



ROLAND LEHOUCQ

**FAIRE DES  
SCIENCES AVEC  
STAR WARS**



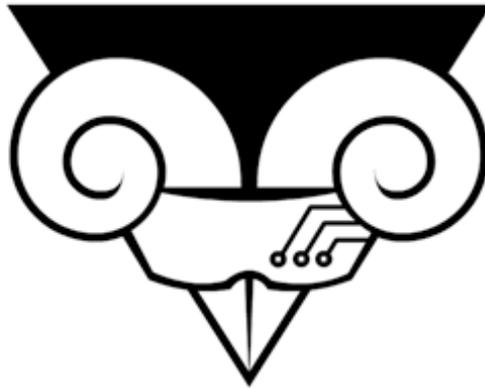
# Faire des sciences avec Star Wars

Roland Lehoucq



Le Béliat' vous propose volontairement des fichiers dépourvus de dispositifs de gestion des droits numériques (DRM) et autres moyens techniques visant la limitation de l'utilisation et de la copie de ces fichiers.

- Si vous avez acheté ce fichier, nous vous en remercions. Vous pouvez, comme vous le feriez avec un véritable livre, le transmettre à vos proches si vous souhaitez le leur faire découvrir. Afin que nous puissions continuer à distribuer nos livres numériques sans DRM, nous vous prions de ne pas le diffuser plus largement, via le web ou les réseaux peer-to-peer.
- Si vous avez acquis ce fichier d'une autre manière, nous vous demandons de ne pas le diffuser. Notez que, si vous souhaitez soutenir l'auteur et les éditions du Béliat', vous pouvez acheter légalement ce fichier sur notre plateforme **e.belial.fr** ou chez votre libraire numérique préféré.



# e-Béliâl'

Cet ouvrage est une version largement remaniée et complétée de celui publié en 2005 par les éditions Le Pommier/Collège de la Cité sous le titre *Faire de la physique avec Star Wars*. Ce *collector* n'est désormais disponible qu'à prix d'or sur les marchés de la Bordure extérieure...

ISBN : 978-2-84344-740-2

Parution : octobre 2015

Version : 1.0.0 — 20/10/2015

© 2015, Le Béliâl' pour la présente édition

Illustration de couverture © Manchu

# Faire des sciences avec Star Wars

Existe-t-il encore quelqu'un qui n'ait pas vu (et revu !) les épisodes de *Star Wars*, la saga de science-fiction la plus célèbre du cinéma ? Comme dans tout *space opera* qui se respecte, la technologie foisonne et *Star Wars* ne déroge pas. Bien que de nombreux objets semblent déjà vus<sup>1</sup>, les capacités techniques des protagonistes sont à l'évidence largement supérieures aux nôtres. Si certaines réalisations, comme les hologrammes, sont d'actualité ou paraissent relativement plausibles, d'autres relèvent plutôt du fantasme technologique. Aussi nous sommes-nous posé la question suivante : dans *Star Wars*, est-il possible de faire la part de la science et de la fiction, celle du rêve et de la réalité ? Bien sûr, nul ne serait surpris d'apprendre que l'essentiel des manifestations techniques et scientifiques montrées à l'écran sont impossibles ou pour le moins très difficiles à réaliser. Mais notre objectif n'est pas vraiment de trier le vrai du faux. Il ne consiste pas non plus à détruire la part de rêve inhérente à toute œuvre de fiction. Il s'agit plutôt d'en profiter pour développer, de manière ludique, un raisonnement scientifique appliqué à des scènes ou des personnages, qui ouvrent le champ à des interrogations scientifiques que l'on ne s'attend pas à trouver dans une œuvre de la culture populaire. Notre démarche consiste à faire une lecture scientifique d'un univers de fiction et, à chaque fois que c'est possible, à en extraire des informations qui ne sont pas explicitement données dans

---

<sup>1</sup> Par exemple, le costume de Dark Vador s'inspire de la tenue médiévale des samourais tandis que son casque présente des similitudes avec au casque allemand de la Première Guerre mondiale, le pistolet blaster de Han Solo n'est autre qu'un Mauser C96 auquel a été rajouté un cache flamme et une lunette de précision, le bruit que font les chasseurs TIE n'est pas sans rappeler celui des chasseurs allemands Stuka, le cockpit du Faucon Millenium ressemble à celui d'un bombardier américain B29, etc.

l'œuvre. Il s'agit donc de mener de véritables enquêtes, de faire comme si nous étions des scientifiques transportés sur ces mondes imaginaires. C'est une manière de « bidouiller » — de *hacker* — des monuments de la culture *geek* pour les détourner de leur but initial — divertir — et de s'en servir comme des prétextes pour faire de la science en jouant avec elle. Si l'épopée *Star Wars* est un bon support pour mener ces investigations, de nombreux autres films de science-fiction<sup>2</sup> constituent aussi de formidables portes d'entrée qui ouvrent les esprits à des questions de science. Pour le plus grand bien de nos neurones, nous allons donc nous livrer à une petite analyse scientifique de l'univers *Star Wars*. Notre champ d'investigation est fort vaste : la Force et le sabre-laser (incontournables !), l'Étoile de la mort (archétype de l'arme absolue dont rêvent tous les super-méchants d'envergure galactique), les véhicules (il y en a de toutes tailles et de tous usages, du *lanspeeder* au vaisseau interstellaire) et bien sûr les planètes, dont la célèbre Tatooine et son soleil double. « Que la Force soit avec vous ! », vous risquez d'en avoir besoin...

---

<sup>2</sup> Citons par exemple *Avatar* (J. Cameron, 2009), *Gravity* (A. Cuarón, 2013) ou *Interstellar* (C. Nolan, 2014).

# La Force

La Force est la mystérieuse et puissante source du pouvoir des chevaliers Jedi. Mais quelle est exactement sa nature ? Dans l'épisode IV *Un nouvel espoir*, Obi-Wan Kenobi, le célèbre chevalier Jedi, la définit ainsi : « C'est un champ d'énergie créé par tous les êtres vivants. Il nous entoure et nous pénètre. Il lie la galaxie toute entière. » Au premier abord, ces quelques phrases semblent plutôt à ranger du côté de la pseudoscience dont les scientologues et les publicitaires sont friands<sup>3</sup>. Pourtant, pour un physicien, certains mots sont évocateurs. Examinons par exemple la notion de champ. Elle émergea au XIX<sup>e</sup> siècle, quand les savants cherchèrent une explication physique à la façon dont une charge électrique ou un aimant agissent à distance, sans aucun contact, avec une autre charge ou un autre aimant. Cette question était d'importance car, à cette époque, il semblait impossible que l'action d'un objet sur un autre puisse se faire autrement que par un contact direct. La question était encore sujette à controverse, surtout depuis qu'Isaac Newton (1642-

---

<sup>3</sup> À ce propos, on appréciera les expressions suivantes, lues sur des publicités réelles, vantant les mérites d'une crème antirides car elle contenait « des capsules de rétinol actif extrait de l'ADN végétal » (il suffit de faire une mayonnaise à l'oignon pour avoir quelque chose approchant cette définition) ou affirmant les qualités d'un acier « au carbone » (ce qui est la moindre des choses car l'acier est un alliage de fer et de carbone).

1727) avait brisé le tabou en introduisant sa force de gravitation, capable de s'exercer à travers l'espace entre deux corps éloignés. Le physicien anglais Michael Faraday (1791-1867) proposa qu'une charge électrique produise autour d'elle un champ invisible s'étendant dans tout l'espace. Ce champ agit sur les charges électriques qui le rencontrent, ce qui se traduit par l'action d'une force sur celles-ci. L'action à distance entre deux charges se ramène ainsi à une action de contact entre l'une des deux charges et le champ de la seconde. Et le tour est joué ! Le concept de champ s'étend facilement à la force gravitationnelle de Newton et à la force magnétique entre aimants. L'idée de champ s'applique aussi magnifiquement à la Force. Si un Jedi peut agir à distance sur des objets, c'est parce qu'il est capable de manipuler un champ, un champ d'énergie d'après Obi-Wan Kenobi. Cela semble logique car, en physique, l'énergie est précisément la mesure de la capacité d'un système à agir sur les choses ou à les transformer. Ainsi, pour déplacer une chaise, il faut lui fournir de l'énergie — en général, ce sont les muscles des bras qui s'en chargent. C'est la même chose pour propulser une voiture — dans ce cas, c'est la combustion de l'essence dans le moteur qui fournit l'énergie nécessaire à ce mouvement. Pour soulever à distance le chasseur de Luke dans les marais de Dagobah, Yoda lui fournit de l'énergie en manipulant le champ associé à la Force. Tout cela semble clair et logique, non ?

## Une Force déjà connue ?

Évidemment, il reste à trouver la source de ce champ et de cette énergie. Cette question ne doit pas être négligée car, dans la nature, chaque effet a une cause qui lui est associée. Sans source identifiée, la Force s'apparenterait dangereusement à de la magie. D'ailleurs, la sagesse populaire ne s'y trompe pas : tout le monde sait qu'il n'y a pas de fumée sans feu. Selon Obi-Wan Kenobi, la Force trouverait sa source dans les êtres vivants, tout comme le champ électrique trouve la sienne dans les charges électriques. Alliée au fait que la Force lie la galaxie, c'est-à-dire qu'elle lui donne sa cohésion, cette affirmation conduit à penser que la Force est un avatar de la force de gravité, la seule des quatre interactions

fondamentales<sup>4</sup> qui compte à l'échelle des planètes, des étoiles et des galaxies. Et les êtres vivants sont aussi source de gravitation. Rien de glorieux à cela, puisque c'est aussi le cas de n'importe quel morceau matière, qu'il soit grain de sable, montagne ou planète. Le puzzle semble bien s'ajuster... Il y a pourtant un petit bémol : le champ de gravité créé par les êtres vivants de notre galaxie est très largement insuffisant pour lier les quelque deux cents milliards étoiles qu'elle contient, même si l'on tient compte, à tout hasard, d'une bonne quantité d'extraterrestres obèses. C'est le champ de gravité de *toute* la matière d'une galaxie<sup>5</sup> qui lui donne sa cohésion et sa dynamique. L'hypothèse selon laquelle la Force pourrait être identifiée à la gravité est renforcée par le fait que nombre de ses manifestations ressemblent à une manipulation de la gravité locale. Ainsi, quand Yoda soulève le chasseur de Luke pour l'extraire du marais de Dagobah, tout se passe comme s'il était capable d'annuler, et même d'inverser, la gravité de la planète juste sous le chasseur de sorte qu'il « tombe vers le haut ». La situation se répète quand Luke s'entraîne à contrôler la Force en soulevant sans contact de grosses pierres ou le droïde R2D2. Mais alors, si la Force n'est rien d'autre que la gravitation, pourquoi la nommer différemment et faire tout ce foin autour d'elle ? Non, il doit y avoir une autre explication.

Réfléchissons davantage. De quelle autre sorte de champ un être vivant pourrait-il être la source ? D'un champ électrique, bien sûr ! Il suffit de toucher un poisson torpille pour se convaincre que certains animaux sont même capables d'en produire d'importants. Par ailleurs, c'est bien le champ électrique de notre cerveau que l'on mesure dans un électroencéphalogramme, même s'il est plutôt faible. Malheureusement, la matière d'une galaxie n'est pas liée par un quelconque champ électrique. Alors, peut-être faut-il prendre la phrase d'Obi-Wan au sens figuré : la Force joue le rôle d'un lien entre tous les êtres vivants de la galaxie, un réseau GSM galactique en quelque sorte... Une scène de l'épisode VI *Le retour du Jedi*, va dans le sens cette hypothèse : l'empereur Palpatine tente de « convaincre » Luke Skywalker de le rejoindre du côté obscur de la Force. Devant la résistance de ce dernier, il le torture, puis tente de le tuer en le frappant avec des éclairs émis par les extrémités de

---

<sup>4</sup> Ce sont les interactions nucléaires forte et faible, l'interaction électromagnétique, et la gravitation.

<sup>5</sup> La masse visible d'une galaxie se présente sous forme de gaz interstellaire ou d'étoiles. Mais la masse totale d'une galaxie est dominée par une matière sombre, non lumineuse, qui représente entre 80 % et 90 % de la masse totale.

ses doigts. Dans ce cas, l'Empereur fait appel à la Force pour se transformer en un puissant générateur de tension !

