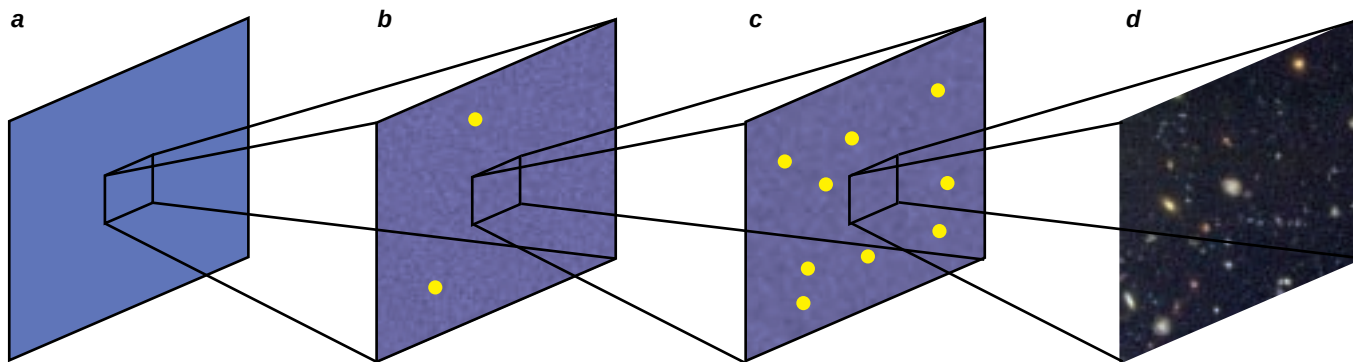




9. LE FOND EXTRAGALACTIQUE apparaît uniforme à grande échelle (a), mais il est dû à l'émission de galaxies non résolues (d). L'instrument *ISOPHOT* permet de résoudre environ dix pour cent des galaxies (b),

les autres galaxies formant un fond granuleux. La caméra *ISOCAM* résout 80 pour cent des galaxies (l'image qu'il donne serait comprise entre c et d).

Le satellite *ISO* a apporté des éléments de réponse qui vont dans le sens de la seconde hypothèse. Plusieurs petites régions du ciel ont été très longuement observées. En raison des performances exceptionnelles des détecteurs et du mode d'observation (*ISO* travaille en mode pointé, les détecteurs étant fixés sur la partie du ciel à analyser, tandis qu'*IRAS* fonctionnait en mode de balayage), *ISO* a découvert des objets bien moins lumineux, donc plus lointains, qu'*IRAS*.

La caméra *ISOCAM* a recherché les galaxies lointaines, donc très peu brillantes, à des longueurs d'onde égales à 6 et à 15 micromètres. Le gain en sensibilité par rapport à *IRAS* est spectaculaire : environ 3 000. Le relevé le plus profond avec *ISOCAM* a été effectué sur une partie du ciel qui a été surnommée « champ profond de Hubble » : c'est ce champ qui a été exploré par le Télescope spatial *Hubble* en lumière visible et dans le domaine ultraviolet. *ISO* a trouvé bien moins de sources que *Hubble*, mais il nous a appris que l'énergie totale rayonnée par les quelques sources infrarouges détectées est comparable à celle de toutes les sources trouvées par *Hubble*.

Les sources détectées par *ISOCAM* ne sont donc pas du même type que celles observées par *Hubble*. Ce résultat spectaculaire pose des problèmes à l'ensemble des astronomes qui ont bâti depuis plus de 20 ans une compréhension de l'évolution des galaxies à partir des observations du domaine ultraviolet et visible !

L'infrarouge lointain a été observé avec le photomètre *ISOPHOT* qui, malgré sa faible résolution spatiale, permet pour la première fois d'observer les galaxies lointaines à une longueur d'onde de 175 micromètres. À cette longueur d'onde, les sources détec-

tées sont bien moins nombreuses que dans l'ultraviolet, dans le visible ou dans l'infrarouge proche. Cependant ce petit nombre est bien supérieur à celui que l'on obtient quand on extrapole l'émission des galaxies proches observées avec *IRAS*.

