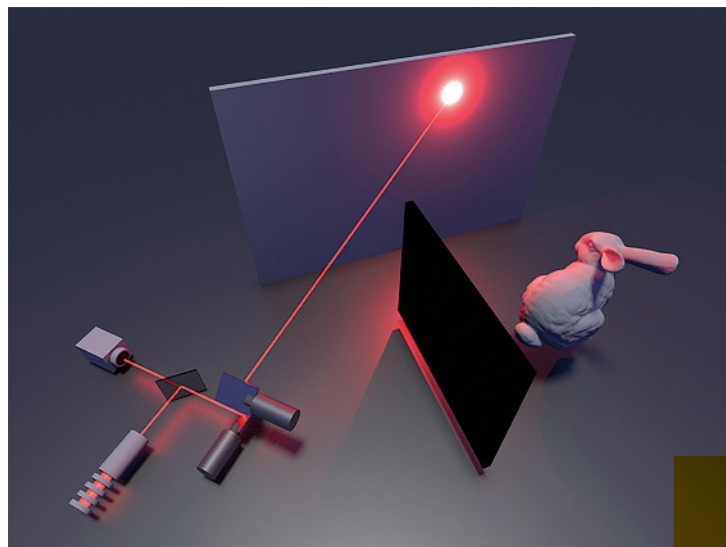




chacune comme un antisténopé, bloquant un ensemble différent de rayons lumineux. Analyser l'ombre des feuilles révèle les rayons manquants et aide par conséquent à révéler des images d'une partie de la scène cachée que l'on peut ensuite réunir.

Cette technique du champ lumineux livre des images bien plus nettes que les méthodes précédentes fondées sur des caméras accidentelles. La forme connue de la plante d'intérieur, la supposition que les images naturelles tendent à être lisses, et d'autres informations offrent aux chercheurs des renseignements sur le bruit et les aident donc à produire des images plus précises.

ÉPARPILLÉ FAÇON PUZZLE

Tandis que Bill Freeman, Antonio Torralba et leurs collègues exploraient des images jusqu'alors négligées, ailleurs, sur le campus du MIT, Ramesh Raskar développait une technique nommée « imagerie active » (par opposition à l'imagerie passive des précédents). L'idée consiste à envoyer des impulsions laser sur un mur de sorte qu'une petite fraction de la lumière rebondisse et se réfléchisse de l'autre côté d'une cloison cachant un objet. Quelques instants après chaque impulsion, une « caméra à balayage ultrarapide » enregistre

← Dans l'imagerie active hors ligne de visée, la lumière d'un laser rebondit sur un mur, est dispersée par un objet caché derrière une cloison (ici un lapin), puis rebondit à nouveau dans la direction de laquelle elle est venue (ci-contre). La lumière réfléchie peut être utilisée pour reconstruire l'objet en trois dimensions (ci-dessus).

individuellement les photons renvoyés sur le mur par l'objet dissimulé à des milliards d'images par seconde.

En mesurant les temps de trajet des photons recueillis, les chercheurs reconstruisent la géométrie tridimensionnelle détaillée des objets cachés derrière la cloison. La tâche est néanmoins complexe, car les chercheurs doivent notamment connaître toutes les trajectoires possibles des photons laser, ce qui les oblige à analyser la géométrie du mur.

De plus, avec, par exemple, une personne cachée, « la lumière d'un point particulier sur la tête, d'un autre sur l'épaule et d'un troisième sur le genou peuvent toutes arriver [à la caméra] exactement au même moment, explique Ramesh Raskar. Mais si je décale légèrement le laser et le détecteur [dans un système dit "non confocal"], les lumières de ces trois points ne seront plus simultanées ». On reconstruit ensuite la géométrie 3D de l'homme invisible en résolvant ce qu'on appelle le

temps de trajet des photons aux positions des surfaces de dispersion.

Les voitures autonomes sont déjà dotées de systèmes Lidar (pour *Laser imaging detection and ranging*, soit en français «détection et estimation de la distance par laser»), une sorte de radar où la lumière remplace les ondes radio. Un jour, elles seront possiblement aussi équipées de caméras Spad, pour voir au-delà des angles. «Dans un futur proche, ces détecteurs laser-Spad seront disponibles dans un format portable», prédit Andreas Velten, coauteur de l'étude pionnière de Ramesh Raskar en 2012 et aujourd'hui à l'université du Wisconsin à Madison. L'objectif consistera ensuite à «détecter des scènes de plus en plus complexes», ajoute-t-il.

«problème inverse» qui consiste à recombinaison tous les signaux.

Cependant, avec un tel système non confocal, l'algorithme original de Ramesh Raskar était gourmand en ressources informatiques. En outre, l'équipement nécessaire coûtait un demi-million de dollars.

Depuis, des progrès significatifs ont été accomplis pour simplifier les calculs et réduire les frais. Ainsi, en 2018, une nouvelle étude fixait un nouveau standard pour l'imagerie hors ligne de visée tridimensionnelle, efficace et rentable d'un objet dissimulé derrière un angle. En effet, les auteurs, Matthew O'Toole, David Lindell et Gordon Wetzstein de l'université Stanford, aux États-Unis, ont mis au point un nouvel algorithme puissant pour résoudre le problème inverse et utilisé une caméra relativement abordable et néanmoins très efficace se servant des diodes à avalanche à photon unique (Spad).

