

se trouvent exactement au centre du piège avec une énergie exactement nulle ; nous ne pouvons avoir ces deux informations simultanément.

Selon la théorie d'Einstein, les atomes du condensat ont l'énergie minimale, alors que la relation d'Heisenberg leur interdit d'être exactement au centre du piège. La mécanique quantique résout cette contradiction apparente en postulant que l'énergie d'un atome dans une enceinte quelconque, y compris dans notre piège, ne prend qu'un ensemble discret de valeurs possibles et que la valeur minimale n'est pas nulle. Cette énergie minimale est nommée énergie de point zéro : c'est celle des atomes à température nulle. Les atomes ayant cette énergie se déplacent lentement au voisinage du centre du piège, et non pas exactement au centre. Habituellement, les effets de la relation d'indétermination et de la mécanique quantique ne sont visibles que pour les objets de la taille d'un atome ou encore plus petits. La condensation de Bose-Einstein est l'une des rares manifestations macroscopiques de la relation d'indétermination.

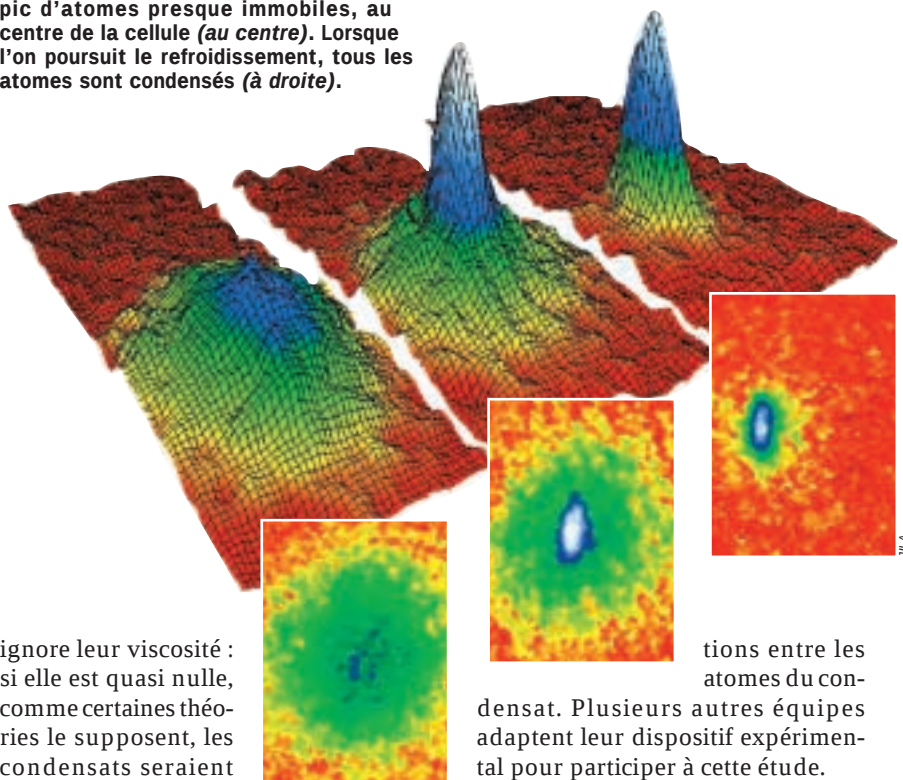
L'ultime précision

L'observation de la condensation de Bose-Einstein est encore trop récente pour que l'on envisage des applications, mais spéculons à l'aide d'une analogie physique : les atomes d'un condensat ressemblent aux photons d'un faisceau laser.

Tous les photons d'un faisceau laser se propagent exactement dans la même direction, et ils ont exactement la même fréquence et la même phase. Ils forment ainsi un faisceau facile à commander et à utiliser dans les lecteurs de disques compacts, dans les imprimantes laser, etc. De même, le condensat de Bose-Einstein est un groupe parfaitement homogène d'atomes que l'on peut réfléchir, focaliser, diffracter, moduler en fréquence et en amplitude. Ce type de manipulation conduira à une meilleure définition du temps (aujourd'hui, les horloges les plus précises utilisent déjà des atomes refroidis par laser). On pourrait aussi imaginer un faisceau d'atomes focalisé en une tache d'un micromètre de diamètre gravant un transistor directement sur un circuit intégré.

Les condensats de Bose-Einstein demeurent mal connus. Ils se comportent comme des fluides, mais on

5. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE D'UN LASER par un condensat de Bose-Einstein en cours de formation a été enregistrée et traitée par ordinateur, de sorte qu'apparaissent la vitesse des atomes. Les deux rangées d'images correspondent aux mêmes données vues sous des angles différents. En haut, l'élévation de la surface est d'autant plus importante que la densité des atomes est grande et que leur vitesse est faible. Avant la formation du condensat (à gauche), le nuage est à une température d'environ 200 milliardièmes de kelvin, et les vitesses sont assez homogènes. Lorsque l'on refroidit jusqu'à 100 milliardièmes de kelvin, le condensat apparaît sous la forme d'un pic d'atomes presque immobiles, au centre de la cellule (au centre). Lorsque l'on poursuit le refroidissement, tous les atomes sont condensés (à droite).



ignore leur viscosité : si elle est quasi nulle, comme certaines théories le supposent, les condensats seraient des sortes de « supergaz » où des remous produits par excitation ne s'amortiraient jamais.

Plusieurs groupes ont commencé à caractériser les condensats. Le groupe de W. Ketterle a déjà montré que le recouvrement spatial de deux condensats forme un réseau de franges provenant d'interférences constructives et destructives : dans le nuage d'atomes, ces franges sont des zones de densité alternativement forte et faible. En appliquant à un condensat piégé par de la lumière un faible champ magnétique, ils ont en outre modifié les interac-

tions entre les atomes du condensat. Plusieurs autres équipes adaptent leur dispositif expérimental pour participer à cette étude.