En effet, les éclairs qui illuminent vivement le ciel durant un orage résultent de l'action d'un champ électrique intense créé entre les nuages et le sol. Sous l'action de ce champ, les molécules de l'air sont brisées, libérant ainsi essentiellement des atomes d'oxygène et d'azote. Mieux, un champ électrique suffisamment intense peut arracher certains des électrons de ces atomes. L'air, habituellement isolant, devient alors conducteur et un courant électrique — l'éclair — frappe le sol. Le champ électrique nécessaire pour produire ce phénomène d'ionisation de l'air est de l'ordre de 3,6 millions de volts par mètre pour de l'air sec à la pression atmosphérique. Si l'on estime que les éclairs produits par l'Empereur ont une longueur de 3 à 4 mètres, tout se passe comme s'il était branché à un générateur d'une dizaine de millions de volts, à comparer aux 100 millions de volts mis en jeu dans la foudre !

Par ailleurs, la position que prend Palpatine pour foudroyer Skywalker, doigts écartés et tendus vers l'avant, va tout à fait dans le sens de notre hypothèse. En effet, le champ électrique est beaucoup plus intense au voisinage des extrémités conductrices pointues, ce qui facilite diablement la production de la décharge électrique. À l'inverse, constatons que la foudre se dirige volontiers vers la pointe d'un paratonnerre. Ce phénomène peut être constaté dans la fameuse salle d'électrostatique du palais de la Découverte, à Paris. Un spectateur volontaire, isolé du sol et branché à un générateur de 300 000 volts, braque ses doigts tendus aux extrémités desquels le public peut aisément observer des aigrettes lumineuses de plusieurs centimètres de long. Et des éclairs se produisent entre deux barreaux métalliques pointus suffisamment proches.

Si la Force donne à l'empereur des pouvoirs « électriques » il doit quand même prendre garde à s'isoler électriquement du sol, faute de quoi il risque une auto-électrocution ! Ainsi, si les semelles de ses chaussures sont trop fines leur capacité d'isolation sera moins bonne que celle de l'air ambiant et le courant électrique passera à travers elle plutôt qu'en ionisant l'air. La résistivité du caoutchouc de semelle peut être trouvée auprès de leurs fabricants, un peu surpris de la question, et permet d'estimer l'épaisseur des semelles de l'Empereur. La réponse est sans appel : il doit disposer de semelles de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur, à la mode des drag-queens ! On comprend mieux pourquoi il porte toujours un grand manteau : il veut dissimuler ce détail qui pourrait faire ricaner dans la Galaxie et l'obligerait à un carnage pour punir les impudents.

Alors, l'Empereur ne serait-il qu'un puissant générateur électrique et la Force qu'une version amplifiée du champ électrique ? Non, confusément, nous sentons bien que quelque chose de plus mystérieux doit être à l'œuvre...

## Un peu d'histoire

Retenons le point essentiel de la définition que nous donne Obi-Wan Kenobi : la Force est une entité physique qui remplit tout l'espace et relie toutes choses. De ce point de vue, la Force n'est pas uniquement un moyen de réaliser quantité d'actions amusantes, comme déplacer un vaisseau spatial embourbé ou ratatiner quelques droïdes de combat, elle plonge aussi ses racines dans les plus anciennes interprétations du monde. Elle rappelle notamment la quintessence, le fameux cinquième élément dont Aristote remplissait les cieux pour compléter l'action terrestre de l'air, de la terre, de l'eau et du feu. Cette quintessence avait de bien étranges propriétés : elle était incréée, inaltérable, invisible, omniprésente. Élément d'une autre nature que celle des quatre éléments terrestres, elle traduisait la profonde différence entre la Terre et le Ciel. Objet de discussion et de réflexion pendant près de deux millénaires, on renonça à la quintessence au XVII<sup>e</sup> siècle, en même temps que fut abandonnée toute la physique d'Aristote.

Mais voilà qu'au XIX<sup>e</sup> siècle resurgit une sorte de quintessence aristotélicienne. À cette époque, les physiciens se représentaient l'espace comme une coquille vide. Selon eux, la lumière ne pouvait s'y propager que s'il était empli d'un milieu particulier, nommé « éther », qui permettait cette propagation. Ils considéraient que les ondes lumineuses se propageaient dans l'éther à la façon des ondes sonores dans l'air. Comme la lumière se déplace à grande vitesse, environ 300 000 kilomètres par seconde, l'éther était conçu comme un milieu extraordinairement rigide. En dépit de cela, la Terre devait s'y déplacer sans aucun frottement car sinon son orbite aurait été modifiée au fil du temps, au point de la faire chuter vers le Soleil. D'autre part, on aurait dû détecter un « vent d'éther », produit par le mouvement de la Terre

autour du Soleil. En effet, la vitesse mesurée d'une onde sonore dépend de la vitesse à laquelle se déplace celui qui fait la mesure. Cela se manifeste par des différences de perception de la fréquence d'un son émis par une source mobile : le bruit du moteur d'une voiture passe de l'aigu quand elle s'approche au grave quand elle s'éloigne. Comme la Terre, qui est en mouvement autour du Soleil, se déplace par rapport à l'éther, les physiciens s'attendaient donc à trouver différentes valeurs pour la vitesse de la lumière en fonction du moment ou de la direction selon lesquels elle était mesurée. En 1887, les physiciens Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward W. Morley (1838-1923) montrèrent que la vitesse de la lumière prend la même valeur quelle que soit la direction selon laquelle elle est mesurée depuis la surface de la Terre. Ce résultat participa à invalider la théorie de l'éther et imposa l'idée que la lumière pouvait se propager dans le vide, sans aucun support matériel. L'abandon de l'éther nous prive d'une explication de la Force...

## Un détour par le vide...

La Force et son omniprésence évoquent enfin l'une des idées les plus fascinantes de la physique moderne : l'énergie du vide. Remarquable oxymore : comment le vide pourrait-il avoir une énergie ? Le vide semble d'abord être le résultat d'une action, celle d'ôter d'une région de l'espace toute la matière qu'elle contient (pensez à l'expression « faire un rangement par le vide »). Pour être complet, la physique nous dit qu'il faut aussi se débarrasser de la lumière, ce qui est moins facile...<sup>6</sup> Et après ? La région traitée devrait avoir perdu tout intérêt puisque plus rien ne s'y trouve. Et pourtant, quantité de choses s'y produisent ! Au début du XX<sup>e</sup> siècle fut élaborée une théorie des phénomènes microscopiques,

---

<sup>6</sup> Pour se débarrasser de la lumière contenue dans une enceinte, il faut la refroidir aussi près que possible du zéro absolu, soit environ -273 °C.

connue sous le nom de mécanique quantique, qui aboutit à l'idée que chaque acteur physique, particule ou lumière, est associée à un champ. Une particule est alors décrite comme une excitation élémentaire du champ associé. Dans ce cadre, le vide se définit simplement : c'est une configuration particulière de l'état des champs, celle de plus basse énergie, qui n'est donc pas forcément nulle. En mécanique quantique, l'énergie d'un système n'est pas constante, mais peut fluctuer tout en respectant une condition : le produit de la variation d'énergie de la fluctuation et de sa durée doit être supérieur à une certaine constante<sup>7</sup>. En clair, il est possible d'« emprunter » une quantité d'énergie quelconque à un système, le vide par exemple, à condition de la « rembourser » assez vite, d'autant plus vite que la quantité empruntée est grande.

Ces fluctuations du vide ont des conséquences expérimentales bien connues des physiciens : un atome isolé placé dans une enceinte vide n'interagit qu'avec les fluctuations du vide ; entraîné vers un état excité par une impulsion lumineuse, il va spontanément redescendre vers son état fondamental en émettant de la lumière. C'est le couplage de l'atome avec les fluctuations du vide qui déclenche ce processus d'émission spontanée. Les fluctuations quantiques de ce vide nouvelle manière ont aussi une manifestation macroscopique mesurable, comme la force de van der Waals<sup>8</sup>. En 1948, le physicien néerlandais Hendrik Casimir (1909-2000) montra que deux plaques conductrices placées dans le vide s'attirent mutuellement et interpréta aussi cette attraction comme la manifestation des fluctuations du vide. À la fin des années 1990, la prédiction théorique de Casimir a été vérifiée avec une précision de l'ordre de 1 %.

Peut-on espérer extraire de l'énergie du vide ? La Force pourrait-elle être une manifestation de ces fluctuations ? Le réalisme scientifique impose de donner une réponse négative ou pour le moins réservée. D'abord, le vide étant, par définition, l'état d'énergie minimum, il semble difficile d'en extraire directement de l'énergie. Si c'était possible, cela signifierait que son énergie n'est pas minimale. Des méthodes théoriques ont pourtant suggéré de se servir de l'effet Casimir pour

---

<sup>7</sup> Cette constante est égale à la moitié de la constante de Planck réduite.

<sup>8</sup> La force de van der Waals est une interaction électrique de faible intensité entre deux atomes, deux molécules, ou entre une molécule et un cristal. Bien qu'il soit possible de décrire cette interaction de façon classique, elle ne peut bien se comprendre que dans le cadre de la physique quantique.

extraire de l'énergie du vide, l'énergie de la région située entre les plaques de l'expérience pouvant être considérée comme plus basse que celle de la région extérieure aux plaques. Mais, pour l'instant, ces idées en sont encore au stade de l'exercice théorique pour physicien joueur. Mais une autre hypothèse est envisageable.

## ... pour en arriver à l'univers

Vers la fin des années 1920, l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) constata que toutes les galaxies lointaines semblaient s'éloigner de la nôtre. Cette observation fut interprétée comme une preuve de l'expansion de l'univers et elle donna un fondement aux modèles à big-bang. Depuis une dizaine d'années, il semble acquis que cette expansion s'accélère<sup>9</sup>. Cela est plutôt surprenant, car il semble que la matière, qui engendre une force de gravité attractive, aurait plutôt tendance à ralentir l'expansion de l'univers. Pour rendre compte d'une accélération, il faut invoquer la présence d'un acteur physique capable de contrer le jeu de la gravité. C'est le rôle de la constante cosmologique, initialement introduite par Albert Einstein (1879-1955) car il souhaitait construire un modèle d'univers statique, invariant dans le temps. Il la désavoua plus tard, au moment de la découverte de l'expansion de l'univers par Hubble. D'un point de vue pratique, la constante cosmologique<sup>10</sup> peut être associée à un fluide remplissant tout l'espace et dont l'énergie est négative, en opposition à la matière dont l'énergie est positive. Il s'agit donc d'une manière d'« antigravité ». Voilà un candidat idéal pour expliquer les manifestations de la Force ! Il est même possible d'être plus quantitatif, car les données collectées par les satellites WMAP

---

<sup>9</sup> La découverte de cette accélération a d'ailleurs valu le prix Nobel de physique en 2011 à S. Perlmutter, B. Schmidt et A. Riess.

<sup>10</sup> Aussi appelée *dark energy*, « énergie noire », par les Anglo-Saxons, cette constante cosmologique fait penser au *dark side of the Force*, le « côté obscur » de la Force.

et Planck ont permis de préciser la valeur de la constante cosmologique. Elle est non nulle et représente environ 68 % du contenu énergétique de l'univers. Cependant, sa densité est si ridiculement petite que, pour soulever R2D2 d'un mètre au-dessus du sol de Dagobah, comme il le fait lors de son entraînement, Luke doit mentalement collecter l'énergie contenue dans un cube de plus de 10 kilomètres de côté<sup>11</sup>. On comprend aisément que, même avec quelques minutes de concentration, il ait du mal à le faire ! Finalement, la Force pourrait bien être avec nous, mais quant à l'utiliser, c'est une autre paire de manches. Peut-être que la nouvelle interprétation de la Force proposée dans l'épisode I *La menace fantôme* nous aidera à y voir plus clair.

## Les mystérieux midichloriens

Dans cet opus de la saga, Qui-Gon Jinn (QGJ) nous révèle que la Force trouve son origine dans d'étranges êtres microscopiques nommés « midichloriens ». En réponse à une question du jeune Anakin Skywalker (AS), intrigué par l'origine de la Force, son mentor nous précise la nature de ceux-ci :

- AS : *Que sont les midichloriens ?*

- QGJ : *Les midichloriens sont des formes de vie microscopiques qui résident dans toutes les cellules vivantes et communiquent avec la Force.*

- AS : *Ils vivent à l'intérieur de moi ?*

- QGJ : *Dans tes cellules. Nous vivons en symbiose avec les midichloriens.*

En introduisant les midichloriens, George Lucas tente, au grand dam de ses fans, de donner une base plus scientifique à la Force. Mais

---

<sup>11</sup> Pour faire ce calcul, nous avons supposé que R2D2 a une masse de 100 kilogrammes et que la gravité de Dagobah est proche de celle de la Terre.

cette explication relève-t-elle vraiment de la science ? Ces mystérieux midichloriens sont-ils plausibles ? Et quelle peut-être leur nature ?

