

les personnes séropositives pour le virus du sida. En France, par exemple, parmi les quelque 193 000 personnes infectées par le virus de l'hépatite C en 2011, environ 65% étaient des usagers de drogues injectables, 5% des détenus et 18% des porteurs du virus du sida, selon une estimation de l'Institut de veille sanitaire.

ÉLIMINER L'HÉPATITE C

Fin de l'histoire? Non, car il reste à vaincre plusieurs obstacles. Le premier est le dépistage des nombreuses personnes infectées de façon chronique à leur insu. Elles ont tout à bénéficier des AAD, car l'infection entraîne souvent des fatigues ainsi que des douleurs musculaires ou articulaires qui disparaissent avec la guérison de l'hépatite, ce qui améliore considérablement la qualité de vie. De plus, l'étude de patients infectés de façon chronique a montré que le virus favorise aussi la résistance à l'insuline et le diabète, augmente le risque de maladie cardio ou cérébrovasculaire et entraîne certains cancers tel celui des voies biliaires ou le lymphome diffus à grandes cellules B. Un pas important pour faciliter ce dépistage a été franchi fin 2016 avec la validation, par l'OMS, d'un premier test de diagnostic portable et moins coûteux que les précédents.

Le second obstacle est le financement à grande échelle de ces traitements encore très coûteux, notamment pour les pays émergents particulièrement touchés par la maladie. Néanmoins, avec une baisse des prix à venir et un raccourcissement de la durée du traitement à huit semaines, voire moins, plusieurs pays, dont la France, l'Allemagne, le Portugal, l'Écosse, l'Australie et l'Irlande ont déclaré leur objectif d'éradiquer le virus d'ici à dix ans.

En France, le ministère de la Santé a annoncé en avril 2017 que l'accès aux nouveaux traitements serait désormais généralisé à tous les patients infectés, alors qu'il était réservé aux personnes dont le foie était atteint à un stade assez avancé (précirrhose et au-delà, fibrose hépatique avancée) et à celles qui avaient un risque élevé de transmettre le virus. À l'échelle mondiale, les 194 membres de l'OMS se sont engagés, le 28 mai 2016, à éliminer les hépatites B et C d'ici à 2030. Un tel but sera difficile à atteindre pour de grands pays particulièrement touchés par la maladie tels que la Chine, avec ses 10 millions de personnes infectées par le virus, ou le Pakistan, mais aussi dans une moindre mesure la Russie, l'Ukraine, le Brésil et l'Argentine.

Afin d'aider une centaine de pays défavorisés à faire face à l'épidémie, le laboratoire Bristol-Myers Squibb a accordé en 2015 des licences du daclatasvir pour la fabrication de génériques. De son côté, le laboratoire Gilead vend ses produits avec un rabais de 99% à ces pays et a aussi permis à une dizaine de

fabricants indiens de produire des génériques à leur intention. Il a aussi engagé des partenariats avec des pays particulièrement frappés par la maladie tels que l'Égypte, où 12% de la population est infectée. Une campagne massive de traitement gratuit de sa population a ainsi pu démarrer en 2014 et a conduit au traitement de près de un million de patients en 2016. En Géorgie, troisième pays le plus touché après la Mongolie, le gouvernement a

5% des injections médicales dans le monde ne sont pas faites dans des conditions stériles

lancé en mai 2015 un plan national de prise en charge gratuite de tous les malades, soit environ 5% de la population, avec des médicaments fournis par Gilead et le soutien du gouvernement américain, et plus de 24 000 patients ont été traités. Dans d'autres pays, en revanche, le prix très élevé du sofosbuvir de Gilead a incité des pays comme le Brésil et la Chine à rejeter sa demande de brevet, et des organisations humanitaires comme Médecins du monde et Médecins sans frontières à en contester la validité auprès de l'Office européen des brevets dans l'espoir de faciliter l'arrivée de génériques.

Un autre obstacle est de disposer de moyens suffisants pour permettre un accès rapide au soin de tous les patients et confirmer la disparition du virus trois mois après la fin du traitement, marque d'une guérison définitive. Enfin, un défi propre aux pays émergents reste de prévenir les contaminations dues à l'utilisation encore trop fréquente de matériel médical usagé. Selon l'OMS, 5% des injections médicales dans le monde ne sont pas sûres; on estime qu'avec l'injection de drogue, elles ont causé 1,75 million de nouvelles infections en 2015.

En moins d'une décennie, la découverte des AAD a radicalement changé les perspectives de lutte contre l'hépatite C. Les autorités politiques et sanitaires de tous les pays vont-elles saisir cette chance historique de guérir les populations de cette infection virale encore trop souvent mortelle? ■

BIBLIOGRAPHIE

Asselah et al., **Direct-acting antivirals for the treatment of hepatitis C virus infection : Optimizing current IFN-free treatment and future perspectives**, *Liver International*, vol. 36, pp. 47-57, 2016.

S. Pol, **Virus de l'hépatite C. 25 ans, la fin de l'histoire ?**, *Médecine/Sciences*, vol. 29, pp. 998-1003, 2013.

T. K. H. Scheel et al., **Understanding the hepatitis C virus life cycle paves the way for highly effective therapies**, *Nature Medicine*, vol. 19, pp. 837-849, 2013.

L'ESSENTIEL

> Un milliardaire de la Silicon Valley, Youri Milner, finance un projet audacieux : envoyer une sonde vers l'une des étoiles les plus proches.