En pointant le laser et la caméra quasiment sur le même point (un système cette fois confocal), l'équipe de Stanford s'affranchissait des difficultés rencontrées par Ramesh Raskar et pouvait cartographier le même «cône de lumière». De quoi s'agit-il?

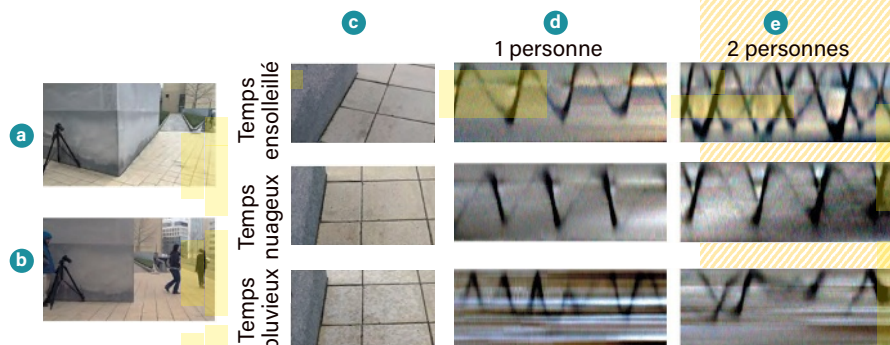
Quand la lumière se disperse à partir d'une surface, elle forme une sphère de photons en expansion, laquelle trace les contours d'un cône tandis qu'elle s'étend au fil du temps. Matthew O'Toole, aujourd'hui à l'université Carnegie-Mellon, a traduit la physique des cônes de lumière (développée au début du ^{xx}e siècle par Hermann Minkowski, le professeur d'Albert Einstein) en une expression concise reliant les

DE LA VOITURE À LA LUNE

Les chercheurs du groupe de Bill Freeman ont commencé à associer les deux types d'approches, passive et active. Une étude dirigée par Christos Thrampoulidis a montré que, en imagerie active avec un laser, la présence d'un antisténopé de forme connue derrière un coin est utilisable pour reconstruire la scène cachée, sans avoir besoin d'informations relatives à la durée de trajet des photons. «Nous devrions pouvoir le faire avec une caméra CCD normale», estime l'informaticien.

L'imagerie hors ligne de visée pourrait un jour aider les équipes de secours, les pompiers et les robots autonomes. Andreas Velten collabore avec le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa sur un projet visant à imager à distance l'intérieur des grottes de la Lune. Pendant ce temps, Ramesh Raskar et d'autres ont utilisé

Un jour, les voitures autonomes seront équipées de caméras spéciales pour voir derrière les murs



1 ou 2 personnes ?

En filmant le sol près d'un coin de rue (a), il est possible d'obtenir des informations à propos des objets cachés à la vue (b, un ou deux individus). Les mouvements de ces derniers se traduisent par des changements subtils de couleur et d'intensité habituellement invisibles à l'œil nu (c). Analysés par des algorithmes, ces signaux faibles renseignent sur ce qui n'est pas visible (d et e).

36

leur technique pour lire les premières pages d'un livre fermé et pour voir sur une courte distance à travers le brouillard.

Outre la reconstruction audio, l'algorithme d'amplification du mouvement de Bill Freeman améliorerait la détection de mouvements astronomiques minuscules. «C'est une très bonne idée et nous devons l'utiliser», plaide David Hogg, astronome à l'université de New York.

Lorsqu'on évoque les inquiétudes relatives à la vie privée soulevées par ces découvertes, Bill Freeman se fait songeur: «C'est une problématique à laquelle j'ai beaucoup pensé», avoue-t-il. Ce bricoleur de caméras, qui développe des photographies depuis qu'il est enfant, dit qu'en commençant sa carrière, il ne souhaitait pas travailler sur quoi que ce soit qui ait à voir de près ou de loin avec l'armée ou les espions. Mais, avec le temps, il en est venu à penser que «la technologie est un outil utilisable de bien des manières. Si vous écarterez tout éventuel usage militaire, vous ne faites rien». Et d'ajouter que, même dans un contexte militaire, «le spectre d'utilisations est très large. Par exemple, nos découvertes peuvent potentiellement sauver des vies, en détectant un agresseur tapi».

Toutefois, ce ne sont pas les possibles applications qui l'enchantent le plus, c'est bien plutôt d'avoir exploré un phénomène caché et pourtant exposé à la vue de tous.

— L'autrice —

> **Natalie Wolchover**
est diplômée en physique de l'université Tufts et journaliste au magazine *Quanta*.



Quanta
magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par **Quanta Magazine**, une publication en ligne indépendante soutenue par la Simons Foundation afin de favoriser la diffusion des sciences: <https://bit.ly/3fLLdvA>

— À lire —

> **D. Faccio et al.**, Non-line-of-sight imaging, *Nature Reviews Physics*, vol. 2, pp. 318-327, 2020.

> **M. O'Toole et al.**, Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform, *Nature*, vol. 555, pp. 338-341, 2018.

> **A. Torralba et W. Freeman**, Accidental pinhole and pinspeck cameras: Revealing the scene out-side the picture, *IEEE CVPR*, pp. 374-381, 2012. bit.ly/3fqcLR2

> **A. Velten et al.**, Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging, *Nature Communications*, vol. 3, art. 745, 2012.