activités. Le financement annuel, de 27 milliards de francs en moyenne, est aujourd'hui supérieur à ce que dépensait le ministère américain de l'Énergie (22 milliards de francs par an) pour l'armement pendant la guerre froide.

Le programme se fonde principalement sur trois superordinateurs, qui sont parmi les plus rapides du monde. Équipées de plusieurs milliers de microprocesseurs qui calculent en parallèle, ces machines font deux billions d'opérations par seconde. Le ministère américain de l'Énergie prévoit d'utiliser des ordinateurs 100 fois plus rapides en l'an 2005.

Ces ordinateurs traitent des données recueillies en laboratoire : une énorme infrastructure expérimentale indique le comportement des matériaux constitutifs des armes aux températures et aux pressions extrêmes, et les concepteurs d'armes nucléaires font des expériences coûteuses pour

vérifier leurs prévisions informatiques. Par exemple, comme on connaît mal les phénomènes qui ont lieu quand les rayons X issus de la fission explosive du premier étage d'une arme chauffent l'étage secondaire, où a lieu la fusion, un budget de 12 milliards de francs a été alloué à la construction de nouveaux laboratoires, telle l'Infrastructure américaine de fusion, au Laboratoire Lawrence Livermore. Quand cette installation fonctionnera (après 2005), des faisceaux laser puissants tenteront de produire une impulsion de rayons X possédant la forme et la durée nécessaires pour comprimer et chauffer uniformément une minuscule gouttelette gelée de deutérium et de tritium, fusionnant ces isotopes lourds de l'hydrogène selon des réactions observées dans les bombes nucléaires ou dans les étoiles.

Les risques de prolifération

Un programme de recherches aussi ambitieux favorise la prolifération. Tout d'abord, il est si hypocrite qu'il prive les États-Unis de tout crédit moral dans les discussions internationales : certains signataires du Traité d'interdiction des essais nucléaires ne respecteront celui-ci que s'ils sont convaincus de la bonne foi américaine. D'autre part, des pays qui disposent déjà de l'arme nucléaire et qui n'auraient pas les moyens d'un programme analogue risqueraient de percevoir un déséquilibre stratégique et de se retirer du traité.

Selon les partisans du programme d'essais virtuels, les objectifs visés ne seront atteints qu'au prix d'une collaboration renforcée entre les spécialistes des armes nucléaires et la communauté scientifique. En l'absence d'explosions expérimentales pour valider les performances des armes, des expertises scientifiques s'imposeront, et des arbitrages nécessiteront probablement l'intervention de chercheurs de la recherche civile.

D'ailleurs, le programme actuel prévoit une intervention de la communauté scientifique bien plus vaste que de simples évaluations ou que des présentations occasionnelles, lors de réunions : l'embauche de scientifiques de haut niveau semble être la condition du succès de l'opération. Financés par des subventions quinquennales s'élevant à plusieurs



Pardy Montoya, Sandia National Laboratories

2. PLUSIEURS MILLIERS DE PROCESSEURS fonctionnent en parallèle dans ce superordinateur qui est utilisé pour la simulation des explosions nucléaires, aux Laboratoires Sandia. L'ordinateur est l'un des plus rapides du monde (le technicien représenté ici vérifie les câbles qui relient deux des huit blocs de l'ordinateur).

dizaines de millions de francs, cinq centres de recherches universitaires et de nombreux chercheurs isolés élaborent les modèles mathématiques et les algorithmes informatiques qui analysent les phénomènes physiques qui ont lieu lors des explosions nucléaires. Afin de valider les modèles physiques et les techniques numériques qui serviront dans les simulations des explosions nucléaires, les chercheurs utilisent des systèmes de complexité analogue, tels que turbines à gaz, moteurs de fusée ou étoiles périodiques.

Pour les partisans du programme de simulation, cette dissémination de la recherche scientifique de pointe sur les armes est une forme utile de «dissuasion scientifique», qui remplacera les tests nucléaires dans ce rôle. Toutefois elle a de graves inconvénients : en donnant à tous les pays des compétences qu'ils n'avaient pas toujours, elle menace la paix dans le monde.