Peut-on condenser autre chose que des atomes, des molécules par exemple ? La difficulté réside dans l'impossibilité de refroidir des molécules par laser. Toutefois, certains ont imaginé un mécanisme, nommé « refroidissement sympathique », qui permettrait la formation d'un tel condensat : on mélange des molécules à des atomes « condensables », comme le rubidium. En refroidissant ces derniers, et pour peu que les collisions entre les molécules et les atomes soient suffisamment fréquentes, on refroidit l'ensemble, et on aboutirait à un condensat moléculaire.

Eric CORNELL et Carl WIEMAN travaillent à l'Institut pour l'astrophysique de laboratoire (JILA), à Boulder (Colorado).

William D. PHILLIPS et Claude COHEN-TANNOUDJI, *New Mechanisms for Laser Cooling*, in *Physics Today*, vol. 43, pp. 33-40, octobre 1990.

Bose-Einstein Condensation, sous la direction de A. Griffin, D.W. Snoke et S. Stringari, Cambridge University Press, 1995.

M.H. ANDERSON, J.R. ENSHER, M.R. MATTHEWS, C.E. WIEMAN et

E.A. CORNELL, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor*, in *Science*, vol. 269, pp. 198-201, 14 juillet 1995.

M.R. ANDREWS, C.G. TOWNSEND, H.-J. MIESNER, D.S. DURFEE, D.M. KURN et W. KETTERLE, *Observation of Interference between Two Bose Condensates*, in *Science*, vol. 275, pp. 637-641, 31 janvier 1997.

De nombreux liens complémentaires sont disponibles sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com>



La conjecture de Syracuse

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le plus simple des problèmes mathématiques non résolus illustre la démarche des chercheurs.

Les sciences résolvent les questions élémentaires, puis passent à d'autres plus compliquées, progressant petit à petit. Le pédagogue défend aussi cette idée d'apprentissage graduel : «L'ontogenèse de l'apprentissage suit la phylogenèse des découvertes», pense-t-il : l'élève traite les cas simples et anciens, puis lentement passe aux cas difficiles.

Hélas, le monde mathématique ne se plie pas à cette vision d'une armée de chercheurs laborieux avançant selon un plan fixé sur un front de difficultés : il est des passages étroits où l'on ne peut maintenir l'allure. Pire, la plaine est semée de murailles invisibles dont on ne découvre l'existence qu'en s'y cognant.

La conjecture de Syracuse est une de ces murailles sur laquelle la communauté mathématique a buté (avec amusement d'abord, avec agacement ensuite) et, pour l'instant, aucun alpiniste n'a su la gravir. Le problème est de formulation si simple qu'il semble étonnant que personne n'ait pu le résoudre : quand vous aurez

lu cet article, vous serez au même point que les plus grands mathématiciens, ce qui n'est pas une piètre satisfaction.

Détaillons la règle du jeu. Prenez un entier, n ; s'il est pair, vous le divisez par 2, s'il est impair, vous le multipliez par 3 et vous ajoutez 1. Vous recommencez cette opération avec le résultat obtenu. Prenons un exemple : partant de 10, vous passez à 5, puis à 16 ($3 \times 5 + 1$), puis à 8, puis à 4, puis à 2, puis à 1, qui vous ramène à 4, 2, 1, cycle dans lequel vous restez alors tout le temps. Au bout du compte, on retombe sur 1. Deux entiers peuvent donner le même résultat (par exemple, 32 et 5 donnent 16, leurs cheminement se rejoignant), ce qui suggère de représenter les divers parcours sous la forme de graphes ou de tableaux.

Essayez d'autres valeurs au hasard, en vous aidant d'un ordinateur si vous voulez. Vous tomberez toujours sur 1. Cette affirmation péremptoire est injustifiée : personne n'a montré qu'on arrive toujours à 1 (d'où le nom de «conjecture de Syracuse» pour cette affirmation).

On a essayé tous les nombres jusqu'à $3,2 \cdot 10^{16}$, et tous aboutissent à 1.

TROUBLES DANS LES ESPRITS

Cette conjecture dont l'origine, vers 1950, reste confuse porte une grande variété d'autres noms provenant de mathématiciens l'ayant étudiée ou fait connaître : problème de Collatz, problème de Kakutani, problème de l'algorithme de Hasse, problème d'Ulam. Le nom de conjecture de Syracuse est lié à l'Université de Syracuse, aux États-Unis, où le problème fut étudié. Le nom le plus souvent retenu aujourd'hui est plus simplement celui de «problème $3x + 1$ ».

S. Kakutani fit circuler le problème et raconte : «Pendant un mois, tout le monde à l'Université de Yale travailla dessus, sans résultat. Un phénomène semblable se produisit à l'Université de Chicago. Cette énigme, pensaient certains, avait été avancée par le KGB pour ralentir la recherche mathématique aux États-Unis.»

1. RÈGLES ET EXEMPLES DU JEU DE SYRACUSE

LA RÈGLE DU JEU :

SI N EST PAIR : DIVISEZ PAR 2
SI N EST IMPAIR : MULTIPLIEZ
PAR 3 ET AJOUTEZ 1
RECOMMENCEZ
JUSQU'À OBTENIR 1

EXEMPLE : 10

10 DIVISÉ PAR 2 DONNE 5
5 MULTIPLIÉ PAR 3 ET PLUS 1
DONNE 16
16 DIVISÉ PAR 2 DONNE 8
8 DIVISÉ PAR 2 DONNE 4
4 DIVISÉ PAR 2 DONNE 2
2 DIVISÉ PAR 2 DONNE 1.