> La mission, intitulée *Breakthrough Starshot*, utilisera des lasers pour propulser des « voiles solaires » fixées à de petites puces électroniques capables de prendre des photos,

d'effectuer certaines mesures et de renvoyer les informations vers la Terre.

> Les spécialistes estiment que le projet constitue un défi technique coûteux et sans garantie de succès. Mais il n'en est pas moins passionnant : ce serait le premier objet fabriqué par l'homme à atteindre une autre étoile que le Soleil.

L'AUTEURE



ANN FINKBEINER
journaliste scientifique,
spécialisée en astronomie
et en cosmologie

Cap sur Alpha du Centaure

UN PROJET FOU : PROPULSER PAR LASER DES SORTES DE PETITS VOILIERS VERS UNE AUTRE ÉTOILE QUE LE SOLEIL. EN FINANÇANT *STARSHOT*, LE MILLIARDAIRE RUSSE YOURI MILNER VA-T-IL RÉALISER UN VIEUX RÊVE DE L'HUMANITÉ ?

Au printemps 2016, j'étais à une soirée en compagnie du brillant physicien et mathématicien Freeman Dyson, alors âgé de 92 ans et professeur émérite à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis. Il a la réputation d'avoir un franc-parler et de toujours vous surprendre, alors je lui ai demandé quelles étaient les nouvelles. Il a souri de façon énigmatique et a répondu : « Apparemment, nous allons rendre visite à Alpha du Centaure. »

Cette étoile est l'une des plus proches voisines du Soleil et un milliardaire russe avait récemment annoncé qu'il voulait financer un projet nommé *Breakthrough Starshot* pour y envoyer un vaisseau spatial d'un type nouveau. « Et c'est une bonne idée ? », ai-je demandé. Le sourire de Freeman Dyson s'est élargi : « Non, c'est idiot. Mais le vaisseau est intéressant. »

Son principe est effectivement séduisant. Au lieu de l'habituelle fusée propulsée par des

réactions chimiques et assez grande pour transporter des humains ou des instruments lourds, *Starshot* est un essaim de minuscules puces électroniques polyvalentes, dénommées *StarChips*, munies chacune d'une « voile solaire » (voir l'illustration ci-contre).

La voile sera tellement légère que, poussée par un faisceau laser, elle atteindra jusqu'à 20% de la vitesse de la lumière. Alpha du Centaure étant distante de 4,37 années-lumière, la plus rapide des fusées pourrait mettre, selon sa masse, 30 000 ans à l'atteindre ; une puce *StarChip* ferait le voyage en vingt ans. À leur arrivée, les puces ne s'arrêteront pas et croiseront en quelques minutes l'étoile et ses éventuelles planètes. Au passage, elles prendront des clichés qui mettront 4,37 années à nous parvenir.

L'aspect « idiot » de la mission *Starshot*, c'est que son intérêt scientifique est très limité. Les informations que les astronomes souhaitent obtenir sur les étoiles ne sont pas du genre de celles que l'on peut saisir en un rapide survol. >





Une escadrille de voiles poussées par de la lumière laser et portant chacune une petite puce équipée de capteurs, telle est l'idée du projet *Starshot* pour atteindre une étoile voisine du Soleil.

> Et comme personne ne sait si Alpha du Centaure est accompagnée de planètes, *Starshot* ne peut même pas promettre de gros plans sur des planètes extrasolaires. «Nous n'avons pas vraiment réfléchi à l'aspect scientifique», admet l'astrophysicien Ed Turner, de l'université de Princeton et membre du comité consultatif de *Starshot*. «Nous avons presque considéré comme allant de soi que la science serait intéressante.»

Mais en août 2016, la chance a souri à l'équipe de *Starshot*: des astronomes européens sans lien aucun avec le projet ont découvert une planète autour d'une autre étoile, Proxima du Centaure, un dixième d'année-lumière plus proche de nous qu'Alpha du Centaure. D'un seul coup, *Starshot* est devenue la seule option quelque peu réaliste pour visiter une planète en orbite autour d'une autre étoile dans un avenir assez proche. Mais même ainsi, *Starshot* n'est pas loin des rêves de la science-fiction – des scénarios où l'on imagine envoyer des hommes au-delà du Système solaire grâce à des technologies miraculeuses, souvent contraires aux lois de la physique, et grâce à beaucoup d'argent.

Pour *Starshot*, nul besoin de miracles. Sa technologie, même si elle n'existe pas encore, est fondée sur des concepts bien établis qui ne violent aucune loi de la physique. Et le projet a de l'argent pour le porter. Youri Milner, l'entrepreneur qui finance de nombreux programmes de recherche (les *Breakthrough Initiatives*) et des prix scientifiques (les *Breakthrough Prizes*), a lancé *Starshot* avec une enveloppe de 100 millions de dollars.

En outre, au vu de l'impressionnant comité consultatif dont s'est entouré l'investisseur, même un sceptique finirait par penser que *Starshot* a une chance de réussir. Ce groupe inclut des spécialistes mondiaux des lasers, des voiles solaires, des puces électroniques, des exoplanètes, de l'aéronautique et de la gestion de grands projets, ainsi que deux lauréats du prix Nobel, l'astronome royal du Royaume-Uni, d'éminents astrophysiciens, un groupe d'ingénieurs aussi doués qu'expérimentés, et Freeman Dyson qui, même s'il pense que la mission *Starshot* est idiote, dit aussi que l'idée de voiles poussées par laser tient la route et mérite d'être explorée. L'un dans l'autre, il serait assez risqué de parier contre un projet servi par tant d'argent, d'avis éclairés et d'ingénieurs compétents.

