

<<< ROLAND LEHOUCQ >>>



# SCIENTIFI FICTION

LA PHYSIQUE DE L'IMPOSSIBLE

EXTRAIT GRATUIT



# SCIENTIFI FICTION

LA PHYSIQUE DE L'IMPOSSIBLE

ROLAND LEHOUCQ



PARALLAXE

Dans la collection « Parallaxe »  
aux éditions du Béliâl'

- *La science fait son cinéma*, de Roland Lehoucq et J.-Sébastien Steyer
- *Comment parler à un alien ?*, de Frédéric Landragin
- *Station Metropolis direction Coruscant*, d'Alain Musset
- *Comment parle un robot ?*, de Frédéric Landragin
- *Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers*, sous la direction de Roland Lehoucq
- *Cyberpunk's Not Dead*, de Yannick Rumpala
- *Neuro-Science-Fiction*, de Laurent Vercueil
- *La Vie alien*, de Roland Lehoucq, J.-Sébastien Steyer et Laurent Genefort
- *Dictionnaire utopique de la science-fiction*, d'Ugo Bellagamba

Si vous voulez être tenu au courant de nos publications,  
écrire aux auteurs, illustrateurs, ou recevoir un  
bon de commande complet, deux adresses :

Le Béliâl'  
35, avenue de la Gare  
77250 Moret-Loing-et-Orvanne  
France  
ou  
[www.belial.fr](http://www.belial.fr)

venez discuter avec nous sur <http://forums.belial.fr>

Collection « Parallaxe » dirigée par Roland Lehoucq

© 2024, Roland Lehoucq

© 2024, le Béliâl', pour la présente édition

Couverture et illustrations intérieures © 2024, Cedric Buaille

Merci à Lilian Guesdon pour la relecture.

# SOMMAIRE

## EXTRAIT

Avant-propos .....	5
<b>ARMES ET BOUCLIER</b>	
Armes soniques : de la fiction à la réalité .....	9
<b>BIG DUMB OBJECTS</b>	
Déplacer la Terre .....	21
<b>PHYSIQUE ULTIME</b>	
Beam us up, Scotty ! .....	34
<b>DISCUSSION AVEC LES ANCIENS</b>	
Arthur C. Clarke : un géant de la SF .....	47

## AVANT-PROPOS

L'OUVRAGE QUE VOUS TENEZ entre les mains est un recueil d'articles initialement publiés dans la rubrique « Science-fiction » de la revue *Bifrost*, que j'ai le plaisir d'animer depuis le numéro 11 daté de décembre 1998. Certains furent déjà intégrés au livre intitulé *La SF sous les feux de la science* (éditions Le Pommier, 2012). D'autres, parus depuis mai 2018, ne sont parus que dans *Bifrost*. Ces dix-sept articles, revus et mis à jour, ont été regroupés en cinq parties — *Armes et bouclier*, *Matière et matériaux*, *Big Dumb Objects*, *Physique ultime* et *Conversation avec les Anciens* — complétées par l'analyse détaillée d'un texte de l'écrivain américain Hal Clement. La logique derrière cette sélection est simple : explorer les confins de la physique et de la science-fiction.

Pour susciter le sentiment d'émerveillement associé à la science-fiction, un auteur insère souvent des éléments techniques ou scientifiques exagérés, voire inexacts. Mais, bien que son récit soit clairement fictif, l'auteur s'engage implicitement à produire une « conjecture romanesque rationnelle », pour reprendre la définition que Pierre Versins donnait de la science-fiction. Par conséquent, après avoir découvert un nouvel univers, le lecteur peut légitimement s'adonner à ce que Hal Clement appelle « le jeu » : identifier les contradictions entre les descriptions de l'auteur et l'état des connaissances scientifiques actuelles. Il ne s'agit bien sûr pas de se transformer en « professeur » évaluant les auteurs en fonction de leur respect des connaissances établies. La qualité d'une

œuvre de science-fiction ne se mesure pas à cela. Cependant, discuter de leur pertinence et, le cas échéant, répondre de façon argumentée à la question « Pourquoi est-ce faux ? », permet d'analyser en détail les concepts scientifiques mis en scène dans la science-fiction et, finalement, d'en apprendre sur notre monde. Cette pratique conduit à tenter une « classification des impossibles » :

- propositions plausibles : elles sont compatibles avec notre physique, mais difficiles à réaliser en pratique faute de ressources énergétiques ou matérielles (ascenseur spatial, voyage interstellaire, invisibilité, terraformation).

- propositions spéculatives : elles sont à la limite de nos connaissances (intelligence artificielle forte, *warp drive*). Ces inventions se situent aux confins des sciences et de l'imagination débridée. Elles restent pensables, mais ne verront peut-être jamais le jour.

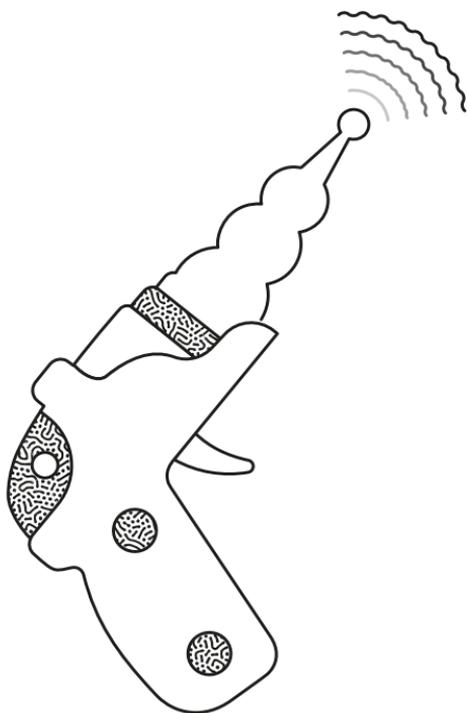
- propositions impossibles : elles violent (au moins) une loi de la physique (machine à mouvement perpétuel, précognition, voyage dans le temps, téléportation). Ces inventions sont incompatibles avec nos connaissances, et elles pourraient le rester indéfiniment.

Établir cette classification revient à exprimer une opinion sur l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques : la science-fiction est une façon de les confronter à leurs limites et de réfléchir à la frontière qui sépare le « possible » de « l'impossible ». Néanmoins, les savants ne sont peut-être pas les mieux placés pour la définir car, comme l'exprime l'auteur britannique Arthur C. Clarke dans sa « première loi », « *Quand un savant reconnu mais vieillissant estime que quelque chose est possible, il a presque certainement raison ; mais lorsqu'il déclare que quelque chose est impossible, il a très probablement tort.* » Ainsi, les idées de faire voler un plus lourd que l'air, d'aller visiter d'autres planètes ou de construire un réseau informationnel mondial, ont d'abord été vues comme impossibles

avant d'être finalement réalisées. Cela signifie-t-il pour autant que tout ce qui est pensable est réalisable? La seule façon de le savoir est de suivre la deuxième loi de Clarke: «*La seule façon de découvrir les limites du possible, c'est de s'aventurer un peu au-delà, dans l'impossible.*» C'est précisément ce que cet ouvrage vous propose de faire.

### **Remerciements**

Je remercie vivement mes collègues Bertrand Cordier (astrophysicien au CEA) et Raphaël Costa (doctorant en droit spatial), pour avoir co-signé deux des chapitres de ce livre lors de leur parution dans la rubrique Scientifiction de la revue *Bifrost*. Je remercie aussi Erwann Perchoc, pour son travail éditorial sans faille sur ce livre, et plus largement sur tous ceux de la collection Parallaxe, ainsi que Cedric Bucaille, dont le travail artistique lui donne une si belle image.



ARMES ET BOUCLIER

---

ARMES  
SONIQUES

« **D**ANS L'ESPACE *personne ne vous entend crier* ». La célèbre accroche du film *Alien, le huitième passager* (Ridley Scott, 1979) rappelle l'importance du son dans les films de science-fiction, de la musique aux bruitages. Elle évoque aussi une critique répétée à l'envi : l'impossibilité d'entendre des bruits d'explosion dans l'espace vide où le son ne peut se propager. En plus des émotions qu'il produit sur les spectateurs, le son est aussi directement utilisé par les protagonistes pour provoquer des effets physiques sur leurs adversaires. Ainsi, parmi la large gamme de pouvoirs dont disposent les super-héros, la capacité à produire un son intense, un super-cri, est régulièrement invoquée. Le plus célèbre des super-héros « bruyant » est sans doute Hurlleur (Banshee, en VO), de la franchise Marvel Comics, dont le cri puissant est capable d'endommager le système auditif des ennemis et de provoquer d'intenses vibrations de leur corps. Chez DC Comics, Black Canary est une super-héroïne dont le cri est, dit-on, capable de terrasser Superman lui-même. Le son peut effectivement avoir des effets destructeurs, si l'on en croit le vieux cliché de la chanteuse d'opéra à même de briser un verre de cristal avec la seule puissance de sa voix <sup>(1)</sup>. Dans un autre genre, des armes soniques sont mises en scène dans de nombreux films. Ainsi, les agents de PreCrime, du film *Minority Report* (Steven Spielberg, 2002), disposent d'un pistolet sonique qui envoie une impulsion acoustique vers la cible afin de la repousser violemment vers l'arrière. On trouve le même type d'engin dans la série *Périphériques, les mondes de Flynn* (2022) où, lors d'un combat, un homme utilise une arme sonique pour endommager les organes internes de son adversaire <sup>(2)</sup>. Dans notre

monde, le son a effectivement été enrôlé dans la guerre et le maintien de l'ordre depuis plus d'un demi-siècle<sup>(3)</sup>, et il en a émergé des dispositifs bien réels, désigné sous l'euphémisme d'«armes non létales». Dans cet article, nous discuterons de ces armes soniques. Mais avant tout, il faut bien évidemment faire un brin de physique...

### Qu'est-ce que le son ?

Le son est une onde mécanique généralement émise par une source vibrante comme une corde de piano, l'anche d'une clarinette ou la partie mobile d'une enceinte acoustique<sup>(4)</sup>. Sa propagation se fait aussi bien dans un gaz comme l'air que dans un liquide comme l'eau (qui permet la propagation du chant des baleines) ou dans un solide tel que l'os (qu'utilisent certaines prothèses auditives). Quel que soit son état physique, ce milieu est indispensable<sup>(5)</sup> car le son n'est rien d'autre qu'une onde de déformation élastique se propageant dans celui-ci : la perturbation initiale fait osciller les atomes autour d'une position moyenne, et ces minuscules oscillations — quelques millièmes de mètre — se propagent de proche en proche. Dans un milieu compressible comme l'air, le son se manifeste comme une onde de pression dont l'amplitude est généralement faible par rapport à la pression atmosphérique.

La propagation d'une onde sonore d'un point à un autre n'est pas instantanée. Dans l'air, la vitesse du son est d'environ 340 mètres par seconde<sup>(6)</sup>, et elle dépend de la température : plus l'air est chaud, plus elle est élevée. De manière générale, la vitesse du son dans un milieu augmente quand sa densité diminue — il y a moins de particules à faire osciller — ou quand sa rigidité augmente — le milieu est plus difficile à déformer car il est peu compressible. Ainsi, la vitesse du son dans l'eau vaut 1 500 mètres par seconde, et elle monte à 5 600 mètres par seconde dans l'acier et à près de 18 000 mètres par seconde dans le diamant !

## Capter un son

Pour capter un son, l'oreille des mammifères dispose d'une membrane mobile, le tympan, qui transmet les vibrations de l'air à une chaîne successive d'osselets<sup>(7)</sup>. Ensuite, le nerf auditif transforme ces vibrations mécaniques en signal électrique interprétable par le cerveau. Le nombre de vibrations que la source effectue en une seconde, la fréquence, fixe la hauteur du son : les sons graves ont une fréquence faible, les sons aigus une fréquence élevée. L'oreille humaine ne capte que les sons dont la fréquence est typiquement comprise entre 20 et 20 000 hertz (1 hertz = une oscillation par seconde). En dehors de cette gamme, on parle d'infrasons et d'ultrasons. Pour comparaison, les dauphins et les chauves-souris peuvent entendre des fréquences allant jusqu'à 100 000 hertz, tandis que les éléphants sont sensibles à des sons très graves, de 14 à 16 hertz. Chez les humains, la perte progressive de sensibilité aux hautes fréquences avec l'âge, considérée comme normale, a été mise à profit par la société britannique Compound Security Systems : leur boîtier Mosquito émet d'intenses ultrasons à une fréquence d'environ 20 000 hertz. Seulement audible par les personnes ayant de « jeunes » oreilles, le dispositif, très irritant, provoque leur fuite rapide. L'indignation suscitée par cette « arme » sonore anti-jeunes a beaucoup limité son usage en France, Suisse et Belgique.

Pour que l'oreille parvienne à capter un son, il faut non seulement que sa fréquence tombe dans la bonne gamme, mais aussi que son intensité soit suffisante : un son dont l'intensité est trop faible ne stimule pas notre système auditif. En acoustique, l'intensité d'une onde sonore est mesurée par l'amplitude de la surpression qui lui est associée, rapportée à une valeur de référence correspondant à un son imperceptible à l'oreille humaine. Mais il se trouve que la relation entre l'amplitude physique d'un stimulus et l'effet ressenti par nos sens est logarithmique : un stimulus 10 fois plus intense ne

provoque pas une sensation 10 fois plus importante<sup>(8)</sup>. Par conséquent, l'intensité d'une onde sonore est quantifiée par son « niveau sonore » exprimé en décibels (dB) : quand l'intensité est multipliée par 10, le niveau sonore augmente de 20 dB. Le seuil d'audition se situe à 0 dB<sup>(9)</sup>, une conversation est à 60 dB (son intensité sonore est donc 1 000 fois supérieure au seuil d'audition), et la réglementation du travail impose de ne pas dépasser un niveau sonore de 87 dB pendant une durée de 8 heures. À partir d'un certain niveau sonore, généralement estimé à 120 dB, la sensation auditive devient douloureuse<sup>(10)</sup>. Enfin, au-delà de 191 dB l'amplitude de l'onde de pression acoustique dépasse la pression atmosphérique : on a alors affaire à une onde de choc... Le son naturel le plus intense fut émis en 1883, lors de l'éruption du volcan indonésien Krakatoa. Le bruit de l'explosion a été si puissant qu'il a crevé les tympans de personnes se trouvant à 60 kilomètres de distance<sup>(11)</sup>, et qu'il a été clairement entendu à plus de 5 000 kilomètres ! Un son intense peut donc avoir des effets physiques sur le corps humain...