De ce fait, les galaxies détectées dans les relevés profonds cosmologiques avec *ISO* sont de tout autre nature que celles qui ont été détectées avec *IRAS*. Ces galaxies sont plus lointaines (et donc plus jeunes), et elles ont des propriétés qui diffèrent considérablement des galaxies locales, plus proches. Cette découverte confirme l'hypothèse qui stipulait que le rythme de la formation d'étoiles fut jadis plus élevé qu'aujourd'hui.

Cette très forte évolution des galaxies distantes s'observe également quand on mesure une composante plus diffuse, provenant de l'émission intégrée des galaxies sur toute l'histoire de l'Univers : le fond diffus extragalactique. Pour comprendre à quoi correspond ce fond, imaginons que nous soyons à bord d'un petit voilier qui passe le cap Horn : nous voyons parfaitement les mouvements de la mer déchaînée. En revanche, si nous sommes en avion, l'océan n'est alors plus qu'une étendue bleue uniforme.

Ce fond d'apparence uniforme a été observé à des longueurs d'onde comprises entre 100 micromètres et 1 millimètre par le satellite américain *COBE*. La forte intensité de ce fond montre qu'une grande partie de la formation d'étoiles est cachée du domaine visible et observable seulement dans le domaine infrarouge : l'énergie émise par toutes les galaxies dans l'Univers est environ deux fois plus grande dans le domaine infrarouge que dans le domaine visible.

Les galaxies dont le rayonnement constitue ce fond émettent beaucoup plus d'énergie dans le domaine infrarouge que les galaxies proches de nous.

Ce phénomène est une autre signature du changement profond des propriétés des galaxies depuis leur formation jusqu'à aujourd'hui. Il conduit à supposer que le rythme de formation d'étoiles fut constant il y a 10 à 12 milliards d'années, mais 20 fois plus fort qu'aujourd'hui (en supposant un âge actuel de 12,6 milliards d'années). Avec *ISOPHOT*, à une longueur d'onde de 175 micromètres, les galaxies détectées ne représentent que dix pour cent du fond. En revanche, à la longueur d'onde de 15 micromètres, mesurée par la caméra *ISOCAM*, le fond diffus extragalactique est presque totalement résolu en sources individuelles.

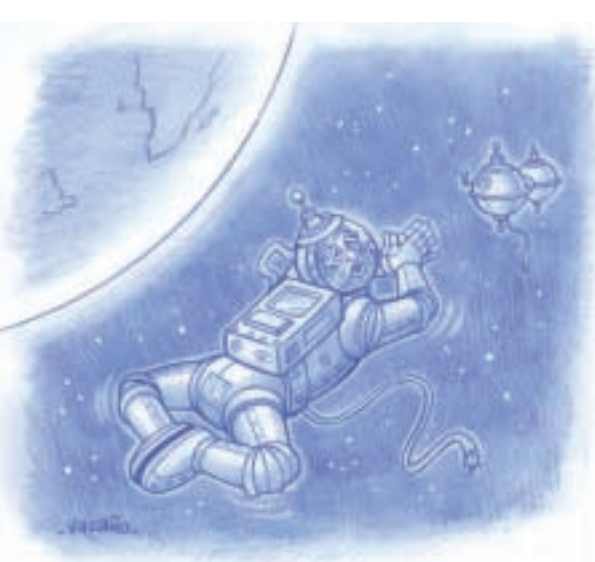
Seule une petite partie de l'Univers est visible aujourd'hui, grâce au satellite *ISO*, mais cette partie permet pour la première fois de mieux étudier l'évolution des galaxies depuis la formation de l'Univers.

Alain ABERGEL, François BOULANGER, Guilaine LAGACHE, Emmanuel DARTOIS et Jean-Loup PUGET travaillent à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay.