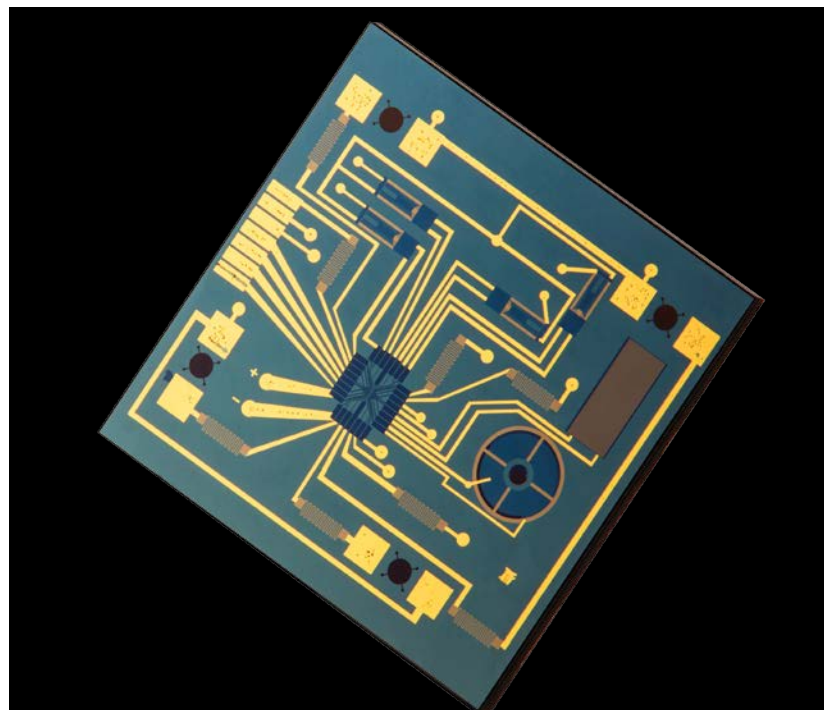
Par de nombreux aspects, le projet ne ressemble à aucune autre mission spatiale. «Tout dans le projet *Starshot* est hors du commun», dit Joan Johnson-Freese, experte en politique spatiale au Naval War College, aux États-Unis. Ses objectifs, son mode de financement et sa gestion divergent de ceux de tous les autres acteurs de l'exploration spatiale. Les entreprises spatiales commerciales se concentrent sur la réalisation de profits et sur les missions habitées qui se cantonnent au Système solaire. La Nasa, qui a

étudié des projets de voyage interstellaire dans les années 1990, est trop prudente pour se lancer dans quelque chose d'aussi incertain; ses procédures bureaucratiques sont plus lourdes; et le financement de ses missions est à la merci des aléas du Congrès américain (ce qui n'empêche pas que la Nasa ait mené de nombreuses missions interplanétaires avec succès). «La Nasa est obligée de prendre son temps; les milliardaires sont libres de se lancer», résume Leroy Chiao, ancien astronaute et commandant de la Station spatiale internationale.

RETOUR AU PREMIER AMOUR

L'homme à la tête du projet *Starshot* a toujours été inspiré par les horizons lointains. Youri Milner est né en 1961 à Moscou, l'année où Youri Gagarine est devenu le premier homme à aller dans l'espace. «Mes parents m'ont envoyé un message en me prénommant Youri», dit-il. Il faudrait donc qu'il aille quelque part où nul n'est jamais allé. C'est ainsi qu'il s'est lancé dans la physique: «C'était mon premier amour», déclare-t-il. Youri Milner a passé alors dix ans à étudier la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte qui lie certaines particules élémentaires. «Malheureusement, sans grand succès», raconte-t-il.

Il s'est alors tourné vers le monde des affaires et est devenu l'un des premiers investisseurs de Facebook et de Twitter. Il aurait



UNE PUCE STARCHIP

Ce prototype de puce *StarChip*, conçu dans un laboratoire de Mountain View, en Californie, a une largeur d'environ 15 millimètres. Il doit cependant intégrer aussi une caméra, de quoi émettre un signal vers la Terre, une source d'énergie... Un énorme défi technique!

amassé une fortune qui s'élèverait à 3 milliards de dollars. «Et, il y a peut-être quatre ans, poursuit-il, j'ai commencé à repenser à mon premier amour», les sciences.

En 2013, il a fondé les *Breakthrough Prizes*, trois prix pour la physique, pour les mathématiques et pour les sciences de la vie. Deux ans plus tard, il a lancé ce qu'il appelle son passe-temps, les *Breakthrough Initiatives*: un prix de un million de dollars pour le meilleur message à envoyer à une civilisation extraterrestre, 100 millions de dollars pour la recherche d'intelligence extraterrestre et, maintenant, 100 millions de dollars pour *Starshot*.

