

(b) L'heure écoulée, il remet sa solution sous forme écrite en utilisant un codage standardisé pour indiquer la meilleure suite de mouvements qu'il a trouvée.

La longueur d'une solution est le nombre de rotations de face, une rotation pouvant être d'un quart de tour ou d'un demi-tour. Le champion 2010 est le Hongrois (tiens, tiens !) Itsvan Kocza, qui a proposé une solution en 22 mouvements pour le cube mélangé qu'on lui avait soumis. Il faut noter que ce nombre est particulièrement faible, car les méthodes de reconstitution de cubes expliquées dans les livres ou les multiples pages Internet qui en décrivent conduisent à des reconstitutions en 60 mouvements environ, ou 30 pour les meilleures... qui sont plus difficiles à apprendre. Ce score de 22 n'est pas dû au hasard qui aurait fait que le problème soumis en 2010 était particulièrement simple. La preuve en est qu'en 2009, le champion de cette épreuve avait réussi lui aussi en 22 mouvements. En 2008, le record était de 27, en 2007 de 35, en 2006 de 28, en 2005 de 28. Les joueurs progressent et une question vient à l'esprit : peut-on toujours faire 22, ou moins ? Plus précisément, quel est le nombre de mouvements qu'un joueur parfait aura à faire dans le pire cas ?

Quand la théorie pure bute

Depuis longtemps, on soupçonne que la réponse est 20. En juillet dernier, la preuve du résultat en a été donnée. Puisque l'étude des mouvements du cube de Rubik se ramène à l'étude d'un certain groupe mathématique, on pouvait penser que la solution proviendrait de progrès mathématiques. La structure étudiée ne contient aucun arbitraire, contrairement par exemple au jeu d'échecs dont le graphe des parties possibles est compliqué, du fait des règles complexes. Ici, la structure du problème, un graphe aussi (voir la figure 4), est définie à partir d'éléments géométriques très simples et la situation paraît donc idéale pour que les mathématiciens exercent leur talent et produisent une réponse s'appuyant sur tout ce qu'ils savent des groupes, de leur classification, de leurs



3. LES VARIANTES LES PLUS CLASSIQUES du cube de Rubik sont le cube $2 \times 2 \times 2$, le cube $4 \times 4 \times 4$ (*Rubik's Revenge*), le cube $5 \times 5 \times 5$ (*Professor's Cube*). Tous donnent lieu à des épreuves dans les compétitions de la WCA. Les plus gros, commercialisés depuis 2008, sont le cube $6 \times 6 \times 6$ (*V-cube 6*) et le cube $7 \times 7 \times 7$ (*V-cube 7*). Le nombre de configurations du $2 \times 2 \times 2$ est 3 674 160. Le nombre de configurations du $3 \times 3 \times 3$ est $4,3 \times 10^{19}$. Celui du $4 \times 4 \times 4$ est $7,4 \times 10^{45}$, celui du $5 \times 5 \times 5$ est $2,8 \times 10^{74}$, celui du $6 \times 6 \times 6$ est $1,57 \times 10^{116}$, celui du $7 \times 7 \times 7$ est $1,95 \times 10^{160}$. On dépasse alors le nombre de bits d'information contenus dans l'Univers visible ! Le succès du cube a été tel que des dizaines de variantes ont été inventées, dont des versions en braille pour les aveugles.

4. Le graphe du cube de Rubik

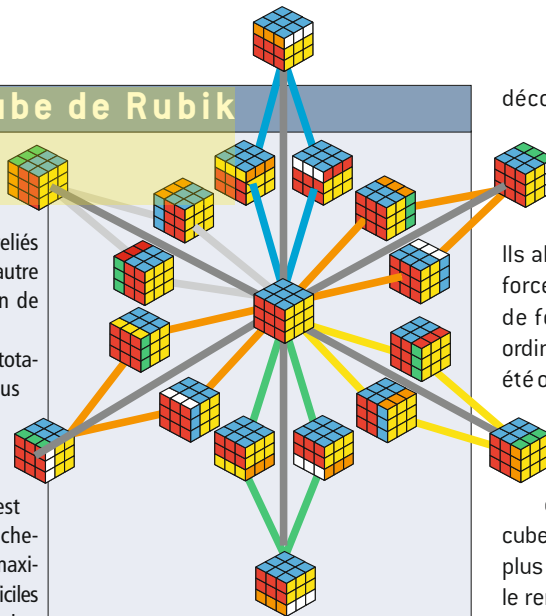
On associe au cube de Rubik le graphe de toutes ses configurations. Les nœuds du graphe sont les $4,3 \times 10^{19}$ configurations possibles et deux nœuds sont reliés par un arc si l'on peut passer de l'un à l'autre en opérant un mouvement de rotation de l'une des faces du cube.

Ce graphe, impossible à dessiner en totalité, est extrêmement symétrique, car tous les nœuds sont équivalents comme c'est le cas par exemple du graphe des sommets d'un cube. Trouver les meilleures suites de mouvements pour résoudre le cube est équivalent à rechercher les plus courts chemins dans ce graphe. Trouver le nombre maximum de mouvements qu'exigent les plus difficiles des configurations est équivalent à rechercher les configurations les plus éloignées de la configuration initiale, ce qui, à cause de la symétrie du graphe, revient à trouver le diamètre du graphe (la distance maximale séparant deux nœuds du graphe).

