

> La présence d'une tringle oblique dans chaque colonne et chaque ligne, ou même en posséder 2, ou même 3, etc., n'est jamais une condition suffisante générale assurant la rigidité d'un réseau de ce type. Il faut prendre en compte le graphe associé, et c'est lui qui donne la réponse, celle-ci étant négative s'il n'est pas connexe (voir l'encadré 4 pour un exemple de grille déformable comportant 2 barres obliques au moins dans chaque ligne et chaque colonne).

DES ALGORITHMES POUR LES CAS LES PLUS DIFFICILES

Un algorithme de «déshabillage» permet de savoir si un graphe est connexe. Il résout la question des grilles rigides sans avoir à dessiner de graphes compliqués et emmêlés.

On part d'un graphe qu'on simplifie progressivement en lui ôtant nœuds et arcs en appliquant la règle suivante: quand on trouve un circuit, c'est-à-dire une suite d'arcs partant d'un nœud et y revenant, on supprime un arc quelconque de ce circuit; et quand un nœud n'a qu'un arc incident, on supprime le nœud et l'arc (voir l'encadré 4).

La justification de l'algorithme est facile, car il est clair que son application ne peut déconnecter le graphe s'il est connexe, ni le reconnecter s'il ne l'était pas. L'algorithme, quel que soit l'instant où on l'arrête, produit donc un graphe qui est connexe si celui de départ l'était, ou qui n'est pas connexe si celui de départ ne l'était pas. En fait, l'algorithme préserve exactement le nombre de composantes connexes du graphe de départ.

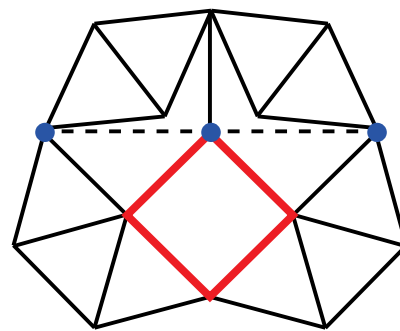
Notons que les circuits du graphe associé à une grille avec tringles transversales peuvent se voir directement sur la grille. En effet, il existe un circuit si l'on peut passer de barre oblique en barre oblique en ne se déplaçant que verticalement ou horizontalement (comme une tour au jeu d'échecs) et revenir à son point de départ. La figure b de l'encadré 4 illustre l'idée: deux circuits sont dessinés sur le graphe associé à la grille et les circuits correspondants directement visibles sur la grille sont aussi dessinés. Repérer les circuits directement sur la grille est plus facile que sur le graphe associé, souvent très emmêlé.

ALGORITHME DE TEST DE RIGIDITÉ D'UNE GRILLE

Comme indiqué dans l'encadré 4, si une ligne ou une colonne ne contient qu'une tringle oblique, on enlève toute la ligne ou toute la colonne. Si une série de tringles obliques forme un circuit, on enlève une tringle oblique quelconque du circuit. Quand on arrive à une grille qui est évidemment rigide ou non rigide, on a la réponse pour la grille initiale.

Il y a bien sûr plusieurs façons de rigidifier une grille donnée de taille $a \times b$ en y plaçant le

5



RIGIDIFIER UN CARRÉ

Si un carré de côté L est donné, combien faut-il introduire de tiges (ne se croisant pas) de longueur L liées et articulées par leurs extrémités pour immobiliser le carré, le tout restant dans un plan ? La meilleure réponse connue utilise 23 barres (voir la figure) ; elle a été trouvée par sept lecteurs de Martin Gardner, qui

avait posé la question dans sa célèbre rubrique mathématique dans *Scientific American*. Saurez-vous faire mieux, ou démontrer qu'on ne peut pas faire mieux ? Erich Friedman, de l'université Stetson, présente d'autres problèmes de ce type sur ses pages web (<https://www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/0100.html>).

minimum possible ($a+b-1$) de tringles transversales. La caractérisation en termes de graphes connexes permet de décompter le nombre de façons de rigidifier une grille. Péter Dóbé et Gábor Domokos, de l'université de Budapest, ont montré en 2014 que le nombre de dispositions (minimales) rendant rigide la grille rectangulaire de taille $a \times b$ est $a^{b-1} b^{a-1}$.

