

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».

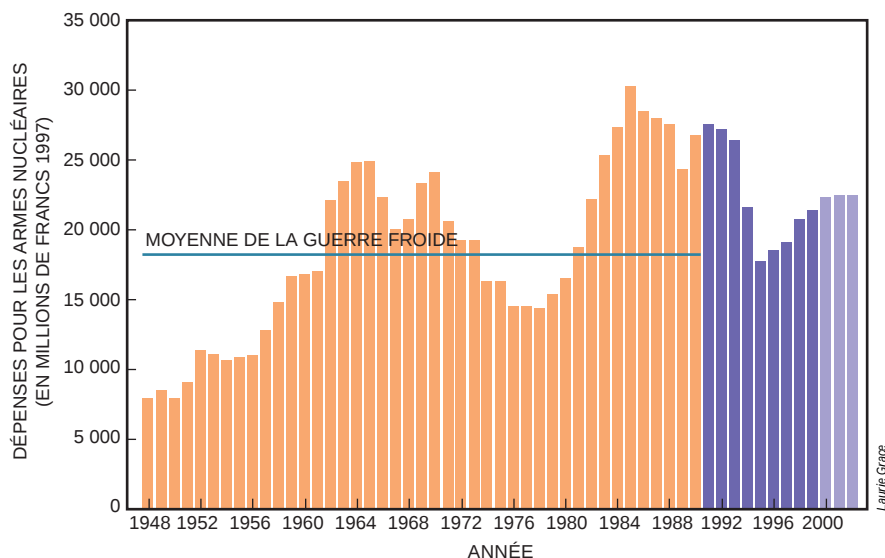
Les explosions souterraines servant peu à la détection des armes vieillissantes, le programme de surveillance n'a clairement pas pour but la maintenance des arsenaux nucléaires. On doit donc conclure que les simulations numériques et les expériences de laboratoire ne servent qu'à accroître les capacités 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.

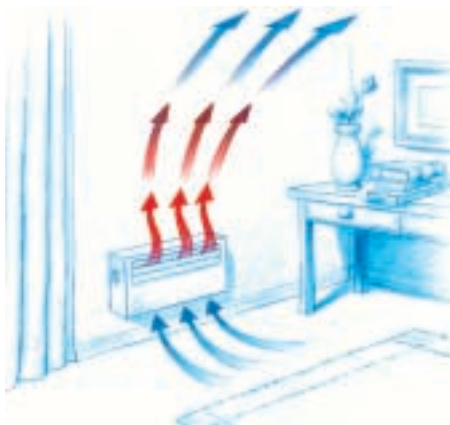
Richard L. GARWIN et Vadim A. SIMONENKO, *Nuclear Weapon Development without Nuclear Testing?*, document pour le Pugwash Workshop on Problems in Achieving a Nuclear-Weapon-Free World, 25-27 octobre 1996.

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

voisins (voir la figure page 100). Dans le cas des métaux, l'énergie cinétique des électrons libres est transmise par collision entre électrons (les mêmes électrons qui interviennent dans la conduction électrique). Si les métaux sont de bons conducteurs de chaleur et d'électricité, c'est que les électrons peuvent se répartir dans toute la structure cristalline du métal. À l'inverse, les solides non métalliques, comme le bois et le verre, sont de mauvais conducteurs parce que les électrons restent localisés aux voisinages des atomes et ne transmettent pas leur énergie par collision. La conductivité thermique des liquides et des gaz est plus faible, surtout pour les gaz : l'énergie cinétique s'y transmet d'autant moins bien que le milieu est peu dense et les collisions rares.

Quand on met en contact deux corps de natures et de températures différentes (la main sur une surface métallique par exemple) la température d'équilibre de l'interface de contact se rapprochera de celle du meilleur conducteur thermique. Ainsi, du bois à température ambiante (20 °C) nous paraît plus chaud que du métal à la même température. En effet, la main est un meilleur conducteur de chaleur que le bois et donc, la température de leur interface, qui est aussi celle qui sera ressentie, sera proche de celle de la surface de la main, soit environ 25 °C. À l'inverse, un métal est un bien meilleur conducteur thermique que la main et la température de leur interface sera proche de celle du métal (20 °C) : la chaleur de la main est absorbée plus vite par le métal qu'elle ne peut la fournir.

CONDUCTION ET CONVECTION

Outre ces mouvements de transmission de la chaleur de proche en proche, des mouvements d'ensemble transportent aussi la chaleur. En hiver, lorsque le vent souffle, nous ressentons un froid plus vif, car le transfert thermique par conduction est remplacé par un transfert



par convection, plus efficace. La convection transporte l'énergie thermique par des mouvements macroscopiques de matière, forcés (ventilateurs) ou naturels (mouvements atmosphériques) : la couche limite protectrice est constamment renouvelée.

Par exemple, l'air chaud au voisinage d'un radiateur d'une pièce est moins dense. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, il s'élève et est remplacé par de l'air plus froid qui se réchauffera à son tour. Ce mouvement naturel d'air ascendant tend à uniformiser la température de la pièce (voir le cartouche). Des mouvements de convection analogues jouent un rôle considérable dans les phénomènes atmosphériques.

