

DES ROBOTS CAPABLES DE SURVIVRE AU DÉFI DE LA CHUTE DE L'ŒUF

William R. Johnson III * et Rebecca Kramer-Bottiglio

Génie mécanique et science des matériaux, Université Yale, New Haven, CT, États-Unis

Si tu as déjà relevé le défi de faire tomber un œuf en le laissant intact, tu sais qu'il est difficile de construire une protection qui évite à cet objet si fragile de s'écraser au sol et se casser. Les ingénieurs construisent des robots souples appelés robots en tensegrité, qui sont conçus pour survivre à des chutes brutales. Le mot tensegrité vient de « tension » et « intégrité ». Cela signifie que le robot est composé de barres rigides maintenues ensemble par des câbles extensibles. Cette structure flexible aide le robot à absorber l'impact des chocs. Un jour, ces robots pourraient être utilisés pour explorer des endroits dangereux comme des grottes profondes ou d'autres planètes. Ces robots pourraient tomber de falaises ou dans des cratères sans se casser. À l'heure actuelle, les ingénieurs améliorent les robots en tensegrité et les rendent plus faciles à contrôler. Dans cet article, nous t'expliquons comment fonctionnent ces robots. Nous discutons de leurs avantages, de leurs inconvénients et de leur utilité.

LES ROBOTS EN TENSÉGRITÉ S'INSPIRENT DE L'ART

Il y a soixante-dix ans, un artiste nommé Kenneth Snelson a commencé à construire les sculptures intéressantes que tu vois dans la [Figure 1](#) [1]. Ces sculptures ont des barres rigides attachées entre elles par des câbles tendus. Les câbles donnent l'impression que les

TENSION. Force de traction qui rapproche des objets, comme des cordes, des cordons et des câbles, lorsqu'on tire dessus.

INTÉGRITÉ. Structure composée de nombreuses pièces qui sont attachées et restent ensemble.

barres flottent. Le professeur de Snelson était un architecte nommé Buckminster Fuller. Fuller appelait ces sculptures flottantes « tenségrité ». Ce mot allie **tension** et **intégrité**. La tension signifie que les câbles sont tendus. L'intégrité signifie que la sculpture reste stable et cohérente. Fuller et d'autres architectes ont remarqué que les sculptures en tenségrité sont utiles et peuvent être utilisées pour construire des structures comme un toit ou un pont. Constituées principalement de vide, les structures en tenségrité peuvent être légères et moins chères.

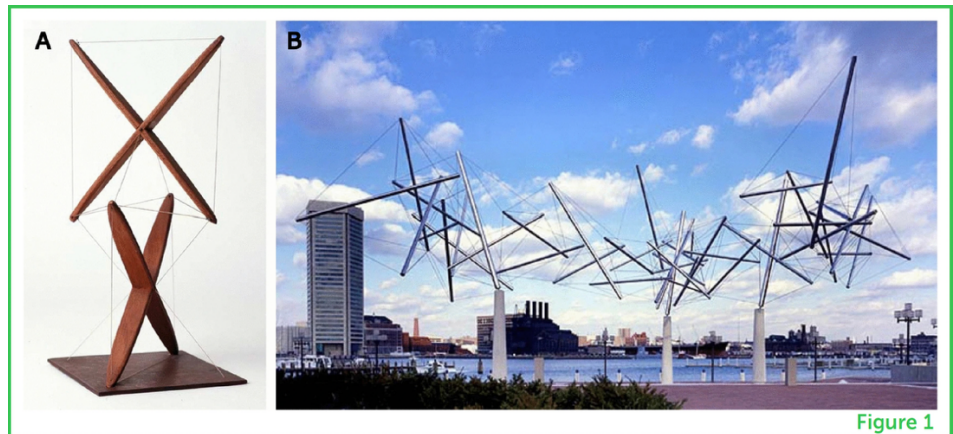


Figure 1. Deux sculptures en tenségrité de Kenneth Snelson [1]. (A) Module X datant de 1948. Ce module a donné naissance à la tenségrité. Il se compose de deux pièces de bois en forme de X suspendues dans l'air par des câbles en nylon (B) Sculpture « Easy Landing » (Atterrissage facile) devant la cité des Sciences de Baltimore (USA) installée en 1978.