Au début de 2015, Yuri Milner a recruté pour commencer une équipe de personnes qu'il a rencontrées à diverses réunions *Breakthrough*. Le directeur du comité consultatif et le directeur exécutif du projet sont respectivement Avi Loeb, qui dirige le département d'astronomie de l'université Harvard, et Pete Worden, qui a dirigé le centre Ames de recherche de la Nasa et qui a participé à un projet de la Nasa de vaisseau destiné à être lancé dans un siècle. Pete Worden a recruté comme directeur de l'ingénierie Pete Klupar, un ingénieur qui avait travaillé pour lui au centre Ames et pour l'industrie aérospatiale. Ce groupe initial a mis sur pied l'impressionnant comité du programme, un concentré de spécialistes des technologies, ainsi que des grands noms comme Mark Zuckerberg de Facebook ou le physicien Stephen Hawking.

La politique de gestion du projet semble être un compromis entre la rigueur de l'arbre décisionnel hiérarchique de la Nasa et l'approche typique de la Silicon Valley: réunir des personnes de talent dans une pièce, leur donner un objectif à long terme et leur laisser le champ libre. L'un des membres du comité, James Benford, président de Microwave Sciences (une société californienne de recherche et de développement), explique que le mot d'ordre est de «nous donner [les objectifs] de la semaine prochaine et pour dans cinq ans, puis à nous de faire le lien entre les deux».

LA FEUILLE DE ROUTE SE DESSINE

Les membres de l'équipe se sont rapidement entendus pour exclure l'idée irréaliste d'envoyer des cosmonautes vers Alpha du Centaure, et qu'il fallait privilégier une mission non habitée. Ils ont estimé qu'une telle mission pourrait être lancée d'ici vingt ans. Ils sont ensuite convenus que le principal problème était la propulsion du vaisseau. Ainsi, à la mi-2015, les postdoctorants et les étudiants en thèse d'Avi Loeb ont commencé à trier les possibilités en trois catégories: impossibles, improbables et faisables.

En décembre de la même année, ils ont reçu un article de Philip Lubin, physicien à l'université de Californie à Santa Barbara, intitulé «Une

DES PROTOTYPES DE VOILES SOLAIRES

Le Russe Constantin Tsiolkovski, considéré comme le père de l'astronautique moderne, a été le premier à suggérer, dans les années 1920, d'utiliser la lumière du Soleil comme moyen de propulsion. Les voiles solaires sont poussées par la pression

de radiation, c'est-à-dire par les photons qui viennent percuter les voiles. La pression exercée par la lumière du Soleil, à la distance de la Terre, est de l'ordre de quelques micronewtons par mètre carré. Il faut donc des voiles très grandes et très légères pour obtenir une accélération importante. Le premier démonstrateur, *Ikaros*, n'a été lancé qu'en 2010, par l'agence spatiale japonaise. Sa voile a une superficie de 173 mètres carrés. La force exercée sur la sonde, d'une masse totale de 315 kilogrammes, augmente sa vitesse d'une dizaine de mètres par seconde tous les mois. Fin 2017, la Nasa enverra dans l'espace *LightSail 2*, un nanosatellite propulsé par une voile, encore une fois pour éprouver cette technique.

feuille de route pour le vol interstellaire». Philip Lubin proposait comme moyen de propulsion un réseau au sol de lasers en phase, c'est-à-dire un grand nombre de petits lasers émettant de telle sorte que leur lumière se combine en un seul faisceau cohérent. Le faisceau laser pousserait une puce portée par une voile, qui pourrait alors voyager à une vitesse relativement proche de celle de la lumière et atteindre une étoile en quelques décennies.

Une idée similaire avait été publiée il y a une trentaine d'années par le physicien et écrivain de science-fiction Robert Forward; il l'avait baptisée *Starwisp*. Même si la technologie relève encore davantage de la science-fiction que de la réalité, «j'ai pour l'essentiel fourni à *Starshot* sa feuille de route», raconte Philip Lubin, qui a depuis rejoint le projet.

En janvier 2016, Yuri Milner, Pete Worden, Pete Klupar, Avi Loeb et Philip Lubin se sont réunis dans la Silicon Valley et ont mis au point une stratégie. «Yuri est arrivé en tenant un article avec des *post-it*, se rappelle Philip Lubin, et il a commencé à poser les bonnes questions scientifiques et économiques.» L'avantage de l'approche originale du projet est que, plutôt que d'avoir à se soumettre au long processus d'appel à propositions et d'évaluation de la Nasa, ou de devoir se soucier des perspectives de retour sur investissement comme une entreprise commerciale, l'équipe de *Starshot* était libre de discuter de toutes les options et de proposer un concept fondé uniquement sur ce qui lui semblait le mieux pour atteindre l'objectif.

En termes de coûts, le seul élément vraiment cher de *Starshot* est le laser; les voiles et les puces devraient être bon marché. Un lanceur expédierait des centaines, voire des milliers de ces puces au-dessus de l'atmosphère où elles déploieraient leur voile. En envoyant >

COMMENT RENDRE VISITE À UNE ÉTOILE

L'ambitieux projet *Breakthrough Starshot* vise à envoyer de minuscules vaisseaux vers une étoile voisine du Soleil afin d'y prendre des photos et d'effectuer des mesures lors d'un rapide survol. La mission serait le premier voyage interstellaire jamais entrepris par l'humanité. Ces vaisseaux seront propulsés grâce à un faisceau laser,

pointé depuis la surface de la Terre. Il exercera une pression sur des feuillets ultraminces formant des sortes de voiles attachées à de minuscules puces électroniques nommées *StarChips* (l'ensemble formant un « nanovaisseau »), qui nous émettraient en retour les données recueillies par leurs capteurs.

