

n^2 : 0, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 289, 324, 361, 400, 441, 484, 529, 576, 625, 676, 729, 784, 841, 900, 961, 1024, 1089, 1156, 1225, ...

$3n^2$: 0, 3, 12, 27, 48, 75, 108, 147, 192, 243, 300, 363, 432, 507, 588, 675, 768, 867, 972, 1083, 1200, 1323, 1452, 1587, 1728, 1875, 2028, 2187, 2352, 2523, 2700, 2883, ...

$n^2 + p^2$: 2, 5, 8, 10, 13, 17, 18, 20, 25, 26, 29, 32, 34, 37, 40, 41, 45, 50, 52, 53, 58, 61, 65, 68, 72, 73, 74, 80, 82, 85, 89, 90, 97, 98, 100, 101, 104, 106, 109, 113, 116, ...

En les regroupant jusqu'à 100 (voir <https://oeis.org/A005792>): 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 25, 26, 27, 29, 32, 34, 36, 37, 40, 41, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 58, 61, 64, 65, 68, 72, 73, 74, 75, 80, 81, 82, 85, 89, 90, 97, 98, 100.

Le résultat pour $3n^2$ provient du découpage en n^2 de chacun des trois triangles de la figure C de l'encadré 2, découpage qui donne, comme on le souhaite, $3n^2$ triangles de même taille et semblables au grand triangle. Pour la série de nombres $n^2 + p^2$, il faut remarquer qu'un triangle rectangle T de côtés n et m peut être utilisé $n^2 + m^2$ fois pour composer un triangle rectangle semblable à T (voir les figures G, H, I de l'encadré 2).

Il faut bien noter que la partie positive du résultat est assez facile (on examine et on contrôle les constructions proposées), mais que ce n'est pas du tout le cas pour la partie négative (consistant à montrer qu'il n'existe aucun autre nombre pour lequel on puisse faire le pavage recherché), qui est sensiblement plus délicate.

POSSIBILITÉS ET IMPOSSIBILITÉS INATTENDUES

Le troisième problème (C) se révèle d'une incroyable difficulté, malgré quelques progrès récents. Rappelons qu'on se demande pour quelles valeurs de m il existe un triangle T pavable par m triangles T' identiques (on n'impose pas ici que T' soit semblable à T).

Ce qui est fascinant dans ce problème, c'est qu'on découvre aujourd'hui encore des pavages que personne n'avait repérés auparavant (voir l'encadré 3). Ainsi, le découpage en 6 est possible maintenant. Plus surprenant, le découpage en 28 est possible. Michael Beeson l'a découvert en utilisant un programme qui devait l'aider à démontrer que 28 n'était pas possible! Le découpage en 44 est aussi possible. Le découpage en $153 = 3^2 + 12^2$ était possible avant (comme somme de deux carrés), mais un pavage inattendu est apparu!

Deux résultats remarquables ont aussi été démontrés. Le premier indique que les valeurs $m=7$ et $m=11$ sont impossibles: aucun triangle ne peut être pavé par 7 ou 11 triangles identiques! N'est-il pas fascinant qu'une propriété générale aussi simple du triangle n'ait pas été

découverte ou même soupçonnée jusqu'à récemment? La plus simple des questions non résolues est la suivante. Existe-t-il des triangles pavables par 14 triangles identiques?

L'autre découverte récente de Michael Beeson est que le pavage du triangle équilatéral est impossible pour tout nombre premier au-delà de 3. On connaît aujourd'hui très mal l'ensemble des valeurs m pour lesquelles le pavage en triangles identiques du triangle équilatéral est possible.

TRIANGLES À CÔTÉS ENTIERS

Les triangles à côtés entiers – nous dirons «triangles entiers» – sont particulièrement élegants et sont à l'origine d'amuses questions associant géométrie et arithmétique. Notons d'abord qu'il résulte de l'inégalité triangulaire (la longueur d'un côté d'un triangle est toujours inférieure à la somme des longueurs des deux autres) que tout triplet d'entiers positifs (a, b, c) tel que chaque somme de deux des trois entiers est inférieure au troisième détermine un triangle dont les côtés ont comme longueurs (a, b, c) .

La question du dénombrement de ces triangles entiers n'est pas simple. Le résultat proposé en 2000 par Tom Jenkins et Eric Mullers est le suivant: pour un périmètre donné n , le nombre de triangles entiers est l'entier le plus proche de $n^2/48$ si n est pair, et l'entier le plus proche de $(n+3)^2/48$ si n est impair.

