

les entiers non multiples de 5 ou de 2 inférieurs à vingt-huit quintillions (c'est cette remarque qui permettra plus bas d'évaluer le nombre de lipopremiers généralisés).

Pour les calculs faits jusqu'ici, nous nous sommes restreints aux mots présents dans le *Petit Robert*. Nicolas Graner propose d'étudier l'impact d'un assouplissement des règles. Il se trouve qu'en français d'autres termes que ceux du *Petit Robert* sont parfois utilisés, et c'est ainsi qu'en plus de ceux déjà cités on rencontre parfois : septillion (10^{42}), octillion (10^{48}), nonillion (10^{54}), décillion (10^{60}), undécillion (10^{66}), duodécillion (10^{72}), tredecillion (10^{78}), quattuordécillion (10^{84}), quindécillion (10^{90}), sexdécillion (10^{96}), septendécillion (10^{102}), octodécillion (10^{108}), novemdécillion (10^{114}) et vigintillion (10^{120}). centillion (10^{600}).

LIPONOMBRES GÉNÉRALISÉS

Le mathématicien John Conway propose de prolonger cette série jusqu'à l'infini. Il utilise pour cela un jeu de compositions syllabiques soigneusement ajustées à partir de considérations linguistiques savantes. Si l'on adopte le système de Conway, il est alors clair que le nombre de liponombres (et très vraisemblablement de lipopremiers) devient infini : le problème n'a alors plus d'intérêt ! Aussi, nous suivrons Nicolas Graner et appellerons liponombres généralisés les nombres dont l'écriture en toutes lettres utilise les termes déjà reconnus par l'usage, dont la liste vient d'être donnée. Nous ajouterons par souci esthétique ceux qui s'en déduisent en changeant illion en illiard. La liste élargie de puissances de dix sans «e» est alors : million (10^6), milliard (10^9), billion (10^{12}),illiard (10^{15}), trillion (10^{18}), trilliard (10^{21}), quatrillion (10^{24}), quatrilliard (10^{27}), quintillion (10^{30}), quintilliard (10^{33}), octillion (10^{48}), octilliard (10^{51}), nonillion (10^{54}), nonilliard (10^{57}), vigintillion (10^{120}) et vigintilliard (10^{123}).

Les liponombres généralisés sont alors en nombre fini, car même si le plus grand terme que nous ayons retenu est «vigintilliard», les nombres plus grands sont du type «trois millions de vigintilliards de vigintilliards» et contiennent donc un «e» à cause du mot «de». Il s'agit de savoir maintenant combien il y a de lipopremiers généralisés et quel est le plus grand. On procède comme précédemment, ce qui conduit aux résultats suivants de Nicolas Graner et détaillés dans la figure 6. Comme le nombre total des liponombres généralisés est : $13^{17} - 1 = 8\,650\,415\,919\,381\,337\,932$, il est impossible de décomposer de façon exhaustive les lipopremiers généralisés sur micro-ordinateur, même

6. RÉSULTATS DE NICOLAS GRANER

- Entre un et un million, les seuls nombres dont l'écriture canonique (définie par le vocabulaire présent dans le *Petit Robert*) n'utilise pas le "e" (les liponombres de base) sont : un, trois, cinq, six, huit, dix, dix-huit, vingt, vingt-trois, vingt-cinq, vingt-six, vingt-huit.
- Tout liponombre s'écrit sous la forme : C1 quintillion(s) C2 quadrillion(s) C3 trillion(s) C4 billion(s) C5 milliard(s) C6 million(s) C7, où C1, C2, ..., C7 sont des liponombres de base.
- Il existe 62 748 516 liponombres.
- Il existe 512 233 lipopremiers (liponombres premiers).
- Le plus grand lipopremier est : vingt-huit quintillions vingt-huit quadrillions vingt-huit trillions vingt-huit billions vingt-six milliards huit millions trois, soit 28 000 028 000 028 000 028 026 008 000 003
- Les liponombres généralisés sont définis en élargissant le vocabulaire accepté pour l'écriture des grands nombres. Chacun comportent 17 composantes correspondant aux puissances de dix : million (10^6), milliard (10^9), billion (10^{12}), billiard (10^{15}), trillion (10^{18}), trilliard (10^{21}), quadrillion (10^{24}), quadrilliard (10^{27}), quintillion (10^{30}), quintilliard (10^{33}), octillion (10^{48}), octilliard (10^{51}), nonillion (10^{54}), nonilliard (10^{57}), vigintillion (10^{120}), vigintilliard (10^{123}).
- Il y a 8 650 415 919 381 337 932 liponombres généralisés.
- On ne connaît pas le nombre exact de lipopremiers généralisés.
- Le plus grand des lipopremiers généralisés est : 28 028 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 028 028 028 028 000 000 000 000 028 028 028 028 028 028 028 028 028 028 020 000 000 001.