De nombreuses années plus tard, des ingénieurs ont commencé à construire des robots en tenségrité (Figure 2) [3]. Les robots en tenségrité ne ressemblent pas à des robots normaux. Ils sont constitués de barres rigides et de câbles tendus, tout comme les sculptures en tenségrité et ont les mêmes avantages : ils sont légers, flexibles et principalement constitués de vide. On peut même les plier pour qu'ils soient faciles à envoyer dans des endroits lointains comme d'autres planètes.

Il y a un autre grand avantage aux robots en tenségrité : ils peuvent survivre à la chute depuis une falaise ! Lorsqu'un robot en tenségrité s'écrase au sol, il se déforme, ce qui absorbe l'impact. Tu peux comprendre comment cela se produit si tu as déjà sauté sur un trampoline. Il n'y a pas de mal à tomber sur un trampoline car le trampoline est souple et se déforme lorsque tu atterris dessus, contrairement à la chute sur du ciment ! Les robots en tenségrité sont flexibles comme les trampolines, de sorte qu'ils absorbent l'énergie des impacts.

C'est pour cela que des ingénieurs de la NASA se sont consacrés avec enthousiasme à la construction de robots en tenségrité [2]. Ils veulent en fabriquer qui peuvent s'écraser sur d'autres planètes ou

DÉFI DE LA CHUTE DE L'ŒUF.

Activité que les enfants font dans certaines écoles et camps d'été : concevoir quelque chose pour protéger un œuf lorsqu'il tombe de haut.

CENTRE DE GRAVITÉ. Point de ton corps où s'applique la gravité de la Terre. Dans les calculs de physique, ce point peut être considéré comme l'endroit où se trouve tout ton poids.

LOCOMOTION. Fait de se déplacer d'un endroit à un autre pour un robot ou une autre machine.

qui peuvent rouler dans des cratères pour en explorer le fond. Regarde cette [vidéo](#) d'un robot en tenségrité de la NASA [2].

Les futurs robots en tenségrité devront assurer la protection des instruments scientifiques qu'ils transporteront. C'est encore plus difficile que le **défi de la chute de l'œuf** ! Après avoir survécu à la chute, le robot en tenségrité doit explorer son environnement. Mais comment pouvons-nous construire des robots en tenségrité et les faire se déplacer ?