Faux choix

Dans leur empressement à lancer un programme techniquement stimulant de simulation d'armes nucléaires, les organisateurs du programme de surveillance ont mis les pouvoirs exécutif et législatif en face d'un dilemme : soit adopter le programme des essais virtuels et accepter la responsabilité d'une prolifération, soit perdre confiance dans la fiabilité et la sécurité des arsenaux au milieu de la prochaine décennie. Ce dilemme est fondé sur plusieurs idées fausses.

En premier lieu, la sécurité des ogives nucléaires ne justifie pas un programme de plusieurs dizaines de milliards de francs. On assure la sécurité des armes nucléaires à l'aide de clôtures, de gardes, de fusils, de systèmes d'alarme, et le risque de détonation accidentelle d'une arme nucléaire ne s'accroît que si le dispositif est mal

conçu. La sensibilité des explosifs chimiques utilisés dans les ogives nucléaires n'augmente pas avec l'âge, et les circuits qui isolent électriquement le système d'allumage de l'ogive peuvent être testés et remplacés sans essais nucléaires.

Une ogive vieillissante peut exploser avec une puissance réduite, mais les documents du programme de surveillance des arsenaux américains montrent que la partie nucléaire des armes américaines peut être maintenue longtemps sans essais nucléaires : une étude de 1996 a révélé que, sur 830 défauts détectés dans les armes entreposées entre 1958 et 1993, moins de un pour cent ont été découverts lors d'essais nucléaires. Après 1970, 11 tests seulement sur 387 visaient à examiner la fiabilité des arsenaux. À un sénateur américain qui s'inquiétait des conséquences éventuelles d'une interdiction des essais, le directeur des

Les buts et les inconvénients du programme américain d'essais nucléaires virtuels

Pour mener à bien leurs essais nucléaires virtuels, les États-Unis comptent sur des superordinateurs puissants, sur la participation de la recherche civile et sur des expériences sur la fusion. Les organisateurs du programme prétendent que des capacités de simulation de pointe sont

indispensables pour le maintien de la sécurité et de la fiabilité des armes nucléaires américaines. Cependant le programme actuel est bien plus audacieux, et il débouchera sur la conception d'armes nouvelles plutôt que sur la maintenance des arsenaux existants.

But annoncé du programme d'intendance :
Garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires.

Inconvénient :
Sape les efforts américains en faveur du désarmement nucléaire.

Superordinateurs

Objectif : Mettre au point les superordinateurs les plus rapides du monde et les programmes de simulation des explosions nucléaires.

Inconvénient : Les capacités actuelles de simulation sont suffisantes pour maintenir ou refabriquer les armes nucléaires existantes.

Recherche civile

Objectif : Étude informatique de systèmes analogues aux explosions nucléaires (moteurs de fusées, supernovae...) et utilisation de ces modèles dans des simulations d'armes.

Inconvénient : La dissémination des informations sur les réactions nucléaires nuit à la sécurité globale.

Expériences sur la fusion

Objectif : Étudier les réactions de fusion en laboratoire pour vérifier les simulations informatiques.

Inconvénient : La fusion n'a jamais été réalisée en laboratoire, et les armes peuvent être entretenues par des techniques plus simples et moins coûteuses.