avec des méthodes probabilistes pour tester la primalité.

Ce qu'on sait faire aujourd'hui concernant les tests de primalité me fait cependant penser que ce décompte est à la portée d'un programmeur astucieux et patient (utilisant peut-être un réseau d'ordinateurs), ou en tout cas le sera prochainement (qui relèvera le défi ?). Avant qu'un tel calcul exhaustif ne soit fait, on peut quand même estimer le nombre de lipopremiers généralisés en supposant que la proportion de nombres premiers parmi les liponombres est la même que parmi l'ensemble des entiers de même taille (après élimination des multiples de 2 et 5).

Le théorème de raréfaction des nombres premiers d'Hadarnard et de La Vallée-Poussin indique que la proportion de nombres premiers parmi les entiers inférieurs à vingt-huit vigintiilliards est approximativement $1/(\ln(28.10^{123})-1)$, soit environ 1/285. En éliminant les multiples de 2 et 5, ce rapport devient 1/114. Si cette proportion est la même parmi les liponombres généralisés non multiples de 2 ou 5 (chose vraisemblable), on en tire qu'il existe approximativement $(13^{16}) \times 3/114 = 17$ billiards lipopremiers généralisés.

En énumérant les liponombres par ordre décroissant, on peut connaître le plus grand lipopremier généralisé : Nicolas Graner, qui a fait ce calcul, est arrivé à la conclusion que le plus grand lipopremier généralisé est : vingt-huit vigintilliards vingt-huit vigintillions vingt-huit nonilliards vingt-huit nonillions vingt-huit octilliards vingt-huit

octillions vingt-huit quintilliards vingt-huit
quintillions vingt-huit quadrilliards vingt-huit
quadrillions vingt-huit trilliards vingt-huit tril-
lions vingt-huit billiards vingt-huit billions
vingt milliards un, soit, en notation déci-
male usuelle : 28 028 000 000
000 000 000 000 000 000 000 000 000
000 000 000 000 000 000 000 000 000
000 000 028 028 028 028 028 000 000
000 000 028 028 028 028 028 028 028
028 028 020 000 000 001.

Ces résultats de lipomathématiques sont d'une utilité incertaine, mais le plaisir de mener des dénombrements et de faire travailler les ordinateurs pour qu'ils résolvent des énigmes originales justifie le temps et l'argent dépensés. J'espère que des passionnés poursuivront le travail de Nicolas Graner.

J. CONWAY et **R. GUY**, *The Book of Number*, Copernicus, New York, 1996.

J.-P. DELAHAYE, *Merveilleux nombres premiers*, Pour la science/Belin, Paris, 2000.

C. GAGNIÈRE, *Pour tout l'or des mots*, Collection Bouquins, Robert Laffont, 1997.

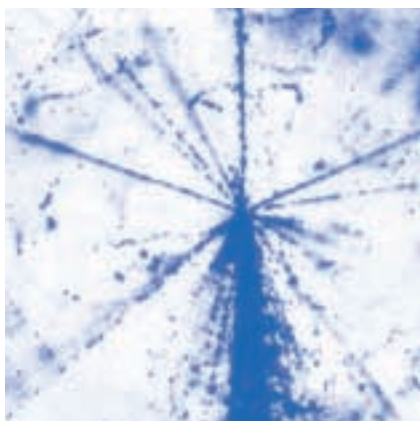
G. GUITEL, *Histoire comparée des numérations écrites*, Flammarion, Paris, 1975.