F. COMBES, P. BOISSIÉ, A. MAZURE, A. BLANCHARD, *Galaxies et cosmologie*, Interéditions / Éditions du CNRS, 1991.

D. ALLOIN, *Les galaxies*, Éditions Flammarion (collection Dominos), 1998.

The Universe as seen by ISO, sous la direction de P. Cox et M. Kessler, *ESA Proceedings*, SP-427, 1999.



Le gravidyne

ROLAND LEHOUCQ

Nous pouvons échapper à l'attraction terrestre à l'aide d'un vaisseau-haltère dont la longueur varie à des instants précis de sa trajectoire.

Cyrano de Bergerac a retardé le duc de Guiche en décrivant sept moyens farfelus d'aller sur la Lune ; émule de Cyrano, le physicien russe V. Béletski a proposé un engin spatial qui paraît étrange au premier abord, mais dont le principe est uniquement fondé sur une conséquence des lois de la gravitation. Dans le champ gravitationnel d'une planète, l'attraction exercée sur un solide étendu diffère de celle exercée sur un point matériel de même masse ; en variant la forme d'un solide, on modifie l'intensité de la force d'attraction qu'il subit et l'on peut le lancer vers les étoiles.

Comment expliquer cette variation ? Quand l'attraction gravitationnelle est uniforme, la force d'attraction est identique en tous les points de l'objet : l'attraction qui s'exerce sur un objet étendu est égale à la force qui s'exerce sur une masse équivalente placée au centre de gravité de l'objet. En revanche, les parties d'un corps étendu plongé dans le champ gravitationnel d'une planète, champ dont l'intensité décroît avec le carré de la distance entre le corps et la planète, subissent des attractions qui peuvent être fort inégales. Chaque partie du corps d'un satellite par exemple, tombe alors vers la planète avec une accélération différente.

Dans le champ terrestre, cet effet est sensible lorsque la dimension du satellite dépasse plusieurs dizaines de kilomètres.

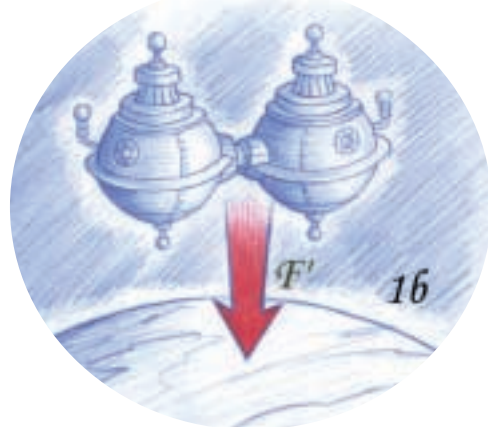
Les parties lointaines étant moins attirées que les parties proches, le satellite est étiré le long de l'axe qui lie son centre à celui de la planète. Les marées témoignent de cet étirement : sur Terre, les océans sont déformés par l'attraction de la Lune.

ATTRACTION SUR UN GRAND SATELLITE

L'engin que nous nous proposons d'utiliser pour nous déplacer dans le cosmos est en forme d'haltère : deux sphères identiques reliées par une barre rigide de masse négligeable par rapport à celle des sphères. Nous supposons, de surcroît, que l'axe de la barre est perpendiculaire au plan de l'orbite. Les sphères subissent des attractions terrestres de même intensité, car elles sont situées à la même distance du centre de la Terre, et de directions légèrement différentes puisque les droites qui joignent leur centre à celui de la Terre forment un petit angle.

La force d'attraction résultante F , orientée vers le centre de la Terre, est presque égale en intensité à la force F' que subirait un point matériel de même masse que notre haltère et situé en son centre de gravité. Presque, mais pas tout à fait ! La force F est en fait inférieure à la force F' (voir les figures 1a et 1b) : l'écart relatif entre les deux forces est proportionnel au carré du rapport entre la longueur de l'haltère et la distance au centre de la Terre (tant que la longueur de l'haltère reste petite devant la distance de son centre de gravité au centre de la Terre). Dans le cas limite où les sphères seraient écartées d'une distance énorme, la force exercée serait presque nulle, puisque cette dernière décroît avec le carré de la distance, alors que la force exercée sur la même masse placée au centre de gravité de l'ensemble ne l'est pas.