Pour commencer, notons que les midichloriens ne peuvent être des virus car ceux-ci sont plutôt considérés comme des parasites intracellulaires, alors que la définition de Qui-Gon est claire : les midichloriens sont des symbiotes. Pour tenter de préciser leur nature, remarquons que le mot « midichlorien », forgé par Lucas, semble être un assemblage des mots « mitochondrie » et « chloroplaste », qui sont deux organites, c'est-à-dire deux structures spécialisées des cellules terriennes. La mitochondrie, dont la taille est généralement de l'ordre de quelques millièmes de mètres, récupère l'énergie fournie par les nutriments et la stocke sous forme de molécules d'ATP (adénosine triphosphate). La mitochondrie est donc l'usine énergétique des cellules à noyau, dites eucaryotes, aussi bien animales que végétales. En revanche, le chloroplaste est un organite spécifique des cellules végétales qui capte la lumière grâce à la chlorophylle qu'il contient. Le chloroplaste est donc à l'origine de la photosynthèse et joue un rôle important dans la transformation du carbone atmosphérique (gaz carbonique) en carbone organique (sucre). Le fait que mitochondrie et chloroplaste possèdent leur propre ADN suggère une origine exogène : ces organites seraient en effet les lointains cousins ou descendants de bactéries<sup>12</sup> qui auraient été « adoptées » (et non phagocytées), voici 1,5 à 2 milliards d'années, par des cellules alors procaryotes (sans noyau) et dans lesquelles elles finirent par vivre en symbiose. Cette hypothèse de l'endosymbiose, publiée en 1967, a été appuyée par la découverte de l'ADN spécifique des mitochondries en 1980. Mais, même s'ils semblent partager des propriétés symbiotiques identiques aux organites connus sur Terre, la définition donnée par Qui-Gon Jinn suggère bien que les midichloriens sont des organismes à part entière et non des organites. On pourrait même les considérer comme des organismes mutagènes et, du point de vue microbiologique, les Jedis seraient alors des individus « porteurs », voire « vecteurs » si les midichloriens peuvent passer d'un Jedi à un autre. Une simple sérologie permettrait alors d'identifier le stade de contamination, voire le degré de contagion !

D'ailleurs, pour mesurer l'affinité du jeune Anakin avec la Force, Qui-Gon Jinn lui prélève une goutte de sang. Le fait que la présence de

---

<sup>12</sup> Les chloroplastes descendraient des cyanobactéries et les mitochondries des protéobactéries.

midichloriens soit quantifiable semble leur donner une base scientifique, si l'on en croit le physicien anglais Lord Kelvin (1824-1907) affirmant qu'il n'y a de science que de mesurable. Pour autant, l'explication ne relève pas tout à fait de la science, car elle rend compte d'un fait mystérieux, la Force, en faisant appel à un second mystère, les midichloriens. L'analyse de l'échantillon sanguin d'Anakin donne un résultat de 20 000, mais sans qu'aucune unité ne soit précisée. Doit-on comprendre que le corps du jeune homme en contient cette quantité ? À moins que ce ne soit celle de la goutte de sang qui lui a été prélevée... Avec ce rapport clairement affiché entre nombre de midichloriens et affinité avec la Force, on peut aussi se demander, sans toutefois tomber dans l'eugénisme, pourquoi le conseil des Jedis n'établit-il pas une classification de ses ouailles, voire la mise en culture de super-Jedis ! L'intérêt clinique d'une classification serait évident pour la communauté Jedi, un peu comme avec notre groupe sanguin ou notre facteur Rhésus... Constatons aussi qu'il semble de fait possible de devenir Jedi par une simple transfusion sanguine !

Quoi qu'il en soit, le résultat d'Anakin est si élevé (supérieur à celui de maître Yoda !) que le conseil des Jedis, réuni sur Coruscant, se demande si le jeune héros qui, rappelons-le, n'a aucun père biologique, n'aurait pas été créé par des midichloriens pour rétablir l'équilibre de la Force dans l'univers. Cette vieille prophétie souvent citée dans *Star Wars* n'a bien sûr aucun sens en terme d'évolution : elle rappelle l'ancienne théorie de la « génération spontanée » qui stipulait que des êtres vivants complexes pouvaient apparaître sans ascendant, simplement à partir de matière inanimée. Selon ce principe erroné, les asticots et donc les mouches, par exemple, naîtraient de la décomposition de la viande ! Cependant, en supposant qu'Anakin ait réellement été « fabriqué » par des midichloriens, son cas reste tout de même fort intéressant en terme de classification systématique : notre héros passerait en effet du statut d'organisme pluricellulaire (un jeune humanoïde) à celui de super-organisme, colonie dont les individus très spécialisés — les zooties — seraient des midichloriens ! Cette frontière entre organisme et super-organisme peut être floue aussi sur Terre. C'est par exemple le cas des siphonophores, groupe bien réel d'étranges cnidaires (« méduses ») qui vivent en colonie et dont les tentacules peuvent atteindre quarante mètres de long. Morphologiquement et fonctionnellement parlant, chacune des parties de cet organisme est tellement spécialisée dans la réalisation de tâches variées (locomotion, reproduction, nutrition, etc.) que les spécialistes se demandent encore si ces bestioles ne seraient pas plutôt des super-organismes...

Puisque les midichloriens affectent des Jedis de toutes espèces et de toutes planètes, ces organismes doivent aussi être des extrémophiles, capables, par exemple, de résister au vide intergalactique pour se propager. En cela ils évoquent certaines bactéries, comme *Serratia liquefaciens* ou la très célèbre *Escherichia coli* de nos intestins capables, en laboratoire, de résister à des conditions martiennes ! Attention cependant à *Escherichia coli* : si elle nous permet de digérer toute sorte d'aliments, elle devient aussi une réelle menace pour peu qu'elle quitte notre système digestif. Une fois passée dans le sang, la bactérie peut fort bien provoquer une septicémie ! L'analogie est-elle possible avec les midichloriens ? Ceux-ci deviennent-ils néfastes — pour ne pas dire « méchants » — s'ils quittent leur milieu de prédilection, c'est-à-dire le système sanguin du Jedi ? Les Siths ne seraient-ils pas finalement des Jedis malades, dont les midichloriens auraient quittés le sang pour passer dans le tube digestif par exemple ? Si Georges Lucas, pour rendre prétendument plus « scientifique » l'origine de la Force, a osé l'analyse de sang d'un Jedi — en l'occurrence, le jeune Anakin —, Disney va-t-il se lancer dans l'analyse de selles d'un Sith ? La science progresserait grandement !

Les midichloriens sont aussi présents partout dans l'univers. Comment peuvent-ils survivre à un voyage dans l'espace avant de trouver l'âme sœur ? Une solution consiste à les imaginer enkystés, c'est-à-dire retournés à un stade d'organisation très simple — le kyste — protégé par une coque dure, et ayant stoppé ses fonctions vitales pendant un certain temps. Cette stratégie de survie est déjà adoptée par de nombreux organismes bien réels sur Terre : ainsi la graine, par exemple, rentre dans un état dit de « dormance », et les petits crustacés du genre *Artemia*<sup>13</sup> s'enkystent quand les conditions extérieures ne leur conviennent pas. Les midichloriens rappellent aussi les fameux tardigrades, ces pseudo-arthropodes minuscules<sup>14</sup> capables de tolérer le vide spatial en entrant dans une léthargie protectrice nommée cryptobiose. Mais vu le nombre et l'éventail très large de Jedis et de leurs mondes d'origine (dont nous découvrons vraiment la diversité dans les épisodes II et III de la saga), on peut aussi se demander comment les midichloriens ont-ils fait pour pulluler autant dans l'univers *Star Wars*. Une possibilité serait qu'ils aient été transportés par des météorites, des astéroïdes ou des comètes qui, selon l'hypothèse de la panspermie, auraient également apportés sur Terre

---

<sup>13</sup> Ceux qui lisaient *Pif Gadget* connaissent l'*Artemia* sous le nom de « Pifises » !

<sup>14</sup> Leur taille est de l'ordre d'une fraction de millimètre.

certaines acides aminés à l'origine de la vie. Vu les très grandes distances qui séparent les étoiles et les planètes, et donc les Jedis dans la galaxie, la dissémination et la divergence des midichloriens auraient pu se faire durant la « jeunesse » de l'univers. Et si l'ancêtre commun à toute forme de vie, le fameux LUCA (acronyme de Last Universal Common Ancestor), hypothétique organisme archaïque âgé de 3,6 à 4,1 milliards d'années, était un midichlorien ? Pour le coup, Georges Lucas serait véritablement un visionnaire !

## Quelle puissance les Jedis extraient-ils de la Force ?

À défaut d'expliquer comment les midichloriens rendent leur hôte capable d'utiliser la Force, il est en revanche possible de quantifier les exploits qu'ils permettent. Commençons par examiner le cas de Maître Yoda. Il apparaît pour la première fois à l'écran en 1980 dans l'épisode V *L'Empire contre-attaque*. Il vit reclus sur la planète Dagobah et teste la patience de Luke Skywalker en se faisant passer pour une espèce endémique, sénile et farfelue, alors que le jeune Luke le recherche désespérément pour parfaire son apprentissage. Mais Luke le prend au sérieux quand Yoda, par sa seule maîtrise de la Force, parvient à sortir son vaisseau spatial, un X-Wing, du marais dans lequel il vient de sombrer. Quelle puissance le Maître Jedi doit-il produire pour réaliser cet exploit ? Si l'on suppose qu'un X-Wing a, en gros, les dimensions d'un avion de combat comme le Rafale, il doit faire une quinzaine de mètres de long pour une masse d'environ 20 tonnes à pleine charge. Cette valeur semble être un minimum car après tout, est-il bien raisonnable qu'un vaisseau interstellaire soit aussi léger ? Yoda extrait le vaisseau assez lentement du marais, à une vitesse que l'on peut estimer à une cinquantaine de centimètres par seconde en rapportant ses déplacements à sa taille. Si la gravité de Dagobah est voisine de celle de la Terre, la puissance nécessaire pour réaliser cet exploit est de l'ordre de 100 kilowatts, soit la puissance d'une voiture standard ! Par comparaison,

quand Luke Skywalker s'entraîne en soulevant R2D2, qui doit peser une centaine de kilogrammes, d'un mètre en environ une seconde, il fournit une puissance de 1 kilowatt, environ 2 fois supérieure à celle d'un cycliste professionnel en plein effort. On comprend qu'il ait des progrès à faire...<sup>15</sup>

Si Yoda est capable d'exploits bien plus extraordinaires que de garer proprement un X-Wing, l'Empereur Palpatine fait aussi des démonstrations impressionnantes. Une scène de l'épisode VI *Le Retour du Jedi* va nous permettre de répondre à la question de la puissance qu'il est capable de produire. Lors de cette confrontation, Palpatine tente de convaincre Luke Skywalker de le rejoindre du côté obscur de la Force. Devant la résistance de ce dernier, il le torture, puis tente de le tuer en le frappant avec des éclairs émis par les extrémités de ses doigts. Alors que Yoda utilise la Force de façon antigravitationnelle, nous avons déjà vu que l'Empereur fait appel à celle-ci pour se transformer en un générateur de tension d'une dizaine de millions de volts. Pour évaluer la puissance produite par Palpatine, il faut aussi se faire une idée de l'intensité du courant, c'est-à-dire du débit des charges électriques — les électrons — qui circulent dans l'éclair. Si l'on considère que l'Empereur peut contrôler l'intensité du courant qu'il produit, il choisira d'abord une valeur qui lui permet de faire souffrir durement Luke Skywalker, pour le « convaincre », avant de lui infliger une intensité mortelle. En consultant les documents expliquant les effets biologiques d'un courant électrique continu<sup>16</sup>, on apprend que le seuil de perception du corps humain est de 2 milliampères. Pour des valeurs supérieures à ce seuil tout en restant de faibles intensités, une sensation de chaleur se produit dans les extrémités corporelles pendant le passage du courant. Des courants jusqu'à 300 milliampères passant à travers le corps pendant plusieurs minutes peuvent provoquer des arythmies cardiaques réversibles, des marques visibles, des

---

<sup>15</sup> Que ceux tentés de ricaner à propos de la faible puissance de Skywalker se rappellent qu'un humain mâle moyen ne produit qu'une centaine de watts.