Une petite subtilité doit être notée ici. Nous avons supposé que toutes les tringles étaient de même longueur. Si on renonce à cette hypothèse et qu'on envisage des grilles approximativement carrées, alors parfois un peu moins de tringles obliques sont nécessaires pour rigidifier l'assemblage. Bien évidemment, toutes sortes d'autres cas ont été étudiés, généralisant les résultats mentionnés à des grilles rectangulaires trouées, ou à des grilles en trois dimensions.

L'IMMOBILISATION DU CARRÉ

L'un des problèmes de rigidification les plus simples et les plus étonnants dans cette catégorie est celui du carré unique. On place un carré unique sur un plan et on cherche, à l'aide de tringles de même longueur que le côté du carré, liées comme précédemment par des articulations souples, à l'immobiliser pour qu'il ne puisse plus se plier. Combien faut-il au minimum de tringles obliques et comment faut-il les disposer pour réussir cette rigidification du carré ? La réponse est donnée dans l'encadré 5.

La théorie mathématique de la rigidité ne s'arrête pas à ces situations. Elle constitue aujourd'hui un domaine de recherche actif, qui produit régulièrement de nouveaux résultats. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Weisstein, **Braced polygon**, <http://mathworld.wolfram.com/BracedPolygon.html> (consulté en avril 2018).

P. Dóbé, **Efficient algorithms for sensitivity analysis of trusses, adapted for distributed computing infrastructures**, Thèse de l'université de Budapest, 2014.

P. Winkler, **Mathematical Mind-Benders**, CRC Press, 2007.

A. Kaveh, **Optimal structural analysis**, Wiley, 2006.

E. Bolker et H. Crapo, **Bracing rectangular frameworks I**, *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 36(3), pp. 473-490, 1979.

M. Gardner, **Martin Gardner's Sixth Book of Mathematical Diversions from Scientific American**, University of Chicago Press, 1971.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

AUTANT EN EMPORTENT LES DONNÉES

Plutôt que de la peinture ou du marbre, pourquoi ne pas utiliser les données pour créer des œuvres? C'est le choix de plusieurs artistes et designers pour, par exemple, donner à voir le vent souffler.

Léonard de Vinci avait choisi, entre autres, les pigments et les liants pour laisser son génie s'exprimer. Michel-Ange extrayait de blocs de marbre des chefs-d'œuvre. Après tout, rien que de très classique comme matière première. Et si l'on vivait avec son temps? Aujourd'hui, le monde bruisse d'une révolution annoncée, et pour certains déjà en marche, fondée sur l'or du XXI^e siècle: les masses de données, ou *big data*. Ces informations, recueillies à foison par d'innombrables capteurs (sachez que beaucoup

sont sur vos téléphones) s'accumulent à un rythme inimaginable dans des *data centers* gigantesques. L'avenir appartiendrait à ceux qui sauront faire parler ces données, les traiter, les exploiter... Les intelligences artificielles d'aujourd'hui s'en nourrissent goulûment. Mais on peut en faire bien autre chose!

C'est le pari de nombreux artistes et designers qui font de ces données le matériau à partir duquel ils créent. Leurs œuvres sont jusqu'à cet automne présentées à Paris dans le cadre de l'exposition «1, 2, 3 data». Elles ont été réunies à l'initiative de David Bihanic, maître de conférences à l'université Paris Panthéon-Sorbonne.