Bien sûr, le niveau sonore diminue avec la distance car l'onde sonore « se dilue » au fil de sa propagation. Et, de même que pour la fréquence, la sensibilité aux sons diffère beaucoup d'un animal à l'autre. Ainsi, l'ouïe du loup l'autorise non seulement à percevoir des sons très aigus — jusqu'à 40 000 Hz —, mais aussi à entendre ses congénères hurler jusqu'à une distance pouvant atteindre 10 kilomètres : son ouïe est si sensible qu'il est réputé capable d'entendre le tic-tac d'une montre à quelques mètres de distance. De même, l'ouïe de l'éléphant capte les sons très graves produits par ses congénères situés à plusieurs kilomètres. Côté super-héros, Superman est évidemment doté d'une ouïe ultrasensible grâce à laquelle il peut entendre le claquement d'un coup de feu dans Metropolis, la cité aux dix millions d'habitants, ou capter un battement cardiaque à plusieurs kilomètres de distance. Sa

super-ouïe est aussi facilement perturbée par l'ensemble des sons qu'il est capable de détecter. Saturer l'ouïe par un son intense est d'ailleurs un procédé utilisé par les forces de l'ordre pour repousser les manifestants : l'explosion de leurs grenades assourdissantes produit un brillant flash lumineux, mais surtout un son intense dont le niveau peut atteindre 160 dB à quelques mètres de distance. À ce niveau sonore, un tympan humain peut être endommagé de manière irréversible...

### **Gare à vos oreilles!**

L'idée d'utiliser le son comme arme remonte sans doute à la Seconde Guerre mondiale, alors que les ingénieurs nazis cherchent frénétiquement la « Wunderwaffe », l'arme miraculeuse qui donnera un avantage décisif à l'Allemagne<sup>(12)</sup>. Dans ce cadre, l'ingénieur tchèque Richard Wallauschek testa un canon sonore au Tyrol pour le compte de l'Allemagne nazie. Un mélange de méthane et d'oxygène était enflammé dans une chambre de combustion, créant ainsi un son intense semblable à celui que l'on entend lors de l'allumage des propulseurs d'une fusée. Lors du test statique du 10 février 2023, les 33 moteurs Raptor du Starship de la société SpaceX, produisirent, bien qu'à 50 % de leur puissance, un niveau sonore de 110 décibels à 4,8 kilomètres (3 miles) du pas de tir! Il était plutôt attendu 90 décibels, une intensité 10 fois inférieure<sup>(13)</sup>... Le niveau sonore d'un lancement d'une fusée Saturn V était d'environ 200 décibels dans le voisinage du pas de tir, équivalent à celui du Space Launch System de la NASA, lancé le 16 novembre 2022 pour le vol Artemis 1. À titre de comparaison, le niveau sonore des moteurs d'un avion de ligne au décollage n'est « que » de 140 décibels, soit 1 000 fois moins bruyant!

Dans le dispositif de Wallauschek, l'énergie sonore des détonations était dirigée et concentrée par deux paraboles de manière à produire une onde de choc capable de tuer un humain à une distance de 60 à 100 mètres. Le concept de

Wallaushek présentait toutefois un inconvénient majeur : pour obtenir cet effet létal, il fallait être exposé à ce bruit intense pendant au moins 30 secondes. Le comportement de fantassins devant se protéger des explosions d'obus sur le champ de bataille a montré que cette hypothèse était irréaliste. Le développement du canon sonique a donc été arrêté début 1945. Reste que cette arme a sans aucun doute inspiré Hergé pour son album *L'Affaire Tournesol*. On y trouve, fait unique chez lui, une référence à un livre bien réel intitulé *Secret Weapons of the Third Reich: German Research in World War II*<sup>(14)</sup>. Son auteur, le colonel américain Leslie E. Simon, y fait un compte-rendu détaillé de ses visites des laboratoires allemands travaillant sur les Wunderwaffen, aussitôt après la fin de la Seconde Guerre mondiale. Dans l'album, le test de cette arme utilise des ultrasons, et disloque une maquette de New-York réalisée en verre et en porcelaine.

L'idée de Wallaushek est cependant devenue un dispositif utilisable dans la pratique, le *Long Range Acoustic Device* (LRAD). Cet appareil en forme de disque a initialement été développé à la suite de l'attentat suicide perpétré en 2000 contre le *USS Cole*, alors qu'il se trouvait à quai dans un port du Yémen. Son objectif était de produire un son intense et focalisé afin de communiquer directement à grande distance : le niveau sonore est de 160 dB à 1 mètre dans une gamme de fréquences comprises entre 2 et 3 000 hertz. Il a ensuite été utilisé dans le contrôle des foules, notamment durant le sommet du G20 de 2009, ou contre des attaques de pirates sur des navires dans le golfe d'Aden.

### La variante à vortex

Toujours du côté des Wunderwaffen, le scientifique autrichien Mario Zippermeyer imagina un « canon à tourbillon » pour se défendre contre les avions alliés. Plutôt qu'un son, il s'agissait de produire un tourbillon d'air capable de perturber

le vol de l'avion au point de lui faire perdre le contrôle de sa trajectoire. Comme pour le canon sonique de Wallauschek, une combustion projette un puissant flux d'air à travers une buse, ce qui produit un vortex se propageant vers la cible. Le premier prototype ne fonctionna pas comme prévu : le tourbillon n'était pas assez puissant pour atteindre une altitude suffisante. Durant la même période, l'ingénieur aéronautique américain Thomas Shelton utilisa un lanceur de vortex pour propager, dans une direction bien précise, des gaz toxiques sur le champ de bataille. Abandonnées à l'époque, faute d'efficacité, ces inventions ont été recyclées sous la forme d'un jouet ayant eu de nombreuses déclinaisons.

En effet, à la fin de la guerre, Shelton mis au point un jouet en forme de pistolet produisant un vortex en anneau capable de faire tomber une cible en papier à quelques mètres de distance. Le jouet fut baptisé *Flash Gordon air ray gun* pour profiter de la notoriété du personnage de Flash Gordon. Les publicités le présentaient comme « le jouet le plus étonnant de l'ère atomique », et il eut un tel succès que le magazine *Popular Mechanics* le consacra jouet de l'année en 1949. En 1965, ce jouet est fut nouveau commercialisé par la firme Wham-o sous le nom d'*air blaster*, lançant un vortex d'air capable d'éteindre une bougie à plusieurs mètres de distance<sup>(15)</sup>. Mais la firme abandonna la commercialisation de ce « jouet » car certains enfants ne se contentaient pas de souffler des bougies d'anniversaire à longue distance : ils pointaient leur *air blaster* droit sur les oreilles de leurs amis pour « voir ce qui se passait ». La réponse ? Un dommage permanent de l'ouïe à cause de la forte variation de pression provoquée par le vortex. D'autres chenapans découvrirent comment se servir de leur *air blaster* pour propulser de petits objets à grande vitesse... La dernière déclinaison du concept se nomme *airzooka*. Il est vendu tout construit<sup>(16)</sup>, mais on trouve des plans de fabrication sur le web...

## Elle bouge plus vite que son ombre

Curieusement, on trouve dans la nature un être vivant bien réel qui utilise le son comme arme. La crevette-pistolet est un petit crustacé de quelques centimètres, doté de deux pinces très asymétriques : la plus grosse mesure souvent la moitié de la taille de l'animal. Cette crevette est capable de faire claquer sa grosse pince à la remarquable vitesse de 25 mètres par seconde. Si ce crustacé possède bien entendu des muscles, ceux-ci ne peuvent expliquer ces performances spectaculaires : l'accélération de la pince peut atteindre 10 000 fois l'accélération de la pesanteur, le mouvement complet ne durant que 2,4 millièmes de seconde ! La puissance requise est au moins 100 fois supérieure à celle qu'un muscle de taille équivalente peut fournir. Pour réussir son coup, la crevette-pistolet stocke l'énergie nécessaire à un tel exploit dans une surface élastique en forme de selle de cheval. Au début, l'animal déforme progressivement cette surface avec ses muscles, tandis qu'un système de cliquets l'empêche de reprendre sa forme initiale. Au moment de l'action, ce « ressort » se détend en une fraction de seconde. Le mouvement est tellement rapide qu'il produit une zone de très basse pression où se forment des bulles de vapeur d'eau : c'est le phénomène de cavitation. Ces bulles s'effondrent sur elle-même en un temps si court que l'énergie brutalement libérée produit localement un son intense<sup>(17)</sup>, de hautes températures (près de 5 000 °C), et, parfois, de la lumière<sup>(18)</sup>. Dans le cas de la crevette-pistolet, l'onde acoustique produite par le claquement de son énorme pince a une intensité de 220 décibels à 1 mètre de distance... Ce son extrême est accompagné d'un puissant jet d'eau, l'ensemble venant frapper, voire tuer, la proie visée : petit poisson ou crevette. Ce claquement a aussi d'autres fonctions, comme la communication entre les deux sexes, l'affirmation des mâles au moment de la reproduction, mais aussi la défense du territoire ou du partenaire face à un danger. Si le son produit est inaudible pour les oreilles

humaines, il est, maintes fois répété dans une colonie de crevettes-pistolets, capable de perturber les sonars, même à des kilomètres de distance. D'ailleurs, ce sont les militaires qui furent les premiers à s'intéresser à ce crustacé, gênés qu'ils étaient par les claquements générés par leurs colonies<sup>(19)</sup> !

Les armes soniques revinrent sur le devant de la scène lors d'une affaire, digne d'un roman d'espionnage, qui fit grand bruit en 2017 : celle de « l'attaque acoustique » visant des diplomates américains à Cuba. Plusieurs employés de l'ambassade des États-Unis à La Havane s'étaient plaints de migraines, de nausées, mais aussi d'une perte d'audition. Ils confiaient aussi avoir entendu d'étranges bruits, et avoir ressenti une sensation comparable à celle de conduire une voiture dont la vitre est partiellement baissée. La piste de l'attaque acoustique a été suivie, car la cavitation résultant de l'exposition à des ultrasons peut endommager les tissus. Des études ont ainsi montré que l'exposition à des ultrasons de forte intensité, à des fréquences allant de 700 kHz à 3,6 MHz, peut provoquer des lésions pulmonaires et intestinales chez les souris. Une attaque par un faisceau dirigé de micro-ondes a aussi été envisagée. Las, en février 2022, le département d'État américain a publié le rapport du comité JASON<sup>(20)</sup> concluant qu'il était peu probable qu'une attaque acoustique ou à énergie dirigée ait été à l'origine de ces incidents sanitaires.

Si les armes acoustiques frappent plus couramment l'imagination que les adversaires, les fantasmes qui leur sont associés sont toujours bien tenaces...

**Bibliographie et filmographie :**

Scott Ridley, *Alien, Le Huitième Passager (Alien)*, Brandywine Productions et 20<sup>th</sup> Century Fox, US/UK, 1979.

Smith Scott, *Périphériques, les mondes de Flynn (The Peripheral)*, USA, Amazon Prime, 2022.

Spielberg Steven, *Minority Report*, USA, 20<sup>th</sup> Century Fox et Dream-Works Pictures, 2002.

Volcler Juliette, *Le son comme arme*, Paris, La Découverte, 2011.

Courty J.-M. et É. Kierlik, « Clac végétal et uppercut de crevette », *Pour la science* 346, p. 98-99, août 2006.

Patek Sheila, « La frappe éclaire de la crevette-mante », *Pour la science* 465, p. 51-58, juillet 2016.

Schmitz B., M. Versluis, A. von der Heydt et D. Lohse, « A unique way of sound production in the snapping shrimp (*Alpheus heterochaelis*) », *The Journal of the Acoustical Society of America* 108(5), 2542 (2000).

Extrait d'un documentaire de la BBC sur la sonoluminescence : <https://www.youtube.com/watch?v=M3EhUZQ3LD4>

**Notes :**

(1). Cet exploit est possible, comme le montre cette vidéo : [https://www.youtube.com/watch?v=Oc27GxSD\\_bI](https://www.youtube.com/watch?v=Oc27GxSD_bI)

(2). Cette arme est utilisée dans une scène du premier épisode de la première saison de la série, visible sur YouTube : <https://www.youtube.com/watch?v=IWxpunr-Gt4>

(3). Par exemple, en 2004, la ville irakienne de Falloujah est « bombardée » de hard rock à plein volume ; rap ou metal sont devenus des outils de torture contre des terroristes présumés ; des alarmes directionnelles servent de technologies « non létales » de contrôle des foules dans la bande de Gaza ou lors des contre-sommets du G20, à Pittsburgh (2009) et à Toronto (2010).

(4). La source d'un son n'est pas nécessairement vibratoire : un choc ou une surpression temporaire, due à une explosion par exemple, émettent aussi des sons.

(5). La nécessité d'un support de propagation pour les ondes sonores est facile à mettre en évidence grâce à une cloche à vide et un réveil : <https://www.youtube.com/watch?v=Xy6fIDGPerc>

(6). Dans l'air, le son est donc moins rapide qu'une balle de fusil, et bien moins rapide que la lumière.

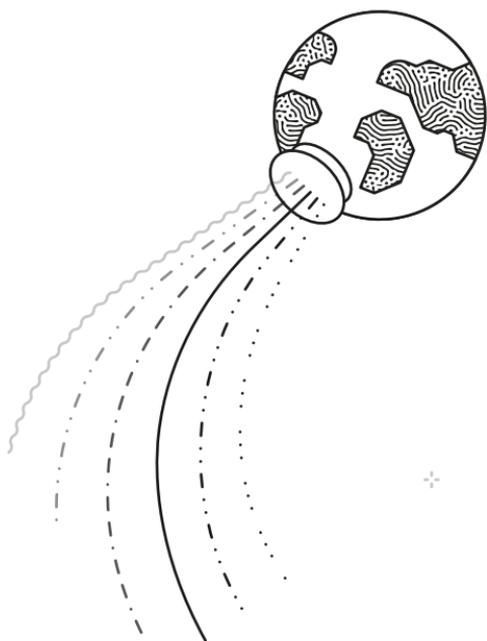
(7). Il s'agit du marteau, de l'enclume et de l'étrier dans l'oreille moyenne, puis de la cochlée dans l'oreille interne.

(8). Cette relation est nommée « loi de Weber-Fechner ». On la retrouve dans l'échelle de magnitude astronomique, quantifiant la luminosité apparente d'un astre.