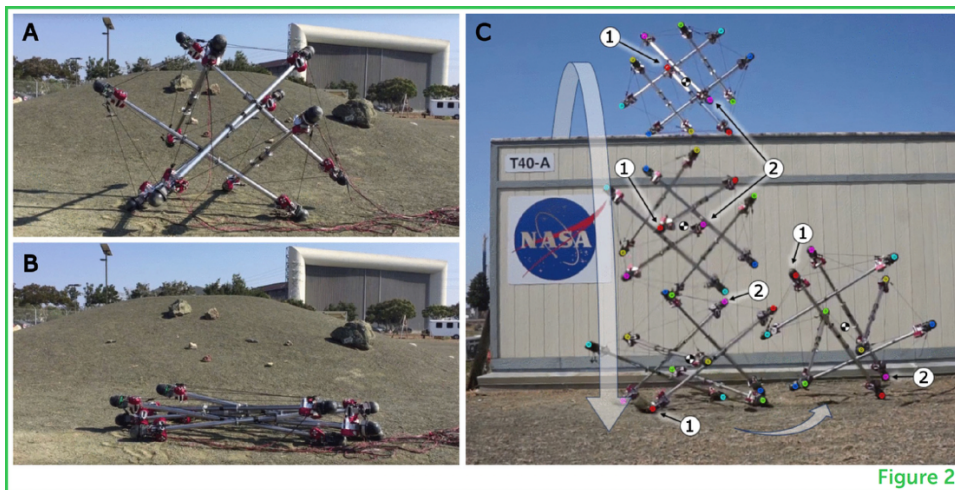


Figure 2

Figure 2. (A) Le robot en tenségrité SUPERball de la NASA peut rouler sur la terre. (B) Il peut se replier à plat. (C) Il peut également survivre à une chute d'un toit. On peut suivre ici où se situent deux des extrémités des barres lors du déplacement du robot (indiquées respectivement par les chiffres 1 et 2). Les ingénieurs de la NASA ont construit SUPERball pour explorer d'autres planètes. Avec la permission de « Design of SUPERball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing big impacts » [2] [[lienvideo](#)].

COMMENT FAIRE SE DÉPLACER LES ROBOTS EN TENSÉGRITÉ ?

Si tu te tiens sur la pointe des pieds et que tu te penches en avant, tu tomberas. Tu seras peut-être surpris d'apprendre que c'est ainsi que se déplacent les robots en tenségrité ! Lorsque tu es debout normalement, ton **centre de gravité** se trouve directement au-dessus de tes pieds. Même si tu te penches un peu en avant, ton centre de gravité sera toujours au-dessus de tes pieds, tu ne tomberas donc pas. Lorsque tu te tiens sur la pointe des pieds, la zone que tes pieds soutiennent est plus petite, donc maintenant se pencher en avant, même un peu, peut te faire tomber. Au lieu de pieds, les robots en tenségrité ont une structure appelée polygone de stabilité sur leur face inférieure. Lorsqu'un robot en tenségrité rétrécit son polygone de stabilité, c'est comme s'il se tenait sur la pointe des pieds. Ensuite, il peut se déformer et tomber, ou se retourner, en poussant son centre de gravité en dehors de son polygone de stabilité. Le robot en tenségrité peut continuer à rouler en tombant à nouveau

D'autres robots en tenségrité utilisent des stratégies de **locomotion** différentes. En plus de rouler, certains rampent, sautent, vibrent et

ACTIONNEUR. Partie du robot qui le fait bouger, comme un moteur.

SIMULATION. Programme informatique qui utilise la physique ou des données pour prédire comment un robot se déplacera.

même nagent. La plupart des robots en tenségrité se déplacent à l'aide de moteurs électriques qui allongent ou raccourcissent leurs câbles

D'autres utilisent des **actionneurs** gonflables pour changer de forme. Regarde cette vidéo [\[ici\]](#) pour voir un robot en tenségrité avec des actionneurs gonflables en train de ramper [\[4\]](#). Il y a beaucoup de variété en ce qui concerne les robots en tenségrité, ce qui les rend cool et passionnants à étudier. Mais il peut être difficile de concevoir un nouveau robot en tenségrité tant il y a de choix à faire.

LES SIMULATIONS NOUS AIDENT À CONCEVOIR ET À CONTRÔLER DES ROBOTS EN TENSÉGRITÉ

Construire des robots peut coûter beaucoup d'argent. Parfois, nous ne savons pas quel type de robot construire pour une tâche précise. Même lorsque nous le faisons, il se peut que nous ne sachions pas comment le faire bouger. Il est facile de comprendre la locomotion d'une voiture : faire tourner les roues pour avancer et tourner les roues avant pour tourner. Contrairement à une voiture, la locomotion d'un robot en tenségrité n'est pas évidente. Quels câbles le robot doit-il tirer pour avancer ou tourner ? Les ingénieurs résolvent ces problèmes en faisant des **simulations** sur un ordinateur. Une simulation, c'est comme un jeu vidéo. Dans un jeu vidéo, tu peux contrôler un personnage, le faire courir et sauter. Le jeu calcule l'endroit où le personnage atterrit à l'aide de la physique et des mathématiques. Les simulations font la même chose, mais pour les robots. Les simulations prédisent ce qu'un robot fera lorsque nous lui donnons des commandes, ce qui nous aide à déterminer les meilleures commandes. La simulation peut également nous dire à quel point un robot sera bon avant que nous ne le construisions.