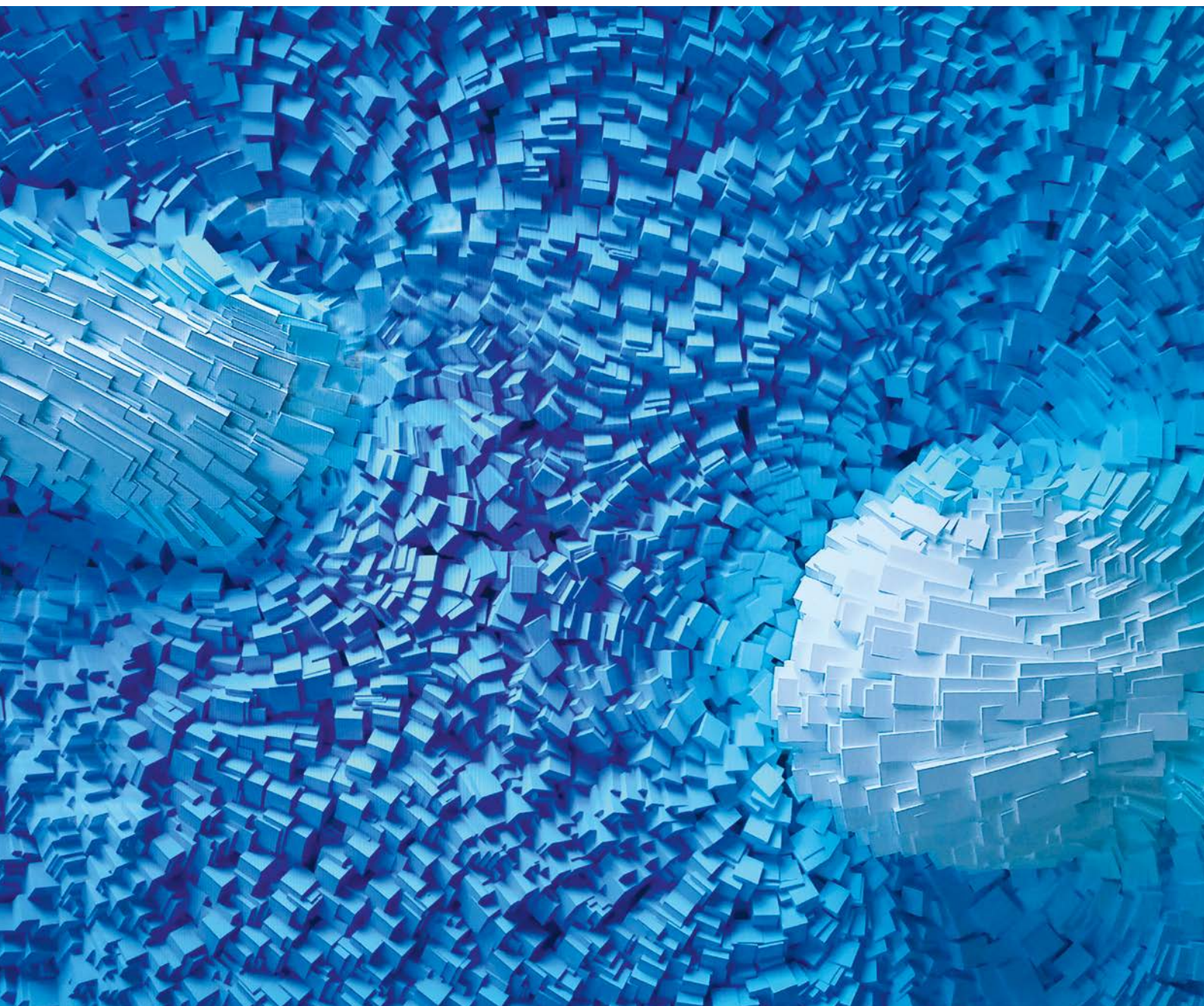
Le parcours s'organise selon trois axes. Dans la partie «Exposer», les données sont mises en forme et présentées, de façon contemplative, au sens presque traditionnel d'une œuvre. Puis vient le temps d'«Expliquer»: là, les données deviennent un vecteur de connaissances sur le monde.

Un ciel de Van Gogh?
Non, une
datavisualisation des
vents soufflant près
d'Istanbul!

Enfin, le public peut «Explorer» en manipulant les données, se les approprier. Ainsi, progressivement, l'interaction augmente et l'on se familiarise peu à peu avec l'infinie richesse des données.

Attardons-nous sur une œuvre de la première partie, *Wind of Istanbul* (ci-dessus), que l'on doit à Refik Anadol, artiste turc installé aux États-Unis, où il est chercheur à l'université de Californie à Los Angeles. Sur un écran se succèdent quatre tableaux animés mettant en scène des données sur les vents, recueillies pendant une année dans la région de l'aéroport Atatürk, à Istanbul.