Pour suivre un vol à droite, on part d'un nombre, on se déplace vers la gauche en restant sur la même ligne autant qu'on peut. Quand on arrive en bout de ligne, on passe à la case au-dessus de la case où l'on est. Si l'entier n est placé dans la i -ème colonne, le nombre d'étapes paires du vol n est i . Le tableau infini contient-il tous les entiers? C'est la conjecture de Syracuse.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
						21	42	84	168	236	572	1344	2599	5398
				5	10	20	40	80	160	320	640	1280	2560	5120
								53	106	212	424	848	1696	
									35	70	140	280	560	
										23	46	92	184	
											15	30	60	
						13	26	52	104	208	416	832	1664	
							17	34	68	136	272	544		
								11	22	44	88	176		
											29	58		
													19	
										7	14	28	56	
											9	18		
					3	6	12	24	48	96	192	394	788	1576

2. LES 30 PREMIERS VOLS

VOL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
DURÉE	0	1	7	2	5	8	16	3	19	6	14	9	9	17	17	4	12	20	20	7	7	15	15	10	23	10	111	18	18	18
DURÉE DE VOL EN ALTITUDE	0	0	5	0	2	0	10	0	2	0	7	0	2	0	10	0	2	0	5	0	2	0	7	0	2	0	95	0	2	0
ALTITUDE MAXIMALE	1	2	16	4	16	16	52	8	52	16	52	16	40	52	160	16	52	52	88	20	64	52	160	24	88	40	9232	52	88	160

La conjecture de Syracuse a donné lieu à des publications rattachées au domaine de la théorie des nombres. Ces travaux ont pris une tournure très sérieuse, conduisant à certains résultats que nous allons examiner. Cependant, on ne sait toujours pas répondre à la question : «Arrive-t-on toujours sur 1?»

Que peut-il se produire d'autre ? Partant d'un entier quelconque, *a priori* trois cas sont possibles :

- on aboutit à 1 (c'est-à-dire sur le cycle $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$) ;
- on aboutit à un autre cycle que $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$;

- on tombe sur une suite infinie de nombres entiers ne revenant jamais là où elle est passée, et prenant donc des valeurs de plus en plus grandes. N'importe quel amateur peut tenter sa chance, mais il doit savoir que des gens intelligents (parfois géniaux) ont essayé et s'y sont cassé les dents : si vous croyez, après quelques heures de recherche, avoir trouvé un raisonnement qui démontre la conjecture, rédigez-le soigneusement. Toutefois, méfiez-vous : nombre de fausses preuves ont déjà circulé, dont une en 1997 sur Internet. Cette année, une preuve a été déposée chez un notaire par un mathématicien amateur inquiet qu'on ne lui vole son idée.

Il y a une vingtaine d'années, le grand mathématicien Paul Erdős, qu'on interrogeait sur ce problème et sur l'impuissance des mathématiques à le traiter malgré sa déconcertante simplicité, répondit que «les mathématiques ne sont pas encore prêtes pour aborder de telles questions». Est-ce toujours le cas aujourd'hui ?

DURÉE DE VOL, ALTITUDE, VOL EN ALTITUDE, ETC.

À défaut de prouver le résultat et pour tenter de trouver un contre-exemple (après tout, peut-être que tout entier n'arrive pas sur 1!), de nombreux calculs ont conduit à des records soigneusement tenus à jour et auxquels il est plus facile de s'attaquer qu'à la conjecture elle-même. L'étude des particularités du processus est motivée par l'espoir que la démonstration d'une propriété équivalente permettra de

démontrer la conjecture... Avant d'indiquer des records, fixons un vocabulaire imagé qui nous facilitera la description des comportements des suites.

Nous dirons, dans ce qui suit, que la suite obtenue à partir d'un entier est son *vol*. Ce vol atteint une *altitude maximale*, qui est l'entier le plus grand par lequel on passe. Ce vol a une *durée* égale au nombre d'étapes avant d'*atterrir* à 1. Nous examinerons aussi la *durée de vol en altitude*, la durée du vol dont les points de la suite sont supérieurs à la valeur du point de départ. Le vol numéro 11 est ainsi : $11 \rightarrow 34 \rightarrow 17 \rightarrow 52 \rightarrow 26 \rightarrow 13 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. Son altitude maximale est 52, sa durée de vol 14, et sa durée de vol en altitude 7 (voir la figure 3).

Remarquons qu'il existe des vols de durée aussi longue qu'on veut : le vol 2^n est $2^n \rightarrow 2^{n-1} \rightarrow 2^{n-2} \rightarrow 2^{n-3} \rightarrow \dots \rightarrow 2 \rightarrow 1$, qui a pour durée n . Les mathématiciens ont aussi démontré que, si tout nombre a une durée de vol en altitude finie, alors la conjecture de Syracuse est vraie (voir la figure 4).

Le record de vérification de la conjecture, nous l'avons mentionné, est $3,2 \cdot 10^{16}$, ce qui signifie que tous les vols dont le numéro est inférieur à $3,2 \cdot 10^{16}$ atterrissent en 1. Ce résultat est dû à Tomás Oliveira e Silva, de l'Université d'Aveiro, au Portugal, qui a développé des trésors d'ingéniosité pour mener les calculs.

On appelle *vol de durée record* un vol dont tous les vols de numéro plus petits sont plus courts. Le vol 7, dont la durée est 16, est un vol de durée record, car les vols 1, 2, 3, 4, 5 et 6 ont des durées inférieures. Aujourd'hui, le plus grand vol de durée record publié (par Eric Roosendaal) est le 109^e : il s'agit du vol 100759293214567, dont la durée est 1 820.

On considère de même les *vols de durée en altitude record* (tout vol de numéro plus petit reste en altitude moins longtemps). On en a trouvé 28, dont le plus grand publié (par E. Roosendaal) est le vol 70665924117439, qui reste en altitude 1 177 étapes.

Les *vols d'altitude record* sont ceux qui atteignent un maximum d'altitude

qu'aucun vol de numéro inférieur n'atteint. On en connaît 69, dont le dernier publié (par E. Roosendaal) est le vol 406738920960667, qui atteint l'altitude : 2560139341004245682288523934.

On démontre que le nombre $P(N)$ d'étapes paires du vol N et le nombre $I(N)$ d'étapes impaires vérifient toujours : $I(N)/P(N) < \log 2 / \log 3$. On remarque que, pour certains nombres N , le rapport $I(N)/P(N)$ s'approche de $\log 2 / \log 3 = 0,63092975\dots$ On conjecture qu'on s'en approche de plus en plus. Cela suggère de repérer les *records d'approche* : nombre N tel que le rapport $I(N)/P(N)$ est plus grand que le rapport $I(n)/P(n)$ pour toutes les valeurs de n inférieures à N .