(9). La valeur de la pression acoustique associée est de 20 millièmes de pascal, soit 0,2 milliardième de pression atmosphérique.

(10). Ceux qui ont physiquement assisté à la coupe du monde de football en 2010 peuvent en témoigner : c'est le niveau sonore à 1 mètre des fameuses vuvuzelas... Par comparaison, les voix humaines les plus intenses peuvent atteindre des niveaux sonores de 135 dB à quelques centimètres de distance.

- (11). Des simulations modernes ont estimé son niveau sonore à 180 dB à 100 kilomètres du volcan !
- (12). La célèbre fusée V2, conçue par l'ingénieur Wernher von Braun, fit partie de ce programme de recherche.
- (13). Pour vous faire une idée de l'intensité sonore d'une grosse fusée, regardez cette vidéo du décollage du Starship le 20 avril 2023, enregistré depuis 6 miles (10 kilomètres) de distance : <https://twitter.com/Cygnusx112/status/1649049505176883202>. Notez que le son arrive bien après le décollage de la fusée, le temps de parcourir la distance qui sépare le pas de tir du public.
- (14). Dans la case d'Hergé, située planche 23 de l'album, la croix gammée qui orne l'avion de la couverture a été ôtée. . .
- (15). La publicité pour le fameux *air blaster* est visible sur YouTube : [https://www.youtube.com/watch?v=fxZu\\_Y\\_m8i4](https://www.youtube.com/watch?v=fxZu_Y_m8i4)
- (16). Par exemple chez Arbor Scientific : <https://www.youtube.com/watch?v=gt6BtMrQ0lw>
- (17). Le phénomène de cavitation se produit aussi au niveau des hélices de navires quand elles tournent très vite. Cela conduit à une usure prématurée et, dans le cas des sous-marins, à la production d'un bruit nuisant à leur discrétion.
- (18). Ce phénomène se nomme sonoluminescence et a été découvert en 1934. Son explication théorique est encore un sujet de recherche.
- (19). Voir par exemple cet article détaillant leurs effets dans la mer Noire : <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001376.pdf>
- (20). Créé en 1960, le comité JASON est un groupe de scientifiques américains chargés de conseiller le gouvernement des États-Unis sur des sujets scientifiques touchant la sécurité nationale.



BIG DUMB OBJECTS

---

DÉPLACER  
LA TERRE

TOUT LE MONDE sait que le Soleil fournit, sous forme de lumière, l'énergie qui fonde l'existence et le fonctionnement de la biosphère terrestre. Que se passerait-il si, après des milliards d'années d'évolution, notre étoile se transformait radicalement, si elle « mourait » ? Cela aurait bien sûr des conséquences dramatiques sur notre bonne vieille Terre que l'humanité d'alors chercherait sans doute à éviter au mieux. Parmi les solutions, la plus radicale consiste à déplacer la Terre, à modifier son orbite pour l'éloigner de la source de vie devenue source de danger. L'idée n'est pas nouvelle. On la trouve dès 1960 dans un roman de Francis Carsac intitulé *Terre en fuite* : alors que le Soleil va se transformer en nova, notre planète quitte le Système solaire pour atteindre une autre étoile. Le fix-up <sup>(1)</sup> *Lifeboat Earth*, publié par Stanley Schmidt en 1978, raconte une histoire similaire. Grâce à la technologie alien des Kyyra, la Terre quitte son orbite pour échapper aux conséquences d'une formidable explosion stellaire au centre de la Voie lactée. Transformée en arche interstellaire, elle va parcourir les deux millions d'années-lumière qui la séparent de la galaxie d'Andromède... Le présent chapitre va plutôt s'intéresser à *Terre errante*, un court roman écrit en 2000 par l'auteur chinois Liu Cixin. Ce récit a été adapté au cinéma en 2019 (*The Wandering Earth*, Frant Gwo), première super-production chinoise de science-fiction, avant d'être ensuite diffusé dans le monde entier par Netflix. Son succès fut tel qu'une préquelle du même réalisateur, *The Wandering Earth 2*, est sortie sur les écrans début 2023. Le moins que l'on puisse dire est que, côté démesure, la SF chinoise n'a rien à envier à celles des USA. Dans le texte de Liu Cixin, des astrophysici-

ciens découvrent qu'un « flash de l'hélium » provoquera dans quelques siècles la transformation du Soleil en géante rouge, ce qui détruira notre planète. L'auteur raconte comment l'humanité se prépare à fuir cette catastrophe, transformant la Terre en vaisseau spatial<sup>(2)</sup> pour l'amener vers l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure. Avant de commencer ce voyage au long cours, il convient d'arrêter la rotation de la Terre grâce à de gigantesques réacteurs, qui servent ensuite à propulser la planète hors du Système solaire. Un postulat énorme qui donne des images stupéfiantes, comme celle d'une planète Jupiter trônant dans le ciel de la Terre. Dans son texte, Liu Cixin ne prend pas vraiment la peine d'expliquer comment l'humanité peut survivre sur une planète ayant abandonné sa principale source d'énergie, le Soleil, et après avoir été ravagée par une succession de catastrophes dues aux manipulations orbitales qu'elle subit. Glissons sur ces détails et intéressons-nous aux aspects techniques. Risquons-nous vraiment un emballement du Soleil? Est-il pensable de protéger une planète de son étoile en modifiant son orbite? Analyse détaillée d'un *big dumb project*...

### Le Soleil s'emballe

Dans son texte, Liu Cixin justifie le déplacement de la Terre par une inquiétante observation : « *Les astrophysiciens avaient découvert plus de trois siècles plus tôt l'accélération soudaine de la conversion de l'hydrogène en hélium à l'intérieur du Soleil. Des milliers de sondes ont été envoyées vers le Soleil, qui ont pu établir un modèle mathématique précis et complet de notre étoile. À partir de ce modèle, des superordinateurs ont pu montrer que le Soleil évoluait déjà au-delà de la séquence principale. Le phénomène de la fusion de l'hélium de propagerait bientôt dans le noyau du Soleil, provoquant une violente explosion appelée flash de l'hélium. Après quoi, le Soleil deviendrait une géante rouge massive et s'étendrait jusqu'à l'orbite de la Terre, qui tournerait donc à*

*l'intérieur de lui!*» Que penser de cet argument? Rien de positif, car nous pouvons maintenant avoir une idée, en direct, de ce qui se passe au cœur du Soleil. Certaines réactions de fusion thermonucléaire qui s'y déroulent émettent de fantomatiques particules nommées neutrinos. Interagissant très peu avec la matière, ils traversent le Soleil puis la Terre quasiment sans s'y arrêter; une minuscule fraction en est stoppée dans les détecteurs de neutrinos terrestres, installés sous d'épaisses couches de roches. Les premières tentatives de détection des neutrinos solaires datent des années 1960, mais il fallut attendre 2014 et le détecteur Borexino pour obtenir des mesures vraiment précises du flux de neutrinos. Le seuil de détection énergétique très bas de Borexino lui a donné accès aux neutrinos de basse énergie produits par la réaction proton-proton <sup>(3)</sup>, représentant à elle seule 99 % de l'activité nucléaire du Soleil. Ces neutrinos interagissent si faiblement avec la matière que, chaque jour, seule une grosse centaine nous fait la grâce de s'arrêter dans le détecteur. Ces mesures montrent que chaque seconde, chaque centimètre carré de la Terre est traversé par environ 66 milliards de neutrinos. Comme ils traversent le Soleil — et la Terre — sans s'y arrêter, ces neutrinos portent le témoignage des réactions nucléaires qui se déroulent *maintenant* au cœur du Soleil. En revanche, l'énergie produite par les réactions nucléaires met environ cent mille ans à émerger par la surface solaire sous forme de lumière. Le flux de neutrinos observé par Borexino a permis de mesurer en direct la puissance dégagée par les réactions de fusion. Cette dernière étant égale à la puissance rayonnée par la surface de notre étoile, cela signifie que l'activité nucléaire du Soleil n'a pas sensiblement varié depuis cent mille ans. Aussi pouvons-nous donc être rassurés sur la santé de notre étoile: sa luminosité restera parfaitement stable dans les prochains milliers de siècles! Reste que, à l'échelle de temps près, l'évolution du Soleil esquissée par Liu Cixin est correcte. Quand, dans environ 4 à 5 milliards

d'années, notre étoile aura épuisé son hydrogène central, son cœur se contractera lentement, augmentant ainsi température et débit d'énergie nucléaire. Dans le même temps, l'enveloppe externe du Soleil s'adaptera à cette luminosité accrue en se dilatant considérablement, jusqu'à une centaine de fois son rayon actuel. Pendant cette phase de géante rouge, la fusion thermonucléaire de l'hélium commencera par une hausse rapide et temporaire de luminosité, nommée flash de l'hélium, au terme de laquelle commencera une phase plus calme d'environ un milliard d'années. Vu les durées mises en jeu, nous avons de quoi voir venir. Mais il est évident que cette phase transitoire de l'évolution du Soleil ne sera pas sans conséquences sur la Terre.

### Où aller?

Une fois acquis que le Soleil va dévorer la Terre, l'option «aller sur une planète B» semble limitée: «*Le système possédant une planète tellurique le plus proche est à huit cent cinquante années-lumière d'ici. Aujourd'hui, les vaisseaux les plus rapides que les hommes sont en mesure de construire atteignent difficilement 0,5 % de la vitesse de la lumière. Il nous faudrait donc cent soixante-dix mille ans avant d'atteindre une planète habitable.*» Par conséquent, les humains choisissent de migrer vers «[...] *Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de la nôtre, à 4,3 années-lumière de distance*» en déplaçant la Terre elle-même, arguant du fait qu'«[...] *un écosystème de la taille d'un vaisseau ne pourrait se maintenir que sur un dixième du temps de la traversée. Seul un écosystème de la taille de la Terre, et son cycle écologique d'une extraordinaire vigueur, sera capable de perpétuer la vie!*»

Comme son nom l'indique, Proxima est bien l'étoile la plus proche du Système solaire, située à 268 000 unités astronomiques<sup>(4)</sup>, à comparer à la plus lointaine distance Soleil/Pluton de seulement 49 unités astronomiques. Proxima du Centaure

est une naine rouge, troisième étoile du système d'Alpha du Centaure: son rayon est 7 fois inférieur à celui du Soleil pour une masse à peu près 8 fois plus faible. Quand Liu Cixin a écrit sa novella, en 2000, aucune planète n'a été détectée autour de Proxima. À cette époque, on ne connaissait que très peu d'exoplanètes, la première ayant été découverte en 1995 autour de l'étoile 51 Pegasi par les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz<sup>(5)</sup>. Les premières exoplanètes découvertes étaient plutôt des géantes gazeuses, ressemblant à notre Jupiter, dont la présence était plus facile à mettre en évidence. En 2007, Michel Mayor fut aussi le co-découvreur de la première exoplanète aux caractéristiques terrestres, c'est-à-dire à la fois rocheuse et située dans la zone habitable de son étoile, la naine rouge Gliese 581. On comprend alors que Liu Cixin écrive: «*Il n'y a pas de planètes habitables dans le système de Proxima du Centaure.*» En 2016, une planète tellurique, nommée Proxima Centauri b, a été découverte autour de Proxima. Avec une masse 1,3 fois supérieure à la Terre, cette planète rocheuse a attiré l'attention car elle reçoit de Proxima à peu près le même flux lumineux que la Terre reçoit du Soleil<sup>(6)</sup>: sa température pourrait donc être compatible avec la présence d'eau à liquide à sa surface. Mais elle diffère de la Terre sur (au moins) deux points. D'abord, une planète orbitant aussi près de son étoile subit une force de marée suffisamment intense pour que sa période de rotation soit égale à sa période de révolution, comme c'est le cas pour le couple Terre-Lune. Cela signifie que, comme la Lune avec la Terre, Proxima Centauri b présente toujours la même face à son étoile — ce qui pose de sérieuses questions à propos de son climat. Ensuite, Proxima est dotée d'un champ magnétique plus intense que celui du Soleil. Ce champ magnétique provoque des éruptions stellaires qui augmentent temporairement la luminosité de l'étoile. Les éruptions les plus fortes chauffent considérablement la matière et émettent un flux de rayons X 10 à 20 fois supérieur au flux

solaire moyen : inutile de vous dire que c'est mauvais pour la santé d'êtres évoluant à la surface d'une planète proche. D'autant que compter sur une épaisse couche d'ozone est illusoire, car la matière éjectée lors de ces éruptions finira par éroder l'atmosphère d'une planète située dans la zone habitable, plutôt proche de l'étoile. Bref, mettre la Terre en orbite de Proxima n'est peut-être pas une si bonne idée que ça...