1 Un « vaisseau mère » sera mis en orbite terrestre par une fusée conventionnelle. Il larguera alors, au rythme d'un par jour et pendant plus de trois ans, les nanovaisseaux, qui entameront dès lors leur trajet vers la destination.

2 Cent millions de petits lasers, disposés en un réseau d'environ un kilomètre carré, combineront leur lumière en un faisceau unique. Pointé sur la voile solaire d'une puce *StarChip*, ce faisceau accélérera le nanovaisseau qui atteindra en quelques minutes 20 % de la vitesse de la lumière.

Nanovaisseau

Vaisseau mère

Réseau de lasers en phase

- 3 Les *StarChips* communiqueront avec la Terre en renvoyant des signaux au réseau laser qui les a accélérées. Une fois parvenues à destination, les *StarChips* devront diriger avec une grande précision leurs émissions afin que les données et images recueillies atteignent bien les récepteurs sur Terre.

StarChip

Les vaisseaux qui entreprendront ce voyage sont conçus sur le modèle des petites puces des smartphones, et pèseront environ un gramme chacun. Les puces, de 15 millimètres de côté, seront munies de caméras, de piles, d'un dispositif d'émission de signaux, éventuellement de spectrographes pour étudier la chimie stellaire et planétaire, et de magnétomètres pour mesurer les champs magnétiques.

Voile

Mesurant environ quatre mètres carrés, les voiles de *Starshot* s'inspirent des voiles solaires, mais seront propulsées par le recul provoqué par le faisceau laser. Afin d'accélérer les *StarChips*, elles devront être extrêmement légères, solides et réfléchissantes à 99,999 %. Le système de fixation à la puce n'est pas encore décidé.

> autant de puces, la perte de quelques-unes ne serait pas un problème. Ensuite, chaque puce serait accélérée par le laser et atteindrait 20 % de la vitesse de la lumière en quelques minutes. Le laser s'éteindrait alors et le long vol de croisière de la puce avec sa voile commencerait. Parvenue à proximité de son objectif, la puce renverrait un signal vers la Terre. « Il y a dix ans, nous n'aurions pas pu envisager cela sérieusement », explique Youri Milner. Mais maintenant, avec les progrès des lasers, des puces et des nouveaux matériaux, « la perspective de réussite d'un tel projet ne se compte plus en siècles, mais en décennies ».

La direction de *Starshot* a soumis le plan à l'évaluation de scientifiques indépendants, leur demandant de chercher des failles insurmontables. Aucun n'en a trouvé. « Je peux vous dire pourquoi ce projet est difficile et pourquoi il est cher, dit Philip Lubin, mais je suis incapable de trouver une raison pour laquelle il serait impossible. » En avril 2016, l'équipe s'est mise d'accord sur le principe de base de la mission, et le 12 avril, Philip Lubin a organisé une conférence de presse au sommet de la nouvelle Freedom Tower de New York, avec des vidéos, des animations et plusieurs membres du comité consultatif. Il a annoncé le projet d'un « voilier interstellaire » poussé par un vent de lumière. Les chercheurs ont passé l'été suivant à développer les grandes lignes de la mission.

STARCHIPS ET VOILES SOLAIRES

L'équipe a rapidement compris que les défis techniques allaient être difficiles à surmonter, à commencer par la conception de la *StarChip* (la puce stellaire). Elle doit être minuscule (avec une masse de l'ordre du gramme) et néanmoins capable de recueillir et d'envoyer des données, de transporter sa propre alimentation et de survivre au long voyage.

Il y a plusieurs années, le groupe d'ingénieurs dirigé par Mason Peck, à l'université Cornell, a construit ce qu'ils nomment des *sprites*, des puces semblables à celles des smartphones. Chacune de ces puces comportait un détecteur de lumière, des panneaux solaires et une radio, le tout pesant quatre grammes.

Les puces *StarChips* seraient conçues sur le modèle des *sprites*, tout en étant quatre fois plus légères, et porteraient quatre caméras chacune. Au lieu de lourdes lentilles pour la mise au point, une option consiste à utiliser un minuscule réseau de diffraction (*planar Fourier capture array* ou matrice d'acquisition plane de Fourier) installé sur le capteur lumineux. Il décompose la lumière incidente en fonction de la longueur d'onde et les données sont traitées numériquement plus tard pour obtenir une image avec n'importe quelle profondeur focale.

Parmi les autres équipements suggérés pour les puces, on peut citer un spectrographe pour >

> étudier la chimie des atmosphères planétaires et un magnétomètre pour mesurer le champ magnétique de l'étoile.

Pour que ces données soient exploitables, les puces doivent pouvoir les renvoyer vers la Terre sur des distances interstellaires. Les satellites utilisent actuellement des diodes laser de un watt pour envoyer de l'information, mais sur des distances plus courtes. Jusqu'à présent, la plus longue distance ainsi couverte a été celle qui nous sépare de la Lune, 100 millions de fois plus proche qu'Alpha du Centaure. Afin de cibler la Terre depuis notre voisine stellaire, le pointage des signaux laser émis devra être extraordinairement précis. Et même ainsi, pendant les quatre années du voyage, le signal s'étalera et se diluera à tel point que quand il nous parviendra, il sera réduit à quelques centaines de photons. En arrivant sur Terre, le signal sera-t-il alors trop faible pour être détecté? Une solution serait d'utiliser des relais, d'envoyer le signal d'une *StarChip* à toute une série d'autres dispersées à intervalles réguliers tout le long du parcours.