Nous pouvons faire des simulations avec de nombreux robots en tenségrité différents. Ces robots peuvent avoir différents nombres de barres, différentes formes et différentes tailles. Ensuite, nous pouvons comparer leurs vitesses ou une autre propriété pour choisir quel robot est le meilleur. Nous pouvons même utiliser la simulation pour trouver la meilleure stratégie de locomotion. Tout comme tu peux courir, marcher, ramper et nager, les robots en tenségrité ont différentes façons de se déplacer. La meilleure façon de se déplacer dépend de l'environnement. Les simulations nous disent si un certain robot en tenségrité peut rouler ou ramper, et elles nous indiquent également sur quels câbles il doit tirer pour se déplacer d'une certaine manière. Dans cette vidéo [\[ici\]](#), nous utilisons une simulation pour apprendre à contrôler un robot en tenségrité à 3 barres [\[5\]](#).

Il est difficile de faire des simulations de robots en tenségrité car ces robots sont flexibles, ce qui rend plus compliquée la prédiction de

SIM2REAL GAP. Petites (ou grandes) différences entre les simulations et le monde réel. Aucune simulation ne peut jamais être parfaite, il y aura donc toujours un écart entre la simulation et la réalité.

ce qu'ils feront. De plus, lorsqu'un robot en tensegrité tire sur un câble pour le raccourcir, cela affectera tous les autres câbles. Malgré ces défis, les chercheurs continuent de faire de meilleures simulations pour les robots en tensegrité [5]. Peu importe nos efforts, nous ne simulerons jamais parfaitement un robot. Ce problème s'appelle le **sim2real gap**. Il y a beaucoup de choses dans le monde réel qui sont difficiles à mesurer avec précision. Même si nous le pouvions, le monde réel a un caractère aléatoire qu'il est impossible de prévoir. Si les simulations sont utiles pour comprendre comment concevoir et contrôler des robots en tensegrité, nous devons toujours construire le vrai robot et le tester. Et être heureux si notre simulation a été précise !

LES ROBOTS EN TENSÉGRITÉ À L'AVENIR

Lorsque Kenneth Snelson réalisait des sculptures d'art il y a 70 ans, il ne savait pas que son travail conduirait à des robots qui explorent d'autres planètes. Aujourd'hui, les ingénieurs continuent de concevoir de nouveaux robots en tensegrité plus performants. Un jour, ces robots pourraient fouiller des grottes souterraines [6] ou le fond de cratères (Figure 3). Ils pourraient faire d'autres choses que nous n'avons même pas imaginées. Personne n'aurait pensé qu'une œuvre d'art deviendrait un jour un robot ! Il reste cependant des problèmes à résoudre. Les robots en tensegrité peuvent être difficiles à concevoir, à simuler et à contrôler. Ils ne sont pas non plus aussi fiables que les robots avec des roues ou même des jambes. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour qu'ils atteignent leur plein potentiel. Peut-être seras-tu celui qui résoudra ces problèmes !