En pratique, à moins que le satellite ne soit très grand, l'écart entre les

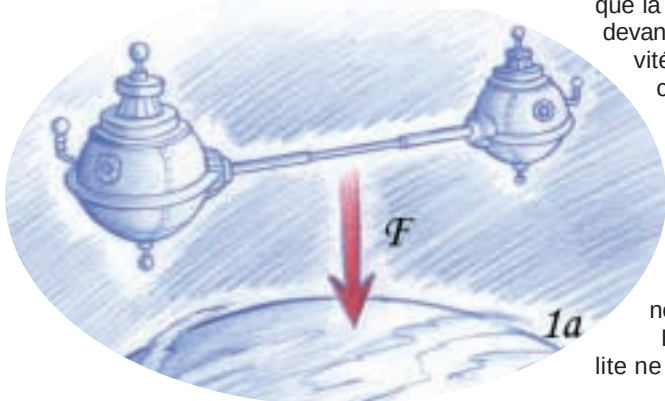


deux forces est faible. Ainsi, pour la station spatiale *Mir*, dont la taille est de 30 mètres et la distance au centre de la Terre d'environ 6 800 000 mètres, l'écart relatif des deux forces, $(F' - F)/F$, vaut trois cent milliardièmes (3×10^{-11}). En d'autres termes, un corps très allongé subit une attraction inférieure à celle d'un corps ramassé sur lui-même. Presque insensible sur de petits satellites, cette différence est ici mise à profit pour concevoir un procédé original de déplacement spatial.

UN VAISSEAU SPATIAL PULSANT

La modification de l'orbite est la clé du voyage spatial. Pour qu'un satellite quitte le voisinage terrestre à partir d'une orbite elliptique, il faut dépenser de l'énergie, c'est-à-dire augmenter l'excentricité e (l'allongement de l'ellipse) de l'orbite initiale jusqu'à ce qu'elle dépasse l'unité, valeur au-delà de laquelle la trajectoire devient hyperbolique (voir la figure 2).

Sans apport d'énergie, l'excentricité de l'orbite est constante. Le mouvement d'un solide est en général compliqué par l'interaction entre le déplacement du centre de gravité du solide et la rotation autour de son centre de gravité. Pour des raisons de symétrie, un solide comme notre haltère placé initialement avec son axe de symétrie perpendiculaire au plan de son



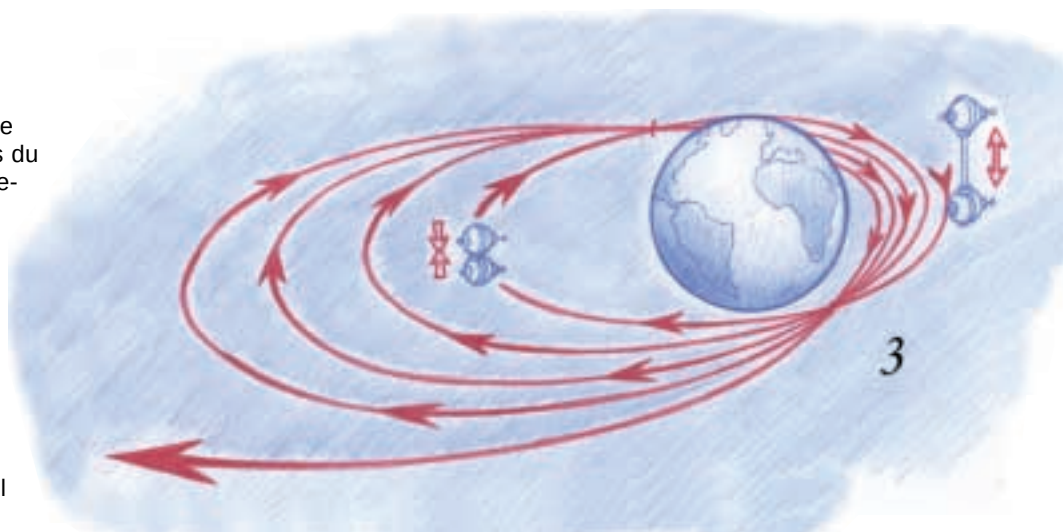
orbite garde cette orientation. L'excentricité de la trajectoire dépend alors du temps et oscille périodiquement entre deux valeurs extrêmes, minimale au périhélie (le point de l'orbite le plus proche de la Terre) et maximale à l'apohélie (le point le plus éloigné de la Terre). Ces oscillations sont de très faibles amplitudes, et l'orbite de l'haltère est très proche de l'orbite elliptique d'un point matériel de même masse.