<sup>16</sup> Notons que la fameuse chaise électrique fonctionnait avec du courant alternatif, appliqué plusieurs dizaines de secondes, avec une tension de 2 000 volts et une intensité de 5 ampères. Elle a été mise au point à la fin des années 1880 en pleine « guerre des courants » qui vit s'affronter Thomas Edison, qui réalisa la première usine de distribution d'électricité en courant continu, et George Westinghouse qui introduisit un réseau concurrent basé sur le courant alternatif. Aucun des deux ne voulait que « son » courant ne soit associé à la chaise électrique.

brûlures<sup>17</sup>, des vertiges, voire une perte de connaissance. Au-dessus de 300 milliampères, le sujet perd connaissance. Si l'on suppose que l'Empereur commence par une valeur « raisonnable », mais déjà très désagréable, de l'ordre de 200 milliampères, il produit déjà une puissance de 2 mégawatts (soit 2 millions de watts) ! Et s'il s'énerve un peu pour atteindre une intensité de l'ordre de l'ampère, c'est plutôt 10 mégawatts que Palpatine est capable d'émettre grâce à la Force, soit la puissance consommée par un TGV Duplex ! L'Empereur est bien un redoutable adversaire et Skywalker, avec son petit kilowatt, peut aller se rhabiller...

---

<sup>17</sup> Notons d'ailleurs que la dissipation thermique due au courant électrique (effet Joule) est manifeste dans le film car on voit le corps et les habits de Luke Skywalker fumer sous l'intensité des éclairs qui le frappent.

# Le sabre-laser

Existe-t-il un objet plus emblématique de l'univers Star Wars que le sabre-laser ? Arme noble par excellence, le sabre-laser représente l'alliance étonnante d'une technologie futuriste et du féodalisme moyenâgeux qui prévaut encore dans la saga. Qui n'a pas rêvé de posséder ou de construire une telle arme ? Voyons si la physique actuelle est capable d'en percer les mystères et interrogeons-nous sur ce qu'est un sabre-laser et sur ce qu'il n'est pas. Mais tout d'abord, s'agit-il vraiment d'un laser ?

## Une arme improbable

D'emblée, il faut nous rendre à l'évidence : le sabre-laser, arme imaginaire, est pétri de contradictions. Bien sûr, ces sabres se manipulent comme leurs équivalents terrestres et leurs lames se heurtent bruyamment. Quel serait en effet l'intérêt d'un sabre inutilisable pour exécuter les attaques et les parades de l'escrime occidentale ou du kendo

japonais ? Mais la « matérialité » des lames de lumière pose un grave problème, car deux faisceaux lumineux se croisent sans opposer la moindre résistance : la lumière n'est pas de même nature que la matière. Deuxième souci : les lames des sabres devraient être difficilement visibles. En effet, à la différence d'une ampoule électrique classique, la lumière d'un laser ne s'éparpille pas dans l'espace, mais reste contenue dans un faisceau dont l'angle d'ouverture est très petit. Cette excellente directivité du laser est justement l'un de ses atouts les plus précieux. Ainsi, le faisceau laser ne sera vu que si sa direction de propagation rencontre notre œil. Cette configuration est à éviter absolument, car l'intensité lumineuse d'un laser, même de faible puissance, est telle que notre rétine ne s'en sortirait pas sans dommages. Comment sortir de cette impasse ? Il faudrait qu'une partie de la lumière du faisceau laser soit forcée de sortir « sur le côté ». Une solution consiste à saupoudrer le faisceau avec de fines particules de poussière, de craie ou de farine par exemple. En diffusant la lumière, elles matérialiseront le faisceau. Ce phénomène s'observe facilement dans une pièce sombre dans laquelle pénètre un rayon de soleil : il est vu grâce à la lumière diffusée sur les côtés par les poussières qui virevoltent dans l'air. Puisque l'on distingue nettement les lames des sabres, il est possible que l'atmosphère des vaisseaux de l'Empire soit très poussiéreuse. Il est urgent que Dark Vador mette bon ordre dans cet intolérable laisser-aller ménager ! Autre possibilité : comme le sabre-laser est une puissance source de lumière, la diffusion de celle-ci sur les molécules de l'atmosphère peut rendre le faisceau visible de tout point de vue si l'ambiance est suffisamment sombre, afin que le contraste soit bon. C'est à cause de cette diffusion — dite de Rayleigh — que l'atmosphère nous paraît bleutée et que l'on voit les faisceaux lumineux des lasers shows de certains groupes de rock.

Il faut aussi résoudre un problème technique crucial : comment limiter la longueur de la lame d'un sabre ? Imaginons un duel se déroulant dans un vaisseau spatial, comme celui qui oppose Luke et Dark Vador dans l'épisode V *L'Empire contre-attaque*. Luke active son sabre dont la lame se développe jusqu'à atteindre le plafond de la pièce du duel. En effet, un faisceau lumineux se propage en ligne droite tant qu'il ne rencontre pas d'obstacle qui le réfléchisse, le réfracte ou l'absorbe. Que se passe-t-il alors ? Si le sabre-laser est aussi puissant qu'on le dit, la lame perce le plafond, puis le suivant et ainsi de suite, jusqu'à découper la coque du vaisseau. Gênant. Pour que les bretteurs galactiques ne sombrent pas dans le ridicule, il faut absolument que la lame de leur sabre ait une longueur raisonnable.

## Peut-on sauver la situation ?

Les plus bricoleurs d'entre vous ont déjà imaginé une solution : se débrouiller pour placer un miroir<sup>18</sup> en regard de l'orifice de sortie du laser, de sorte qu'il se réfléchisse en sens opposé. Bonne idée, mais comment faire tenir le miroir ? Tout simplement en le fixant à l'extrémité d'une tige télescopique qui se déroule lors de l'activation du sabre. Malheureusement, l'usage de l'arme est alors malaisé : couper en deux un droïde de combat nécessite de donner un coup de taille par la gauche, puis un autre par la droite, parce que cette tige gêne le mouvement complet. Et puis, il ne faudrait pas que la tige de support se brise, sinon la lame prendrait la longueur maximale compatible avec le lieu du combat, et adieu plafond !

Une autre solution existe. L'idée consiste à garder une lame de grande longueur tout en limitant la zone où l'intensité lumineuse serait dangereuse. Pour cela, il suffit de placer une lentille convergente — une sorte de loupe — sur la trajectoire du faisceau. Les rayons lumineux convergent alors vers le point focal de la lentille avant de poursuivre en divergeant. Au point focal, l'intensité du faisceau est bien plus élevée qu'en dehors, car tous les rayons qui le composent — donc toute son énergie — y sont concentrés. En revanche, l'intensité lumineuse est d'autant plus faible que l'on s'éloigne du foyer. Pour nous convaincre de l'efficacité de la méthode, rappelons-nous comment, par un jour bien ensoleillé, il est facile de faire brûler des feuilles sèches avec une simple loupe. Il suffit de placer cette dernière de sorte que la tache de lumière projetée sur la feuille soit la plus petite possible : la loupe concentre alors toute la lumière dans cette image du Soleil et la feuille commence à se carboniser. Et il suffit de déplacer la feuille en dehors du foyer de la loupe pour que l'effet cesse immédiatement.

La focalisation d'un faisceau laser est couramment utilisée dans l'industrie pour la découpe précise de pièces métalliques ou de plastique. Une lentille fait converger le laser sur la surface du plan à découper. En dehors de ce plan, le faisceau diverge et s'atténue rapidement. Un laser de

---

<sup>18</sup> L'idéal est d'utiliser un miroir catadioptrique, comme ceux que l'on trouve dans les dispositifs rétro-réfléchissants. Ils ont l'avantage de renvoyer en toute circonstance la lumière dans la direction exactement opposée à celle de sa direction incidente.

puissance raisonnable permet de découper des plaques métalliques de quelques centimètres d'épaisseur avec une rapidité et une précision que les Jedi envieraient. Pour améliorer notre sabre-laser, il suffirait donc de le munir d'une lentille dont la longueur focale serait de l'ordre de un mètre. Combinée avec une source laser de forte puissance, cela devrait permettre d'obtenir un faisceau lumineux d'une grande intensité sur une longueur limitée, autour du point focal de la lentille. Si cela semble pouvoir fonctionner, ce système évoque davantage un couteau qu'un sabre. Mais il permet au moins de trancher la tête d'un soldat de l'Empire sans faire un trou au plafond en même temps. Il reste néanmoins quelques menus inconvénients. Ainsi, je vous déconseille vivement de braquer votre beau couteau-laser vers une surface réfléchissante concave, comme un miroir grossissant de salle de bain : le faisceau divergent pourrait être refocalisé et endommager le « quelque chose » qui se trouve devant le miroir, peut-être vous. Je me permettrai donc de vous donner un bon conseil : évitez de vous battre avec ce truc dans une salle de bain ou une galerie des glaces...

## Une puissance phénoménale

Comme si ces problèmes ne suffisaient pas, il nous faut aussi régler le problème de la source d'énergie du sabre. Au vu des dégâts qu'il peut causer, la puissance d'un sabre-laser doit être énorme. Curieusement, il est possible de la déterminer en examinant les films. Et plus précisément, en regardant la scène d'introduction de l'épisode I *La Menace fantôme*. On y voit Qui-Gon Jinn tenter de franchir l'épaisse porte blindée que le vice-roi de la Fédération du Commerce vient de refermer pour se protéger du Jedi. Pour cela, Qui-gon plonge son sabre-laser dans la porte métallique, ce qui la chauffe intensément et finit par en fondre une partie, comme le montre clairement les images du film. Pour déterminer

la puissance dégagée par le sabre-laser de Qui-gon, il suffit d'estimer l'énergie nécessaire pour faire fondre la porte et de la diviser par la durée mise pour le faire<sup>19</sup>. Cette durée se lit facilement sur l'affichage du DVD : entre 3 et 5 secondes. La détermination de l'énergie dégagée est plus subtile. Remarquons d'abord qu'elle dépend de la masse de métal à faire fondre (plus y en a, plus c'est difficile !) et de ses propriétés thermodynamiques (le plomb fond à une température plus basse que l'or par exemple). Faute d'information sur la nature du métal, faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'acier. Toute autre métal ferait l'affaire et ses différences de propriétés modifieront un peu la valeur numérique de notre réponse sans changer le raisonnement. En revanche, si l'on reste sur le plan scientifique il est certain que la porte blindée est faite d'une combinaison des 92 atomes naturels et pas d'un matériau imaginaire dont la science-fiction est friande. Si l'on suppose donc que la porte est en acier, dont la masse volumique est d'environ 8 tonnes par mètres cube, il est facile de déterminer la masse en fusion en estimant son volume. Comment ? Par comparaison avec Qui-gon dont la taille est de 1,93 mètres ! On se convainc aisément que le volume fondu est un cylindre d'environ 1 mètre de diamètre et dont l'épaisseur doit tourner autour de 60 centimètres, comme les portes qui protègent le dépôt d'or de Fort Knox<sup>20</sup>. Cela conduit à une masse d'environ 4 tonnes d'acier fondu. Pour aboutir à la fusion, il faut échauffer le métal de la température ambiante à sa température de fusion (environ 1 500 °C pour l'acier), puis payer le coût énergétique de la fusion elle-même<sup>21</sup>. Au final, le résultat est sans appel : il faut que la sabre-laser dégage une puissance de l'ordre d'un milliard de watts, équivalente à celle d'une centrale nucléaire !

Cette puissance paraît énorme, mais il faut bien réaliser que les lasers les plus puissants — ceux qui, dans la vraie vie, sont utilisés dans la recherche scientifique, par exemple — peuvent atteindre des puissances un million de fois supérieure ! Ces valeurs monstrueuses sont émises par des laser capables de produire des impulsions ultra-courtes, dont la durée est de l'ordre de quelques femtosecondes (millionième de milliardième de seconde). Si la puissance de ces lasers est aussi élevée, c'est que l'énergie

---

<sup>19</sup> Rappelons que la puissance est le débit d'énergie, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie et la durée de sa libération.

<sup>20</sup> Une petite recherche sur le web nous apprend que l'épaisseur de la porte principale est de 21 pouces, soit 53 cm, et qu'elle pèse 20 tonnes.