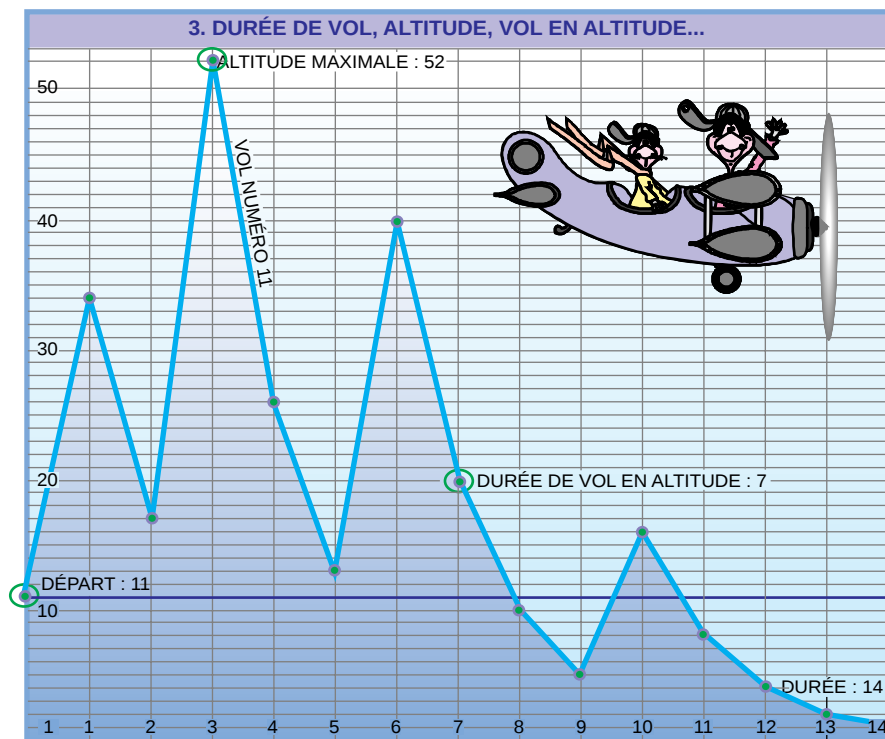
Ces records d'approche sont rares : seuls 15 sont connus aujourd'hui, dont le dernier est $N = 100759293214567$, qui donne $I(N)/P(N) = 0,604938$.

On sait que, pour tout entier p , il existe au moins un vol de durée p : le vol 2^p . En général, il en existe d'autres, et trouver celui qui a le plus petit numéro n'est pas facile. Un défi a été lancé pour l'an 2000 : trouver le plus petit entier n dont la durée de vol est 2000. Actuellement, c'est 377060271667498687, mais rien n'assure qu'il n'y a pas mieux.

En programmation, l'intelligence est utile, et les résultats obtenus avec les plus puissantes machines peuvent être battus par un ordinateur personnel astucieusement programmé. Voici quelques idées conduisant à gagner du temps dans la recherche d'un contre-exemple et utiles pour battre les records mentionnés.

Pour établir que tout vol inférieur à n atterrit en 1, il n'est pas nécessaire de mener le calcul jusqu'à 1 : on peut arrêter chaque vol dès qu'il passe en dessous de son point de départ x (car si, avant x , on a testé tous les vols de numéros inférieurs, on est alors certain que le vol x , une fois arrivé sous x , se poursuivra jusqu'à 1). On arrête aussi le calcul dès qu'on trouve un nombre déjà atteint par un vol précédent (pour le savoir, on doit mémoriser les nombres par lesquels on est déjà passé, ce qui doit se faire intelligemment pour que le procédé soit économique).

Plus intéressantes encore sont les remarques mathématiques du type :



tout vol dont le numéro est de la forme $n = 4k + 1$ finit par passer en dessous de n . On calcule les étapes à partir de n (qui est impair) : on obtient $12k + 4$ (pair), $6k + 2$ (pair), $3k + 1$ (pair ou impair, mais plus petit que n).

Ainsi, dans une suite de tests systématiques, il est inutile de traiter les nombres de la forme $4k + 1$ (car ils passent toujours sous n), ce qui fait gagner 25 pour cent du temps de calcul. Comme il est aussi inutile de traiter ceux de la forme $4k$ ou $4k + 2$ (qui passent dès la première étape au-dessous de leur point de départ), il ne reste plus qu'à essayer ceux de la forme $4k + 3$, soit une économie de calcul de 75 pour cent par rapport à la méthode naïve.

Ce type d'accélération des calculs mérite d'être perfectionné. Voici un premier pas dans cette direction : tout vol dont le numéro est de la forme $n = 16k + 3$ finit par passer en dessous de n . En effet, les étapes à partir de $16k + 3$ (impair) sont $48k + 10$ (pair), $24k + 5$ (impair), $72k + 16$ (pair), $36k + 8$ (pair), $18k + 4$ (pair), $9k + 2$ (pair ou impair, mais plus petit que n).

En poursuivant sur le même principe, on montre que, si l'on écrit les nombres sous la forme $256k + i$ avec i variant de 0 à 255, seuls ceux correspondant à un i parmi : 27, 31, 47, 55, 63, 71, 91, 103, 111, 127, 155, 159, 167, 191, 207, 223, 231, 235, 239, 251, 255 doivent être traités, ce qui cette fois donne un gain de plus de 92 pour cent.

Le programme de E. Roosendaal, à qui l'on doit certains records, est fondé sur une étude des entiers mis sous la

forme $65536k + i$ ($65536 = 2^{16}$), dont seuls 1 729 cas (soit 2,6 pour cent) restent à étudier. Cette économie est associée, dans son programme, à d'autres idées arithmétiques, ainsi qu'à une méthode de traitement simultané de plusieurs vols à la fois. Le programme de T. Oliveira e Silva améliore encore ces idées, ce qui lui permet d'être le détenteur actuel du record de vérification de la conjecture.

DES RÉSULTATS EN PROGRÈS

Les résultats les plus avancés obtenus du côté des tentatives de démonstrations mathématiques utilisent aussi l'idée du *vol en altitude*. En effet, un peu de réflexion montre que la conjecture de Syracuse est équivalente à *la durée de tout vol en altitude est finie* : tout vol finit par passer sous son point de départ.