Imaginons maintenant que notre vaisseau-haltère pulse, c'est-à-dire qu'il se contracte et se déploie rapidement sur toute sa longueur à des instants bien choisis. Partant du périhélie, l'haltère parcourt une demi-révolution jusqu'à son apohélie, où l'excentricité atteint sa valeur maximale. À cet instant, l'haltère se replie : sa longueur devient très faible, et le vaisseau se déplace alors comme un point matériel, c'est-à-dire en suivant un arc d'ellipse dont l'excentricité est celle atteinte à l'apohélie.

Revenu au périhélie, en un point plus proche de la Terre que le périhélie précédent, l'haltère se déploie à nouveau. L'excentricité de sa trajectoire augmente et, lorsque le vaisseau arrive à un nouvel apohélie, plus éloigné de la Terre, la trajectoire atteint une excentricité supérieure à celle atteinte lors du précédent passage. L'haltère se replie alors pour conserver la nouvelle valeur de l'excentricité jusqu'à l'instant où il pourra se déployer à nouveau.

TRANSFERT D'ÉNERGIE ET RÉSONANCES

Après de nombreuses pulsations, l'excentricité de l'orbite aura varié notablement et, lorsqu'elle dépasse l'unité, le vaisseau échappe définitivement à l'attraction terrestre. La trajectoire suivie est une spirale dont le nombre de spires est égal au nombre de pulsations de l'haltère (voir la figure 3). Ce vaisseau spatial est dénommé gravidyne.



D'où provient l'énergie gagnée par le gravidyne ? En changeant de forme, le gravidyne fait varier l'intensité de la force d'attraction qu'il subit, c'est-à-dire qu'il modifie son énergie potentielle gravitationnelle. Celle-ci augmente lorsqu'il se déploie et diminue lorsqu'il se contracte (sa valeur est négative). Cependant, n'oublions pas que ces variations ne se produisent pas à la même distance de la Terre : le déploiement s'effectue à l'apohélie, et la contraction au périhélie. Ainsi l'énergie du gravidyne augmente plus qu'elle ne diminue.

Cette énergie provient du mécanisme qui modifie la géométrie du gravidyne. Puisque la force gravitationnelle est attractive, les deux sphères de l'haltère sont attirées vers le centre de la Terre ; elles ont alors tendance à se rapprocher. Nous récupérons donc de l'énergie lors de la contraction du gravidyne, alors que nous en dépensons pour le déployer. La différence est égale au gain d'énergie orbitale : l'énergie dépensée pour faire pulser le gravidyne est transformée en énergie orbitale.

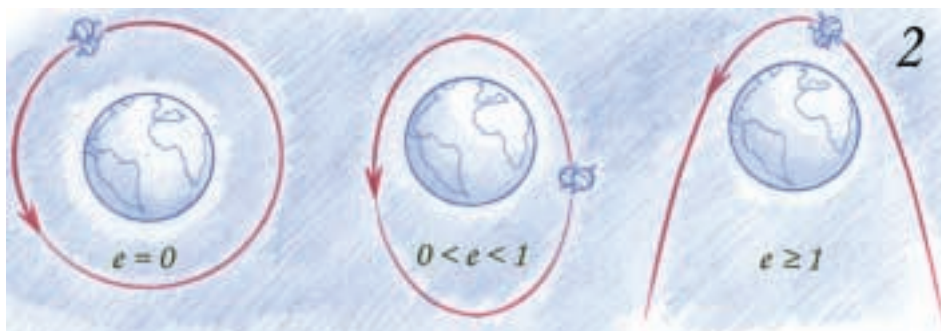
Le pilotage du gravidyne est aussi fondé sur l'utilisation judicieuse des résonances. La période de pulsation du gravidyne coïncide exactement avec la période de révolution orbitale. On augmente l'énergie du gravidyne en variant sa longueur à des moments bien choisis, tout comme un enfant accélère le mouvement de sa balançoire en dépla-