<sup>21</sup> Pour faire ce calcul, il faut connaître la capacité calorifique de l'acier, de l'ordre de 470 J/kg/K, ainsi que sa chaleur latente de fusion qui vaut à peu près 270 kJ/kg.

de l'impulsion est délivrée en un temps extraordinairement bref. Ce qui est plus impressionnant dans le sabre-laser de *Star Wars* n'est pas tant la puissance qu'il est capable de délivrer, mais le fait qu'il puisse le faire en continu, pendant plusieurs secondes. Si le sabre-laser fonctionne avec une batterie, il faut que celle-ci soit capable de stocker une quantité considérable d'énergie. On imagine mal un Jedi se balader avec une centrale nucléaire sur le dos pour alimenter son sabre ! Et quand on voit l'autonomie ridicule des téléphones portables, qui font hélas des choses nettement moins ambitieuses qu'un sabre-laser, on se demande s'il existe vraiment une batterie suffisamment compacte capable d'alimenter un sabre-laser digne de ce nom. En fait, la densité d'énergie d'un sabre-laser — le rapport entre l'énergie qu'il contient et sa masse — est si énorme que le simple fait de charger sa batterie le réduirait en ses constituants atomiques ! Autre problème : si la conversion de l'énergie stockée en lumière n'est pas parfaite, la différence sera dissipée en chaleur dans le manche du sabre-laser. L'énormité de la puissance dégagée fait que, même avec une perte très minime de 0,01 %, la température du manche peut atteindre 10 000 °C ! Dans cette situation, pas facile de se battre...

Tout cela confirme que c'est bien en s'alimentant à la Force que les Jedi parviennent à utiliser leur sabre-laser. Lucas a donc raison sur ce point : seul un Jedi peut utiliser efficacement un sabre-laser. Mais la Force semble donc plutôt être un immense stock d'énergie qu'une force mystérieuse. Au lieu de « Que la Force soit avec toi ! », il faudrait plutôt dire « Que l'Énergie soit avec toi ! ».

## Le sabre-plasma

Après avoir joué mon rôle de scientifique rabat-joie, je vais maintenant tenter d'être plus constructif. Abandonnons donc l'idée du laser, puisqu'elle semble si fortement compromise, et voyons s'il est possible de concevoir une arme ayant les mêmes caractéristiques, mais en se basant sur d'autres principes. Une idée plutôt intéressante serait d'utiliser un plasma confiné par un champ magnétique astucieusement disposé. Avant d'examiner les détails techniques, voyons d'abord ce qu'est

un plasma. Souvent appelé quatrième état de la matière (les trois autres étant les états solide, liquide et gazeux), le plasma est un gaz dans lequel les atomes ont perdu un ou plusieurs de leurs électrons. Cette ionisation peut être obtenue, par exemple, en chauffant fortement ce gaz : sous l'effet de la chaleur, les collisions entre atomes deviennent si violentes que des électrons sont arrachés aux atomes. Nous sommes environnés de plasmas. Il suffit d'ailleurs d'une belle journée pour voir briller dans le ciel la plus grosse boule de plasma qu'il nous soit donné de contempler de ce côté-ci de l'univers... Les éclairs, qui résultent de l'ionisation de l'air sous l'effet de l'intense champ électrique établi entre un nuage et le sol, en sont un autre exemple, comme nous l'avons déjà vu. Dernier exemple de plasma, celui d'un tube fluorescent au néon : il contient un plasma obtenu par des décharges électriques adéquates, dont le rayonnement lumineux est utilisé pour l'éclairage. Un néon est d'ailleurs un bon moyen de bricoler un sabre-laser plus vrai que nature, avec le défaut évident pour un chevalier Jedi que, à part aveugler l'adversaire et lui même, cela n'aura guère d'effets. De plus, et cela ne vous aura sans doute pas échappé, le plasma d'un néon est contenu dans un cylindre de verre plutôt fragile. Attention aux chocs...

Premier avantage d'un plasma : comme un laser, il est relativement facile de lui donner la couleur que l'on souhaite ; il suffit pour cela de choisir habilement la température et le gaz qui fournira le plasma. Une température élevée, disons de l'ordre de 10 000 °C, donnera plutôt une couleur bleutée tandis qu'une température de l'ordre de 2 000 °C semblera plus rouge. Côté gaz, le sodium donnera une belle couleur orangée et le mercure produira une teinte plus blanchâtre. Nos Jedi n'ont donc que l'embarras du choix. Second avantage : le plasma rayonne de la lumière dans toutes les directions. Il est donc inutile de secouer la poussière des tapis des vaisseaux spatiaux pour rendre visible la lame d'un sabre-plasma.

Inutile de le cacher, l'utilisation d'un plasma chaud dans l'air ne va pas sans poser quelques problèmes. D'abord, la température du plasma doit être maintenue en permanence. Tout refroidissement fournit aux électrons et aux noyaux l'occasion de se recombiner pour former à nouveau des atomes complets, neutres, et faire ainsi disparaître l'état de plasma. Par ailleurs, il faut aussi compenser en permanence l'hémorragie d'énergie résultante de l'appréciable quantité de lumière rayonnée par le gaz, faute de quoi il se refroidirait. Enfin, il faut avoir une réserve de gaz suffisante pour produire un jet continu de plasma. Il est envisageable d'obtenir un jet d'une dizaine de centimètres de long et d'une température de 10 000 °C à partir d'un générateur d'énergie de taille raisonnable délivrant une puissance de quelques dizaines de kilowatts, à

condition toutefois de pomper plusieurs dizaines de litres d'air par minute. Dix centimètres de long, cela nous donne un couteau-laser plutôt qu'un sabre. Qu'à cela ne tienne ! Voyons du côté de l'industrie aérospatiale, qui possède une torche à plasma dont le jet mesure près d'un mètre. Cette torche fut utilisée pour tester le bouclier thermique de la défunte navette européenne Hermès. L'inconvénient de cet objet, c'est qu'il faut un générateur de six mégawatts pour l'alimenter et qu'il consomme plusieurs mètres cube d'air à chaque minute. Dernier détail : le tout pèse quelques tonnes. Pas facile à faire tenir dans une poche de Jedi... Encore une fois, remercions la Force de fournir l'énergie nécessaire au maintien du plasma.

On vient de le dire, dix centimètres de lame, c'est un peu court. Pour améliorer cet aspect, il suffit d'étirer le jet de plasma, en le forçant à épouser la forme d'une sorte de bouteille magnétique. Pourquoi utiliser un champ magnétique ? Tout simplement parce qu'un plasma est un gaz constitué de particules ayant une charge électrique (les atomes ayant perdus des électrons sont chargés positivement et les électrons sont chargés négativement) et donc sensibles à l'action d'un champ magnétique. Confiner durablement un plasma est une opération que les chercheurs tentent de réaliser en vue de contrôler des réactions de fusion thermonucléaire. Le réacteur expérimental et international ITER, en construction à Cadarache, dans le sud de la France, a précisément pour but de conduire de telles expériences. Le plasma au sein duquel doivent se produire les réactions thermonucléaires est confiné dans un champ magnétique torique, c'est-à-dire en forme de chambre à air de bicyclette. En ce qui concerne notre sabre-plasma, il suffirait d'ioniser de l'air (grâce à l'énergie empruntée à la Force, bien sûr) avant de l'injecter dans le volume de confinement de forme allongée délimité par le champ magnétique. Celui-ci serait créé par de puissants électroaimants intégrés à la poignée du sabre.

Outre le fait de confiner et de donner forme au plasma, le champ magnétique a un autre avantage décisif. Pour le comprendre, faisons une expérience. Prenons deux des aimants qui tiennent la liste des courses sur le réfrigérateur de la cuisine et approchons-les l'un de l'autre : ils s'attirent mutuellement. Retournons-en un et recommençons : maintenant, les aimants se repoussent. À quoi ce phénomène amusant est-il dû ? C'est tout simple : un aimant possède deux pôles, généralement nommés « nord » et « sud » et, si les pôles opposés s'attirent, les pôles de même nature se repoussent. Ainsi, l'aiguille de la boussole, qui est un petit aimant, pointe son pôle nord vers le pôle magnétique sud de la Terre, qui se trouve être voisin du pôle nord géographique. Si l'on considère qu'une lame de sabre-plasma est analogue à une sorte d'aimant

(en plus compliqué bien sûr !), il suffit que les polarités des deux lames soient identiques pour qu'elles se repoussent et donnent l'illusion qu'elles sont matérielles ! Évidemment, il faut qu'auparavant tous les possesseurs de sabre-plasma de la galaxie se soient mis d'accord pour adopter une polarité commune sinon, au lieu de se repousser, les lames vont s'attirer ! Le combat risque de perdre beaucoup en intensité...

Ce sabre nouvelle manière se comporterait plus ou moins comme le font les sabres-laser de Star Wars. En particulier, l'exploit de Qui Gong Jin, qui réussit à percer une épaisse porte métallique grâce à son sabre-laser, s'explique alors aisément : l'intense chaleur dégagée par le plasma fait fondre le métal. Mais le problème de la source d'énergie demeure... Pour être tout à fait juste, notons que l'avantage d'un sabre-plasma doit être quelque peu relativisé. Il est chaud et brillant, avons-nous dit. Avez-vous déjà essayé de tenir une simple torche enflammée devant vous ? Il est facile d'imaginer que la prudence soit de rigueur lorsqu'on manipule ainsi du feu. Or notre superbe sabre-plasma est au bas mot six à dix fois plus chaud que la flamme de la torche et mille à dix mille fois plus brillant. Il est inutile d'argumenter longtemps pour se convaincre de tenir le sabre loin du visage afin d'éviter de griller prématurément. La position recommandée par le manuel est de le maintenir à bout de bras, en le pointant en permanence vers l'adversaire... Dernier argument qui achèvera de nous convaincre qu'il n'est peut-être pas raisonnable de nous précipiter dans notre atelier pour construire un sabre-plasma : il n'est pas très sage de confiner magnétiquement quelque chose d'aussi chaud qu'un plasma, car, si la bouteille magnétique est perturbée, le gaz chaud pourrait bien nous arroser. Comment se débarrasser de Dark Vador ? Facile ! Il suffit de lui jeter à la figure une bonne quantité d'aimants et il est cuit ! Certains, se prétendant bien informés, affirment d'ailleurs que, contrairement à ce que l'on voit dans l'épisode III, c'est ce qui lui est déjà arrivé...

# L'Étoile de la mort

L'Étoile de la mort est le symbole de la puissance de l'Empire, l'ultime arme de destruction massive. Dotée d'une puissance de feu à même de réduire une planète en poussière, la seule terreur qu'inspire l'Étoile de la mort permet à l'Empire d'imposer son joug.

## Quelle est sa taille ?

Cette question est intéressante car, finalement, les dimensions de l'Étoile de la mort ne sont précisées dans aucun des épisodes de Star Wars. Un fin connaisseur du système solaire peut démarrer son enquête en remarquant un troublante similitude de forme avec Mimas, l'un des nombreux satellites de Saturne. La surface de Mimas est dominée par un immense cratère d'impact de 139 kilomètres de diamètre, qui n'est pas sans rappeler la cavité de l'Étoile de la mort d'où est émis son laser destructeur de planète. La ressemblance est d'ailleurs si frappante que

l'on est en droit de se demander si Mimas ne serait pas, en réalité, le vestige d'une Étoile de la mort... Si tel était le cas, cela donnerait à l'Étoile de la mort un diamètre de 396 kilomètres, identique à celui de Mimas.

Plus sérieusement, il existe des indices qui permettent d'estimer quantitativement son diamètre. Souvenez-vous : Luke Skywalker, apercevant l'Étoile de la mort pour la première fois, la confond avec une « petite lune ». Obi-Wan Kenobi et Han Solo confirment cette observation : elle est aussi grosse qu'une lune et nettement plus importante qu'une station spatiale classique. Dans notre système solaire, les lunes (c'est-à-dire les satellites des planètes) et autres astéroïdes remarquables ont un diamètre qui varie de quelques dizaines à quelques milliers de kilomètres : Cérès, le plus gros astéroïde du système solaire, à un diamètre moyen de 952 kilomètres ; Ganymède, le plus gros satellite de Jupiter, a un diamètre moyen de 5 262 kilomètres ; les plus petits satellites connus de Jupiter et de Saturne ont un diamètre d'une dizaine de kilomètres. Une comparaison très utile peut être faite entre la deuxième Étoile de la mort et la planète Endor, autour de laquelle elle orbite durant sa construction. Pour préparer leur attaque du générateur d'Endor, l'amiral Ackbar commente aux troupes rebelles une image holographique dans la salle de commandement de son vaisseau. Un habile arrêt sur image suivi d'une mesure au double décimètre permet d'estimer que le diamètre de l'Étoile de la mort est environ douze fois plus petit que celui d'Endor.

Tout pourrait s'arrêter là. Après tout, le diamètre d'Endor est une unité de longueur au même titre que le mètre, le nanomètre ou l'année-lumière. Et, dans cette unité, la réponse à la question initiale est 1/12. Cependant, force est de reconnaître que l'unité « Endor » n'est guère pratique, essentiellement parce que l'on ne peut pas la raccorder à un système d'unité usuel. Les physiciens ont mis plusieurs siècles pour s'accorder et construire un système international d'unités qui leur permette d'échanger et de comparer leurs résultats. Pour connaître la taille de l'Étoile de la mort exprimée dans ce système, il suffit de déterminer le diamètre d'Endor dans une unité déjà connue, le kilomètre par exemple.