Quand on découpe un triangle entier, peut-on le faire de façon à n'avoir que des sous-triangles entiers? Oui, c'est possible. L'encadré 4 donne notamment quatre exemples correspondant aux quatre découpages topologiquement différents d'un triangle en trois (les quatre dessins du haut). Pour chacune des 23 catégories de découpages d'un triangle en quatre de l'encadré 1, on peut trouver un découpage d'un triangle entier en triangles entiers qui en respecte le schéma. L'encadré 4 en donne quelques-uns (pour les autres, voir <http://mathworld.wolfram.com/TriangleDissection.html>).

Pour terminer, voici trois énoncés simples à propos des triangles entiers:

- Le seul triangle entier dont les longueurs des côtés et l'aire sont des entiers consécutifs est le triangle (3, 4, 5), dont l'aire est 6. Rappelons à ce sujet que l'aire A d'un triangle dont les côtés sont a, b, c est donnée par la formule de Héron:

$$A = (1/4)[(a+b+c)(a+b-c)(a-b+c)(-a+b+c)]^{1/2}.$$

- Le seul triangle entier ayant des entiers consécutifs pour ses côtés et l'une de ses hauteurs est le triangle (13, 14, 15) dont la hauteur à partir du côté 14 vaut 12.

- Les seuls triangles entiers dont l'aire est égale au périmètre sont ceux qui ont pour côtés (5, 12, 13), (6, 8, 10), (6, 25, 29), (7, 15, 20) et (9, 10, 17). ■

BIBLIOGRAPHIE

Article **Integer triangle** de Wikipedia, consulté en mars 2019.

Ed Pegg Jr., **Triangles** sur www.mathpuzzle.com/triangle.html, consulté en mars 2019.

M. Beeson, **No triangle can be cut into seven congruent triangles**, 2019 (<http://arxiv.org/abs/1811.09723v4>).

T. Jenkyns et E. Muller, **Triangular triples from ceilings to floors**, *The American Mathematical Monthly*, vol. 107, pp. 634-639, 2000.

A. Soifer, **How Does One Cut a Triangle?**, Springer, 2009.

M. Laczkovich, **Tilings of triangles**, *Discrete Mathematics*, vol. 140, pp. 79-94, 1995.

S. L. Snover et al., **Rep-tiling for triangles**, *Discrete Mathematics*, vol. 91, pp. 193-200, 1991.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DU NOIR PRESQUE PARFAIT

Pour qu'un objet apparaisse complètement noir, il ne suffit pas que le matériau dont il est fait absorbe la lumière. Sa surface doit aussi être structurée à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

Comment obtenir du noir vraiment noir ? La question agite le milieu des arts depuis bien longtemps. Mais elle a connu récemment de multiples rebondissements à travers la querelle entre les artistes britanniques Stuart Semple et Anish Kapoor, lequel détient les droits exclusifs sur le Vantablack, substance artificielle réputée la plus sombre au monde. Cette question du noir profond concerne aussi les physiciens, qui cherchent à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques ou à absorber les lumières parasites dans les télescopes. Or des progrès décisifs ont été réalisés ces dernières décennies – grâce à des revêtements structurés à des échelles spatiales de plus en plus petites.

Les noirs que nous rencontrons ne sont jamais totalement noirs : nous voyons les plis d'une chemise noire, la

forme des touches noires de nos claviers, etc., tout simplement parce que ces surfaces réfléchissent encore une partie de la lumière ambiante. Un objet parfaitement noir, que les physiciens appellent « corps noir », absorberait toute lumière qui lui parvient. Sa luminosité serait alors si faible qu'aucun détail n'en serait discernable : il serait impossible d'en distinguer la forme ou le volume.

ENTRE RÉFLEXION ET ABSORPTION

Pour qu'un corps s'approche de cet idéal, il faut donc qu'il réfléchisse le moins possible de lumière et, en même temps, qu'il absorbe la lumière afin d'être bien opaque.

Comment faire ? Les premiers noirs ont été réalisés à partir de pigments à base de charbon, de fumée – des composés à haute teneur en carbone – ou de graphite, dont sont faites les mines de

crayon. On comprend mieux aujourd'hui l'opacité de ces matériaux. Il y a une dizaine d'années, on a pu calculer l'absorption d'une couche de graphène, c'est-à-dire une couche cristalline d'épaisseur monoatomique constituée d'atomes de carbone liés en un réseau hexagonal (voir l'encadré page 90).

Le résultat, bien vérifié expérimentalement, est remarquable : cette couche de minceur extrême ne transmet que 97,7% de la lumière incidente, quelle que soit sa longueur d'onde. Cette valeur, entièrement déterminée par des constantes fondamentales, signifie aussi que le graphène absorbe 2,3% de la lumière.

Le graphite étant un matériau formé d'un empilement de plans de graphène