çant son corps aux bons moments, ou comme les tireurs du grand encensoir de Saint-Jacques-de-Compostelle augmentent l'amplitude des oscillations en modifiant périodiquement la longueur de la corde de suspension.

UNE SOLUTION MIRACLE ?

Ce mécanisme d'amplification paramétrique serait donc parfait si le calcul ne nous ramenait à la dure réalité. À chaque cycle, l'excentricité du gravidyne augmente d'une quantité proportionnelle à $(l/a)^2$, où l est la distance des deux masses et où a est la longueur du demi grand axe de l'orbite (tant que l/a est assez petit). Pour atteindre une excentricité unité, synonyme d'échappement, il faudra environ $(a/l)^2$ cycles. Si l'orbite de départ d'un gravidyne d'un kilomètre de longueur a un demi grand axe de 7 000 kilomètres, il lui faudra environ 49 millions de révolutions pour se libérer, ce qui prendra 9 000 ans ! Un gravidyne de 100 kilomètres de longueur atteindrait cet objectif en moins d'un an.

Ce procédé de navigation interplanétaire permet aussi d'imaginer une possibilité inédite de sauvetage d'un cosmonaute perdu hors de sa base spatiale et sans moyen de propulsion : par des pulsations adéquates obtenues en nageant la brasse, il modifiera son orbite et pourra rejoindre son vaisseau. Mais surtout ne demandez pas combien de temps il mettra...



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

V. BÉLETSKI, *Essai sur le mouvement des corps cosmiques*, Éditions Mir, 1986.

A. CAZENAVE et **A. BRAHIC**, *L'effet des marées dans le Système solaire*, in Dossier Les terres célestes, *Pour la Science*, avril 1999.

J. S. LOSADA, *La physique de l'encensoir*, in *Pour la Science*, septembre 1990.



Premiers jumeaux : frères ennemis?

JEAN-PAUL DELAHAYE

En additionnant les inverses des nombres premiers jumeaux, un mathématicien obstiné découvre des erreurs dans les microprocesseurs.

Il arrive que l'écart entre deux nombres premiers soit égal à 2. Ainsi le nombre premier 11 est suivi de 13, 17 de 19, 29 de 31, etc. Le problème, comme nous le verrons, est dans le etc.!

Ces paires sont dénommées des nombres premiers jumeaux ; si l'on ne sait pas très bien qui s'y intéresse le premier, elles sont l'objet d'une grande attention depuis un siècle. Leur étude a donné lieu à de nombreuses spéculations mathématiques et à de non moins nombreux

calculs informatiques. L'un d'eux, dont les conclusions viennent d'être rendues disponibles, a mené un paisible mathématicien à faire trembler sur sa base la puissante industrie des microprocesseurs ; d'autres ont amené la découverte de nouvelles propriétés des nombres premiers. Ainsi, par certains côtés, l'arithmétique ressemble plus à une discipline expérimentale,

proche de la physique, qu'à une branche des mathématiques dites «pures».

EN TROUVE-T-ON TOUJOURS ?