LE DÉFI DE LA BATTERIE

L'alimentation des puces est aussi un défi. Des batteries devront alimenter les caméras et les processeurs informatiques qui transmettront les données tout au long du voyage. À ce jour, aucune source d'énergie assez puissante ne fonctionne à la fois dans l'obscurité et dans le froid tout en pesant moins d'un gramme. Une solution serait d'adapter les minuscules piles nucléaires utilisées dans certains implants médicaux. Une autre consisterait à exploiter la chaleur produite par le frottement de la voile contre le gaz et la poussière du milieu interstellaire.

Ce même milieu interstellaire présente aussi des risques pour les puces de *Starshot*. Le milieu est comme une fumée de cigarette très diluée, explique Bruce Draine, astronome à l'université de Princeton et membre du comité. Mais personne ne connaît exactement la densité du milieu ni la taille des grains de poussière. Et avec des collisions à une vitesse proche de celle de la lumière entre les puces et ces grains, le potentiel de destruction est difficile à estimer. Les dégâts pourraient aller de cratères mineurs à la destruction totale.

Un revêtement de quelques millimètres de cuprobéryllium (qui alourdirait la puce) offrirait une protection contre les particules les plus petites, mais des grains de poussière plus gros pourraient entraîner des dégâts catastrophiques. Quelles seront les chances de survie des puces dans ces conditions? D'après les membres de l'équipe, en envoyant des centaines voire des milliers de puces vers notre voisine stellaire, quelques-unes devraient arriver à bon port.

Par ordre de difficulté croissante, la conception de la voile vient après celle de la

puce. Les *StarChips* seraient propulsées par le recul imprimé à la voile lorsque les photons, les particules de lumière, se réfléchissent à sa surface, de la même manière que le rebond d'une balle de tennis sur les cordes pousse une raquette. C'est le principe des voiles solaires propulsées par la lumière du Soleil, mais le flux de photons de ce dernier est trop faible pour amener les *StarChips* aux vitesses voulues.

Plus la quantité de lumière réfléchie est importante, plus la poussée sera importante et plus la voile avancera vite; pour atteindre 20 % de la vitesse de la lumière, les voiles de *Starshot* devront être réfléchissantes à 99,999 %. D'où l'idée d'utiliser un laser puissant, mais «toute lumière qui n'est pas réfléchie chauffe la voile», explique Geoffrey Landis, scientifique au centre de recherche Glenn de la Nasa et membre du comité consultatif; «même si une petite fraction de la puissance du laser venait à chauffer la voile, ce serait désastreux».

Comparée aux voiles solaires déjà testées, qui utilisent le rayonnement du Soleil pour propulser des vaisseaux expérimentaux dans le Système solaire, la voile de *Starshot* devra aussi être beaucoup plus légère, avec à peu près «l'épaisseur d'une bulle de savon», dit Geoffrey Landis. En 2000, dans l'expérience qui s'approche le plus des spécifications requises pour *Starshot*, James Benford a utilisé un faisceau micro-onde pour accélérer une voile constituée d'un feuillet de carbone. Son essai est parvenu à produire une accélération de 13 g (13 fois l'accélération de la pesanteur sur Terre), alors que la voile de *Starshot* devra supporter une accélération de 60 000 g.

La voile, comme la puce, devra aussi résister à la poussière du milieu interstellaire qui risque de la cribler de trous. Jusqu'à présent, il n'existe aucun matériau qui soit à la fois léger, solide, réfléchissant et qui ne coûte pas des millions de dollars. «Un des nombreux miracles que nous devons inventer, c'est le matériau de la voile», conclut Pete Klupar.

D'autres décisions liées à la voile restent à prendre. La voile, de quatre mètres carrés, pourrait être fixée à la puce par des câbles, ou bien la puce pourrait être montée directement sur la voile. Celle-ci pourrait tourner, ce qui lui permettrait de rester centrée sur le faisceau laser de propulsion. Après l'accélération initiale, la voile pourrait se replier comme un parapluie, ce qui la rendrait moins vulnérable au voyage. Et une fois parvenue au niveau d'Alpha du Centaure, elle pourrait se redéployer et ajuster sa courbure afin de servir de miroir de télescope ou d'antenne pour renvoyer les messages de la puce vers la Terre. «Cela paraît bien compliqué, admet Geoffrey Landis, mais nous avons déjà résolu des problèmes plus difficiles.»

Tous ces défis ne sont rien comparés à celui que présente le laser qui poussera la voile. Le



L'entrepreneur et milliardaire russe Yuri Milner a dévoilé la mission *Breakthrough Starshot* lors d'une conférence de presse à New York le 12 avril 2016. Il tient un prototype de la puce *StarChip* qui devrait faire le voyage jusqu'à Alpha du Centaure. Les physiciens Stephen Hawking (au centre) et Freeman Dyson (à droite) participent au projet en tant que conseillers, parmi un groupe rassemblant de nombreux experts de divers horizons.

seul moyen pour *Starshot* d'atteindre une fraction non négligeable de la vitesse de la lumière est l'utilisation d'un laser exceptionnellement puissant d'une centaine de gigawatts. Le Département américain de la défense a produit des lasers plus puissants, dit Robert Peterkin, chef de projet au Laboratoire de recherche de l'Armée de l'air, mais ils n'émettent que pen-

Youri Milner espère que *Starshot* aura un effet fédérateur, capable d'unir les gens

dant quelques milliardièmes ou billionièmes de seconde. Or le laser de *Starshot* devra éclairer chaque voile pendant plusieurs minutes.