Fondant leurs raisonnements sur une étude arithmétique fine de l'arbre associé à la conjecture, R. Terra et C. Everett ont montré indépendamment que «presque tout vol finit par passer sous son point de départ». Le «presque» signifie ici que :

- il existe un nombre n tel que, parmi les vols de numéro inférieurs à n , au plus dix pour cent ne passent pas sous leur point de départ ;
- il existe un nombre n' (plus grand que n) tel que, parmi les vols de numéros inférieurs à n' , au plus un pour cent ne passent pas sous leur point de départ ;
- il existe un nombre n'' (plus grand que n') tel que parmi les vols de numéros

inférieurs à n'' , au plus 0,1 pour cent ne passent pas sous leur point de départ ; etc.

On a l'impression qu'on n'est pas loin de la conjecture, mais réfléchissez : ce résultat signifie seulement que les vols qui restent toujours en altitude sont de plus en plus rares quand on tend vers l'infini. Il se peut quand même qu'il en existe, et donc on ne peut pas déduire la conjecture du *presque* de R. Terra et C. Everett.

Pire, leur résultat n'implique même pas qu'une infinité de vols atterrissent en 1, car il n'interdit pas l'existence d'un cycle autre $4 - 2 - 1$. Le résultat est un progrès seulement si c'est véritablement un premier pas vers le même résultat sans le «presque».

Plus récemment, des démonstrations concernant cette fois les vols qui atterrissent en 1 (et non plus les vols qui ne restent qu'un temps fini au-dessus de leur point de départ) ont été obtenues. On a prouvé qu'il existait une constante c telle que, si n est assez grand, alors le nombre de x inférieurs à n qui atterrissent en 1 est supérieur à n^c .

Le résultat a d'abord été montré pour la constante $c = 0,05$ par R. Crandall en 1978, puis avec $c = 0,3$ par J. Sander et $c = 0,43$ par I. Krasikov en 1989, puis avec $c = 0,48$ par G. Wirsching en 1993, et enfin avec $c = 0,81$ par D. Applegate et J. Lagarias en 1995. On approche du but (qui sera atteint si l'on obtient le résultat avec $c = 1$), mais rien n'assure que les méthodes utilisées permettront d'avancer plus.

La démonstration du résultat de 1995 est assez particulière, car elle utilise la résolution de grands systèmes d'équations qui ont été traitées par programmes. La démonstration ne peut être vérifiée à la main, et l'article dans lequel le résultat est présenté donne, non pas la démonstration du théorème avec $c = 0,81$, mais l'explication de la façon dont les systèmes d'équations sont écrits, les résultats des programmes et la manière de les interpréter : un mathématicien qui veut vérifier le résultat doit suivre les explications et les raisonnements, écrire un programme (compliqué!), le faire fonctionner et s'assurer qu'il a obtenu ce qu'il faut.

Une autre série de résultats remarquables concerne cette fois les cycles (éventuels) autres que celui à trois éléments, $4 - 2 - 1$. R. Crandall et N. Yoneda ont établi en 1978 que, s'il en existait, ils étaient nécessairement de taille (nombre de leurs éléments) supérieure à 275 000. Cette borne a été poussée à 17 087 915 en 1993, puis tout récemment à 102 225 496. Les preuves de ces affirmations utilisent les informations provenant des records de vérification de la conjecture, faisant là encore de ces résul-

tats mathématiques des propriétés invérifiables par un mathématicien sans ordinateur. S'il y a des cycles autres que notre cycle $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, ils seront vraiment très longs !

UN ARGUMENT HEURISTIQUE

Les expérimentations numériques jusqu'à $3,2 \cdot 10^{16}$ constituent un premier «presque» ; les résultats mathématiques déjà cités constituent un second «presque». En voici un troisième.

Certains raisonnements dits *heuristiques* («qui aident à la découverte»), fondés sur des considérations approximatives ou probabilistes, éclairent une question mathématique. Le raisonnement suivant concernant la conjecture de Syracuse est une tentative de ce type :

«Chaque nombre est soit pair, soit impair ; il y a autant de nombres pairs que de nombres impairs, et donc une fois sur deux, lors d'un vol, on appliquera la formule $n \rightarrow 3n + 1$ et, une fois sur deux, on appliquera la formule $n \rightarrow n/2$. À chaque fois qu'on fera deux étapes, l'altitude sera donc, en gros, multipliée par $3/2$ (ce qui revient à ajouter 50 pour cent), et... le vol montera à des altitudes infinies.» Le raisonnement heuristique naïf conduit à l'inverse de ce qu'énonce la conjecture de Syracuse !

Ce raisonnement est vraiment trop naïf, car il ne tient pas compte du fait que, lorsque l'on a appliqué la formule $n \rightarrow 3n + 1$ à partir d'un nombre impair, on est certain de trouver un nombre pair (trois fois un nombre impair est impair, en ajoutant un, on a donc un nombre pair).

Il faut améliorer le raisonnement. Voici la version qu'en propose J. Lagarias : après avoir appliqué la formule $n \rightarrow 3n + 1 = m$ (pair) et juste après la formule $m \rightarrow m/2$, on tombe cette fois sur un nombre qu'on peut considérer comme quelconque. Il a donc 1 chance sur 2 d'être impair, 1 chance sur 4 d'être le double d'un nombre impair, 1 chance sur 8 d'être le quadruple d'un nombre impair, etc. Le vol qui mène d'un nombre impair au suivant aura donc pour effet «en moyenne» :

- de multiplier n par $3/2$, une fois sur 2 (trajet de longueur 2) ;
- de le multiplier par $3/4$, une fois sur 4 (trajet de longueur 3) ;
- de le multiplier par $3/8$, une fois sur 8 (trajet de longueur 4) ;
- etc.

Cela conduit à la conclusion qu'en moyenne, entre deux entiers impairs appartenant à un même vol, on multiplie l'altitude par la constante :

$$c = (3/2)^{1/2} (3/4)^{1/4} (3/8)^{1/8} (3/16)^{1/16} \dots = 3/4.$$

4. RÉSULTATS THÉORIQUES

(a) Si tout nombre supérieur à 4 a une durée de vol en altitude finie, alors la conjecture de Syracuse est vraie. Supposons que l'hypothèse est vraie.