Existe-t-il une infinité de nombres premiers jumeaux ? C'est l'une des plus célèbres conjectures mathématiques : on ne sait ni prouver qu'il n'y a qu'un nombre fini de nombres premiers jumeaux ni démontrer le contraire. La situation est choquante, car moins de 30 mots suffisent pour démontrer qu'il existe une infinité de nombres premiers : *S'il n'y en avait qu'un nombre fini, leur produit additionné de 1 serait divisible par l'un d'eux, donc 1 aussi, ce qui est absurde.* En même temps, tout semble s'opposer à ce que l'on sache (avec certitude) si, oui ou non, il existe une infinité de nombres premiers jumeaux. Les deux problèmes sont très proches, pourtant l'un est facile, alors que l'autre résiste obstinément.

Bien sûr, les calculs montrent que l'on trouve toujours des nombres premiers jumeaux, aussi loin qu'on aille. On a cherché aussi à compter le nombre précis de premiers jumeaux inférieurs à n . Ce calcul, par recherche exhaustive, a été mené jusqu'à la valeur de n égale à 10^{15} (un million de milliards) : pour 29 844 570 422 669 nombres premiers inférieurs à 10^{15} , on compte exactement 1 177 209 242 304 paires de nombres premiers jumeaux, soit environ quatre pour cent.

Les mathématiciens ont trouvé des nombres jumeaux beaucoup plus grands que cette valeur. Actuellement, la plus grande paire, découverte il y a quelques semaines, est composée de deux nombres de 11 755 chiffres chacun, qui sont : 361700055.2^{39014} plus et moins 1. Ces nombres ont été capturés par Henri Lifchitz, un ingénieur français passionné des nombres premiers (en 1971, il avait déjà publié une table des nombres premiers inférieurs à 20 millions).

Les nombres premiers se raréfient ;

1. LE BUG DU PENTIUM : AVEC THOMAS NICELY, TESTEZ VOTRE MACHINE!

Le problème du *Pentium*, dévoilé par Thomas Nicely, a été décortiqué, et des cas d'erreurs très simples ont été repérés. Le pire cas a été découvert par Tim Coe : $4195835.0 / 3145727.0$ donne 1.333739068902... au lieu de 1.333820449136... sur le *Pentium*. L'erreur est 10 000 fois supérieure à celle que donne une calculette à 50 francs : il ne s'agit pas d'une erreur normale d'arrondi.

Pour le petit programme de trois instructions : $B = 4.1 - 1.1$; $A = 699306 * B$; $Q = A / B$, le *Pentium* donne $Q = 699263.3$ au lieu de $Q = 699306$. Dans ce programme, il ne faut pas remplacer $4.1 - 1.1$ par 3, car le *Pentium* calcule en binaire et ni 4.1 ni 1.1 ne s'écrivent exactement en base 2.

Pour le quotient $4.9999999/14.999999$ le *Pentium* donne 0.33332922 au lieu de 0.33333329. Là non plus, il ne s'agit pas d'une erreur normale d'arrondi, mais d'une erreur dans la conception même de l'algorithme de division du processeur mathématique des premières versions du *Pentium*.

Une analyse détaillée montre que c'est souvent avec des nombres proches de l'unité que le *Pentium* se trompe. Or il se trouve que, dans toutes sortes de calculs, de tels nombres apparaissent naturellement, ce qui fait que, même si peu de divisions sont mal calculées, ce sont par malchance des divisions qu'on a la plus grande probabilité de rencontrer. Vaughan Pratt a ainsi montré que, si l'on s'intéresse aux quotients x/y , avec x et y variant entre 1 et 100 par pas de $1/100000$, la probabilité de tomber sur une erreur du *Pentium* est de $1/3000$, ce qui est très loin du $1/9 \times 10^9$ indiqué par *Intel* pour se défendre!

L'erreur du *Pentium* n'est pas bénigne! Remarquons cependant que les erreurs d'arrondi sont normales et inévitables, et qu'elles se produisent même avec des microprocesseurs sans bug. Leur accumulation doit être contrôlée : un rapport du *General Accounting Office* américain cite le cas d'un missile *Patriot* qui, pendant la guerre du Golfe, n'a pas intercepté sa cible, à la suite d'accumulations d'erreurs d'arrondi, causant la mort de 28 personnes.



Thomas Nicely