Le programme français de simulation

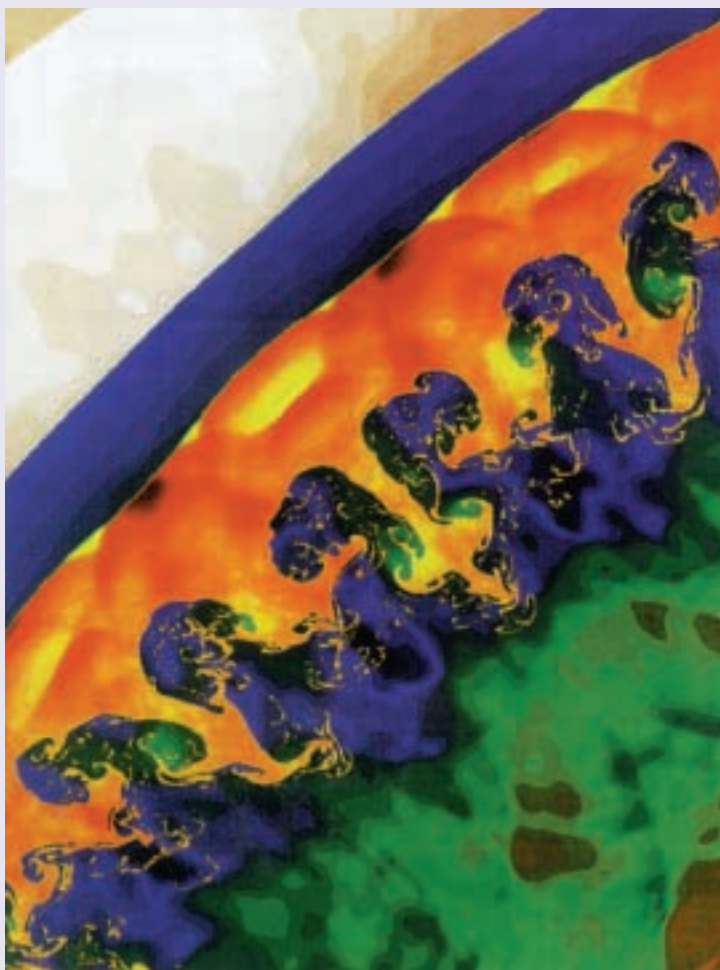
Les positions des chefs de l'État français sont claires et identiques : François Mitterrand voulait «développer et obtenir une simulation complète, qui permettra la mise au point des armes dont nous aurons besoin à l'horizon 2010, sans nouveaux essais nucléaires» ; pour Jacques Chirac, «nous disposons maintenant de tous les éléments pour relever le grand défi technologique de la simulation. Nous nous en donnerons les moyens».

En charge du programme de simulation, la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a analysé les moyens d'assurer la continuité de la capacité scientifique et technique à garantir la fiabilité et la sûreté des armes nucléaires : «Cette garantie est apportée par des équipes qui ont

acquis une maîtrise de l'ensemble des problèmes liés au fonctionnement d'une arme et qui se sont forgés une expérience à travers la réalisation des essais nucléaires passés. Leur connaissance est en partie empirique, notamment dans le domaine du thermonucléaire, qui n'a jamais pu faire l'objet d'expérimentations en laboratoire. Ces scientifiques chevronnés vont progressivement partir à la retraite et être remplacés. Le programme Simulation vise avant tout à donner aux nouvelles équipes, qui ne pourront pas recourir aux essais en vraie grandeur, des outils leur permettant de maîtriser tous les domaines de fonctionnement d'un engin nucléaire.»

Ce programme comporte trois volets : des études de physique de base, donnant une compréhension et une modélisation de chaque phénomène physique élémentaire intervenant dans le fonctionnement des armes ; la simulation numérique ; la validation expérimentale, fondée sur l'exploitation des résultats nucléaires passés et de deux grands outils expérimentaux (la machine radiographique AIRIX et le laser *Mégajoule*).

Daniel Verwaerde, qui dirige le programme Simulation du CEA, rejoint l'analyse de ses collègues américains, en ce qui concerne l'insuffisance des ordinateurs actuels pour atteindre l'objectif de la simulation ou, encore, pour



l'analyse des phénomènes physiques qui seront étudiés grâce au laser *Mégajoule*. Notamment, on devra modéliser de façon moins fruste qu'aujourd'hui les instabilités hydrodynamiques : celles-ci peuvent se développer dans la capsule de matière plastique de la cible laser (contenant le mélange fusible de deutérium et de tritium) lorsqu'elle est éclairée par les rayons X. Non maîtrisé, ce phénomène générerait la fusion, qui est d'autant plus importante que le mélange fusible est comprimé de façon plus homogène. Lors de l'expérience, les irrégularités initiales de la capsule conduiraient à un mélange hétérogène (voir la photographie ci-contre) du polymère vaporisé avec le mélange fusible ; cette dilution bloque la fusion. Pour bien comprendre les instabilités hydrodynamiques, il

faut des puissances 100 à 1 000 fois supérieures à celles des plus gros ordinateurs actuels. De même, pour comprendre les mécanismes des réactions entre le deutérium et le tritium, une puissance de calcul bien supérieure aux puissances actuelles est nécessaire.