Pour atteindre une telle puissance sur des durées aussi longues, une solution est de grouper en réseau de petits lasers à fibre optique, de telle sorte que leurs rayonnements se combinent en un faisceau cohérent. Le Département de la défense a aussi construit des réseaux de lasers en phase, mais les siens comportaient seulement 21 lasers, pour une puissance totale de quelques dizaines de kilowatts. Le laser de *Starshot* devra inclure 100 millions de ces lasers d'environ un kilowatt chacun. Le réseau occupera au sol une surface d'un kilomètre carré.

Et les difficultés ne s'arrêtent pas là. Il faut pouvoir focaliser de façon cohérente ces 100 millions de lasers sur une petite cible, située à 60 000 kilomètres d'altitude. Tout en prenant en compte les turbulences atmosphériques, qui dévieront les faisceaux laser. La lumière pourrait passer complètement à côté de la voile, ou plus probablement l'atteindre de manière inégale, si bien que certaines parties de la voile seraient davantage poussées que d'autres. Cela déséquilibrerait la voile, la ferait tourner ou la déplacerait hors du faisceau.

Là encore, l'équipe de *Starshot* a une solution, mais celle-ci s'accompagne de son propre lot de difficultés: l'optique adaptative, déjà utilisée par les grands télescopes, qui consiste à éliminer les distorsions dues aux turbulences atmosphériques grâce à un miroir déformable. Mais il faudrait apporter à cette technique des avancées majeures pour qu'elle fonctionne avec *Starshot*. Dans le cas du laser, au lieu d'un

miroir déformable, les scientifiques devront ajuster minutieusement chaque fibre laser pour corriger les effets optiques de l'atmosphère. L'optique adaptative actuellement en service sur les télescopes atteint une précision de 30 millisecondes d'angle (unité de mesure de la taille angulaire d'un objet sur le ciel). *Starshot* devrait focaliser le laser avec une précision de 0,3 milliseconde d'angle, un exploit qui n'a jamais été réalisé.

Et même si nous parvenions à développer toutes ces techniques aussi disparates qu'audacieuses, il faudra encore les réunir en un système unique, ce qui, pour les cadres de *Starshot*, revient à créer un puzzle dont les pièces sont en pleine évolution ou n'existent pas encore. Pour les cinq prochaines années, l'objectif est de rassembler les techniques en suivant les conseils des spécialistes du comité. Les membres de l'équipe testeront la faisabilité à l'aide d'expériences à petite échelle et de modèles mathématiques.

Ils ont commencé ce processus à l'hiver 2015-2016 et émettent des appels à projets pour des technologies qui ne sont pas encore développées. Les premiers contrats sont en passe d'être signés, sur des petits projets de quelques centaines de milliers à 1,5 million de dollars chacun. Viendront ensuite les prototypes. Et, à supposer que les tests soient passés avec succès, la construction du laser et des voiles pourrait démarrer au début des années 2030, pour un lancement au milieu des années 2040.

À ce stade, *Starshot* aura déjà vraisemblablement coûté des milliards de dollars, mais il aura peut-être noué de nouveaux partenariats avec des gouvernements, des laboratoires et les agences spatiales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. «Je vais défendre la cause du projet, et j'espère que davantage de personnes nous rejoindront», commente Youri Milner.

CAP SUR LES ÉTOILES !

Avec tous ces obstacles, quelles sont les chances de succès? Les chercheurs et les ingénieurs qui ne sont pas liés à *Starshot* tendent à penser qu'elles sont faibles; plusieurs personnes m'ont déclaré catégoriquement: «Ils n'iront pas sur Alpha du Centaure.» David Charbonneau, du centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, pense que le projet sera à terme tellement coûteux que «cela reviendrait à convaincre la population des États-Unis d'y consacrer 5 % du budget fédéral – autant que le programme *Apollo*».

Les scientifiques liés à *Starshot* sont plus optimistes, mais restent pragmatiques. «Nous pouvons certainement utiliser des lasers pour envoyer des vaisseaux vers Alpha du Centaure», dit Greg Matloff du College of Technology de New York, et membre du comité. «Est-ce que nous pourrions les y emmener d'ici à vingt ans, >

> je ne sais pas.» Youri Milner pense que son rôle dans le projet *Starshot* – outre son financement – est de s'assurer qu'il reste réaliste et qu'il s'appuie sur des bases solides. «Si cela devait prendre plus d'une génération, dit-il, nous ne devrions pas travailler sur ce projet.»

Jusqu'à la fin du mois d'août dernier, je pensais que Freeman Dyson avait raison; la technologie *Starshot* était intéressante, mais le choix d'Alpha du Centaure comme destination était idiot. L'étoile est en fait un système binaire, formé de deux étoiles de même type que le Soleil et tout à fait ordinaires. Les astronomes comprennent bien ces étoiles, et bien que comparer leurs éruptions et leur champ magnétique à ceux du Soleil puisse être utile, David Charbonneau considère que «ce que nous apprendrions en matière de physique stellaire en leur rendant visite ne vaut pas l'investissement».