G. IFRAH, *Histoire universelle des chiffres*, Robert Laffont, Bouquins, Paris, 1994.

OULIPO, *La littérature potentielle*, Gallimard, Paris, 1973.

Georges PEREC, *La disparition*, Denoël, Paris, 1969.

**Nicolas Graner, *Liponombre*,
<http://altern.org/ngraner>**



De la lumière plein les yeux

ROLAND LEHOUCQ • HERVÉ DZITKO

Les yeux fermés, les astronautes en route vers la Lune voient des étoiles aux formes variées. À quoi est dû cet étrange phénomène ?

L'atmosphère de la Terre a d'immenses effets bénéfiques. Elle fournit l'oxygène nécessaire à notre métabolisme, elle maintient une température agréable avec l'effet de serre, mais aussi elle dresse un écran entre nous et le rayonnement cosmique qui emplit le Système solaire.

À mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, l'épaisseur de la couche protectrice diminue et la quantité de rayonnement reçu augmente, au point que, hors de l'atmosphère, des phénomènes inhabituels se produisent. Les astronautes des sept dernières missions *Apollo* – celles qui ont voyagé vers la Lune – ont tous vu des éclairs lumineux alors qu'ils avaient les yeux fermés ! Ces phosphènes peu colorés et d'aspects variés résultent du passage dans l'œil d'une particule rapide qui a traversé le blindage de la cabine spatiale.

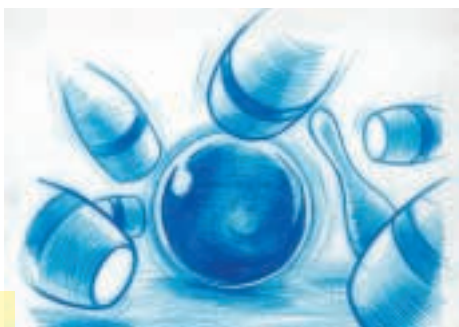
En 1912, lors d'une ascension en ballon, le physicien allemand Victor Hess remarque qu'à mesure que le ballon s'élève un « rayonnement » décharge un électroscope, et ce d'autant plus vite qu'il est haut.

Attribué d'abord à une source de rayonnement électromagnétique extraterrestre, ce phénomène est ensuite expliqué par l'impact de diverses particules chargées (elles étaient déviées par un champ magnétique) : ce sont essentiellement des protons (89 pour cent), des noyaux d'hélium (10 pour cent), le reste étant des électrons et des noyaux lourds (jusqu'à l'uranium). Ces particules cosmiques sont caractérisées par leur charge et par leur énergie. La majorité des protons a une énergie d'environ 5×10^8 d'électronvolts, mais certaines particules peuvent avoir une énergie colossale, jusqu'à 10^{20} électronvolts pour les plus énergiques, soit l'équivalent de l'énergie cinétique d'une balle de tennis lancée à plus de 60 kilomètres par heure !

D'où viennent ces particules ? Certaines sont éjectées par les éruptions solaires, avec des énergies de l'ordre de quelques 10^8 électronvolts. À la surface de la Terre, nous ne sommes pas directement exposés à ces particules : le champ magnétique terrestre piège les particules dont l'énergie est inférieure à environ 10^9 électronvolts. À l'inverse, les particules galactiques, d'énergie supérieure, sont engendrées par des astres lointains (peut-être des supernovae) et se manifestent au sol, après avoir été transformées.