Combien le programme Simulation coûtera-t-il ? D. Verwaerde indique d'abord que le budget français affecté à la dissuasion nucléaire a été réduit depuis 1990. Il coûte moins cher que le programme américain, parce que la France ne possède qu'un seul grand laboratoire «armes nucléaires», la Direction des applications militaires du CEA, alors que les États-Unis en ont trois. De surcroît, la France a choisi une «juste suffisance» des moyens pour la simulation, alors que les États-Unis explorent simultanément plusieurs pistes. Enfin, la France se propose d'utiliser davantage la recherche civile existante, notamment grâce aux accords de coopération signés entre le CEA et les universités. D. Verwaerde ne craint pas que les collaborations puissent engendrer une prolifération nucléaire, car les sciences fondamentales sont, de toute façon, largement partagées par la communauté internationale : «Ce qui empêche un pays proliférant de construire des armes, c'est l'accès à la matière et la possession d'une "bibliothèque d'essais" en vraie grandeur.»

Laboratoires *Sandia* a avoué que «seule une faible proportion des essais nucléaires effectués a servi à évaluer l'état des arsenaux, parce qu'on dispose de bien d'autres moyens d'effectuer ces évaluations».

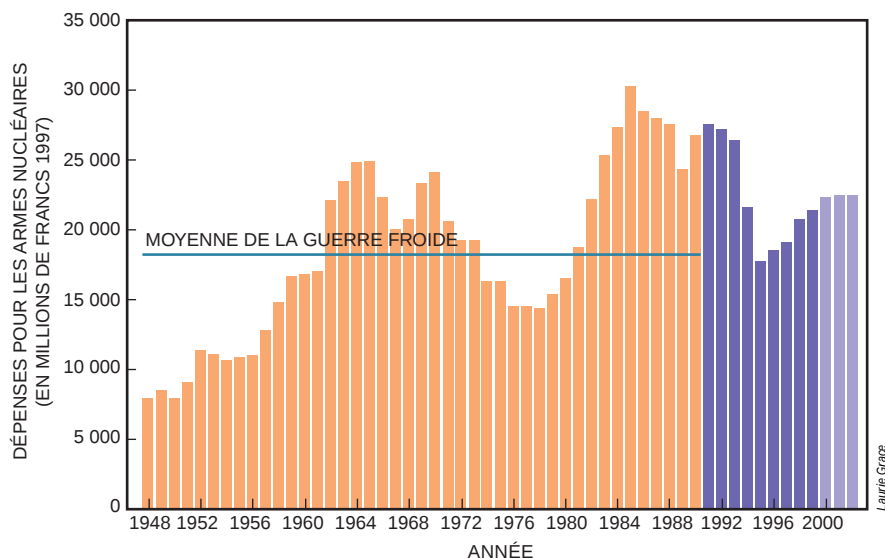
Les explosions souterraines servant peu à la détection des armes vieillissantes, le programme de surveillance n'a clairement pas pour but la maintenance des arsenaux nucléaires. On doit donc conclure que les simulations numériques et les expériences de laboratoire ne servent qu'à accroître les capacités américaines de conception d'armes nucléaires. Pis encore, le perfectionnement des simulations est inutile, puisque les États-Unis ont déjà les compétences techniques pour fabriquer de nouveaux missiles ou de nouvelles bombes, en utilisant les dispositifs nucléaires déjà validés. Les ingénieurs militaires pourraient améliorer les radars, les altimètres, les systèmes de propulsion, les générateurs de neutrons, les détonateurs, les batteries, les circuits intégrés et les autres composants des armes sans changer la partie nucléaire proprement dite.

Les partisans du projet américain d'essais virtuels prétendent également qu'ils ont besoin de calculer le moment où les performances des armes vieillissantes seront dégradées, en raison de la désintégration radioactive des matériaux des ogives ou d'autres processus. Les calculs serviraient à optimiser les calendriers de fabrication de nouvelles ogives, évitant des investissements excessifs dans la production d'ogives (à l'époque des essais souterrains, le problème du remplacement des stocks ne se posait pas : les nouvelles armes remplaçaient les modèles plus anciens).