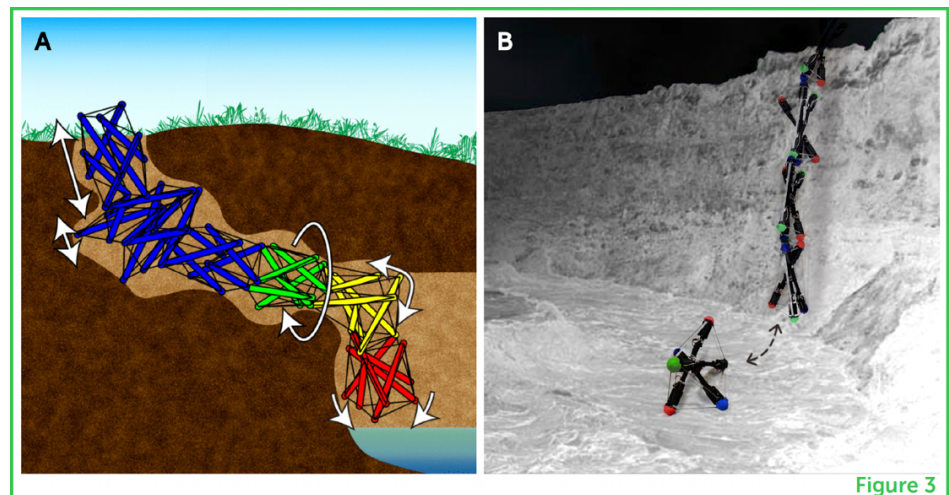


Figure 3. Ces illustrations montrent l'avenir des robots en tensegrité. (A) Des ingénieurs japonais construisent des robots en tensegrité pour explorer des grottes souterraines. Utilisé avec autorisation d'après « Structure en tensegrité à grands couples de torsion et muscles artificiels fins pour la manipulation par rotation. » [6]. (B) Nous pensons que les robots en tensegrité exploreront également les cratères sur d'autres planètes.

REMERCIEMENTS

Ce document est basé sur des travaux financés par la National Science Foundation par la subvention n°. IIS-1955225.

RÉFÉRENCES

1. Micheletti, A., and Podio-Guidugli, P. 2022. Seventy years of tensegrities (and counting). *Arch. Appl. Mechan.* 92:2525–48. doi: 10.1007/s00419-022-02192-4
2. Vespignani, M., Friesen, J. M., SunSpiral, V., and Bruce, J. 2018. "Design of superball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing large impacts", in 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (Madrid: IEEE), 2865–71.
3. Shah, D. S., Booth, J. W., Baines, R. L., Wang, K., Vespignani, M., Bekris, K., et al. 2022. Tensegrity robotics. *Soft Robot.* 9:639–56. doi: 10.1089/soro.2020.0170
4. Kobayashi, R., Nabae, H., Endo, G., and Suzumori, K. 2022. Soft tensegrity robot driven by thin artificial muscles for the exploration of unknown spatial configurations. *IEEE Robot. Automat. Lett.* 7:5349–56. doi: 10.1109/LRA.2022.3153700
5. Wang, K., Johnson, W.R., Lu, S., Huang, X., Booth, J., Kramer-Bottiglio, R., et al. 2023. "Real2sim2real transfer for control of cable-driven robots via a differentiable physics engine", in 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (Detroit: IEEE), 2534–41.
6. Kobayashi, R., Nabae, H. and Suzumori, K., 2023. Large torsion thin artificial muscles tensegrity structure for twist manipulation. *IEEE Robot. Automat. Lett.* 8:1207–14. doi: 10.1109/LRA.2023.3236889

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi : 10.3389/frym.2024.1452937 ; Johnson WR III et Kramer-Bottiglio R (2024)

TRADUCTION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Frédéric Lemoigno, ICGM, Montpellier, France

MENTOR SCIENTIFIQUE : [Frédéric Lemoigno](#)

REMERCIEMENTS : Merci à Fanny Chandesris pour son accueil et son implication dans l'édition de cet article par ses élèves.

JEUNES ÉDITEURS :

NATEC, OWEN, HUGO, CHLOÉ, ELÉA, 11-12 ANS

Nous sommes en classe de sixième dans un collège près de Montpellier au sud de la France. Natec se trouve petit. Owen adore le sport, Hugo jouer au ping-pong avec ses amis. Chloé aime chanter

et Éléa adore la gymnastique.