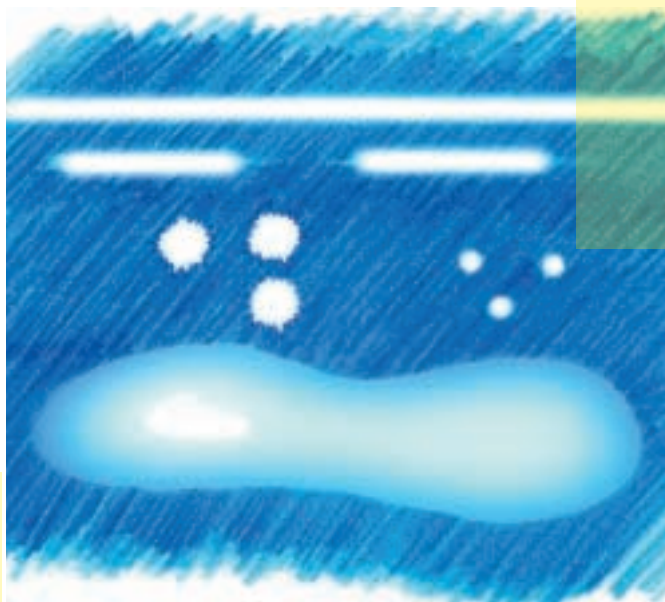
LA GERBE COSMIQUE

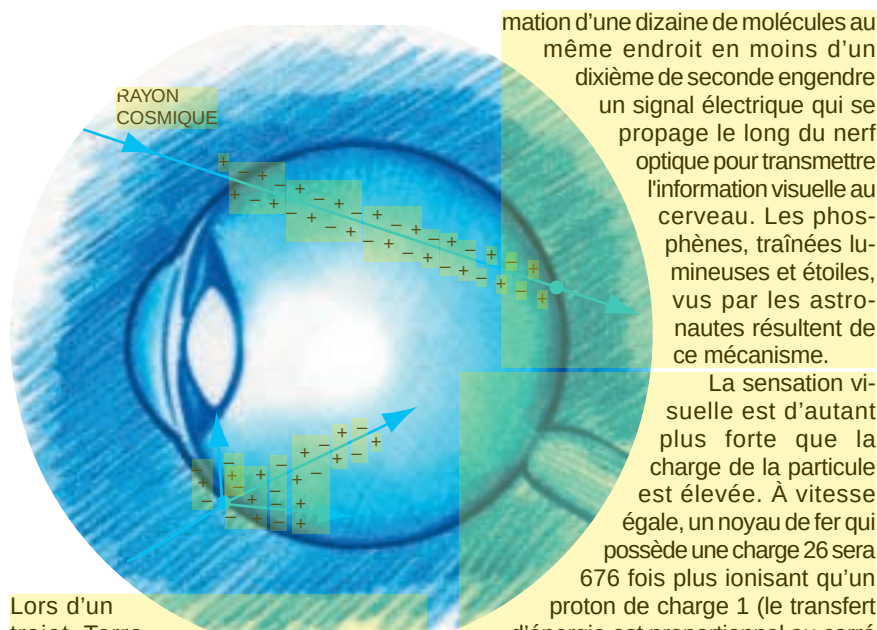
Après un voyage de plusieurs millions d'années, une particule galactique chargée atteint les couches supérieures de l'atmosphère, elle excite le cortège électronique des atomes proches de sa trajectoire et arrache parfois certains électrons et elle brise les liaisons



moléculaires ou déclenche des réactions nucléaires. Les produits de réactions interagissent à leur tour avec le milieu, arrachant d'autres électrons ou produisant une gerbe de particules secondaires. L'énergie d'une particule cosmique se trouve ainsi dissipée dans l'atmosphère et répartie dans les nombreuses particules qui atteignent finalement le sol. En moyenne, chaque seconde, une centaine de particules secondaires bombardent chaque mètre carré de sol. Doit-on s'inquiéter de cette radioactivité spatiale ? Pas vraiment, car elle ne représente que quelques pour cent de la radioactivité naturelle qui provient du sol (granit radioactif, uranium...).

Éloignons-nous du sol. À mesure que l'on s'élève, la radioactivité terrestre diminue et celle de ces particules cosmiques augmente. Au sommet du Mont-Blanc, l'irradiation cosmique est dix fois supérieure de ce qu'elle est à Paris. À l'altitude où vole un avion, la dose de rayonnement cosmique est multipliée par 100 (bien que la carlingue en arrête une partie).





Lors d'un trajet Terre-Lune, les astronautes ne bénéficient plus de la protection du champ magnétique terrestre et de l'atmosphère. Seules les parois de la capsule spatiale les protègent du rayonnement ambiant. Les particules capables de franchir cette barrière sont les plus énergétiques de sorte que, lorsqu'elles traversent l'œil d'un astronaute, elles agissent comme une boule de bowling qui chamboule l'arrangement des quilles que sont les atomes et les molécules de l'œil. Les effets sont d'autant plus importants que la charge des particules est élevée.