### Comment déplacer la Terre

La titanesque manœuvre de déplacement de la Terre est prévue pour se dérouler en cinq étapes : « *Premièrement, les propulseurs terrestres interrompraient la rotation de la Terre en générant une poussée dans le sens inverse du mouvement de la planète. Deuxième étape : les propulseurs, activés à la puissance maximale, accéléreraient la Terre jusqu'à ce qu'elle atteigne la vitesse de libération qui lui permettrait de quitter le système solaire. Troisièmement, la Terre continuerait à accélérer dans l'espace, en direction de Proxima du Centaure. Quatrième étape : durant le voyage, les propulseurs amorceraient une nouvelle rotation de la Terre, en inversant la direction de la poussée, qui la ferait lentement décélérer. Cinquième étape : elle permettrait à la Terre de rallier l'orbite de Proxima du Centaure et de devenir ainsi son satellite. [...] Cet exode durerait environ deux mille cinq cents ans [...].* »

La première étape, dite Ère du Freinage, s'étale sur 42 années et résulte de l'action de douze mille gigantesques propulseurs de 11 kilomètres de haut, soit 2,2 kilomètres de plus que le mont Everest ! À pleine puissance, chacun exerce une poussée d'environ quinze milliards de tonnes sur la Terre, nous dit mademoiselle Xing lors d'une visite du propulseur Huabei 794<sup>(7)</sup>. En supposant que la poussée de ces propulseurs s'exerce au niveau de l'équateur et tangentiellement à la surface de la Terre, la durée d'arrêt de la rotation terrestre est de l'ordre de 20 ans. Comme les poussées ne sont ni parfaitement tangentielles ni toutes équatoriales, on peut considérer

que les 42 ans annoncés par Liu Cixin sont un bon ordre de grandeur. Évidemment, cette première manœuvre n'est pas sans conséquences fâcheuses: *«Les marées provoquées par la poussée des propulseurs avaient englouti les deux tiers des grandes cités de l'hémisphère Nord, tandis que l'extrême chaleur avait provoqué la fonte des glaciers polaires dont l'eau était retombée en déluge sur l'hémisphère Sud. Trente ans plus tôt, mon grand-père avait été témoin du déferlement des vagues de cent mètres de haut sur la ville de Shanghai.»*

L'étape d'accélération semble plus facile: on pousse les propulseurs à pleine puissance, en n'oubliant pas de changer la direction de leur poussée après avoir arrêté la rotation terrestre, et hop, en route pour Proxima! En fait, il faut être un peu malin, car 12 000 propulseurs exerçant une poussée équivalente à 15 milliards de tonnes n'accélèrent la Terre qu'au lamentable rythme de 0,3 millionième de mètre par seconde au carré: plus clairement, il faut environ un gros mois pour que l'augmentation de vitesse soit équivalente à celle d'un adulte au pas. La vitesse orbitale de la Terre étant de 30 kilomètres par seconde, la faire varier de 1% prendra donc de l'ordre de 1 milliard de secondes... soit environ 32 ans. En pratique, la Terre ne partira pas «tout droit» une fois la propulsion enclenchée. Si l'on suppose que la poussée s'exerce tangentiellement à la trajectoire, ce qui nécessite de pouvoir l'orienter, la Terre suivra une orbite en forme de spirale se déroulant de son orbite initiale, quasi circulaire, à sa trajectoire interstellaire finale. Ce n'est pas tout à fait ce qu'écrit Liu Cixin: *«[...] les propulseurs terrestres ne sont pas si puissants que ça. Ils ne sont capables de produire qu'une petite accélération, ils ne peuvent pas exercer une poussée suffisante pour projeter la Terre hors de l'orbite solaire. Avant de pouvoir fuir le Soleil, la Terre va tourner encore quinze fois sur son orbite! Et c'est pendant ces quinze révolutions qu'elle va progressivement prendre de la vitesse»*. La trajectoire décrite ressemble plutôt à celle que

suivrait un vaisseau subissant une succession de phases commençant par une propulsion courte et intense suivie par un long arrêt des moteurs, comme on le fait pour modifier l'orbite d'un satellite artificiel. En étant propulsée faiblement mais de façon continue, la Terre va inexorablement gagner de l'énergie et, comme on l'a dit, plutôt suivre une trajectoire en spirale déroulante dont chaque spire peut être assimilée à une orbite quasi circulaire, au moins au début du mouvement. Et curieusement, la vitesse de la Terre doit commencer par diminuer au fil du temps ! Ce paradoxe apparent dure tant que la Terre est liée au Soleil : l'augmentation de son énergie totale fait croître le demi-grand axe de son orbite et, en vertu de la troisième loi de Kepler, cela fait croître la période de révolution et donc diminuer en moyenne la vitesse du mouvement.

Enfin, pour se placer sur l'orbite hyperbolique qui l'amènera près de Proxima du Centaure, Liu Cixin prévoit aussi d'utiliser l'assistance gravitationnelle de Jupiter afin de donner l'ultime impulsion : *« Selon l'itinéraire prévu, la Terre avait rendez-vous avec Jupiter. Le Comité de navigation avait dressé le plan suivant : lors de la quinzième révolution de la Terre, son orbite serait si elliptique qu'à son aphélie, elle se retrouverait dans l'orbite de Jupiter. La Terre frôlerait alors la géante gazeuse, et pourrait atteindre la vitesse de libération grâce à la prodigieuse attraction gravitationnelle jovienne. »* Mais attention : Jupiter est une planète massive dont la force de marée est considérable — et redoutable si l'on s'y frotte un peu trop. Ainsi, la comète Shoemaker-Levy 9 s'est-elle disloquée, en juillet 1992, après être passée trop près de la planète géante<sup>(8)</sup>. Déviés de l'orbite solaire de la comète initiale, les débris sont tous entrés en collision avec Jupiter deux ans plus tard, à la queue-leu-leu. Pour un corps de grandes dimensions ayant la densité de la Terre, il faut absolument éviter de passer à moins de 105 000 kilomètres de Jupiter (1,5 fois le rayon de la planète) pour ne pas être brisé par sa force de marée. Prendre une bonne

marge de sécurité serait même judicieux histoire de limiter les séismes dus aux déformations de la croûte terrestre imposées par la force de marée jovienne.

Une fois en route vers pour son voyage interstellaire, les épreuves de la Terre ne sont pas finies pour autant. La suppression de l'alternance jour-nuit et l'éloignement du Soleil vont provoquer son refroidissement inexorable à une température de l'ordre de  $-230^{\circ}\text{C}$ , comparable à celle qui règne à la surface de la planète naine Pluton. L'atmosphère de notre planète, ou ce qu'il en restera après ses premières épreuves, se condensera sous forme solide: *«J'ai vu le sol couvert d'étranges cristaux diaphanes jaune-vert: de l'oxygène et de l'azote solides, les reliques congelées de notre ancienne atmosphère.»* Il est quand même curieux de vouloir préserver la Terre d'un emballement du Soleil par la destruction intégrale de son écosystème de surface...

### **Billard interplanétaire**

Le déplacement de la Terre autour d'une autre étoile est clairement une opération titanesque, bien plus ambitieuse que la terraformation d'une planète. Mais aussi folle semble-t-elle, la possibilité de modifier l'orbite de la Terre a été discutée dans un article scientifique paru en 2001 sous la plume de trois astrophysiciens américains, Don Korycansky, Greg Laughlin et Fred Adams. Constatant que la hausse progressive de la luminosité du Soleil dans les prochains milliards d'années<sup>(9)</sup> allait sérieusement compromettre l'intégrité de la biosphère de notre planète, ils proposèrent d'augmenter petit à petit le rayon de l'orbite terrestre. Leur idée consiste à transférer de l'énergie orbitale de Jupiter à la Terre, de manière à faire migrer notre planète vers l'extérieur du Système solaire et Jupiter vers l'intérieur.

Pour accomplir ce transfert d'énergie, il faut utiliser un troisième corps, un gros objet de la ceinture de Kuiper<sup>(10)</sup> choisi

pour son orbite initiale très elliptique, avec un demi-grand axe de l'ordre de 300 unités astronomiques et une période d'environ 6 000 ans. La technique consiste à dévier légèrement ce corps, de sorte qu'il passe très près de la Terre, mais au-delà de 18 000 kilomètres, toutefois, pour qu'il ne soit pas brisé par la force de marée terrestre. S'il passe devant notre planète, le corps perd un peu de son énergie orbitale au profit d'une augmentation de celle de la Terre. Ce « billard interplanétaire » est tout à fait similaire à l'assistance gravitationnelle régulièrement utilisée pour modifier la trajectoire des sondes interplanétaires. À titre d'exemple, la sonde Solar Orbiter, lancée le 10 février 2020 subira trois assistances gravitationnelles (deux avec Vénus, une avec la Terre) avant d'atteindre l'orbite très inclinée qui lui permettra de survoler les pôles du Soleil. Dans notre cas, le passage de l'objet de Kuiper augmentera le demi-grand axe de l'orbite terrestre du fait de l'augmentation de l'énergie orbitale de notre planète. Bien sûr, l'orbite de l'objet sera elle aussi modifiée. En s'arrangeant habilement, sa nouvelle orbite passera au voisinage de Jupiter où une assistance gravitationnelle bien calculée lui permettra de récupérer, au détriment de Jupiter, l'énergie orbitale qu'il a perdue au profit de la Terre. Il « suffit » d'itérer le processus pour modifier lentement l'orbite de la Terre. Pas facile, donc... Ce n'est pas sans rappeler la façon dont le vaisseau générationnel du roman *Aurora* de Kim Stanley Robinson s'y prend pour décélérer en une douzaine d'années et une vingtaine de rebonds gravitationnels sur les planètes du Système solaire.

Jusqu'où éloigner la Terre du Soleil? Sachant que dans environ 6 milliards d'années, la luminosité du Soleil aura augmenté de 120%, une Terre située 1,48 fois plus loin de lui qu'actuellement recevra, à cette époque, le même flux lumineux qu'aujourd'hui. En pratique, cela revient à augmenter l'énergie orbitale de la Terre d'environ 1/3 de sa valeur initiale. Pour les objets de la ceinture de Kuiper ayant une masse et

un rayon typiques de l'ordre  $10^{16}$  tonnes et 100 kilomètres, atteindre cet objectif nécessite de cumuler un million de passages! Vu le temps qu'il reste avant la transformation du Soleil en géante rouge, chaque passage doit être espacé d'à peu près 6000 ans, ce qui est justement la période initiale de l'objet choisi. On mesure la ténacité dont doit faire preuve l'humanité du futur...

### Déplacer la Terre à la voile

En 2002, l'ingénieur écossais Colin McInnes proposa une stratégie alternative. Spécialiste des voiles solaires, son idée repose sur l'utilisation d'un très grand miroir spatial afin d'utiliser la pression exercée par le rayonnement solaire. La voile est placée de sorte à être en équilibre stable et statique entre la force de pression du rayonnement solaire et la force gravitationnelle de la Terre. Nommé statite, ce concept de satellite statique a été inventé indépendamment par le physicien américain Robert Forward (qui forgea le terme statite) et... McInnes lui-même! Alors que la voile subit la pression du rayonnement solaire, elle est donc aussi « ancrée » gravitationnellement à la Terre. L'analyse dynamique du système constitué par la Terre et la voile montre que son centre de masse, quasiment confondu avec le centre de la Terre, accélère sous l'effet de la pression du rayonnement solaire. Très faible mais continue, cette accélération habilement dirigée peut modifier le rayon de l'orbite terrestre à volonté. Comme la pression exercée est très faible, équivalente au poids d'une masse d'un kilogramme s'exerçant sur une surface d'un kilomètre carré, il faut prendre son temps et choisir une *très* grande voile: 120 000 kilomètres de rayon, soit environ 19 rayons terrestres. Avec une telle taille, il faut que la voile soit très fine pour ne pas être trop massive. Un film métallique dont l'épaisseur est de l'ordre de 8 millièmes de mètre lui donne une masse d'environ trois mille milliards de tonnes, celle d'un

astéroïde métallique de 4 kilomètres de rayon à transformer pour l'opération. Enfin, la voile serait placée à une distance 5 fois supérieure à celle de la Lune.

Pour conclure, notons que l'utilisation de grands miroirs orbitaux a également été proposée pour contrôler le climat terrestre (géo-ingénierie). Un réflecteur situé en équilibre statique derrière la Terre pourrait rediriger la lumière solaire dans l'atmosphère pour compenser le refroidissement global pendant une future période glaciaire ou, dans le cas de Mars, pour réchauffer ses calottes polaires afin de créer un embryon d'atmosphère. L'astronome américain Roger Angel a proposé de déployer au point de Lagrange L1, située à 1,5 million de kilomètres de la Terre vers le Soleil, un écran constitué de 16 000 milliards de disque semi-transparents de 60 centimètres de diamètre et pesant chacun 1 gramme. Ce nuage permettrait de diffuser les rayons solaires et de réduire le flux lumineux qui frappe la Terre de 1,8% afin de compenser le réchauffement climatique en cours. Un disque de « seulement » 7 000 kilomètres de rayon situé au point de Lagrange L1 occulterait totalement le disque solaire. Un tel parasol orbital pourrait, en principe, compenser l'augmentation de la luminosité d'un Soleil devenu géante rouge sans avoir à modifier l'orbite de la Terre. Car il faut bien le reconnaître : le plan de Liu Cixin est vraiment dur à avaler...

#### **Bibliographie et filmographie :**

Badescu V., R. Cathcart et R. Schuiling (dir.), *Macro-engineering, a Challenge for the future*, Berlin, Springer, 2006.

Carsac Francis, *Terre en fuite* (1960), Diéval, Éons, 2013.

Cixin Liu, *Terre errante* (流浪地球, 2000), traduit du chinois par Gwennaël Gaffric, in : *L'Équateur d'Einstein*, Arles, Actes Sud, coll. « Exofictions », 2022.

Schmidt Stanley, *Lifeboat Earth*, New York, Berkley Books, 1978.

Gwo Frant, *The Wandering Earth* (流浪地球), Chine, China Film Group Corporation et Alibaba Pictures, 2019.

Gwo Frant, *The Wandering Earth 2* (流浪地球2), Chine, China Film Group Corporation et Guo Fan Culture and Media, 2023.

Korycansky D., G. Laughlin et F. Adams, « Astronomical engineering: a strategy for modifying planetary orbits », *Astrophysics and Space Science* 275, 349–366 (2001).

McInnes C., « Astronomical engineering revisited: planetary orbit modification using solar radiation pressure », *Astrophysics and Space Science* 282, 765–772 (2002).

Robinson Kim Stanley, *Aurora* (Aurora, 2015), traduit de l'américain par Florence Dolisi, Paris, Bragelonne, coll. « Poche », 2021.

**Notes :**

(1). Un fix-up est un recueil de nouvelles d'un même auteur. Écrites indépendamment et à des moments différents, elles sont réunies et arrangées pour former une trame commune.

(2). Ce qui n'est pas sans rappeler la fameuse série *Cosmos 1999*, dans laquelle la Lune est délogée de son orbite à cause d'une explosion de déchets radioactifs. Les humains de la base lunaire sont alors condamnés à errer dans le cosmos sur une Lune devenue vaisseau spatial par accident.

(3). Cette réaction de *fusion* transforme deux noyaux d'hydrogène — deux protons — en un noyau de deutérium. Le noyau de cet isotope de l'hydrogène étant constitué d'un proton et d'un neutron, cette réaction doit aussi émettre un positron, antiparticule de l'électron, et un neutrino.

(4). Rappelons-le, l'unité astronomique est une unité de distance égale au demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil, soit environ 149,6 millions de kilomètres. La lumière franchit cette distance en 500 secondes. La lumière de Proxima met, quant à elle, 4,24 années pour nous parvenir.

(5). Ils ont d'ailleurs reçu le prix Nobel de physique en 2019 pour cette découverte.