Toutefois, pour conserver les armes en bon état, on n'a pas besoin de connaître le moment précis où les dégradations sont excessives ; on peut aussi inspecter les armes afin de savoir quand les détériorations semblent nuire aux performances. Un programme de détection, plutôt que de prévision, conduirait à un calendrier de remplacement très admissible, à un coût bien inférieur à celui du programme d'essais virtuels.

Des priorités différentes

Pourquoi la défense américaine accepte-t-elle les risques de prolifération posés par le programme de surveillance ? En priorité, un plan efficace d'intendance des arsenaux devrait



3. LE BUDGET ANNUEL du programme américain de surveillance des arsenaux nucléaires atteint 27 milliards de francs. Il est supérieur au financement qui était accordé aux armes nucléaires, pendant la guerre froide.

envisager les problèmes qui surviendraient après le départ des spécialistes des armes nucléaires. Un seul plan de ce type a été examiné : il envisageait de former une nouvelle génération de concepteurs d'armes en mettant à sa disposition des infrastructures expérimentales et des superordinateurs performants pour créer les explosions expérimentales virtuelles. Autrement dit, on aurait perpétué à grands frais des armuriers plutôt que des armes.

Il serait plus avisé, politiquement et techniquement, de reconnaître que le jugement des spécialistes d'armes nucléaires ne doit pas, ne devrait pas et ne peut probablement pas être formé sans des essais expérimentaux. Si l'on ne modifie pas les armes nucléaires, on n'aura pas à tester les nouveaux modèles. Dans cette hypothèse souhaitable, les personnels existants devraient utiliser leurs compétences pour valider les procédures de fabrication des armes qui

remplaceront les systèmes vieillissés. Une analyse attentive fait immanquablement conclure qu'un programme américain de surveillance des arsenaux plus concis, plus limité techniquement et focalisé sur le remplacement des armes actuelles garantirait mieux la défense des États-Unis tout en servant mieux les objectifs de non-prolifération nucléaire. Les contradictions du programme actuel d'essais virtuels semblent être la preuve d'une confusion considérable de la politique américaine de défense.

Dans les négociations internationales, les États-Unis prônent la non-prolifération et l'élimination de toutes les armes de destruction massive, mais ils cherchent, en fait, à conserver une suprématie nucléaire. Le gouvernement actuel et le Congrès n'ont pas pris un parti clair sur cette question qui, à l'approche des élections de l'an 2000, reste au centre d'un débat public vigoureux.

Christopher PAINE est directeur de recherche du Groupe «ressources naturelles» du Conseil américain de défense.

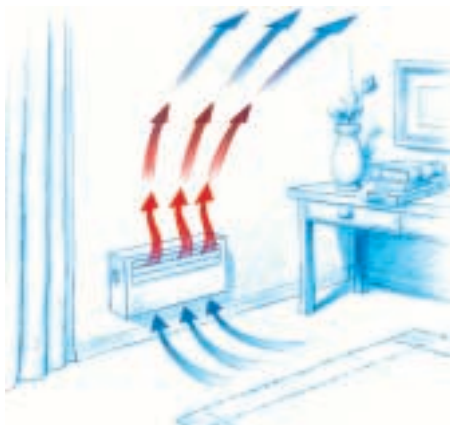
Richard L. GARWIN et Vadim A. SIMONENKO, *Nuclear Weapon Development without Nuclear Testing?*, document pour le Pugwash Workshop on Problems in Achieving a Nuclear-Weapon-Free World, 25-27 octobre 1996.

Christopher E. PAINE et Matthew G. MCKINZIE, *End Run : The U.S. Government's Plan for Designing Nuclear Weapons and Simulating Nuclear Explosions*

under the Comprehensive Test Ban, Natural Resources Defense Council, Nuclear Program, août 1997.

M.G. MCKINZIE, T.B. COCHRAN et C.E. PAINE, *Explosive Alliances : Nuclear Weapons Simulation Research at American Universities*, Natural Resources Defense Council, janvier 1998.