Les animations résultent de divers algorithmes qui visualisent les vents selon quatre modalités différentes (les données traitées restent les mêmes). Dans la première, *Paysages cachés* (*Hidden Landscapes*), l'artiste se concentre sur les vents les plus violents. Dans *Souvenirs de porcelaine* (*Porcelain memories*), les données apparaissent sous la forme d'un paysage fin, blanc et fragile. *Brise de mer* (*Sea Breeze*) met en lumière les vents doux et chauds qui soufflent de la mer (*ci-dessus*). Enfin, *Rafales dans la ville* (*Gust in the city*) révèlent les interactions des bourrasques et des constructions urbaines.

Les logiciels développés par Refik Anadol permettent de lire, d'analyser et de visualiser la vitesse, la force des vents, leur direction et de croiser ces données avec d'autres informations météorologiques (température, hygrométrie...). Sur l'écran de télévision de 65 pouces ultra HD 4K où *Wind of Istanbul* est projeté, les vents, évanescents par essence, acquièrent une densité forte, riche en contrastes. Les souffles d'air ainsi matérialisés évoquent les coups de pinceau de Van Gogh dans certains de ces ciels, par exemple celui de *La Nuit étoilée*.

L'exposition se prolonge sur son site où une plateforme présente, par thème, une sélection de projets de *data design*, des dossiers d'information multimédia ainsi que des interviews d'experts. ■

« 1, 2, 3 data »,
jusqu'au 6 octobre 2018,
Fondation Groupe EDF,
6 rue Récamier, 75007 Paris.

Site web de Refik Anadol :
<http://refikanadol.com/>



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



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

DES ONDES COBRA AVEC DES BÂTONNETS

En entrelaçant convenablement des bâtonnets, on crée des structures étonnantes : lorsqu'on les déstabilise, l'énergie élastique qu'elles ont accumulée se libère de façon explosive !



En une fraction de seconde, le cobra se soulève. Il traverse la pièce et revient à vive allure – sans toutefois susciter d'effroi chez les spectateurs médusés. Car le cobra dont il est question ici n'a du redoutable serpent que le nom : il s'agit plus précisément de l'onde cobra, la propagation d'une réaction en chaîne le long d'une structure formée de bâtonnets entrelacés, un peu comme la chute d'une série de dominos.

De telles structures se défont de façon explosive, en projetant des bâtonnets dans toutes les directions, ou plus progressive, en formant une ondulation qui avance à une vitesse de plusieurs mètres par seconde. Quels mécanismes se cachent ici ?

Ces « bombes de bâtonnets », *stick bombs* en anglais, sont réalisées en général avec des bâtonnets de bois semblables à ceux des glaces. Lorsqu'on entrelace

ces éléments, ils se déforment avec des fléchissements qui sont de l'ordre de leur épaisseur (voir l'encadré page 90, figure c), mais ils retrouvent leur forme initiale une fois libérés. Ils stockent donc de l'énergie élastique.

DES ENTRELAÇOS DE BÂTONNETS QUI STOCKENT DE L'ÉNERGIE ÉLASTIQUE

On estime la valeur de l'énergie stockée par bâtonnet à plusieurs dizaines, voire centaines, de millijoules. Compte tenu de la faible masse d'un bâtonnet (environ 2,5 grammes), cette énergie est considérable. Une énergie de 150 millijoules correspond ainsi à l'énergie potentielle de pesanteur d'un bâtonnet ayant atteint une altitude de 6 mètres, ou à son énergie cinétique si sa vitesse est de 11 mètres par seconde. On comprend mieux le potentiel explosif de bâtonnets fléchis !

Cependant, la raideur en flexion de ces morceaux de bois est suffisante pour assurer une force pressante élevée entre les parties en contact dans un entrelacs : grâce aux forces de frottement, ces parties ne glissent pas et l'entrelacs, manipulé avec précaution, se révèle assez robuste. Mais si on le laisse tomber par terre, le choc peut déplacer les bâtonnets les uns par rapport aux autres et déstabiliser la structure. L'énergie élastique des bâtonnets se relâche alors brutalement et les éléments sont projetés avec force dans diverses directions, comme les éclats d'une bombe.

L'un des atouts ludiques de ces structures, outre la variété des entrelacements