Le vent est un exemple de mouvement de convection forcé qui renforce les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du corps. Quelle est, selon la vitesse du vent, la température ressentie par la peau nue, dont la température de surface est d'environ 25 °C ? On cherche à quelle température «équivalente» doit être l'air ambiant supposé immobile pour que le flux d'énergie entre la peau et l'air soit égal à l'énergie emportée par le vent à la température réelle. L'écart entre la température ressentie et la température réelle est d'autant plus grand que l'écart entre la température réelle et celle de la

peau est grand et que le vent est plus fort (que la convection est plus active). Par exemple, dans un vent à -10 °C soufflant à 30 kilomètres par heure, la température ressentie est de -18 °C (voir le tableau)

BIENFAISANTE ÉVAPORATION

Dans le calcul précédent, l'air est supposé sec. Dans le cas d'un air humide, l'énergie prélevée au corps pour évaporer l'eau renforce la sensation de froid. On comprend ainsi mieux le rôle de la sueur qui, nécessitant une importante quantité d'énergie pour s'évaporer, joue un rôle essentiel dans la régulation thermique humaine (la chaleur de vaporisation de l'eau est de 2,26 kilojoules par gramme). Un courant d'air

sur un visage en sueur donne une forte sensation de fraîcheur, car la convection forcée active l'évaporation (de même que le linge humide sèche plus rapidement quand il y a du vent). Pour mesurer cette activation, observons qu'un thermomètre dont l'extrémité est enveloppée d'un mouchoir en papier humide indique une température bien inférieure à celle du même thermomètre à l'air libre.

Finalement, notre confort thermique ne dépend pas de la température extérieure réelle, mais plutôt du flux thermique entre notre corps et l'air ambiant : la sensation de froid (chaud) est d'autant plus prononcée que le flux thermique sortant de (entrant dans) notre corps est important.

Lorsque vous vous brûlez la main, il est ainsi nécessaire d'évacuer la chaleur emmagasinée en passant la brûlure sous l'eau froide pendant plusieurs minutes. Pour évacuer la chaleur reçue par les grands brûlés, on a envisagé de plonger les victimes dans un bain d'eau à 15 °C circulant autour du corps. Les calculs montrent que, dans les cas les plus graves, la chaleur est évacuée qu'après plusieurs heures. En pratique, la difficulté est de maintenir la température corporelle proche de 37 °C afin d'éviter l'hypothermie.

TEMPÉRATURE AMBIANTE RÉELLE

	-15 °C	-10 °C	-5 °C	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
5 KM/H	-18 °C	-10 °C	-7 °C	-2 °C	3 °C	9 °C	14 °C	19 °C	25 °C	31 °C	36 °C	41 °C
10 KM/H	-20 °C	-14 °C	-8 °C	-3 °C	2 °C	8 °C	13 °C	19 °C	25 °C	31 °C	37 °C	42 °C
30 KM/H	-24 °C	-18 °C	-12 °C	-6 °C	1 °C	7 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	43 °C
50 KM/H	-29 °C	-21 °C	-14 °C	-7 °C	0 °C	6 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	44 °C
70 KM/H	-35 °C	-24 °C	-15 °C	-8 °C	-1 °C	6 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	44 °C
90 KM/H	-41 °C	-30 °C	-19 °C	-9 °C	-2 °C	5 °C	12 °C	18 °C	25 °C	32 °C	38 °C	45 °C

VITESSE DU VENT

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

S. OLIVIER et H. GIÉ, *Thermodynamique*, Lavoisier Tech & Doc, 1996.

H. WEINSTOCK, *Thermodynamics of cooling a live human body*, in *American Journal of Physics*, vol. 48, pp. 339, 1980.



Les sphéricônes

IAN STEWART

Un volume inédit amuse les mathématiciens.

Aujourd'hui, un cône, c'est plus souvent une crème glacée que la forme qui passionna les géomètres grecs dans l'Antiquité. Ils se délectaient de la subtile géométrie des sections coniques, à l'intersection d'un plan et d'un cône. Ils utilisaient ces ellipses, paraboles et hyperboles pour résoudre des problèmes inaccessibles «à la règle et au compas», dont les plus célèbres sont la trisection d'un angle et la construction d'un cube d'un volume double de celui d'un cube initial.

Ces deux problèmes se ramènent à la résolution d'une équation du troisième degré, c'est-à-dire que le plus grand exposant de l'inconnue est trois. Les sections coniques sont utiles dans la résolution de tels problèmes, car l'équation de l'intersection de deux d'entre elles est une

équation du troisième ou du quatrième degré, alors que les constructions avec une règle et un compas ne donnent accès qu'à des solutions d'équations du deuxième degré.

Le cône seul a moins intéressé les mathématiciens que ses intersections avec un plan, peut-être parce qu'il est très simple. Qu'espérer en dire de neuf? En mai 1999, un lecteur anglais de ces colonnes, C. Roberts, a démontré qu'un peu d'opiniâtreté n'est jamais déplacée : il s'est intéressé à une étrange forme proche du cône, qu'il a nommée sphéricône.