Sidney DRESS, Raymond JEANLOZ et Bob PEURIFOY, *Maintaining a Nuclear Deterrent under the Test Ban Treaty*, in *Science*, vol. 283, pp. 1119-1120, 19 février 1999.



Le fond de l'air effraie

ROLAND LEHOUCQ

La sensation de chaud et de froid dépend de la quantité de chaleur reçue et de la conductivité thermique des matériaux.

« **Q**uelle chaleur ! Mets le ventilateur en route pour avoir un peu d'air frais. » Qui n'a fait cette remarque par une torride journée d'été. Mais pourquoi l'air serait-il plus frais sous prétexte qu'il est agité par les pales du ventilateur ? Avec un peu de mauvais esprit, on peut même affirmer que, le moteur du ventilateur chauffant pendant son fonctionnement, la température de l'air de la pièce augmente légèrement. Pourquoi alors ressentons-nous un courant d'air frais ?

Au sortir d'une douche, une sensation de froid nous étreint. Pourtant l'eau était chaude et la température de la pièce est identique à celle qui régnait au moment où, nu comme un ver, nous sommes entrés dans la douche sans ressentir de fraîcheur particulière.

Le contact avec le plateau de bois du bureau semble plus chaud que celui avec l'un de ses pieds métalliques. Pourtant, bois et métal, situés dans la même pièce, sont *a priori* à la même température.

Toutes ces situations paradoxales résultent de ce que la température ressentie diffère de la température ambiante. Qu'est ce alors que la température d'un corps et comment en ressentons-nous les différents échelons ?

La température du corps

La température interne du corps est de 37 °C et la température ambiante est, dans une atmosphère agréable, de 20 °C. La température de la peau prendra une valeur intermédiaire entre les deux extrêmes qui sera donc légèrement supérieure à la température ambiante (de l'ordre de 25 °C). La température diminue donc de l'intérieur du corps à sa surface, et la peau est surmontée d'une «couche limite» froide où la température rejoint

la température ambiante. C'est pour cette raison qu'après un certain temps, on supporte un bain à 50 °C, par exemple. Même s'il est un peu difficile de rentrer dans un tel bain, après quelques minutes d'immobilité, la fine couche qui surmonte la peau est à une température sensiblement inférieure à 50 °C et le bain ne paraît plus trop chaud. Évidemment, si l'on bouge, l'eau est mélangée et cet effet de couche disparaît.

La température possède deux propriétés importantes. Premièrement, contrairement au volume et à la masse, la température n'est pas une quantité additive : un volume d'eau à 50 °C versé dans un volume d'eau à 20 °C ne fait pas de l'eau à 70 °C. Deuxièmement, chacun sait que la température tend à s'uniformiser, car les zones les plus chaudes réchauffent les plus froides : il y a transfert thermique du chaud vers le froid. À l'aide de ces deux propriétés, on définit l'équilibre thermique d'un corps comme l'état où la température est constante et homogène. La température quantifie alors

l'agitation des atomes composant le corps à l'équilibre thermique : plus ils se déplacent rapidement plus le corps est chaud. À l'équilibre, la température mesure l'énergie cinétique moyenne des atomes du corps ; c'est donc une quantité macroscopique qui reflète la distribution microscopique des vitesses atomiques.

Comment augmenter la température d'un corps ? En lui apportant de l'énergie (on chauffe de l'eau en la plaçant sur du feu ou sur une plaque chauffante) ou du travail mécanique (la compression d'un gaz l'échauffe). Ainsi, en chauffant une barre métallique à l'une de ses extrémités, sa température s'élève de proche en proche sur toute sa longueur. C'est le phénomène de conduction thermique étudié par le mathématicien Joseph Fourier (1768-1830). Empiriquement, Fourier établit que le flux thermique, c'est-à-dire la quantité d'énergie qui passe chaque seconde d'une zone chaude à une autre plus froide, est proportionnel à la section de la barre et à la différence de température entre les deux zones. Le coefficient de proportionnalité, la conductivité thermique du milieu, est d'autant plus grand que le corps transmet efficacement la chaleur.

La conduction résulte de phénomènes microscopiques : à l'endroit chauffé, l'agitation thermique augmente et elle se transmet de proche en proche aux atomes



Dessins de Bruno Vézaro