Les algorithmes généraux de calcul dans un graphe (calcul de plus court chemin, calcul de diamètre, etc.) ne peuvent pas s'appliquer directement à cause de la taille du graphe, et cela même en utilisant de puissants réseaux d'ordinateurs. Le diamètre du graphe a été calculé en adaptant ces méthodes et en exploitant au mieux les propriétés particulières du graphe.

L'une des idées utilisées par les chercheurs est la suivante. Pour connaître un court chemin entre deux positions A et B, on peut choisir une configuration C pas trop loin de A, puis rechercher le plus court chemin entre A et C et le plus court chemin entre C et B. La mise bout à bout des deux plus courts chemins ne conduit pas toujours au plus court chemin entre A et B, mais elle en donne un assez bon. De plus, si on fait varier C, cela permet presque à coup sûr de découvrir le plus court chemin entre A et B.

Le problème du diamètre du graphe du cube de Rubik est étudié depuis 30 ans et les progrès ont été lents jusqu'à la démonstration en juillet 2010 que le diamètre est 20. Pour mesurer les progrès, voyons la date, le nom du prouveur et le diamètre entre parenthèses : juillet 1981, Morwen Thistlethwaite (52) ; avril 1993, Hans Kloosterman (42) ; mai 1992, Michael Reid (39) ; mai 1992, Dik Winter (37) ; janvier 1995, Michael Reid (inférieur à 29 et supérieur à 20) ; décembre 1995, Silviu Radu (28) ; avril 2006, Sil-



Début de l'immense graphe des configurations du cube de Rubik.

viu Radu (27) ; mai 2007, Dan Kunkle (26) ; mars 2008, Tomas Rokicki (23) ; août 2008, Tomas Rokicki (22) ; juillet 2010, Tomas Rokicki, Herbert Kociemba, Morley Davidson et John Dethridge prouvent enfin que le diamètre est 20.

Le tableau suivant (obtenu à l'occasion du dernier résultat) indique le nombre de nœuds du graphe ayant une distance donnée à la configuration initiale. Les dernières lignes du tableau sont des valeurs approchées en cours de calcul.

0	1
1	18
2	243
3	3 240
4	43 239
5	574 908
6	7 618 438
7	100 803 036
8	1 332 343 288
9	17 596 479 795
10	232 248 063 316
11	3 063 288 809 012
12	40 374 425 656 248
13	531 653 418 284 628
14	6 989 320 578 825 358
15	91 365 146 187 124 313
16 environ	1 100 000 000 000 000 000
17 environ	12 000 000 000 000 000 000
18 environ	29 000 000 000 000 000 000
19 environ	1 500 000 000 000 000 000
20 environ	300 000 000

décompositions, etc. Il n'en a rien été, la théorie pure s'est révélée inopérante !

La réponse, 20, n'a été obtenue qu'à l'issue d'une série de progrès algorithmiques s'étalant sur 20 ans. Ils aboutissent grâce à l'utilisation d'une force de calcul équivalente à 35 années de fonctionnement ininterrompu d'un ordinateur de bureau. Ce temps de calcul a été obtenu en mobilisant un ensemble d'ordinateurs prêtés par le géant Google pendant quelques semaines.

Le nombre de configurations qu'on peut obtenir en mélangeant le cube est de 43 milliards de milliards. Si en plus de le manipuler, vous le démontez et le remontez sans prendre de précautions, il y a 12 fois plus de configurations et vous n'aurez donc qu'une chance sur 12 de pouvoir le remettre en ordre. Cette propriété du cube est analogue à celle du Taquin : en démontant un Taquin et en remplaçant les pièces sans précaution, vous n'avez qu'une chance sur deux de pouvoir revenir à la position initiale.

On peut s'occuper une à une des $4,3 \times 10^{19}$ configurations possibles, en recherchant à chaque fois la meilleure suite de mouvements pour l'atteindre. Trouver la suite la plus courte de mouvements pour ranger une position donnée est aujourd'hui possible grâce aux bons algorithmes mis au point par Herbert Kociemba, qui travaille sur la question depuis 1992. Pour une position donnée, il faut souvent plusieurs secondes, même avec une machine puissante, pour identifier la suite optimale de mouvements. La recherche de la pire configuration du cube de Rubik que nous obtiendrions en calculant, pour chaque configuration, la séquence optimale de mouvements avec un algorithme traitant une configuration par seconde, exigerait donc de mobiliser pendant plus de 1 300 ans le milliard d'ordinateurs qu'il y a sur Terre aujourd'hui. La méthode brutale n'est pas en mesure de donner la réponse.

Une autre idée consiste à procéder progressivement en mémorisant ce qu'on obtient et en le réutilisant. On regarde toutes les configurations qu'on atteint en un mouvement (il y en a 18) et on mémorise leur liste avec