Comment répondre à cette seconde question ? En émettant une hypothèse et en faisant un peu de planétologie comparée. La base de la discussion est raisonnable : les rebelles et les impériaux ont une

morphologie proche de la nôtre<sup>22</sup>, qui laisse supposer qu'ils sont habitués à une gravité voisine de celle de la Terre. Une fois posé sur Endor, le groupe rebelle se déplace à sa surface sans inconvénients apparents : ils ne progressent ni par bonds, comme les astronautes qui se sont posés sur la Lune, ni par une marche lourde, comme s'ils étaient écrasés par une forte gravité. Cela ne peut signifier qu'une chose : Endor est un monde dont la gravité est voisine de celle de la Terre. Nous avons trouvé la clé de la solution, qui réside justement dans la détermination de la gravité d'Endor, en établissant des comparaisons avec la Terre ou les autres planètes du système solaire.

Remarquons aussi que les rebelles ne portent pas d'appareil respiratoire. Cela signifie deux choses. D'abord, l'atmosphère d'Endor est respirable, sinon il faudrait y être pourvu d'un système autonome de respiration, comme les pompiers intervenant dans un milieu enfumé. Ensuite, sa pression atmosphérique est suffisamment forte, sinon il faudrait être doté d'un masque à oxygène, comme les alpinistes qui gravissent les plus hautes montagnes, où la pression atmosphérique peut être deux fois inférieure à celle du niveau de la mer. De quoi dépend la pression atmosphérique qui règne à la surface d'une planète ? En premier lieu, de sa gravité, qui tire et tasse l'atmosphère vers le sol, mais aussi du volume de gaz que la planète a pu préserver durant son évolution. À titre d'exemple, la planète Mars a perdu son atmosphère initiale en quelques centaines de millions d'années ; avec un rayon moitié de celui de la Terre et une masse dix fois inférieure à celle de notre planète, sa gravité de surface ne vaut que 38 % de celle de la Terre. Une vie complexe (celle des Ewoks !) ayant pu se développer à sa surface, Endor doit être une planète assez âgée : au bas mot, trois à quatre milliards d'années. Il faut donc que sa gravité ait été suffisante pour retenir une atmosphère assez dense pendant cette durée. Il faut aussi qu'elle soit dotée d'un champ magnétique, dont l'action ralentit considérablement l'échappement atmosphérique<sup>23</sup>. Enfin, la présence d'une atmosphère suffisamment dense est confirmée par le fait que nous voyons les Ewoks voler à l'aide de planeurs rudimentaires. Néanmoins, il faut que la gravité ne soit pas trop

---

<sup>22</sup> Remarquons qu'il ne peuvent pas être humains car les événements relatés dans *Star Wars* se passent il y a très longtemps, dans une lointaine galaxie...

<sup>23</sup> Le champ magnétique de la Terre limite « l'évaporation » de l'atmosphère terrestre car il piège les particules de la haute atmosphère qui sont ionisées sous l'effet du rayonnement ultraviolet du Soleil.

forte, pour que la faible surface portante de ces planeurs supporte le poids des petites créatures.

Ces multiples indices ne convergent pas vers une solution unique mais vers un intervalle des possibles. On peut alors choisir, un peu arbitrairement, une solution plausible : la gravité d'Endor est voisine des deux-tiers de celle de la Terre. Si l'on suppose que cette planète a une structure et une densité proches de celles de la Terre, disons de cinq grammes par centimètre cube, alors son rayon vaut environ 70 % du rayon de la Terre, soit à peu près 4 500 kilomètres. Cela donne à l'Étoile de la mort le diamètre respectable d'environ 750 kilomètres, compris entre ceux des deux plus gros astéroïdes du système solaire, Cérès et Vesta. Comme quoi la physique, ça peut servir ! Pour finir, estimons la masse de la chose, cela nous sera utile pour la suite. Réalisée en métal de densité ordinaire, en tenant compte du volume occupé par les espaces vides nécessaire à ses installations et à ses habitants, l'Étoile de la mort doit peser de l'ordre de  $10^{21}$  kg, soit 6 000 fois moins que la Terre...

## De quelle énergie a-t-elle besoin ?

Capable de réduire une planète en poussières, l'Étoile de la mort inspire la terreur. La première planète à en faire les frais est Alderande qui, vue de l'espace, semble être une cousine de notre Terre. Une petite enquête va nous permettre de fixer une limite inférieure à la capacité destructrice du « turbolaser » qui équipe l'Étoile de la mort.

Une planète est un corps dont la cohésion est essentiellement assurée par la force de gravitation : à cette échelle de taille et de masse, c'est cette force qui impose sa loi, bien avant les forces nucléaires, dont la portée est de l'ordre de la taille du noyau atomique, et presque à égalité avec la force électromagnétique. Détruire une planète signifie séparer toute la matière qui la compose. Pour cela, il faut donc y injecter de l'énergie, beaucoup d'énergie, au moins autant que l'énergie de cohésion due à sa propre gravité. Cette énergie de cohésion gravitationnelle est proportionnelle au rapport entre le carré de la masse de la planète et son rayon : une planète de même taille que la Terre mais deux fois plus

massive sera quatre fois plus difficile à réduire en poussière, tout comme une planète de même masse mais quatre fois plus petite. En faisant l'hypothèse qu'Alderande est une planète semblable à la Terre, son énergie de cohésion gravitationnelle est de l'ordre de  $2 \times 10^{32}$  J (la lettre J est le symbole du joule, l'unité d'énergie du système international). C'est une quantité d'énergie considérable : la production énergétique annuelle de toute l'humanité est de l'ordre de  $5 \times 10^{20}$  J. Nous ne sommes donc pas près de faire exploser notre planète, même si notre action irraisonnée nous permet d'y mettre un désordre non négligeable...

Pour produire cette énergie, l'Étoile de la mort dispose d'un générateur dont on peut estimer la puissance. En effet, dans l'épisode IV, l'Étoile de la mort fut capable de produire et de stocker cette énergie en quelques jours, durée qui semble séparer la destruction d'Alderande et la bataille de Yavin. Dans cette hypothèse, la puissance<sup>24</sup> fournie par le générateur principal doit être comparable à la puissance totale rayonnée par notre Soleil ! Une étoile dans un vaisseau de la taille d'un astéroïde ? Décidément, l'Étoile de la mort est pleine de surprises...

En fait, la valeur obtenue précédemment n'est qu'un minimum. Dans l'hypothèse où le turbolaser fournit tout juste l'énergie de cohésion gravitationnelle, les débris de la planète se répandront dans l'espace à une vitesse voisine de celle qu'une fusée aurait dû atteindre pour échapper à sa gravité. Dans le cas de la Terre, cette vitesse de libération vaut à peu près 11 kilomètres par seconde, soit environ 40 000 kilomètres par heure. Il faudra donc attendre plusieurs minutes avant de constater les effets de la frappe, et des heures pour que les débris soient raisonnablement dispersés. C'est bien connu, Dark Vador est impatient. Les jolis effets pyrotechniques qu'il aime à contempler depuis son destroyer interstellaire ne peuvent être obtenus que si le turbolaser fournit une énergie supplémentaire, nécessaire pour assurer aux débris une expansion rapide. Dans l'épisode IV, l'explosion et la dispersion d'Alderande ne prennent pas plus de deux secondes, ce qui laisse supposer que la vitesse d'expansion est bien supérieure à la vitesse de libération. En visionnant le film image par image et en supposant que la taille d'Alderande est égale à celle de la Terre, la vitesse d'expansion des parties externes de la planète peut être estimée : elle est de l'ordre de 10 000 kilomètres par seconde ! L'énergie cinétique de l'explosion est alors de l'ordre de  $10^{38}$  J, soit

---

<sup>24</sup> Rappelons que la puissance est le rapport entre l'énergie libérée et la durée nécessaire à cette opération.

500 000 fois supérieure à la limite fixée précédemment. La valeur réelle de l'énergie à fournir pourrait même être sensiblement plus élevée, car le rendement de la conversion d'énergie lumineuse du turbolaser en énergie d'expansion des débris est certainement inférieur à 100 %. Ce rendement dépend essentiellement de la façon dont l'énergie du laser est injectée dans la planète, ce qui est difficile à estimer. Gardons tout de même à l'esprit l'énormité de l'énergie minimum à fournir. La puissance que produit le générateur principal pour accumuler une telle énergie en quelques jours est tout simplement phénoménale : plusieurs centaines de milliers de fois supérieure à celle rayonnée par le Soleil tout entier... Plutôt pas mal pour un Empire qui va se faire rétamer par des oursons deux épisodes plus tard...

## D'où tire-t-elle son énergie ?

Devant l'énormité des chiffres que nous venons d'énoncer, nous sommes en droit de nous demander quel genre de processus peut bien produire une telle puissance. Inutile de penser aux réactions chimiques telles que la combustion du pétrole : il en faudrait plus de deux milliards de milliards de milliards de tonnes, 400 000 fois la masse de la Terre... Passons alors à quelque chose qui semble plus efficace. Combien de centrales nucléaires faudrait-il pour alimenter l'Étoile de la mort ? Environ quatre cents mille milliards de milliards pendant plusieurs jours. Rappelons que la France n'en possède qu'une petite soixantaine. Puisque le générateur doit produire l'équivalent de l'énergie rayonnée par plusieurs centaines de milliers de soleils, insérons une étoile idoine à l'intérieur du vaisseau de destruction massive de l'Empire. Seul problème, cette étoile doit avoir une masse de l'ordre de quarante fois supérieure à celle du Soleil. Un peu gros pour le faire tenir dans notre petite Étoile de la mort... Si les étoiles sont si brillantes, c'est avant tout parce qu'elles sont très massives et donc très chaudes.

Dernière solution raisonnablement envisageable par la pauvre technologie terrestre du XXI<sup>e</sup> siècle : faire réagir de la matière avec de l'antimatière. Le rendement énergétique de cette opération est le meilleur

possible, car cette réaction transforme toute la masse en énergie. Cet apparent tour de passe-passe résulte de la célèbre loi  $E = mc^2$  (l'énergie libérée  $E$  est égale au produit de la masse de réaction  $m$  par le carré de la vitesse de la lumière  $c$ ), énoncée par Einstein en 1905. Dans ce cas de figure, produire l'énergie nécessaire à la destruction d'Alderande revient à annihiler l'équivalent de la masse de l'Étoile de la mort avec son équivalent en antimatière... En dehors du difficile problème de stockage de cette quantité d'antimatière, n'oublions pas qu'il faudra produire préalablement cette réserve, car il n'existe aucun stock d'antimatière dans notre univers. Voilà qui devrait achever de nous convaincre (si nous ne l'étions déjà !) que la technologie de l'Empire est vraiment *très* en avance sur la nôtre.

En quittant quelque peu les chemins de la physique conventionnelle, il est possible d'esquisser une solution certes un peu tirée par les cheveux, mais tout à fait amusante : l'Étoile de la mort tirerait son énergie d'un trou noir. Facile, non ?

## Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Albert Einstein publie une nouvelle théorie de la gravitation, la relativité générale, dans laquelle il interprète la gravitation comme la manifestation de la courbure de l'espace, elle-même imposée par la répartition de matière et d'énergie. Dans ce cadre, Einstein montre que la lumière est sensible à la gravitation, c'est-à-dire à la courbure de l'espace : sa trajectoire est déviée au voisinage d'un corps massif. Cet effet de déviation des rayons lumineux fut vérifié par Arthur Eddington (1882-1944) lors d'une éclipse totale de Soleil, en 1919. La différence entre la position d'une étoile observée dans une direction voisine de celle du Soleil pendant l'éclipse et la position de la même étoile mesurée quelques temps plus tard était parfaitement en accord avec les calculs d'Einstein. Grâce à la théorie de la relativité générale, il est possible de calculer à quelle condition un astre ne laisse pas échapper sa lumière. Il suffit pour cela qu'il soit suffisamment compact, c'est-à-dire que, pour une masse donnée son rayon soit suffisamment petit. En 1915,

le physicien Karl Schwarzschild (1873-1916) a montré que l'emprisonnement de la lumière se produit quand le rayon de l'astre est inférieur à un rayon critique proportionnel à sa masse ; pour le Soleil, il vaut environ 3 kilomètres. Ce rayon délimite une frontière de l'espace-temps qui est en fait une surface indépendante de tout observateur. Purement géométrique et sans consistance matérielle, cette surface est nommée « horizon des événements », car elle partage les événements spatio-temporels en deux catégories. À l'extérieur de l'horizon, il est possible de communiquer entre deux points quelconques, quel que soit leur éloignement, grâce à des signaux lumineux ; c'est l'univers ordinaire dans lequel nous évoluons. À l'intérieur de l'horizon, les rayons lumineux ne sont plus libres de voyager entre n'importe quels points, car ils sont focalisés vers le centre. La communication est alors soumise à de sévères contraintes. Ainsi, la matière et la lumière peuvent passer du domaine extérieur au domaine intérieur, mais pas l'inverse ; c'est la justification du terme « trou noir ». Divers mécanismes naturels peuvent conduire à la formation d'un trou noir : effondrement du cœur d'une étoile très massive, au moment de son explosion en supernova ; formation de mini trou noir durant les phases très denses qui prévalaient dans les premières fractions de seconde de l'univers ; croissance par absorption de matière à partir d'un trou noir déjà formé. Les trous noirs existent vraiment. Détecté en 1965, Cygnus X-1 fut le premier objet identifié comme pouvant être la manifestation d'un trou noir. Il s'agit d'un système binaire qui serait constitué d'un trou noir en rotation et d'une étoile géante. Désormais, une vingtaine de trous noirs ont été identifiés dans notre Galaxie, dont le plus imposant — sa masse atteint 4 millions de masses solaires — est tapi au centre de la Voie lactée. Sa présence a été démontrée en 2002 par l'observation des orbites d'étoiles proches du centre de notre Galaxie.