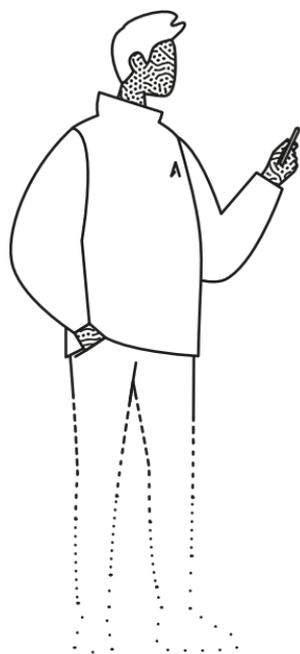
(6). Elle est située à environ 7 millions de kilomètres d'une étoile dont la luminosité est 590 fois inférieure à celle du Soleil.

(7). Ne parlons pas de la source d'énergie des propulseurs à fusion, alimentés par les roches des chaînes de montagnes. Cette solution est d'une naïveté scientifique confondante.

(8). La limite de Roche est la distance en dessous de laquelle un objet se disloque sous l'action des forces de marée causées par le corps céleste au voisinage duquel il passe. Elle tire son nom de l'astronome français Édouard Roche (1820-1883), qui l'a théorisée le premier.

(9). Les modèles d'évolution du Soleil estiment que cette hausse pourrait être de 40 % d'ici 3,5 milliards d'années.

(10). La ceinture de Kuiper s'étend au-delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 55 unités astronomiques. Plus large et plus massive que la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, elle est composée de petits corps, restes de la formation du Système solaire.



PHYSIQUE ULTIME

---

BEAM US UP,  
SCOTTY !

L'EXCLAMATION QUI NOUS TIENT LIEU de titre est indéfectiblement attachée à la série télévisée *Star Trek*. C'est l'ordre que donne le capitaine Kirk à son responsable des transports à chaque fois que son groupe doit retourner à bord de l'*Enterprise*. Les personnages sont alors dématérialisés avec des effets lumineux du plus bel effet et réapparaissent quasi-instantanément sur le pont du vaisseau. Si ce procédé de transport eut par la suite un succès considérable, l'histoire raconte que dans les épisodes de *Star Trek*, la téléportation permettait surtout de se dispenser des coûteux effets spéciaux de vaisseaux spatiaux atterrissant ou décollant incessamment...

La téléportation fut invoquée pour la première fois <sup>(1)</sup> en 1931 par l'auteur américain Charles Fort (1874-1932) et fut largement popularisée dans les années 1960 grâce à *Star Trek*. Notons au passage que le Petit Larousse n'a admis le mot dans ses pages qu'en 2004. Peut-être est-ce dû au fait qu'il a aussi fait florès dans le monde scientifique depuis qu'en 1993, le physicien américain Charles Bennett posa les bases théoriques de ce qu'il est maintenant convenu d'appeler la téléportation quantique. L'expérience fut réalisée quelques années plus tard et ressemblait peu aux espoirs de la science-fiction. Le choix du terme ne fut sans doute pas anodin. Il permettait de donner une touche « brillante » à une superbe expérience de physique quantique qui, sinon, aurait bien pu passer inaperçue auprès du grand public.

Aujourd'hui, le procédé continue à être employé au cinéma comme à la télévision, par exemple dans les séries *Stargate* et *Terminator*, dans le film de David Cronenberg *La Mouche* ou encore dans *Jumpers*, sorti en 2008 sur les écrans. Le scénario

de ce dernier repose sur l'idée suivante: de rares individus, les *jumpers*, naissent avec la capacité de se déplacer instantanément d'un point à l'autre de la planète par la simple action de leur esprit. Ils utilisent ce pouvoir pour se transporter dans les endroits les plus improbables, au sommet du Sphinx d'Égypte pour y boire un verre ou à l'intérieur d'un coffre de banque pour y faire un retrait. Dans le film, la création du passage vers la destination choisie se fait rapidement et sans heurts, ne laissant qu'une « cicatrice » à même d'être utilisée par une autre personne, pourvu qu'elle agisse assez vite. Cela donne lieu à des poursuites spectaculaires, commençant dans le désert et finissant à Tokyo, qui rehaussent à peine l'intérêt d'une histoire plutôt faible. Ce film s'inspire d'un livre bien plus convaincant portant le même titre et écrit par l'auteur américain Steven Gould.

### Téléportation et trous de vers

Pour se déplacer, les protagonistes du film *Jumper* doivent visualiser précisément leur destination avant de s'y téléporter. C'est aussi ce que doit faire Gilbert Gosseyn dans *Le Monde des non-A* de Alfred E. Van Vogt (1912-2000): il peut se téléporter grâce à son cerveau double à condition d'avoir mémorisé « jusqu'à la vingtième décimale » un élément du lieu désiré. Dans *Jumper*, les héros se déplacent dans l'espace en créant un trou de ver. Le procédé n'est pas nouveau, puisqu'on le trouve par exemple dans le cycle de la « Culture » de Iain M. Banks (1954-2013) ou dans le film *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014). Mais que cache-t-il exactement? En 1935, Albert Einstein et son collègue Nathan Rosen (1909-1995) découvrirent que le formalisme de la relativité générale (la théorie de la gravitation élaborée par Einstein en 1915) permettait des solutions qui connectaient une région de l'espace-temps à une autre. À cette époque, ces objets furent nommés « ponts d'Einstein-Rosen ». Dans les années 1960, le physicien américain John Wheeler

(1911-2008) nomma « trous de ver » ces raccourcis spatio-temporels entre deux points de l'espace, par analogie avec les tunnels que creusent les vers dans le sol. Il montra que ces trous de vers étaient instables et si, par chance, il s'en formait un dans le vide, il se refermerait avant même qu'un seul photon puisse le traverser. En 1988, le physicien Kip Thorne et son étudiant Mike Morris montrèrent qu'il était possible de stabiliser les trous de vers et même que l'on pouvait les convertir en machine à voyager dans le temps. Pour parvenir à cette stabilisation, il faut obtenir une déformation particulière de l'espace-temps. La théorie de la gravitation d'Einstein nous enseigne que la géométrie de l'espace-temps est fixée par la distribution de matière et d'énergie; un système d'équations différentielles traduit formellement ce lien. Ainsi, pour concevoir un trou de ver stable, il suffit de calculer, grâce aux équations, quelle est la distribution de matière adaptée au plan de l'espace-temps souhaité. Cela semble « simple », à ceci près que la solution obtenue pose problème: en effet, pour qu'un voyageur puisse ressortir du trou après y avoir pénétré, une partie de la matière utilisée doit avoir une masse négative (dont le champ de gravité est répulsif, voir le chapitre « Jouons avec la masse »), contrairement à toute la matière que nous croisons habituellement. Si nous n'utilisons que des masses positives, le voyageur ne pourrait pas ressortir du trou de ver qui, en fait, ne serait plus qu'un trou noir avec une entrée et pas de sortie. Ainsi, pour pouvoir traverser le trou de ver, il faut recourir à une matière exotique de masse négative qui permette de repousser et d'expulser le voyageur vers la sortie. Or, pour l'instant, cette matière n'a jamais été observée en laboratoire, ni ailleurs, du reste...

De surcroît, les extrémités du trou de ver de Thorne-Morris sont sujettes à un phénomène nommé *back reaction*, une manifestation de la conservation de l'énergie. Quand un objet traverse le trou de ver, l'entrée du trou gagne une énergie

égale à l'énergie de masse de l'objet et la sortie perd la même quantité d'énergie. La même chose se produit pour d'autres quantités physiques, comme la charge ou la quantité de mouvement. La solution consiste à envoyer une sorte de ballast dans le trou de ver en suivant la direction opposée de l'objet, de sorte à annuler les variations d'énergie qui affectent les extrémités dudit trou de ver. Le film *Jumper* ne montre aucune masse se déplaçant dans la direction opposée du jumper. Dans cette situation, la *back reaction* pose problème car à l'entrée du trou de ver est libérée une énergie égale à l'énergie de masse du jumper, soit tout de même l'équivalent de mille mégatonnes de TNT pour un humain de corpulence moyenne...

### Effet tunnel et passe-muraille

Si l'on en croit la physique classique, la téléportation est tout simplement impossible. La mécanique de Newton est fondée sur l'idée que la matière est faite de petites particules ponctuelles qui suivent des trajectoires régies par des lois bien précises. La mécanique quantique a radicalement changé cette représentation du monde microscopique car certaines expériences ne pouvaient être comprises qu'en supposant que la matière avait aussi un comportement ondulatoire. Le physicien autrichien Erwin Schrödinger (1887-1961) construisit l'équation décrivant le mouvement de ces ondes de matière. Ce travail eut une conséquence inattendue: une particule a une probabilité non négligeable de passer à travers un obstacle. Selon Newton, une particule, supposée indestructible, ne passe à travers un mur que si son énergie de mouvement (dite énergie cinétique) est suffisante; si ce n'est pas le cas, elle rebondit. Pour une onde, la situation est différente: elle sera partiellement réfléchiée et partiellement transmise par la surface du mur. Si les conditions sont favorables, l'amplitude de l'onde transmise de l'autre côté du mur peut s'avérer suffisante pour être mesurée: la particule est alors détectée. Appliquée

à une onde de matière, cette idée implique qu'une particule a une probabilité non nulle de traverser un mur, même si son énergie cinétique n'est pas assez grande pour le faire de façon classique. Cet « effet tunnel » indique donc qu'une particule peut passer spontanément de l'autre côté d'une barrière, jouer les passe-murailles en quelque sorte. Dans le monde macroscopique, la probabilité de cet événement est totalement ridicule : inutile d'attendre devant une bijouterie qu'un collier de diamants arrive spontanément dans votre poche en franchissant quantiquement la paroi de la vitrine. Dans son *Guide du voyageur galactique*, l'auteur britannique Douglas Adams (1952-2001) imagine un fabuleux vaisseau, le *Cœur en or*, dont la propulsion est assurée par un « générateur d'improbabilité infinie ». On y apprend que ce moyen de déplacement révolutionnaire permet de traverser de vastes espaces interstellaires en une fraction de seconde sans perdre son temps à passer par l'hyperespace ou par un trou de ver. Le moteur du vaisseau doit jouer sur les lois de la physique quantique pour augmenter considérablement la probabilité que le *Cœur en or* passe par effet tunnel de sa position d'origine à sa destination. Il est à craindre que nous ne puissions pas réaliser ce rêve avant un certain temps...

### Les états intriqués

Pourtant, la physique microscopique peut malgré tout nous aider à imaginer une machine à téléporter de l'information. Avant d'aborder ce moyen étonnant, il nous faut faire un petit tour dans le passé. La clef se trouve dans un article publié en 1935 par Einstein (incontournable !) et ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen (encore lui !). Dans leur texte, les trois physiciens proposaient une expérience de pensée, dite EPR d'après leurs initiales, dont le but était de réfuter l'introduction des probabilités en mécanique quantique. La mise en œuvre de leur expérience reposait sur la réalisation d'un état

intriqué, état quantique de deux objets qui ne peut être décrit que globalement, sans pouvoir séparer un objet de l'autre, et ce bien que ces objets puissent être spatialement séparés. En 1964, le physicien nord-irlandais John Stewart Bell (1928-1990) publie des relations, des inégalités, que doivent respecter les mesures sur des états intriqués si la mécanique quantique est une théorie déterministe locale <sup>(2)</sup> à variables cachées <sup>(3)</sup>. Au début des années 1980, le physicien français Alain Aspect accomplit la première expérience EPR <sup>(4)</sup> qui, démontrant la violation des inégalités de Bell, validait le phénomène d'intrication quantique et la non-localité de la physique quantique.

Lorsque deux particules sont placées dans un état intriqué, les mesures de certaines propriétés physiques des deux particules (le spin des électrons ou la polarisation des photons, par exemple) sont parfaitement corrélées : cela revient à dire que si on chatouille une particule, l'autre rit systématiquement. Ce ne serait pas le cas si l'on pouvait attribuer des propriétés individuelles à chacune des deux particules. Dans un état intriqué, il est donc impossible de parler de l'état de la particule 1 ou de celui de la particule 2 : seul l'état du système global peut être défini. Einstein décrivait ce phénomène comme « une action surnaturelle à distance », car tout se passe comme si la mesure effectuée sur la première particule à un instant donné avait un effet instantané sur le résultat de la mesure effectuée sur la seconde. Et ce, même si une information partant de la première et se déplaçant à la vitesse de la lumière n'a absolument pas le temps d'informer la seconde du résultat de ladite mesure. De fait, un système intriqué forme un tout indissociable qui ne peut pas être séparé en deux systèmes indépendants tant qu'il reste intriqué, quelle que soit l'étendue spatiale de ce système.

Pourtant, la physique quantique est bien compatible avec la notion de causalité, car on démontre que les états intriqués ne peuvent pas être utilisés pour transmettre une information d'un point à un autre de l'espace-temps plus rapidement

que la lumière. Cela s'explique par le fait que le résultat de la mesure relatif à la première particule est toujours aléatoire, dans le cas des états intriqués comme dans le cas des états non intriqués. Il est donc impossible de transmettre quelque information que ce soit, puisque la modification de l'état de la seconde particule, pour instantanée qu'elle soit, conduit à un résultat de mesure toujours aussi aléatoire que celui relatif à la première particule; les corrélations entre les mesures des deux particules resteront indétectables tant que les résultats des mesures ne seront pas comparés, ce qui implique nécessairement un échange d'information à une vitesse inférieure à celle de la lumière.

En quoi cette obscure histoire d'états intriqués a-t-elle un intérêt pour notre affaire? C'est tout simple. En utilisant l'intrication quantique, il est possible de transporter l'état d'un système quantique à distance sans le transporter matériellement.

### Téléportation quantique

Le transport d'information est essentiel à toute communication: transmission de texte, de sons, d'images, etc. En physique classique, cette opération ne pose aucun problème. Il suffit de coder le message d'origine — texte, image, son... — en une succession de 0 et de 1 (bits binaires) avant de le transmettre par pigeon voyageur, ligne téléphonique ou ondes radio. Le récepteur décode le signal reçu et reconstitue le message initial. Bien sûr, la transmission se fait toujours à une vitesse inférieure à celle de la lumière. Notons qu'elle réalise une copie de l'original conservé par l'expéditeur: après envoi, le message existe en deux exemplaires. La transposition de ce processus à l'information quantique est loin d'être évidente mais elle conduit à un mode de communication sans équivalent classique: la téléportation quantique.