ETHAN, MARTIN, MAËL, JADE, LOU, 11 ANS

Nous sommes des collégiens du sud de la France. Ethan aime le basket et les chiens ; il adore lire. Martin aime dormir longtemps et adore le rugby. Maël, lui, préfère le handball ! Jade et Lou aiment la danse et les activités manuelles (surtout le dessin pour Lou !).

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 21 juin 2024 ; **ACCEPTÉ** le 25 octobre 2024

PUBLIÉ EN LIGNE le 13 novembre 2024.

ÉDITION : Laura H. Blumenschein, Université de Stanford, États-Unis

MENTORS SCIENTIFIQUES : Dharani Suresh Babu et Adiya Rakymzhan

CITATION

Johnson WR III and Kramer-Bottiglio R (2024) Robots that Can Survive the Egg Drop. *Front. Young Minds* 12:1452937. doi: 10.3389/frym.2024.1452937

CONFLIT D'INTÉRÊTS :

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2024 Johnson et Kramer-Bottiglio.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES ÉVALUATEURS

ADITYA, ÂGE : 14

Bonjour, je m'appelle Aditya. Je m'intéresse à la lecture, aux STIM et à la flûte. J'aime lire (principalement de la fantasy et de la non-fiction littéraire) en raison de son aspect immersif, en plaçant toute mon attention sur le monde et l'histoire sculptée par l'auteur. J'aime la flûte pour une raison similaire, en me concentrant sur une activité apaisante et stimulante. En ce qui concerne les STIM, je crois que la poursuite de la connaissance est un objectif admirable et épanouissant, donc je ressens une certaine satisfaction lorsque j'apprends quelque chose de nouveau.

ANSAR, ÂGE : 14

J'ai 14 ans et je vis au Kazakhstan. Je suis un grand fan de natation et je participe à des compétitions à un niveau professionnel. Je fais également partie d'une communauté locale d'urbanisme axée sur les solutions écologiques et durables. Pendant mon temps libre hors de l'école, j'aime cuisiner, danser, lire des livres de fiction et passer du temps avec mes amis.

ARUN, ÂGE : 11

Bonjour, je m'appelle Arun. J'aime les mathématiques et ma matière préférée est l'histoire. J'aime l'histoire parce qu'elle m'aide à imaginer tout ce qui est important dans le passé. Je veux être zoologiste quand je serai grand parce que j'aime les animaux. Je veux apprendre comment les animaux peuvent changer notre mode de vie tel que nous le connaissons aujourd'hui. De plus, je veux apprendre comment le fait de supprimer un animal, de changer un animal ou d'ajouter un nouvel animal affecte l'écosystème et la chaîne alimentaire. Je joue au football et au badminton. J'adore jouer aux jeux vidéo et regarder des films.

AUTEURS

WILLIAM R. JOHNSON III

Le travail à plein temps de Will consiste à construire des robots en tenségrité et à les faire rouler sur des cliv. Il est candidat au doctorat à l'Université Yale. Avant cela, il était entraîneur de robotique et professeur de physique au secondaire. Avant cela, il a obtenu son M.S.E. en robotique et B.S.E. en génie mécanique à l'Université de Pennsylvanie. À l'extérieur du laboratoire, vous pouvez trouver Will en train d'enseigner, de jouer au football, de courir sur de longues distances et de participer à des tournois d'échecs, mais pas tous en même temps. *will.johnson@yale.edu

REBECCA KRAMER-BOTTIGLIO

Rebecca Kramer-Bottiglio est professeure agrégée de génie mécanique à l'Université Yale, où elle a fait de sa passion pour le bricolage une carrière. Avant cela, elle a obtenu son doctorat à Harvard, sa maîtrise à l'UC Berkeley et sa licence à Johns Hopkins. Lorsqu'elle ne construit pas de robots, elle est une fière mère de trois enfants, une double citoyenne américaine et danoise et une collectionneuse enthousiaste de services à thé. À d'autres moments de sa vie, elle a couru un marathon, traversé le pays à vélo et sauté d'un avion (avec un parachute, bien sûr).