## Un trou pas si noir que ça

Dans les années 1970, le physicien anglais Stephen Hawking (1942) a établi un résultat fondamental et inattendu à propos des trous noirs. En

leur appliquant les lois de la mécanique quantique, il a montré qu'un trou noir peut rayonner de la lumière et des particules ! Résultat en apparence contradictoire avec la définition même de cet astre...

Pour comprendre la raison de cette étonnante émission, il faut d'abord se rappeler que la physique théorique remplace les notions d'ondes et de particules par celle de champs, êtres physico-mathématiques capables de décrire tous les états possibles de la matière, quels que soient leur nombre de particules et leurs énergies. Dans ce cadre, le vide n'est plus défini comme ce qui reste quand on a tout enlevé, mais comme l'état des champs dont l'énergie est minimale, et pas forcément nulle. Par ailleurs, dans le monde microscopique, le repos absolu n'existe pas et l'énergie d'un système fluctue en permanence. Dans le cas du vide, ces fluctuations se manifestent par l'apparition fugitive de particules, dites « virtuelles », qui peuvent sortir du vide à condition d'y replonger très rapidement. En physique de l'infiniment petit, il est en effet possible « d'emprunter » une quantité d'énergie quelconque — et donc de violer la conservation de la masse-énergie — à condition de la « rembourser » assez vite. Bien qu'inobservables directement, ces particules virtuelles peuvent interagir avec les particules réelles et, par exemple, modifier leur charge électrique apparente. Bien sûr, pour conserver la charge électrique, les particules virtuelles apparaissent toujours par paires particule-antiparticule. Ce petit jeu commence à devenir amusant quand la paire virtuelle se matérialise au voisinage immédiat de l'horizon d'un trou noir. L'une des particules peut tomber dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe à l'infini. Il s'agit donc d'une matérialisation spontanée d'une particule, à partir de rien semble-t-il. Par ailleurs, les particules émises (essentiellement photons, électrons et anti-électrons — nommés positrons —, neutrinos et antineutrinos) n'ont pas toutes la même énergie. Hawking a montré que leur distribution en énergie a une forme identique à celle que suit la lumière rayonnée par un corps chaud et incandescent. Il a ainsi pu attribuer une sorte de température au trou noir, inversement proportionnelle à la masse de celui-ci. En pratique, un trou noir de quelques masses solaires a une température lamentable qui se chiffre en milliardième de kelvin, mais un tout petit trou noir d'un milliard de tonnes rayonne avec une température de l'ordre de 100 milliards de kelvins. Nous l'avons dit, du point de vue extérieur tout se passe comme si de la masse-énergie avait été créée à partir de rien. En réalité, la masse-énergie rayonnée provient de la conversion d'une partie de la masse du trou noir, qui doit donc diminuer au fur et à mesure qu'il rayonne. Il s'agit là d'un processus divergent car la température augmentant quand la masse diminue, la puissance rayonnée augmente aussi sans cesse, ce qui accélère la diminution de masse du trou noir.

Finalement, quand la puissance rayonnée devient trop grande, on dit que le trou noir « explose ».

## Extraire de l'énergie d'un trou noir

Vous voyez maintenant où je veux en venir ? En entourant un trou noir par une coquille fermée dont la face interne absorbe le rayonnement et le transforme en chaleur il est possible de récupérer l'énergie qu'il rayonne. Il faut bien sûr choisir un trou noir de masse ajustée de sorte que la puissance rayonnée soit adaptée à nos besoins. Ainsi, un trou noir d'un milliard de tonnes (masse comparable à celle d'une petite montagne) rayonne déjà la respectable puissance de 5 milliards de watt, équivalente à celle produite par 5 centrales nucléaires. Pour l'humanité entière, l'idéal serait peut-être de disposer d'un trou noir de dix millions de tonnes, dont la température supérieure à 10 000 milliards de degrés lui permet de rayonner chaque seconde une puissance comparable à celle que nous consommons dans le même temps.

Il faut toutefois d'être prudent. En rayonnant, notre trou noir perd de la masse et, devenant de plus en plus chaud, rayonne de plus en plus, avant le dommageable emballement final. Empêcher cette divergence paraît facile : il suffit de compenser la perte de masse du trou noir résultant de son rayonnement en lui faisant régulièrement absorber de la matière, n'importe quelle matière — des déchets toxiques ou des rebelles par exemple. Dans le cas d'un trou noir d'un milliard de tonnes, il faut l'alimenter au rythme de deux kilogrammes par an, tandis qu'il faut fournir presque cinq tonnes par an à un trou noir cent fois plus léger. Comme la masse du trou noir reste constante, le processus revient à transformer la masse injectée en énergie, c'est-à-dire à utiliser le trou noir comme une machine à convertir la masse en énergie. Et le tour est joué ! En pratique, le rendement n'est pas égal à 100 % car nous ne pouvons pas intercepter toutes les particules émises, notamment les très évanescents neutrinos. Le rendement est d'autant plus important que la température du trou noir est élevée car la part relative des neutrinos diminue. Ainsi, le rendement d'un trou noir de dix millions de tonnes est

voisin de 80 %, ce qui n'est déjà pas si mal, surtout comparé aux 0,7 % obtenu par fusion thermonucléaire.

Alors, que faire pour l'Étoile de la mort ? A l'époque, nous avons estimé que la puissance minimale dont elle doit disposer est 500 000 fois supérieure à celle rayonnée par notre Soleil. Pour produire cette formidable puissance, il faut disposer d'un minuscule trou noir d'une dizaine de kilogrammes qui rayonne à la faramineuse température de 10 000 milliards de milliards de degrés ! Seul problème : la puissance rayonnée est telle que la perte de masse du trou noir n'est en rien négligeable par rapport à sa masse. Du coup, la durée de vie d'un si petit trou noir est extraordinairement courte, quelques cent millièmes de milliardièmes de secondes : cela ne laisse guère le temps de s'en servir ! Pour des trous noirs plus massifs, la durée de vie augmente rapidement : dans les 500 000 ans tout de même pour un trou noir de dix millions de tonnes et supérieure à l'âge de l'univers dès que le trou noir est plus massif qu'une montagne... Une autre possibilité pour produire beaucoup d'énergie consiste à disposer d'un trou noir en rotation.

## Le tourbillon spatio-temporel

Sans surprise, la structure spatio-temporelle créée par un trou noir en rotation est assez différente de la situation précédente. Au voisinage de celui-ci, l'espace-temps est irrésistiblement entraîné par le mouvement de rotation<sup>25</sup>, un peu comme le tourbillon qui se produit lors de la vidange d'une baignoire. Dans cette situation, l'eau suit un mouvement en spirale qui se décompose en un mouvement circulaire, autour de la bonde, et un mouvement radial de chute vers la bonde. Imaginons qu'un bateau à

---

<sup>25</sup> Ce n'est qu'à une distance infinie que l'espace-temps cesse de tourner et que l'on peut attribuer une vitesse de rotation à l'horizon du trou noir. Cet effet d'entraînement de l'espace-temps a été observé grâce au satellite Gravity Probe B qui a pu précisément mesurer le très faible entraînement de son plan orbital dû à la rotation de la Terre.

moteur s'aventure près du tourbillon, son moteur ne lui permettant pas de dépasser 20 kilomètres par heure. Loin du tourbillon, là où l'eau est encore assez calme, il est évident que le pilote peut naviguer à son gré parce que, grâce au moteur, il compense aisément le très lent mouvement d'entraînement de l'eau. Le pilote peut donc maintenir son embarcation fixe par rapport à la rive sans avoir à jeter l'ancre, il peut se rapprocher ou s'éloigner un peu du tourbillon ou encore naviguer en sens contraire du courant. S'approchant du centre du tourbillon, il finit par atteindre une région pour laquelle la vitesse circulaire du courant est égale à la vitesse maximale du bateau. Plus près que cette distance critique, le bateau n'est plus en mesure de garder une position fixe, même en faisant tourner son moteur à plein régime contre le mouvement de l'eau : il est irrésistiblement entraîné dans le sens de rotation du tourbillon. Ses possibilités de manœuvres s'en trouvent réduites et les directions possibles de navigation ne sont plus quelconques : le bateau ne peut plus se diriger que dans le sens du tourbillon, à l'intérieur d'un périmètre d'autant plus restreint que le tourbillon est rapide. Le pilote peut habilement se sortir de cette situation embarrassante en orientant convenablement sa trajectoire selon une spirale sortante : il faut toujours s'éloigner du centre. Si le bateau s'aventure plus près du centre du tourbillon, il arrive aussi un moment où la vitesse radiale du courant atteint à son tour 20 kilomètres par heure, la vitesse limite du bateau. C'est là que commencent les vrais ennuis : les possibilités de navigation sont tellement réduites que le bateau n'a d'autres choix que d'être emporté vers la gueule du tourbillon, où il sera déchiqueté.

Dans un trou noir en rotation, la situation est analogue. Un vaisseau qui s'en approche subit lui aussi l'entraînement de l'espace-temps imposé par la rotation du trou noir : il acquiert un mouvement de rotation et sa trajectoire a tendance à s'enrouler dans le sens de rotation du trou noir. Ce mouvement devient inexorable à l'intérieur d'une région nommée « limite statique » à l'intérieur de laquelle le vaisseau spatial ne peut plus rester fixe par rapport aux étoiles lointaines, même si sa vitesse atteint celle de la lumière ! Plus près du trou noir, on retrouve l'horizon des événements, véritable frontière du trou noir, limite à partir de laquelle plus rien ne peut lui échapper. Cet horizon est sphérique et entièrement contenu dans la limite statique<sup>26</sup>. La région située entre

---

<sup>26</sup> Il existe un deuxième horizon, dit horizon interne. C'est à l'intérieur de celui-ci que l'on trouve la singularité centrale, qui, contrairement au cas du trou noir de Schwarzschild,

l'horizon et la limite statique se nomme « ergosphère » et joue un rôle capital dans l'extraction de l'énergie de rotation du trou noir. Le physicien anglais Roger Penrose (1931- ) a imaginé le mécanisme suivant. Depuis une distance grande par rapport à la limite statique du trou noir, tirons un projectile en direction de l'ergosphère. Ce projectile est conçu de sorte qu'il puisse se diviser en deux fragments à un moment fixé par l'opérateur. Si la trajectoire initiale est soigneusement choisie, l'un des fragments sera définitivement capturé par le trou noir tandis que l'autre ressortira de l'ergosphère et pourra être récupéré. Penrose a démontré que le projectile pouvait être envoyé de sorte que l'énergie totale du fragment qui revient soit supérieure à celle du projectile initial. Cela impose au fragment capturé de tomber sur le trou noir selon une orbite qui tourne en sens contraire de sa rotation. D'où vient l'énergie récupérée par le fragment qui s'échappe ? Du trou noir ! De son point de vue, le résultat net de l'opération est une augmentation de sa masse et une diminution de son énergie de rotation. Le trou noir en rotation joue donc le rôle d'un gigantesque stock d'énergie dans lequel il est possible de puiser si l'on est assez habile. Penrose a aussi montré que ce processus ne permettait pas d'extraire plus de 29 % de l'énergie de rotation du trou noir, ce qui n'est déjà pas si mal...