Contrairement à ce que son nom laisse entendre, la téléportation quantique ne transfère pas de matière, comme dans *Star*

*Trek*. Il s'agit plutôt d'un protocole de communication qui, à la différence du fax classique, permet de reconstruire en un autre lieu quelque chose qui a été détruit au point d'émission. Comment cela fonctionne-t-il en pratique? Supposons qu'Alice veuille transmettre secrètement à Bob <sup>(5)</sup> l'état d'un système quantique A, un photon par exemple, tout en ignorant où Bob se trouve. Alice ne peut donc pas faire voyager le système vers Bob. Elle ne peut pas non plus faire une mesure sur A et envoyer le résultat à son correspondant. D'abord parce qu'Alice ne sait pas où Bob se situe et, ensuite, parce qu'en physique quantique toute mesure modifie l'état du système mesuré. Pour résoudre ce problème, Bob a, avant son départ, partagé avec Alice un système intriqué, de deux photons par exemple. Alice a gardé son photon, C, et Bob a emmené le sien, B, avec lui. Pour transmettre l'état du système A à Bob, Alice commence par le faire interagir avec C. Puis elle mesure l'état du système obtenu. Du côté de Bob, cette mesure aura pour effet de transformer instantanément B de sorte que son état soit corrélé avec le nouvel état de C. Toutefois, Bob ne connaît toujours pas l'état du système A dont disposait Alice. Il ignore d'ailleurs dans quel état se trouve B et même qu'il y a eu changement. Il faut maintenant qu'Alice transmette à Bob le résultat de la mesure. Cette transmission se fait avec des moyens classiques. Alice, ignorant où est Bob, doit donc arroser toute la galaxie (et Bob doit rester à l'écoute!). Une fois le message capté Bob en déduit l'opération physique qu'il doit appliquer à B pour qu'il soit dans l'état du système A. On comprend pourquoi le message d'Alice peut être public: seul celui qui dispose de la partie B peut reconstruire A grâce au message d'Alice. On comprend aussi que la téléportation quantique ne viole pas la causalité: pour la réaliser, il faut un canal quantique (paires de particules intriquées) et un canal classique qui propage l'information moins vite que la lumière. Le résultat n'est acquis qu'après la communication classique, d'où le respect de la causalité. Notons enfin qu'Alice a dû détruire l'état

de son photon A pour pouvoir transmettre à Bob l'information nécessaire à sa reconstruction : contrairement au fax classique, la téléportation quantique ne duplique pas l'original. Dans le roman *Crépuscule d'acier* de Charles Stross, les protagonistes utilisent largement la téléportation quantique pour communiquer. Mais les règles sont respectées : les particules intriquées sont transportées à vitesse subluminaire sur diverses planètes, il n'y a pas violation de la causalité<sup>(6)</sup> et la capacité de communication est limitée par le nombre de particules emportées.

Jusqu'à présent, la téléportation quantique à distance macroscopique restait confinée aux photons. On sait maintenant la réaliser sur des atomes ou sur des ions (atomes ayant perdu une partie de leurs électrons) distants d'un mètre. Quant aux photons, des physiciens chinois ont réussi à téléporter leur état sur plus de 1 000 kilomètres, entre deux villes mais aussi entre un satellite et le sol. Le téléporteur de *Star Trek* est-il pour bientôt ? Pas sûr. Un corps humain contient une quantité considérable d'atomes dont il faudrait téléporter les états. Une fois l'information transmise, un clone humain serait reproduit avec exactement le même physique que la personne téléportée... qui s'en trouverait donc détruite. Difficile à admettre, surtout lorsque l'on en vient à se demander si le clone aura les mêmes souvenirs, la même personnalité, etc. que l'original. Il faut également espérer qu'il n'y ait pas de problèmes durant la téléportation, auquel cas la personne téléportée arriverait déformée et, disons, altérée. C'est ce que l'on voit dans le film *La Mouche* de David Cronenberg, où le sujet de la téléportation fusionne malencontreusement avec une mouche. Dans la saga Harry Potter, où la téléportation est renommée « transplanage », le même problème se pose : le sorcier peut être « désarticulé » durant l'opération, des parties de son corps pouvant se retrouver séparées du reste. Qui est volontaire ? Ne comptez donc pas sur moi pour être le premier humain téléporté...

**Bibliographie et filmographie :**

Adams Douglas, *Le Guide du voyageur galactique* (*The Hitch Hiker's Guide to the Galaxy*, 1979), traduit de l'anglais par Jean Bonnefoy, Paris, Gallimard, coll. « Folio SF », 2010.

Bennett Charles, « Teleporting an unknown quantum state via dual classic and Einstein Podolsky Rosen channels ». *Physical Review Letters* 70, 1895–1899 (1993).

Bouwmeester Dik et al., « Experimental quantum teleportation », *Nature* 390, 575–579 (1997).

Cronenberg David, *La Mouche* (*The Fly*), Brookfilms et SLM Production Group, 1986.

Gould Steven, *Jumper* (*Jumper*, 1992), traduit de l'anglais par Yann Egly, Paris, Mango, coll. « Mondes Imaginaires », 2009.

Lévy-Leblond Jean-Marc et Balibar Françoise, *Quantique : rudiments*, Paris, Dunod, 2007.

Liman Doug, *Jumper*, Regency Enterprises, New Regency Productions, Hypnotic et Dune Entertainment, 2008.

Minute Physics, « How to Teleport Schrödinger's Cat », [https://www.youtube.com/watch?v=DxQK1WDYI\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=DxQK1WDYI_k)

Science Étonnante, « L'intrication quantique », <https://www.youtube.com/watch?v=5R6k2mEacZo>

Stross Charles, *Crépuscule d'acier* (*Singularity Sky*, 2003), traduit de l'anglais par Xavier Spinat, Paris, Le Livre de poche, coll. « SF », 2008.

Van Vogt Alfred E., *Le Monde des non-A* (*The World of Null-A*, 1945), traduit de l'anglais par Boris Vian (rév. par Jacques Sadoul), in : *Le Cycle du A*, Paris, J'ai lu, coll. « Science-fiction », 2013.

**Notes :**

(1). Attaché à décrire et à collecter de nombreux phénomènes inexplicables, Charles Fort invente le mot téléportation dans son troisième livre intitulé *Lo!* : « *Mostly in this book I shall specialize upon indications that there exists a transportory force that I shall called Teleportation.* » ; version en ligne sur <http://www.resologist.net/lo102.htm>, consultée le 31 octobre 2023. Pour Fort, notre environnement n'est qu'une partie d'un ensemble plus vaste et la téléportation est le moyen par lequel le contenu d'un autre plan d'existence, normalement inaccessible, peut s'immiscer dans notre monde.

(2). En physique, le principe de localité stipule que des objets distants ne peuvent exercer une influence directe l'un sur l'autre : un objet ne peut être influencé que par son environnement immédiat.

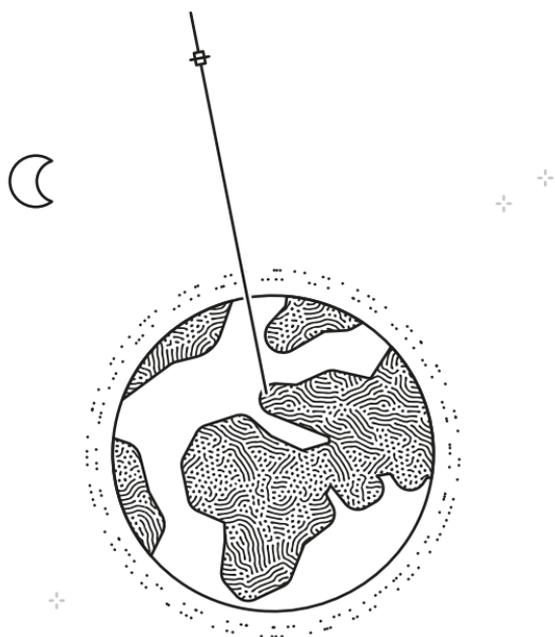
(3). En physique quantique, une variable cachée désigne un hypothétique paramètre non pris en compte par les postulats de la théorie, soit dans la définition de l'état quantique, soit dans son évolution dynamique. Certains physiciens ont introduit des variables cachées pour tenter de résoudre le problème de la mesure

quantique et établir une continuité entre physique classique et physique quantique.

(4). Alain Aspect a reçu le prix Nobel de physique en 2022 pour cette expérience pionnière.

(5). En cryptographie, les personnages qui communiquent secrètement s'appellent toujours Alice et Bob, allez savoir pourquoi . . .

(6). Sinon, cela agace l'Eschaton, l'IA forte ayant échappé au contrôle des humains et qui les avertit ainsi : « Je suis l'Eschaton. Je ne suis pas votre Dieu. Je suis votre descendant et j'existe dans votre futur. Vous ne violerez pas la causalité à l'intérieur de mon cône de lumière du passé. Ou sinon . . . »



DISCUSSION AVEC LES ANCIENS

---

ARTHUR C. CLARKE,  
UN GÉANT DE LA SF

Ce chapitre a été écrit en collaboration avec Raphaël Costa, doctorant et enseignant en droit public à l'Université Paris Saclay.

**C**ONSIDÉRÉ COMME UN GÉANT de la science-fiction mondiale, l'auteur britannique Arthur C. Clarke (1917-2008) s'intéressait bien sûr à l'espace et aux sciences en général. Il en fut aussi acteur, notamment crédité d'avoir proposé l'idée d'utiliser des satellites géostationnaires pour les télécommunications. Mais, en bon auteur de science-fiction, Clarke s'intéressait tout autant aux conséquences politiques et juridiques de l'expansion humaine au-delà de l'atmosphère. Dans ce chapitre, nous allons examiner en détail ses contributions à la politique spatiale bien réelle.

### **De l'usage de satellites géostationnaires**

Comme souvent, l'histoire de l'astronautique et de l'espace converge vers son père fondateur, le Russe Constantin Tsiolkovski (1857-1935). Dans un article publié en 1903 et intitulé « Exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction », Tsiolkovski démontre qu'il est possible de se libérer de l'attraction terrestre grâce à des fusées. Il s'intéresse aussi à la mise en place et à l'aménagement d'une station orbitale et suggère de la placer en orbite géosynchrone, c'est-à-dire ayant une période de révolution égale à celle de la rotation de la Terre sur elle-même<sup>(1)</sup>. L'importance de ce type d'orbites fut confirmée par Herman Potočnik (1892-1929), un ingénieur slovène spécialiste des fusées. Dans son unique livre, publié en 1929 sous le pseudonyme de Hermann Noordung et intitulé *Le Problème du voyage dans l'espace*, Potočnik détaille lui aussi la structure d'une station orbitale. Comme Tsiolkovski, et indépendamment de lui, il place sa station sur une orbite géosynchrone, mais située dans le plan équatorial de la Terre; elle

est alors dite géostationnaire<sup>(2)</sup>. Mais la raison de son choix est différente. Pour Tsiolkovski, la station est surtout une habitation dans l'espace, une alternative à notre propre monde, dont l'orbite géosynchrone est choisie pour qu'elle soit perpétuellement éclairée par le Soleil. En revanche, Potočnik considère sa station comme un observatoire de la surface terrestre, à des fins pacifiques ou militaires, et il choisit l'orbite géostationnaire pour qu'elle reste en permanence au-dessus du même lieu de la surface de notre planète<sup>(3)</sup>. Les travaux de Tsiolkovski restèrent longtemps inconnus en Occident, et l'on doit au physicien et ingénieur autrichien Hermann Oberth (1894-1989) l'émergence du vol spatial de ce côté-ci du monde. Dans son livre de 1923 intitulé *Les Fusées vers l'espace interplanétaire*, il définit les bases du vol spatial par fusée à réaction et aboutit, indépendamment, aux mêmes conclusions que Tsiolkovski. À la fin de son livre, Oberth évoque la possibilité de mettre des « stations d'observation » en orbite et en donne de nombreux usages possibles, notamment les télécommunications, mais d'une façon tout à fait inhabituelle : *« Avec leurs puissants instruments, elles seraient capables de voir les détails les plus fins à la surface de la Terre et pourraient communiquer au moyen de miroirs réfléchissant la lumière du Soleil. Cela pourrait être utile pour communiquer avec des lieux dépourvus de connexions par câble et inaccessibles aux ondes électromagnétiques. »*<sup>(4)</sup>

Mais c'est Arthur C. Clarke qui marquera les mémoires. Dans un article publié en octobre 1945 dans la revue *Wireless World* et intitulé « Extra-terrestrial relays », il propose de placer plusieurs satellites en orbite géostationnaire car, en restant fixes par rapport à la surface de la Terre, ils pourraient, en relayant les signaux radio, assurer aux communications une couverture mondiale permanente. Ce n'était pas la première fois que Clarke évoquait cette possibilité. Dans son autobiographie, il évoque sa surprise quand, en 1968, le personnel technique de la Sri Lanka Broadcasting Corporation lui rap-

pelle une lettre adressée à l'éditeur de *Wireless World* publiée huit mois avant l'article d'octobre 1945. Dans ce texte d'une page intitulée «V2 for Ionospheric Research?», il propose d'utiliser la fusée allemande V2 comme outil de recherche sur la haute atmosphère. Une fois équipée d'un second étage, elle pourrait même mettre une charge utile en orbite «[...] faisant le tour de la Terre en permanence en dehors des limites de l'atmosphère, et diffusant des informations tant que ses batteries durent. [...] Un satellite artificiel situé à la bonne distance de la Terre ferait une révolution toutes les 24 heures, c'est-à-dire qu'il resterait stationnaire au-dessus du même endroit et serait à portée optique de près de la moitié de la surface terrestre. Trois stations répétitrices, distantes de 120 degrés sur la même orbite, pourraient donner une couverture télévisuelle et micro-ondes à toute la planète.»

C'est sans doute la combinaison des intérêts de Clarke en 1945 — son expertise des radars durant la guerre et un grand intérêt pour les fusées et les voyages dans l'espace — qui est à l'origine de cette idée pionnière. Reste que, toujours dans son autobiographie, Clarke évoque la possibilité qu'une série de nouvelles de science-fiction dues à l'ingénieur radio George Smith l'ait inconsciemment influencé. Publiées en 13 épisodes, entre 1942 et 1945, dans la revue *Astounding Science Fiction*, le feuilleton *Venus Equilateral* met en scène une station spatiale servant de relais radio entre la Terre et Vénus. Elle est située au point de Lagrange L4 du couple Vénus-Soleil<sup>(5)</sup>, de sorte que le Soleil ne bloque jamais les communications entre Vénus et la Terre.