Le sphéricône s'obtient à partir de deux cônes dont l'angle au sommet est de 90 degrés. On les accole par leur base, puis on coupe ce double cône par un plan qui passe par l'axe commun : la section est un carré, puisque les angles au sommet sont droits. Comme un carré est invariant par une rotation de 90 degrés, une moitié du double cône, tournée de 90 degrés, s'ajuste parfaitement à l'autre moitié non tournée. Une fois les deux moitiés recollées, vous obtenez un sphéricône (voir la figure 1). La rotation d'une moitié en fait un animal mathématique que je n'avais encore jamais rencontré.

Le sphéricône s'obtient également par le pliage d'une feuille découpée suivant quatre secteurs identiques, juxtaposés tête-bêche (voir la figure 3). Pour quel angle des secteurs obtient-on le sphéricône? Prenons le problème à l'envers : partons d'un double cône. De profil, on voit un carré. Si le côté est égal à un, le théorème de Pythagore

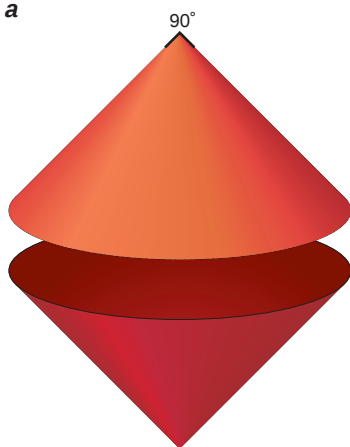
stipule que la diagonale, qui est aussi le diamètre des cônes, est égale à $\sqrt{2}$. La circonférence de la base des cônes est donc égale à $\pi\sqrt{2}$. Comme les arcs des secteurs représentent la moitié d'un cône, leur longueur est égale à $(\pi\sqrt{2})/2$. L'angle au centre de chaque secteur est alors égal à $(\pi\sqrt{2})/2$ radians, soit environ 127,28 degrés.

Avec un peu d'attention et quelques bouts de ruban adhésif, vous obtiendrez un magnifique sphéricône.

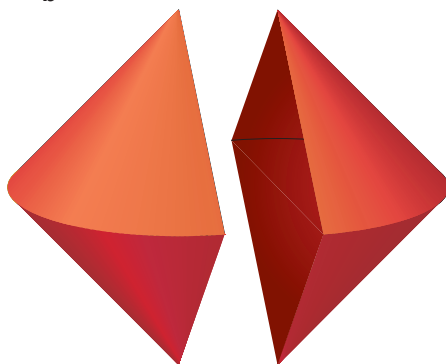
Vous aurez alors le plaisir de voir le sphéricône rouler! Sur un plan, un cône roule en décrivant un cercle. Un double cône, lui, décrit soit des cercles différents selon le cône d'appui, soit une ligne droite lorsqu'il est en équilibre sur la frontière des deux cônes ou qu'il est guidé par des rails. Un sphéricône, enfin, décrit une ligne sinueuse autour d'une droite : il suit exactement le patron de construction de la figure 2, où les sommets des secteurs correspondent aux points de contact des sommets de la section carrée, tandis que les secteurs correspondent au balayage de la zone de contact. Sur une pente douce, le sphéricône se dodeline de gauche à droite avec une démarche chaloupée. N'hésitez plus à construire le sphéricône et observez-le rouler sur une table.

La lettre de C. Roberts mentionnait également quelques propriétés fascinantes, telles que la présence d'une face continue ou la possibilité pour deux sphéricônes identiques de rouler indéfiniment l'un sur

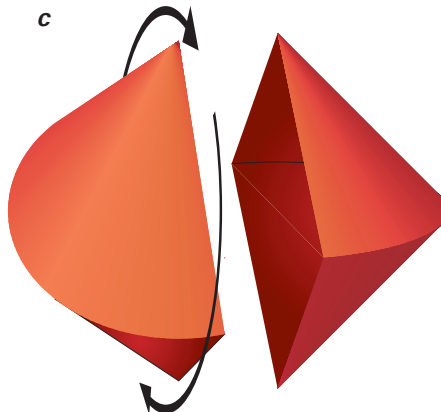
a



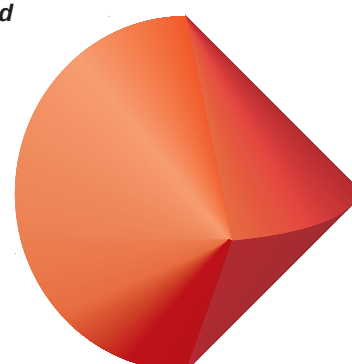
b



c



d



1. LA CONSTRUCTION D'UN SPHÉRICÔNE : collez deux cônes identiques, d'angle au sommet égal à 90 degrés, par leurs bases (a) ; coupez selon le plan de l'axe des deux cônes (b) ; pivotez l'une des moitiés de 90 degrés (c) ; enfin, recollez les deux parties (d).