Montrons par récurrence que tout n atterrit en 1. C'est vrai pour 5. Soit un entier $n > 5$. Supposons que tout entier $i < n$ atterrit en 1. Par hypothèse, n a une durée de vol en altitude finie. Donc, partant de n , on descend sous n , et l'on arrive donc à un i dont, par hypothèse, on sait qu'il atterrit en 1, donc n atterrit en 1.

(b) Plus généralement, la conjecture de Syracuse est équivalente à l'un des énoncés suivants :

- (1) la durée de tout vol est finie ;
- (2) la durée de tout vol en altitude est finie ;
- (3) tout vol a un nombre fini d'étapes paires ;
- (4) tout vol a un nombre fini d'étapes paires en altitude ;
- (5) tout vol a un nombre fini d'étapes impaires ;
- (6) tout vol a un nombre fini d'étapes impaires en altitude.

Il est clair que l'affirmation (1) implique les autres affirmations.

Nous avons déjà vu que (2) implique (1). Partant d'un nombre pair, on aboutit nécessairement, au bout d'un nombre fini d'étapes, à un nombre impair et partant d'un nombre impair, on aboutit en une étape à un nombre pair. Cela montre que (3) équivaut à (5) et à (1). De même (4) équivaut à (6) et à (2).

En moyenne, on passe donc d'un nombre impair à un nombre impair plus petit de 25 pour cent, et donc on finit par atterrir sur un cycle (le raisonnement heuristique n'exclut pas qu'il puisse y avoir d'autres cycles que $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$).

L'intérêt de ce raisonnement un peu compliqué est qu'en considérant maintenant un processus aléatoire construit sur le modèle supposé dans le raisonnement heuristique, on peut calculer le temps moyen pour que, partant de n , on passe en dessous de n (*durée moyenne de vol en altitude en ne comptant que les étapes impaires*). Le résultat de ce calcul est 3,49265... Or en évaluant, cette fois expérimentalement, la valeur moyenne de cette durée de vol en altitude (on essaie tous les entiers entre trois et deux milliards, et l'on fait la moyenne), on trouve 3,4926... Cette coïncidence numérique remarquable indique que le modèle probabiliste du raisonnement heuristique est certainement correct.

S'il est correct, il n'y a pas de vol infini en altitude, et donc la conjecture est vraie (du moins concernant l'inexistence de vol tendant vers l'infini).

Malheureusement, pour avoir une démonstration complète, il faudrait justifier par une preuve (et pas par une expérimentation) que le modèle probabiliste utilisé est correct. Le raisonnement heuristique renforce la conviction qu'il n'existe pas de vols infinis, mais ce n'est pas une démonstration.

On est ici dans une situation analogue à celle concernant les décimales du nombre π : dans les deux cas, on a une suite numérique parfaitement déterminée par des règles arithmétiques fixées ; dans

les deux cas, on constate que la suite se conforme miraculeusement bien à un modèle probabiliste clairement identifié (pour π , c'est le modèle du tirage équitable des chiffres) ; dans les deux cas, une vérification numérique poussée a été menée, mais, dans les deux cas, sans prouver ce qui est constaté par les calculs numériques.

Remarquons que les modèles probabilistes prédisent que l'altitude la plus haute du vol n est au plus Kn^2 (pour une certaine constante K), ce qui, pour $K = 8$, est aussi expérimentalement vérifié.

Nous avons maintenant trois «presque» pour la conjecture de Syracuse. Des «presque» ne suffisent pas à démontrer un résultat, et donc, même si notre conviction s'est renforcée, la conjecture de Syracuse n'est pas devenue un théorème.

L'INDÉCIDABILITÉ N'EST PAS LOIN

Jeffrey Lagarias m'a indiqué que «la conjecture est encore désespérément hors de portée, mais je la crois vraie. Si elle devait être fausse, cela serait à cause d'un long cycle plutôt qu'à cause d'un vol infini. Même cela semble extrêmement improbable. Mon intuition dit "impossible", mais je ne sais pas en trouver une bonne traduction verbale».

Ne pas réussir à démontrer un résultat conduit à se poser la question : serait-ce un indécidable ? C'est-à-dire : ne se pourrait-il pas que les méthodes traditionnelles des mathématiques (codifiées, par exemple, dans la très puissante théorie des ensembles) ne soient pas en mesure de démontrer la

5. LES VOLS RECORDS

VOL	DURÉE	ALTITUDE MAXIMALE
3	7	16
6	8	16
7	16	52
9	19	52
18	20	52
25	23	88
27	111	9232
54	112	9232
73	115	9232
97	118	9232
129	121	9232
171	124	9232
231	127	9232
313	130	9232
327	143	9232
649	144	9232
703	170	250504
871	178	190996
1161	181	190996
2223	182	250504
2463	208	250504
2919	216	250504
3711	237	481624
6171	261	975400
10971	267	975400
13255	275	497176
17647	278	11003416

conjecture de Syracuse qui pourtant serait vraie ?

Notons que la conjecture pourrait être fausse et que cela soit indécidable par les méthodes mathématiques traditionnelles : cela signifierait qu'un jour nous allons tomber sur un entier que nous n'arriverons pas à faire atterrir sur 1, mais dont nous ne saurons pas montrer non plus qu'il n'atterrira jamais sur 1.

Exceptionnellement, nous avons quelques raisons de considérer cette question de l'indécidabilité avec sérieux, car un résultat de logique mathématique établit que nous ne sommes pas loin de l'indécidabilité.

Ce résultat est dû à J. Conway. Celui-ci a considéré les généralisations de la conjecture de Syracuse obtenues en prenant non plus deux formules qu'on applique selon que n est pair ou impair, mais en considérant p formules qu'on applique selon le reste de la division de n par p . Conway montre comment définir précisément une conjecture, du type « tout n atterrit à 1 », de telle façon qu'elle soit indécidable dans la théorie des ensembles.