La diffusion de *Wireless World* étant modeste, il faudra attendre les années 1950 pour que l'article de Clarke touche un plus large public, au point de devenir son article de non-fiction le plus célèbre. Dans la préface du livre *The Beginnings of Satellite Communications*, publié en 1968 par son ami John Pierce, Clarke raconte que son article fut reçu avec «une

*indifférence monumentale*». Mais son idée devient réalité le 6 avril 1965, avec le lancement d'Intelsat I, le premier satellite géostationnaire commercial dédié aux télécommunications. Depuis, de l'eau a coulé sous les ponts et, aujourd'hui, plusieurs centaines de satellites géostationnaires sont en service, et pas uniquement pour les télécommunications : les satellites de météorologie, tels les Météosat, peuvent enregistrer en permanence l'évolution des nuages et des températures.

### **Du principe de non-appropriation de l'espace**

Le libre envoi de satellites en orbite terrestre pourrait laisser penser que l'espace est une zone de non-droit, où aucune règle ne s'applique et où chacun est libre de faire ce qu'il veut. Pourtant, depuis les origines de la conquête spatiale, les activités humaines dans le cosmos — juridiquement nommé *espace extra-atmosphérique* — sont réglementées par une série de traités internationaux. Dès 1959 est créé, aux Nations Unies, un *Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique*. En pleine Guerre froide, les États-Unis et l'Union soviétique, accompagnés d'autres États, vont pourtant rédiger le *Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes*, plus communément appelé *Traité de l'espace* (ouf!). Adopté en 1967, le texte est toujours en vigueur et a été ratifié par plus de cent dix États, dont toutes les puissances spatiales<sup>(6)</sup>.

Cet accord international pose les principes que doivent respecter les États qui explorent et utilisent l'espace extra-atmosphérique. Passons en revue les plus importants. D'abord, tout État est libre d'explorer et d'utiliser l'espace. D'ailleurs, cette exploration doit se faire dans l'intérêt de tous les pays, mais ce principe ne fut jamais strictement appliqué. Afin de garantir cette liberté d'accès à tous, il est interdit de s'approprier des zones de l'espace extra-atmosphérique (des orbites

particulières ou les points de Lagrange par exemple) ou des corps célestes (planètes, astéroïdes, etc.). Ensuite, il est interdit de *placer* des armes de destruction massive dans l'espace, mais ces dernières peuvent néanmoins y transiter. En revanche, les corps célestes sont sanctuarisés et ne peuvent être utilisés qu'à des fins exclusivement pacifiques. Les astronautes sont, quant à eux, considérés comme des « *envoyés de l'humanité dans l'espace* ». Dès lors, les États leur doivent secours en cas de situation de détresse. Par ailleurs, si une capsule s'écrase et cause des dégâts sur le sol terrestre, l'État d'immatriculation de l'objet spatial est responsable et doit intégralement réparer ceux-ci. En revanche, pour d'éventuels dommages causés dans l'espace à d'autres satellites, ils ne devront être réparés que si l'État d'immatriculation a commis une faute.

La notion d'« État d'immatriculation » d'un objet spatial n'est pas simple. Tout artefact humain envoyé dans l'espace peut disposer d'un ou de plusieurs États *de lancement*. Il s'agit du ou des États qui procèdent ou font procéder au lancement de l'objet, ainsi que de tout État dont les installations ou le territoire ont servi au lancement. S'il y a plusieurs États de lancement, ces derniers s'entendent pour désigner lequel sera l'unique État d'immatriculation. Cette unicité est primordiale car c'est le contrôle et la juridiction de cet État qui s'appliqueront à l'objet une fois celui-ci effectivement dans l'espace. Par exemple, la navette spatiale américaine fut immatriculée par les États-Unis car elle opérait pour la NASA : à l'intérieur du vaisseau, c'était donc le droit américain qui s'appliquait.

Enfin, le *Traité de l'espace* prévoit divers principes de coopération et d'information entre les États et l'Organisation des Nations Unies. Citons son étonnant article IX qui aborde la question de la vie extraterrestre : « *Les États effectueront l'étude de l'espace extra-atmosphérique de manière à éviter les modifications nocives du milieu terrestre résultant de l'introduction de substances extraterrestres.* » Précisons enfin que le *Traité* oblige

les États à veiller à ce que leurs entreprises le respectent aussi ! L'espace n'est pas un Far West, ni pour les États ni pour les entrepreneurs. Si ces derniers — au hasard : des sociétés américaines — venaient à s'appropriier des ressources spatiales, tous les autres États ayant adhéré au *Traité de l'espace* pourraient engager des procédures internationales. Non pas contre les sociétés américaines, mais contre les États-Unis eux-mêmes pour n'avoir pas respecté leur obligation de faire appliquer le *Traité de l'espace*.

Revenons-en à maintenant à cette histoire d'appropriation. L'article II du *Traité* précise ceci : « *L'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation ou d'occupation, ni par aucun autre moyen.* » Si cette règle semble maintenant évidente, elle était inédite à l'époque. Traditionnellement, toutes les zones non-occupées par un État sont considérés comme des *terra nullius* : des territoires sans maître libres d'appropriation par le premier État qui y plante son drapeau. Pour l'espace, les USA et l'URSS vont y renoncer en adoptant le traité de 1967, craignant que l'autre n'arrive en premier sur la Lune et ne l'annexe. En effet, lorsque l'espace ne leur était pas encore accessible, la souveraineté des États s'étendait au-dessus de leur territoire sans que personne ne s'inquiète de l'altitude jusqu'à laquelle s'appliquait cette souveraineté. Depuis le *Traité*, nous le savons : les États sont souverains sur l'espace aérien situé au-dessus de leur territoire, mais cette souveraineté s'arrête une fois arrivé dans l'espace extra-atmosphérique, libre d'utilisation aux autres États. De nombreux universitaires et penseurs avaient justifié ce principe bien avant l'adoption du *Traité de l'espace*. Arthur C. Clarke fut l'un d'eux.

En 1946, notre auteur publie *The Challenge of the Spaceship*, un essai encore non traduit dans lequel il livre sa vision de la future expansion de l'humanité dans l'espace. Au détour de ses

vues sur les vaisseaux spatiaux, un petit paragraphe méconnu expose une justification naturaliste au principe de non-appropriation : la souveraineté d'un État doit avoir une limite verticale, sinon cet État — situé sur une planète en rotation sur elle-même et en mouvement dans le Système solaire — pourrait constituer des droits sur une large portion de l'Univers en à peine vingt-quatre heures. Si la souveraineté part du territoire terrestre, elle doit y rester attachée. Sans le savoir, Arthur C. Clarke fit partie de ces précurseurs du droit spatial qui, dès qu'ils ont entrevu la possibilité de s'extraire de notre berceau, ont expliqué que l'espace devait être une zone de liberté, et par conséquent inappropriable.

À partir des années 1940 s'installera doucement dans l'esprit des juristes et des gouvernements l'idée que l'espace est une zone libre. À tel point que le principe de non-appropriation est aujourd'hui considéré comme une coutume internationale, pratique générale acceptée par les États comme étant le droit même si elle ne figure dans aucun texte. Ainsi, même si les États venaient à défaire le *Traité de l'espace*, le principe de non-appropriation, ayant à présent une existence indépendante du texte, continuerait de s'appliquer. Car dès les années 1940, des précurseurs comme Arthur C. Clarke se sont attelés à justifier auprès des États que cette règle allait de soi !

### **Transit de la Terre**

L'idée que l'exploration spatiale devait servir l'humanité et les sciences est très présente dans l'œuvre de Clarke. Sa nouvelle « *Transit de la Terre* », publiée dans le numéro de janvier 1971 du magazine *Playboy*, le montre bien. Elle révèle aussi l'intérêt profond de Clarke pour l'astronomie. L'arrivée sur Mars du premier vaisseau habité s'est mal passée : le permafrost a fondu sous le vaisseau au moment de l'atterrissage et celui-ci s'est renversé, bloquant les astronautes à la surface de la planète rouge. Avant de mourir faute d'oxygène, le

dernier survivant observe et enregistre le transit de la Terre et de la Lune devant le disque du Soleil, le 11 mai 1984. Dans sa préface au recueil de nouvelles *Le vent venu du soleil*, publié en 1972 et contenant la nouvelle « *Transit de la Terre* », Clarke indique la source d'inspiration de son récit et les détails astronomiques qu'il y décrit : un article de l'astronome belge Jean Meeus, spécialiste de mécanique céleste, publié en 1962 dans le *Journal of the British Astronomical Association*.

Depuis la Terre, il est possible d'observer des transits de corps du Système solaire si ceux-ci peuvent passer entre notre planète et le Soleil. Cela limite donc le choix à Mercure et Vénus. Pendant le transit, la planète peut être observée depuis la Terre sous la forme d'un petit disque noir se déplaçant sur le disque solaire. Ce sont des phénomènes rares qui, dans le cas de Vénus, suivent une séquence qui se répète tous les 243 ans, avec des paires de transits espacés de 8 ans séparées par 121,5 puis 105,5 ans. Ainsi, les derniers transits de Vénus eurent lieu le 8 juin 2004 et le 6 juin 2012. Si vous les avez ratés, le prochain aura lieu le 11 décembre 2117 puis le 8 décembre 2125... Mercure, plus proche du Soleil que Vénus, transite plus fréquemment : 13 ou 14 fois par siècle. Le dernier transit eut lieu le 11 novembre 2019 et le prochain se déroulera le 13 novembre 2032. Vous avez toutes vos chances...<sup>(7)</sup> Les transits de Mercure et de Vénus ont joué un rôle très important en astronomie. Ainsi, les données recueillies sur les transits de Mercure entre 1667 et 1881 permirent à l'astronome américain Simon Newcomb (1835-1909) de déterminer précisément l'avance du périhélie de Mercure, qui fournira en 1915 le premier test expérimental de la relativité générale. Les observations des transits de Vénus permirent d'affiner la connaissance de l'orbite de la Terre, notamment en mesurant précisément son demi grand axe, et montrèrent que Vénus était dotée d'une atmosphère. Enfin, certaines planètes extrasolaires transitent entre la Terre et leur étoile. C'est d'ailleurs

l'une des méthodes utilisées pour les découvrir: il « suffit » de traquer l'infime baisse de luminosité marquant le passage d'une planète devant le disque de son étoile <sup>(8)</sup>.

Comme notre planète est plus proche du Soleil que Mars, il est possible d'observer un transit de la Terre depuis la planète rouge. Pour que le phénomène se produise, il faut bien sûr que les trois astres soient alignés. Du point de vue de la Terre, cette configuration est appelée « opposition », car Mars est située dans la direction opposée au Soleil. Le but de l'article de Jean Meeus était justement de calculer avec précision toutes les oppositions de Mars se déroulant durant le xx<sup>e</sup> siècle, car ce sont des périodes particulièrement favorables pour son observation. Lors de son opposition, Mars reste visible durant toute la nuit, se levant au coucher du Soleil et se couchant au moment où celui-ci se lève. Elle est aussi au plus près de la Terre. Comme la Terre boucle son orbite en 365,2422 jours, tandis que Mars, plus lointaine, met 686,885 jours, l'opposition de Mars se produit tous les 780 jours <sup>(9)</sup>. Les orbites de la Terre et de Mars n'étant pas des cercles parfaits, surtout celle de la planète rouge, le jour de l'opposition n'est pas forcément celui où la distance entre les deux planètes est la plus faible. Ainsi, l'opposition de 2020 eut lieu dans la nuit du 13 au 14 octobre 2020, mais l'écart Mars-Terre était minimum avec 62,07 millions de kilomètres <sup>(10)</sup> quelques jours plus tôt, le 6 octobre. Néanmoins, lors de son opposition, Mars se trouve plutôt proche de la Terre et apparaît ainsi plus grande et plus lumineuse. Il s'agit donc d'un moment privilégié pour l'observer et en faire de spectaculaires photographies depuis la Terre.

Comme l'orbite de Mars est légèrement inclinée par rapport à celle de la Terre, l'alignement Soleil-Terre-Mars ne peut se produire que si l'opposition se produit au même moment que le passage de la planète rouge dans le plan orbital terrestre. Cela réduit considérablement la fréquence de l'événement: vus depuis Mars, les transits de la Terre suivent un cycle de

284 ans (soit 151 années martiennes), par intervalles de 100,5 ans, 79 ans, 25,5 ans et 79 ans<sup>(11)</sup>.

Dans son article de 1962, Jean Meeus signale aussi « *un phénomène curieux qui aura lieu le 11 mai 1984. Il s'agit d'un passage, devant le Soleil, de... la Terre et de la Lune pour un observateur situé sur Mars.* » Meeus précise bien sûr les heures du début et de fin du passage de la Terre et de la Lune devant le disque du Soleil, que Clarke reproduira scrupuleusement dans sa nouvelle<sup>(12)</sup>. Meeus conclue son article par : « *Grâce aux progrès de l'astronautique, il nous sera peut-être possible d'aller observer sur Mars, ou sur l'un de ses satellites, ce passage de notre mère-planète devant l'astre du jour...* » Un auteur comme Clarke ne pouvait laisser sans suite une telle prévision ! En 1983, Meeus signe avec son collègue Edwin Goffin un article intitulé « *Transits of Earth as Seen from Mars* » dans lequel il rend hommage à Arthur Clarke et à sa nouvelle. Il indique aussi le prochain passage de la Terre devant le Soleil vu de Mars : le 10 novembre 2084. Le rendez-vous est pris !

### **Les fontaines du Paradis**

Arthur C. Clarke est aussi célèbre pour avoir popularisé le concept d'ascenseur spatial dans son roman *Les Fontaines du Paradis*, publié en 1979. L'idée est simple : placer une station spatiale en orbite géostationnaire et la relier par un réseau de câbles au « rez-de-chaussée » situé quelque part sur l'équateur. L'intérêt de l'ascenseur spatial est qu'il permet d'envoyer à moindre coût et à moindre risque des passagers et des marchandises dans l'espace.