Ces particules déforment la rhodopsine, une molécule des cellules photoréceptrices de la rétine, d'une manière particulière nommée isomérisation (le signal visuel habituel résulte de l'isomérisation de cette molécule lors de l'interaction avec un photon du domaine visible). La défor-

mation d'une dizaine de molécules au même endroit en moins d'un dixième de seconde engendre un signal électrique qui se propage le long du nerf optique pour transmettre l'information visuelle au cerveau. Les phosphores, traînées lumineuses et étoiles, vus par les astronautes résultent de ce mécanisme.

La sensation visuelle est d'autant plus forte que la charge de la particule est élevée. À vitesse égale, un noyau de fer qui possède une charge 26 sera 676 fois plus ionisant qu'un proton de charge 1 (le transfert d'énergie est proportionnel au carré de la charge). Son pouvoir d'ionisation est tel qu'un seul noyau de fer peut engendrer des erreurs dans les mémoires de bord des satellites ou même détruire des composants électroniques. Sans protection adéquate, ce que les ingénieurs nomment le durcissement, les microprocesseurs de nos ordinateurs de bureau ne survivraient pas longtemps dans l'espace.

L'EFFET CERENKOV DANS L'ŒIL

Un second mécanisme explique ces visions : dans un milieu transparent, les particules dont la vitesse est suffisante peuvent perdre de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique (plus l'énergie d'une particule est élevée, plus sa vitesse est grande). En 1934, Pavel Alekseïevitch Cerenkov expliqua pour-

quoi les solutions de sel de radium émettaient une faible lueur bleutée. Lorsqu'une particule chargée se déplace plus vite que la lumière dans un milieu transparent, il se produit une « onde de choc lumineuse », similaire au passage du mur du son par un avion (la vitesse de la lumière dans un milieu donné est le quotient de vitesse de la lumière dans le vide et de l'indice de réfraction du milieu, de sorte qu'elle est toujours inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide). Une lumière bleutée est alors émise le long d'un cône dont l'ouverture dépend de la vitesse de la particule et de l'indice de réfraction du milieu. Cette lueur bleutée est visible dans l'eau qui entoure les cœurs de réacteurs nucléaires ou dans les piscines de stockage de combustibles irradiés.

L'humeur vitreuse de l'œil humain ayant un indice de 1,34, la lumière s'y déplace à 223 000 kilomètres par seconde. Pour qu'une particule y émette un rayonnement Cerenkov, il faut que sa vitesse soit supérieure à cette valeur ce qui, dans le cas d'un proton, correspond à une énergie cinétique de $4,70 \times 10^6$ électronvolts. Ainsi, quelques centaines à quelques milliers de photons, émis lors du passage d'une particule cosmique, ont induit dans les yeux des astronautes des missions Apollo des phénomènes lumineux diffus.

L'espace interplanétaire est balayé par un rayonnement cosmique de haute énergie qui représente un danger potentiel, tant pour les astronautes que pour les systèmes électroniques. Les rayons cosmiques galactiques apportent à eux seuls une dose annuelle proche de la dose maximale admissible. Pour un vol interplanétaire de plusieurs mois (le voyage aller-retour vers Mars durera plus de 500 jours dans l'espace interplanétaire), un caisson blindé ou d'eau de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur assurera une protection efficace de l'équipage, notamment contre les particules émises par les éruptions solaires.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA où **Hervé DZITKO** travaille sur les radiations cosmiques.

P. McNULTY, *Single event effects experienced by astronauts and microelectronic circuits flown in space*, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, n°2, p. 475, 1996.

J. BAILEY et coll., *Light flashes observed by astronauts on Apollo 11 through Apollo 17*, in *Science*, vol. 183, p. 957, 1974.

G. FAZIO et coll., *Generation of Cerenkov light flashes by cosmic radiation within the eyes of Apollo astronauts*, in *Nature*, vol. 228, p. 260, 1970.