En fait, dans n'importe quelle théorie mathématique, la méthode de Conway permet de construire un problème ressemblant à la conjecture de Syracuse et qui y soit indécidable (attention : cela ne

signifie pas qu'on puisse définir un problème de type Syracuse qui soit indécidable dans toutes les théories à la fois ; une telle chose n'existe pas, car « être indécidable » est toujours relatif à une théorie fixée).

Le résultat de Conway n'établit pas que la conjecture est indécidable ni même qu'elle est difficile (car certaines variantes de la conjecture sont faciles !), mais seulement que des problèmes assez semblables le sont, ce qui est quand même troublant.

En 1993, le résultat de Conway a été utilisé par Philippe Devienne, Patrick Lebègue et Jean-Christophe Routier, du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, pour démontrer la puissance d'un formalisme de programmation à base de règles logiques. Comme d'habitude, les recherches en apparence les plus futiles se trouvent avoir des conséquences pratiques, insoupçonnables *a priori*.

LES VARIANTES SONT AUSSI DIFFICILES

Les mathématiciens sont toujours soucieux de généralité, car elle permet d'extraire pleinement la puissance d'un raisonnement particulier et d'en tirer des conséquences inattendues. Ils se sont donc interrogés sur ce qu'on obtenait pour des problèmes ressemblant à la conjecture de Syracuse.

Ils se sont demandé d'abord ce qui se passait pour le problème $3x + 1$ lorsqu'on autorisait les altitudes négatives. La conjecture qu'ils ont proposée est que tous les vols se terminent sur l'un des trois cycles suivants :

$-1 \rightarrow -2$.
 $-5 \rightarrow -14 \rightarrow -7 \rightarrow -20 \rightarrow -10$.
 $-17 \rightarrow -50 \rightarrow -25 \rightarrow -74 \rightarrow -37 \rightarrow -110$
 $\rightarrow -55 \rightarrow -164 \rightarrow -82 \rightarrow -41 \rightarrow -122 \rightarrow$
 $-61 \rightarrow -182 \rightarrow -91 \rightarrow -272 \rightarrow -136 \rightarrow$
 $-68 \rightarrow -34$.

Pour la fonction $5x + 1$ (à utiliser à place de $3x + 1$ quand x est impair), tous les vols n'arrivent pas à 1, car, en plus du cycle $6 \rightarrow 3 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$, on trouve les cycles :

$13 \rightarrow 66 \rightarrow 33 \rightarrow 166 \rightarrow 83 \rightarrow 416 \rightarrow$
 $208 \rightarrow 104 \rightarrow 52 \rightarrow 26$.
 $17 \rightarrow 86 \rightarrow 43 \rightarrow 216 \rightarrow 108 \rightarrow 54 \rightarrow 27$
 $\rightarrow 136 \rightarrow 68 \rightarrow 34$.

Le vol 7 pour $5x + 1$ semble infini quoi qu'on ne sache pas le démontrer.

L'adaptation de l'argument heuristique de Lagarias suggère d'ailleurs que, pour $qx + 1$ à la place de $3x + 1$, si q est > 3 , alors il existe des vols infinis.

Pour le problème $181x + 1$, on trouve un cycle qui ne contient pas 1. De même, pour $q = 1\,093$, on démontre que certains vols n'atterrissent pas à 1.

Tout cela a conduit à une nouvelle conjecture formulée par Richard Crandal (une sorte de conjecture anti-Syracuse) qui affirme : pour $q \times x + 1$ (à la place de $3x + 1$), avec q impair et supérieur à 3, il y a toujours au moins un vol qui n'atterrit pas en 1. Bien sûr, cette conjecture reste à démontrer !

Les considérations ci-dessus sur les cycles montrent que la conjecture de Crandal est vraie pour q égal à 5, 181 et 1093. En 1995, Z. Franco et C. Pomerance ont montré que les entiers q pour lesquels la conjecture de Crandal était vraie devenaient de plus en plus fréquents quand q tend vers l'infini, autrement dit que la conjecture était « presque vraie » (comme il est « presque vrai » que tout vol pour $3x + 1$ passe sous son point de départ).

D'autres généralisations ont été formulées, et des résultats ont établi des connexions entre ces questions, l'arithmétique des nombres premiers, certaines équations diophantiennes (équations à coefficients entiers dont on cherche des solutions en nombres entiers), les chaînes de Markov (des itérations probabilistes) et la théorie ergodique (études de l'utilisation répétée des fonctions de mélange).

Avec toutes ces variantes donc, même si la conjecture de Syracuse était résolue prochainement, les mathématiciens et les expérimentateurs numériques ont de quoi s'amuser pendant des siècles.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lilfl.fr

J. H. CONWAY, *Unpredictable Iterations. Proc. 1972 Number Theory Conference, University of Colorado, Boulder, 1972.*

V. KLEE et S. WAGON, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory. Ch. 19 : The $3x + 1$ Problem*, Math. Assoc. of America, Dolciani Math. Exposition, 11, 1993.

J. LAGARIAS, *The $3x + 1$ Problem and its Generalizations*, in *Amer. Math. Monthly*, 92, pp. 3-23, 1985.

J. LAGARIAS, *The $3x + 1$ Problem Annotated Bibliography*. Novembre 1997. Communication personnelle.

K.R. MATTHEWS, *The Generalized $3x + 1$ Mapping*, 1997, à paraître.

T. Oliveira e SILVA, *Maximum Excursion and Stopping Time Record Holders for the $3x+1$ Problem : Computational Results*. À paraître dans *Mathematics of Computation*.

E. ROOSENDAL, *On the $3x + 1$ Problem (1-1998)* : <http://personal.compu-train.nl/eric/wondrous/>



Bouteilles et rubans

IAN STEWART

Soufflage de verre et topologie.

Alan Bennett est un souffleur de verre qui exerce son art à Bedford, en Angleterre. Il y quelques années, il fut intrigué par les étranges surfaces qu'étudient les topologistes : ruban de Möbius, bouteilles de Klein, etc. Cherchant à les reproduire, il rencontra un curieux problème mathématique qu'il résolut par le soufflage, alors que des mathématiciens avaient jusque là échoué. Sa série d'objets remarquables, de la recherche mathématique figée dans le verre, sera bientôt exposée dans les musées scientifiques.