Maintenant que les astronomes savent que la voisine d'Alpha du Centaure a une planète, l'intérêt scientifique est plus convaincant. L'étoile, Proxima du Centaure, est un peu plus proche de la Terre et c'est une naine rouge, le type d'étoiles le plus répandu dans la galaxie. La planète, Proxima Centauri b, est à une distance de son étoile qui la rend potentiellement habitable. Les membres de *Starshot* envisageraient-ils de changer la cible du projet? «Pourquoi pas», répond Youri Milner. «Nous avons encore largement le temps de changer d'avis.»

Mais même la présence de Proxima Centauri b ne suffira pas à garantir le succès scientifique de *Starshot*. Ses puces pourraient prendre des images, peut-être mesurer le champ magnétique de la planète, voire échantillonner l'atmosphère, mais elles devront faire tout cela en quelques minutes, du fait de leur extrême vitesse. Vu le temps de développement du projet et le coût final, souligne David Spergel, astronome à l'université de Princeton, «nous pourrions construire un télescope optique de 12 à 15 mètres dans l'espace, observer la planète pendant des mois et recueillir beaucoup plus d'informations qu'en un bref survol».

UN PROJET HUMANISTE

Mais les milliardaires sont libres d'investir leur argent comme ils le souhaitent, et d'autres sont libres de se joindre à leurs rêves. De plus, même parmi ceux qui mettent en doute l'intérêt scientifique de *Starshot*, beaucoup le soutiennent néanmoins, parce qu'en développant les techniques associées, les ingénieurs feront très certainement des innovations intéressantes. Qui plus est, même si *Starshot* échoue, des missions mettant à profit ses techniques pourraient atteindre d'autres destinations à l'intérieur et hors du Système solaire.

Si Youri Milner s'enthousiasme autant pour ce projet, c'est qu'il espère qu'un tel objectif

aura un effet fédérateur, qu'il sera capable d'unir les gens, de renforcer le sentiment d'appartenir à la même planète et à une unique espèce. «Ces six dernières années, j'ai passé 50 % de mon temps sur la route, en grande partie en Asie et en Europe», dit-il. «J'ai compris qu'un consensus global est difficile à atteindre,

La présence d'une exoplanète ne suffira pas à garantir le succès scientifique de *Starshot*

mais pas impossible.» Mais somme toute, même lui reconnaît que la volonté d'aller vers une autre étoile ne s'explique pas.

Presque tous ceux à qui j'ai posé la question ont donné la même réponse: ils ne savent pas l'expliquer à quelqu'un qui ne le comprend pas déjà; ils veulent juste y aller. Bien qu'il pense que les chances de succès de *Starshot* sont minces et ne prennent pas au sérieux ses motivations scientifiques, James Gunn, astrophysicien émérite de Princeton, affirme: «Je suis rationnel la plupart du temps, mais je ne suis pas particulièrement rationnel concernant les frontières de l'humanité dans le cosmos. Je rêve d'atteindre les étoiles depuis que je suis enfant.» Beaucoup de membres du comité consultatif disent la même chose.

C'est peut-être Freeman Dyson qui exprime le mieux les contradictions inhérentes à de tels rêves. L'idée de puces équipées d'une voile à laser se tient, dit-il, et les personnes qui portent le projet *Starshot* sont intelligentes et «tout à fait sensées». Mais il pense qu'elles devraient revoir à la baisse les objectifs, arrêter d'essayer d'aller voir Alpha ou Proxima du Centaure et se concentrer sur l'exploration du Système solaire, où les *StarChips* seraient propulsées par des lasers moins puissants et plus faciles à réaliser. «L'exploration est dans la nature humaine», conclut-il. Cependant, pour lui, ces expéditions devraient être menées avec des «machines automatiques» qui font ça très bien, surtout quand il n'y a pas de justification scientifique à envoyer des cosmonautes. Mais Freeman Dyson ne serait pas Freeman Dyson s'il n'ajoutait pas, imprévisible comme toujours: «D'un autre côté, j'adorerais y aller.» ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Lubin, **A roadmap to interstellar flight**, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 69, pp. 40-72, 2016.

M. Alpert, **Alpha Centauri or bust**, *Blog Scientific American*, <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/alpha-centauri-or-bust>

Site web du projet **Starshot**: <https://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



L'ESSENTIEL

> Plusieurs espèces de poissons de la famille des Poeciliidés colonisent des cours d'eau mexicains malgré une forte concentration en sulfure d'hydrogène.

> Divers traits, dont une tête et une progéniture de plus grande taille, facilitent leur survie dans ces eaux toxiques.

> Leur ADN montre qu'elles ont développé ces

adaptations par des voies moléculaires diverses.

> Les conditions extrêmes régnant dans les eaux sulfureuses conduisent à une spéciation rapide.

LES AUTEURS



RÜDIGER REISCH
enseignant de biologie
évolutive à l'université
de Londres



MARTIN PLATH
professeur de
zoologie à l'université
Nord-Ouest A&F à
Yangling, en Chine

Sulfureuse évolution chez les poissons mexicains

LES EAUX DE CERTAINES SOURCES MEXICAINES, RICHES EN SULFURE D'HYDROGÈNE, SONT EXTRÊMEMENT TOXIQUES. POURTANT, DES ESPÈCES DE POISSONS S'Y SONT ADAPTÉES. PAR QUELS MÉCANISMES ?