Dans le roman de Clarke, qui se déroule au <sup>XXII</sup><sup>e</sup> siècle, les ingénieurs déterminent que le point idéal d'implantation se trouve sur l'île équatoriale de Taprobane<sup>(13)</sup>, un lieu bouddhiste sacré occupé par des moines qui prient dans les ruines d'un ancien temple de montagne. L'entreprise *Astrotechnique* va alors disputer la possession de l'île aux moines qui l'oc-

cupent. Si ce magnifique roman pose des questions éthiques évidentes, on y trouve aussi une petite curiosité juridique. L'issue du litige est confiée à la Cour mondiale, sorte de Cour internationale de justice adossée à un gouvernement unifié pour toute la Terre. En plus d'inventer une nouvelle juridiction à compétence mondiale, Clarke écrit ainsi le résumé du jugement<sup>(14)</sup> :

*« 1. Concession à perpétuité du site du temple confirmée, en vertu des lois taprobani et mondiale, code 2085. Décision à l'unanimité.*

*2. La construction de la tour orbitale en projet, en raison du bruit, des vibrations et de son impact sur un site d'une grande importance historique et culturelle, constituerait une nuisance privée justifiant une ordonnance de droit civil. Au stade actuel, l'intérêt général n'est pas suffisant pour influencer sur nos conclusions. Décision prise par quatre voix contre deux et une abstention ».*

Si ce résumé n'a pas grand sens pour un juriste, retenons d'abord que la Cour rend sa décision en premier lieu en vertu des textes de loi existants. Elle pèse ensuite les intérêts en jeu et estime que l'intérêt général ne justifie pas une telle atteinte portée à la communauté religieuse. Clarke fut sans doute influencé par le contexte international de l'époque : en 1976, quelques années avant la parution de son roman, sept États équatoriens signent la Déclaration de Bogotá<sup>(15)</sup>. Par ce texte, les Sept déclaraient que puisque l'altitude des orbites géostationnaires était exclusivement fixée par la gravité terrestre, elles ne faisaient juridiquement pas partie de l'espace extra-atmosphérique. Dès lors, le droit de l'espace ne pouvant s'y appliquer, les sept États signataires réclamaient la souveraineté sur les positions orbitales géostationnaires situées au-dessus de leur territoire. Une telle norme aurait réglé tout conflit issu des différents droits applicables entre le haut et le bas de l'ascenseur spatial. En effet, dans la position défendue par les Sept, le droit applicable aux deux extrémités de la cabine est

le même. Or, dans le roman de Clarke comme dans la réalité, le droit applicable au sol est celui de l'État souverain, et le droit applicable dans l'espace est le droit international stipulant que la zone peut librement être utilisée par tous. Malheureusement pour les États équatoriaux, la déclaration de Bogotá ne sera jamais considérée comme un texte contraignant par la communauté internationale. Néanmoins, l'Union internationale des télécommunications, qui gère la répartition des orbites géostationnaires (reconnues comme des ressources naturelles limitées, à l'instar des fréquences électromagnétiques), veille à ce que les pays en voie de développement puissent bénéficier de ces orbites tout en évitant que les puissances spatiales ne les occupent toutes, ce qui constituerait aussi une forme d'appropriation.

Dans le roman de Clarke, les ingénieurs, bien qu'ayant perdu la querelle judiciaire, se voient finalement attribuer la possibilité d'occuper l'île à cause d'une prophétie<sup>(16)</sup> : « *Les papillons dorés... ce sont les âmes des guerriers de Kalidasa — l'armée qui a perdu au Yakkagala. [...] Chaque année, vers cette époque, ils se dirigent vers la montagne pour mourir sur ses pentes inférieures. On les rencontre parfois à mi-chemin du trajet du funiculaire, mais ils ne montent jamais plus haut. Ce qui est une chance pour le temple. Si jamais ils l'atteignent, Kalidasa aura vaincu, et les moines devront partir.* »

Or c'est bien ce qu'il va se passer cette année-là, offrant l'île aux ingénieurs d'*Astrotechnique*. Cette conclusion nous renseigne sur la nature profonde du droit. Peu importe que les moines aient été dans leur « bon droit », cette prophétie écrite leur tenait lieu de loi intériorisée de valeur supérieure. Et c'est en effet ce qu'est le droit : un outil de *métrologie* ; un ensemble de *règles* internes fixant le champ des possibles. Plus la règle est internalisée, plus elle est forte. Quoi de plus obligeant pour des moines qu'une prophétie issue de leur tradition sacrée ? Rien. Peu importe que les lois humaines leur aient donné raison.

Cette conclusion tragique pour les bouddhistes, rattrapés par les âmes d'anciens guerriers, illustre également le caractère transgénérationnel que revêtent parfois les lois, ou que l'on tente à présent de leur donner. Chez Clarke, elle illustre surtout la première phrase de son avant-propos à *2001 : l'Odyssee de l'espace* : « *Derrière chaque être vivant il y a trente fantômes, car tel est le rapport des morts aux vivants.* »

**Bibliographie :**

Clarke Arthur C., « Extra-terrestrial Relays », *Wireless World*, octobre 1945.

Clarke Arthur C., *Ascent to orbit – A scientific autobiography*, Hoboken, John Wiley & Sons, 1984.

Clarke Arthur C., *The Challenge of the Spaceship*, New York, Harper & Row, 1959.

Clarke Arthur C., *Les Fontaines du Paradis (The Fountains of Paradise)*, 1979, traduit de l'anglais par Georges H. Gallet (révisions de Roland C. Wagner), Paris, Gallimard, coll. « Folio SF », 2005.

Clarke Arthur C., « *Transit de la Terre* » (« *Transit of Earth* », 1971), traduit de l'anglais par George W. Barlow (révisions de Tom Clegg), in: *Odyssees*, Bragelonne, coll. « Science-fiction », 2013. La nouvelle « *Transit of Earth* » lue par Arthur Clarke en 1975 s'écoute à cette adresse : [http://recordbrother.typepad.com/imagesilike/files/transit\\_of\\_earth.mp3](http://recordbrother.typepad.com/imagesilike/files/transit_of_earth.mp3)

McAleer Neil, *Sir Arthur C. Clarke: Odyssey of a visionary*, Rosetta Books (2013).

Meeus Jean, « The Mars oppositions of the 20<sup>th</sup> century », *Journal of the British Astronomical Association* 72, 286 (1962); publié en français dans la revue *Ciel et Terre* 78, 39 (1962).

Meeus J. et E. Goffin, « Transits of Earth as Seen from Mars », *Journal of the British Astronomical Association* 93, 120 (1983).

Oberth Hermann, *Die Rakete zu den Planetenräumen*, 1923.

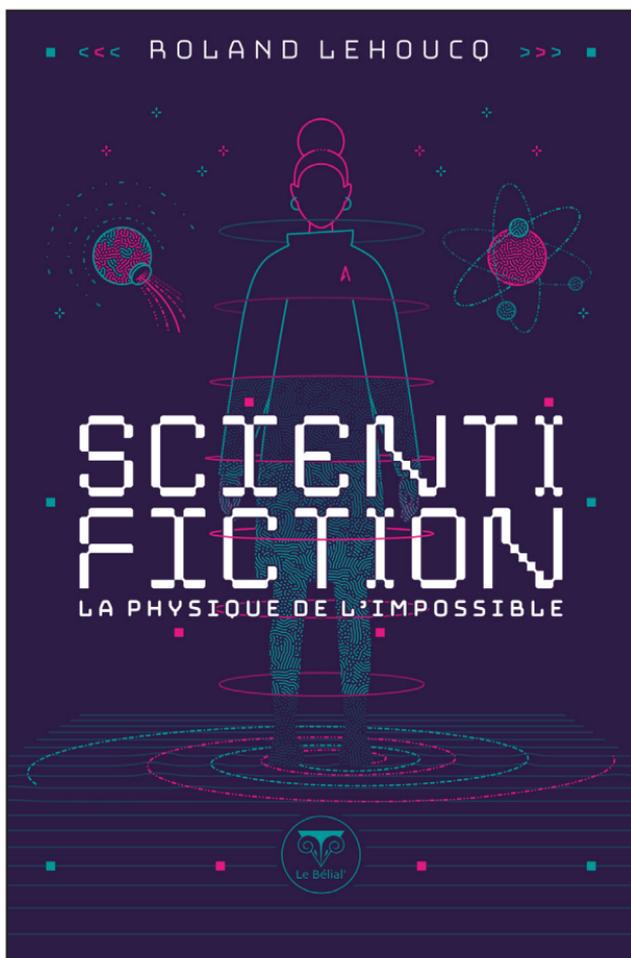
Potočnik Herman sous le pseudonyme de Hermann Noordnung, *Das Problem der Befahrung des Weltraums. Der Raketen-Motor*, Berlin, R. C. Schmidt & Co., 1929.

Tsiolkovski Constantin, « Exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction » (« Исследование мировых пространств реактивными приборами »), 1903.

**Notes :**

(1). Pour être en orbite géosynchrone, le satellite doit être placé à une altitude de 35 786 kilomètres.

- (2). Il fallut attendre 1963 et le lancement du satellite Syncom 2 pour utiliser une orbite géosynchrone, et 1964 pour mettre en orbite le premier satellite géostationnaire, Syncom 3.
- (3). Un satellite géosynchrone ne reste pas en permanence au-dessus du même lieu. La projection de sa trajectoire sur la surface de la Terre prend la forme d'un 8.
- (4). Cette façon de communiquer grâce à un faisceau lumineux, en usage dans la marine, rappelle l'état encore primitif de la radio au début des années 1920, avant la découverte de l'énorme potentiel des ondes courtes.
- (5). Les points de Lagrange d'un système à deux corps, Terre et Soleil par exemple, sont les positions particulières où un corps de masse négligeable est à l'équilibre entre les forces gravitationnelles des deux corps principaux et la force centrifuge qu'il subit. Ils sont au nombre de cinq : les points L1, L2 et L3 sont alignés avec les deux corps tandis que les points L4 et L5 forment un triangle équilatéral avec eux. Cette configuration géométrique est sans aucun doute à l'origine du titre de la série publiée par George Smith.
- (6). En droit international, les traités ne s'appliquent qu'aux États qui les ont ratifiés, d'où l'importance de connaître le nombre de ratifications que reçoit tel ou tel accord.
- (7). Les transits simultanés de Mercure et de Vénus devant le Soleil sont extrêmement rares. Les prochains visibles depuis la Terre se produiront en l'an 69 163 puis en 224 508 !
- (8). C'est ainsi que procéda le télescope spatial Kepler de 2009 à 2018, remplacé depuis par le satellite TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite).
- (9). Un raisonnement simple montre que l'inverse de cette durée est égal à la différence  $1/P_T - 1/P_M$ , où  $P_T$  et  $P_M$  sont respectivement les périodes orbitales de la Terre et de Mars.
- (10). La distance minimum entre la Terre et Mars est comprise entre 55,7 et 101,4 millions de kilomètres.
- (11). Les transits se produisant lorsque Mars traverse le plan orbital de la Terre de « bas en haut » ont lieu en mai, les autres ont lieu en novembre.
- (12). Le traducteur de la nouvelle de Clarke a compris le nombre « 11 » comme un 2 écrit en chiffre romain, décalant ainsi l'événement de 9 jours !
- (13). Le titre du roman viendrait d'une citation de Jean de Marignol (1290-1359) : « *De Taprobane au Paradis, il y a quarante lieues, et là peut s'entendre le murmure des fontaines du Paradis.* »
- (14). *Les Fontaines du Paradis*, Folio « SF », p. 191-192.
- (15). La Colombie, la République du Congo, l'Équateur, l'Indonésie, le Kenya, l'Ouganda et le Zaïre, auxquels se sont ensuite ajoutés le Gabon et la Somalie. Puis enfin le Brésil, mais lui, seulement en tant qu'observateur.
- (16). *Les Fontaines du Paradis*, Folio « SF », p. 167-168.



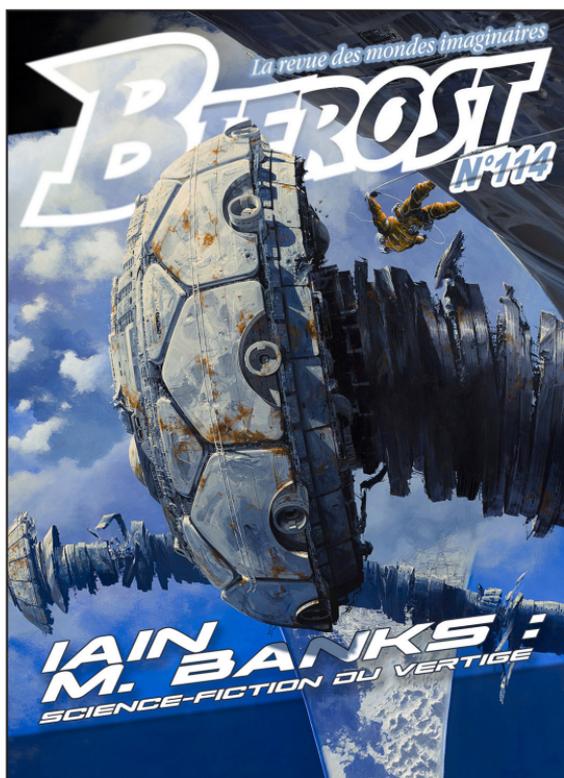
## Scientifiction – La Physique de l'impossible

Roland Lehoucq

320 pp. – 20,90 €

En librairie le 28 mars 2024

Retrouvez Roland Lehoucq  
tous les trois mois  
dans les pages de **Bifrost** !



**n° 114 - 192 pages - 11,90 €**  
Abonnement pour 1 an, 5 n° : 50 €  
Chèque à l'ordre des  
Éditions du Béalial'  
35, avenue de la gare  
77250 Moret-Loing-et-Orvanne

[www.belial.fr](http://www.belial.fr)

## À paraître

**Adam-Troy CASTRO :**

*La Marche funèbre des marionnettes*, court roman  
*Les Fils emmêlés des marionnettes* (titre provisoire), court roman

**COLLECTIF :**

*Architectes du vertige*  
1974 – 2024, cinquante ans de Grand Prix de l'Imaginaire, nouvelles

**Léo HENRY :**

*L'Éveil du Palazzo* (*Mille Saisons, livre deux*), roman

**Larry NIVEN & Jerry POURNELLE :**

*La Troisième main* (titre provisoire), *La Paille dans l'Œil de Dieu T.2*, roman

**Ken LIU :**

*L'Armée de ceux que j'aime* (titre provisoire), court roman

**Sam J. MILLER :**

*Kid Wolf et Kraken Boy*, court roman

**Ray NAYLER :**

*La Montagne dans la mer* (titre provisoire), roman

**Alastair REYNOLDS :**

*La Maison des soleils*, roman

**Robert SILVERBERG :**

*Le Chemin de l'espace*, roman

Le Béliat'