Les topologistes étudient les propriétés qui sont inchangées quand une forme est étirée, tordue ou arbitrairement déformée. On impose seulement aux déformations d'être « continues » : les objets peuvent être coupés s'ils sont recollés, de sorte que des points initialement voisins le soient encore après le recollement. La connexion est une propriété topologique : les objets sont-ils d'une ou de plusieurs pièces ? Il y a d'autres interrogations topologiques. Les objets sont-ils noués ? Sont-ils liés les uns aux autres ? Sont-ils troués ?

Les formes topologiques les plus usuelles semblent n'être que des amusements enfantins, mais ils sont pleins de mystères mathématiques profonds. Ainsi, le ruban de Möbius, que l'on obtient en recollant les extrémités d'une bande de papier, après l'avoir tordue d'un demi tour, est la plus simple des surfaces à une seule face : si deux peintres munis respectivement de peinture bleue et de peinture rouge peignaient ce qu'ils pensaient être les deux faces d'un ruban, ils finiraient par se rencontrer.

Quand on tord une bande de plusieurs demi tours avant de la recoller, on obtient des variantes du ruban de Möbius. Pour un topologiste, la distinction importante réside entre les bandes recollées après un nombre pair de demi

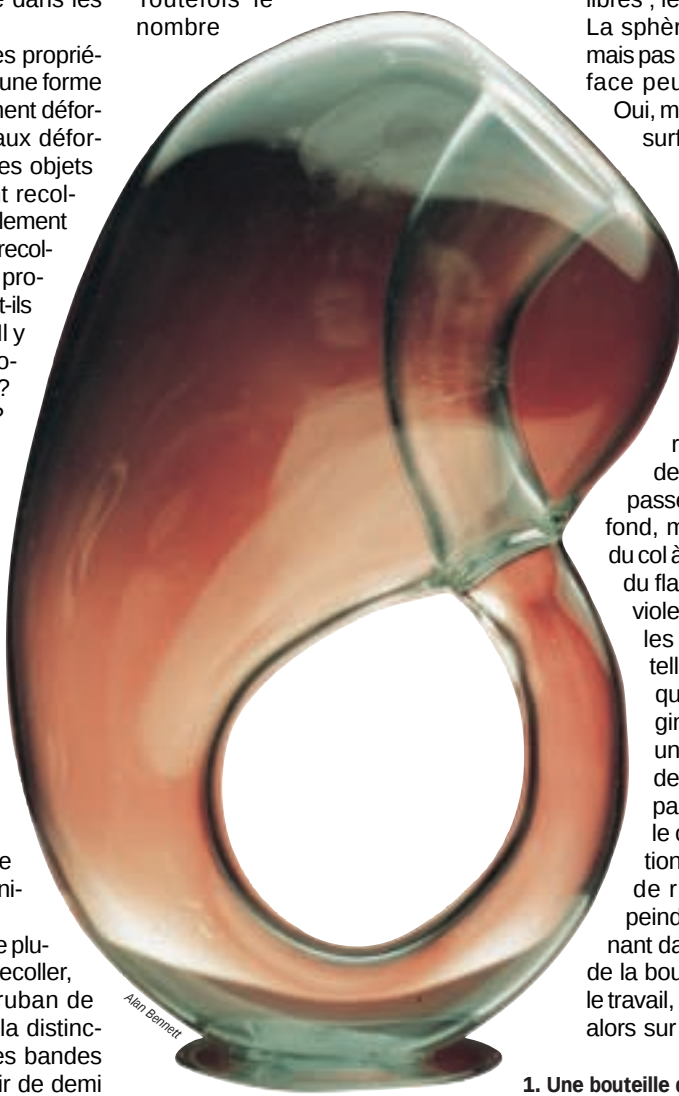
tours, et les bandes recollées après un nombre impair de demi tours ; les premières n'ont qu'une face, et les secondes en ont deux. Pour comprendre pourquoi, coupez une bande tordue de trois demi tours, par exemple ; puis, en conservant les deux coupures parallèles, déplacez l'une des extrémités afin de la dérouler (et non la détordre), avant de la ramener vers l'autre extrémité ; vous obtiendrez, par recollement, un ruban de Möbius, mais pas un simple cylindre. Toutefois le nombre

exact de demi torsions n'est pas sans importance : il détermine la façon dont la bande est plongée dans l'espace qui l'environne. La question de la géométrie intrinsèque de la bande est donc d'un autre ordre que la manière dont la bande est plongée dans l'espace. La première ne dépend que de la parité du nombre de demi tours, la seconde de la valeur exacte de ce nombre.

Le cylindre, obtenu par recollement d'une bande sans torsion, a deux bords libres ; le ruban de Möbius en a un seul. La sphère, en revanche, a deux faces mais pas de bord. Une surface à une seule face peut-elle ne pas avoir de bord ?

Oui, mais, dans notre espace, une telle surface se recoupe elle-même.

Cette particularité ne gêne pas les topologistes, dont c'est le métier d'imaginer des surfaces dans des espaces de dimensions supérieures ou, même, débarrassées des espaces où ces surfaces seraient plongées. En revanche, pour les souffleurs de verre, la difficulté est considérable. La figure 1 représente pourtant une bouteille de Klein en verre : le col a été étiré, passé à travers le flanc et recollé au fond, mais par l'intérieur. Le passage du col à travers le flanc sépare les points du flanc de façon permanente, ce qui viole les règles de la topologie, mais les topologistes admirent tant une telle matérialisation de leurs idées qu'ils ne s'en plaindront pas. Imaginons que nous voulions peindre une telle bouteille : nous partirions de l'extérieur du bulbe supérieur, par exemple, et descendrions vers le col. En arrivant à l'auto-intersection, nous poursuivrions comme si de rien n'était et continuerions à peindre le col, qui se trouve maintenant dans ce qui semble être l'intérieur de la bouteille. Toutefois, en poursuivant le travail, nous verrions que nous sommes alors sur la face « interne » du bulbe : ce



1. Une bouteille de Klein soufflée par Alan Bennett.