Voici donc comment l'Empire pourrait s'y prendre pour alimenter en énergie son Étoile de la mort. Il maintient au centre de celle-ci un trou noir en rotation de 1,5 centimètre de rayon, dont la masse est à peu près 3 fois supérieure à celle de la Terre. En tournant sur lui-même 320 millions de fois par seconde (si !), l'énergie de rotation récupérable est dix fois supérieure à celle d'un seul tir comme celui qui détruisit Alderande. Dans cette configuration, l'Étoile de la mort est donc une sorte de pistolet à dix coups dont chacun serait capable de détruire une planète. Pour extraire de l'énergie du trou noir, il suffit de profiter de l'immense quantité de déchets que ne manquera pas de produire la formidable garnison qui habite l'Étoile de la mort. De petites bennes contenant ces déchets sont larguées en direction du trou noir. Une fois atteint un certain point de l'ergosphère, un mécanisme automatique déclenche l'ouverture de la benne et l'expulsion de son contenu selon une orbite bien calculée : les déchets tombent sur le trou noir et diminuent légèrement son énergie de rotation tandis que la benne vide ressort de l'ergosphère avec une énergie accrue. Elle est finalement récupérée par un

---

n'est pas ponctuelle mais annulaire.

rotor auquel elle transmet son énergie, rotor lui-même lié à un générateur de courant. Glissons sur les « petits » détails techniques à résoudre... Par ce système astucieux, la masse des déchets impériaux est convertie en énergie récupérée sur l'énergie de rotation du trou noir. Triomphe de l'écologie ! Naturellement, les esprits chagrins feront remarquer qu'il reste à résoudre quelques délicats problèmes techniques. Où se procurer un trou noir, même s'il ne fait que quelques centimètres de diamètre ? Comment le maintenir en équilibre au centre de l'Étoile de la mort ? Que faire pour se protéger de son champ de gravité ? Certes. Mais n'oublions pas que les ingénieurs de l'Empire sont vraiment très forts et faisons-leur confiance...

# Les véhicules spatiaux

Dans l'univers de Star Wars, les vaisseaux spatiaux abondent et possèdent deux modes de propulsion qui leur permettent non seulement d'évoluer dans une atmosphère ou dans l'espace d'un système planétaire, mais aussi de s'en éloigner suffisamment pour faire un saut dans l'hyperespace afin de franchir les gigantesques distances qui séparent les étoiles. Dans le premier cas, la vitesse du vaisseau est relativement faible, inférieure à la vitesse de la lumière (on parle alors de « vitesse subluminaire »). En revanche, le « saut dans l'hyperespace » permet de dépasser la vitesse de la lumière afin de parcourir les distances interstellaires en quelques jours quand la lumière met plusieurs années. Voyons comment pourraient fonctionner ces deux modes de propulsion.

## La vitesse subluminique

Le moteur subluminique le plus courant de l'univers *Star Wars* est un propulseur ionique, qui équipe aussi bien les intercepteurs impériaux TIE (acronyme de *Twin Ion Engine*, que l'on peut traduire par « moteur à double flux ionique ») que les chasseurs Ailes-A de la rébellion. Il est amusant de constater que cette technologie a déjà été réellement utilisée.

La sonde Deep Space 1, lancée le 24 octobre 1998 par la NASA, avait pour mission de tester et de valider douze nouvelles technologies spatiales, dont la principale était justement la propulsion ionique. Plus récemment, le 27 septembre 2003, la sonde européenne Smart 1 quittait la Terre en direction de la Lune, qu'elle atteignit après un périple de treize mois. Enfin, la sonde Dawn avait pour mission d'étudier Vesta et Cérès, les deux principaux corps de la ceinture d'astéroïdes. Lancée en 2007, Dawn a entamé ses observations en 2011 en se plaçant en orbite autour de Vesta et les poursuit depuis début 2015, en orbite autour de Cérès. C'est grâce à ses propulseurs ioniques qu'elle a pu passer d'un astéroïde à l'autre.

Le principe du moteur ionique consiste à ioniser un gaz inerte, comme le xénon, à l'aide d'un fort courant électrique, c'est-à-dire à produire des particules chargées, les ions, au sein de ce gaz. Ensuite, un champ électrique intense accélère les ions produits qui, éjectés par une tuyère, propulsent le vaisseau dans la direction opposée à leur flux. Ce mode de propulsion est très économe : à puissances égales, un moteur ionique consomme dix fois moins de combustible qu'un moteur de fusée classique à base d'ergols. Un peu de xénon, un peu d'électricité fournie par des panneaux solaires par exemple, et le tour est joué. En revanche, la poussée est plus réduite, même si la vitesse d'éjection du gaz propulseur est bien supérieure à celle d'un moteur de fusée conventionnel. Leur poussée est même si faible qu'il n'est pas possible de faire décoller une fusée à propulsion ionique depuis la surface de la Terre. En revanche, la poussée peut être délivrée durant des années, tandis que les moteurs

classiques de fusées, plus puissants, consomment leurs ergols en quelques minutes seulement. Enfin, une fois dans l'espace, le moteur ionique permet de manœuvrer le vaisseau, contrairement aux sondes classiques dont la trajectoire n'est fixée que par les conditions du décollage et le champ de gravité dans lequel elles évoluent. Manœuvrer, c'est bien, mais il ne faut tout de même pas être trop pressé : encore une fois, les moteurs ioniques actuels ne produisent que des accélérations assez faibles et sont tout à fait incapables d'exécuter les acrobaties que réalisent les chasseurs interstellaires de Star Wars. Il n'en reste pas moins que, sur ce point, la fiction est relativement proche de notre technologie.

## L'hyperespace

Dans l'univers *Star Wars*, le moyen le plus rapide pour aller d'un point à un autre est de passer par l'hyperespace, une sorte de raccourci permettant de parcourir une distance fabuleuse en un temps ridicule. Quelle est la nature de cet hyperespace ? Pourrait-ce être un univers « parallèle » ? Il est à craindre que la réponse soit négative. En effet, les astrophysiciens définissent concrètement l'univers comme l'ensemble des choses qu'ils peuvent observer dans leurs instruments. Cet univers observable est forcément fini, car l'univers a un âge fini et la vitesse de la lumière, porteuse de l'information, est elle aussi finie<sup>27</sup>. Dans ce cadre, les univers parallèles n'ont guère de place. S'ils sont en rapport avec nous, de manière directe ou indirecte, ils font partie de notre univers observable et doivent perdre le qualificatif de « parallèles ». Si nous ne pouvons ni interagir avec eux ni les observer, on peut en parler sans craindre d'être réfutés, mais le discours à leur sujet n'a alors aucun caractère scientifique et sort du champ de la physique expérimentale.

---

<sup>27</sup> La lumière qui nous vient des confins de l'univers observable a mis 13,8 milliards d'années pour nous parvenir ce qui, en raison de l'expansion de l'univers, place la distance de la source de ce rayonnement à 42 milliards d'années-lumière.

Si l'hyperespace a du plomb dans l'aile, que peut-on imaginer qui permette d'améliorer les délais imposés par les gigantesques distances interstellaires ? En 1994, le physicien Miguel Alcubierre a proposé un moyen de déplacement original basé sur une bulle d'espace en mouvement transportant son contenu. L'intérêt de cette idée réside dans le fait que la vitesse de la bulle peut apparaître supérieure à celle de la lumière à un observateur lointain extérieur à celle-ci, alors que, localement, le voyageur ne se déplace jamais plus vite que la lumière. Voyons comment cela fonctionne.

Dans une théorie publiée en 1915, Einstein montre que la gravitation n'est qu'une manifestation de la courbure de l'espace imposée par la matière qu'il contient. Soumis à la seule action de la gravitation, les corps se déplacent d'un point à un autre en suivant une des lignes de plus court chemin, appelée « géodésique », qui n'est pas toujours une ligne droite. L'espace-temps est une entité modelée par son contenu matériel et qui, en retour, fixe la dynamique de la matière. Dans ce cadre, il existe plusieurs moyens pour diminuer le temps de parcours entre deux points. Le premier, qui est aussi le seul auquel nous pensons spontanément, est classique : il faut augmenter la vitesse. Mais avec un espace malléable, une autre solution est envisageable : il suffit de diminuer la distance à parcourir en déformant l'espace pour rapprocher la position à atteindre ! La solution proposée par Alcubierre est une bulle devant laquelle l'espace est contracté et derrière laquelle il est dilaté. Cette asymétrie locale de la géométrie de l'espace crée un mouvement sans que l'espace extérieur lointain ne soit modifié.

Tout semblait parfait jusqu'à ce que le physicien russe Sergueï Krasnikov démontre quelques années plus tard qu'il est impossible de contrôler cette bulle. La déformation de l'espace est telle qu'un signal lumineux envoyé par un voyageur situé à l'intérieur de la bulle atteint sa surface en un temps infini. Si même la lumière ne peut atteindre la surface de la bulle, c'est qu'il est, de fait, impossible de contrôler celle-ci depuis l'intérieur. En particulier, elle ne peut être ni créée, ni arrêtée. Cela est évidemment fâcheux... Krasnikov a donc proposé une autre solution : plutôt que de former une bulle, il propose de déformer l'espace dans le sillage du vaisseau au fur et à mesure qu'il progresse vers sa destination (en respectant la limite de vitesse galactique officielle !). À l'aller, à une vitesse subluminaire, le vaisseau « creuse » donc une sorte de tunnel dans l'espace-temps. Une fois son but atteint, il l'empruntera au retour. Bien construit, ce tunnel présente un intérêt majeur : pour un observateur terrestre, un voyageur qui l'emprunte peut revenir à un instant arbitrairement proche de son départ, sans toutefois pouvoir revenir avant d'être parti. Du point de vue terrestre, le voyageur semble

dépasser la vitesse de la lumière en empruntant le tunnel dans lequel l'espace a été déformé. Le voyageur mesurera, quant à lui, un temps de parcours qui sera d'autant plus court qu'il se déplacera à une vitesse proche de celle de la lumière. En ajustant la déformation de l'espace effectuée lors du voyage aller, le voyageur peut par exemple faire en sorte que les temps de voyage mesurés par un observateur terrestre et par lui-même soient égaux. Il faut bien noter que, même si le tunnel de Krasnikov permet de dépasser la vitesse de la lumière du point de vue terrestre, toute la trajectoire aller-retour est bel et bien parcourue à une vitesse localement inférieure à celle de la lumière. Pour résoudre le problème de la durée excessive des voyages interstellaires, il suffit donc d'établir un vaste réseau de ces tunnels de Krasnikov. La construction sera longue, bien sûr, car, pour le construire, il faut préalablement parcourir tout le réseau à vitesse limitée. Une autre difficulté semble plus grave : la construction d'un tunnel nécessite d'utiliser une matière dite « exotique », encore jamais détectée et qui, contrairement à la matière ordinaire, a une énergie négative. Mais une piste semble se dessiner.

L'observation de notre univers tend à prouver que, lors de son évolution précoce, il a subi une phase d'expansion accélérée au cours de laquelle une entité ressemblant à cette matière exotique était prédominante. Lors de cette phase d'inflation, deux points initialement très proches ont été éloignés exponentiellement, ce qui permet d'expliquer que notre univers nous apparaisse quasiment homogène (identique en tout point) et isotrope (identique dans toutes les directions) à grande échelle, comme le confirme l'observation du fond diffus cosmologique<sup>28</sup> réalisée par les satellites WMAP et Planck. Par ailleurs, des observations récentes semblent montrer que l'expansion de notre univers va s'accroître. Étant donné que la matière ordinaire, d'énergie positive, a tendance à ralentir l'expansion, cette accélération n'est explicable que s'il existe encore une quantité non négligeable de cette matière exotique cachée aux confins de l'univers. Si cette matière exotique existe vraiment, on peut imaginer que les scientifiques qui peuplent les mondes de *Star Wars* aient compris tant de choses sur la nature de l'espace-temps qu'ils soient capables de moissonner cette énergie négative. Quant à nous, il est à craindre que nous ne puissions pas prendre le métro interstellaire avant quelque temps...

---

<sup>28</sup> Le fond diffus cosmologique est un rayonnement lumineux émis il y a 13,8 milliards d'années, au moment où l'univers en expansion est devenu transparent à la lumière.

# Les véhicules terrestres

## Le landspeeder

À bord de son landspeeder, Luke Skywalker file au-dessus du sol de la planète Tatooine. Mais comment le landspeeder peut-il ainsi flotter en l'air sans support apparent ? L'idée la plus simple consiste à doter le véhicule d'un système à coussin d'air, comme ceux qui équipent les aéroglisseurs qui font la traversée de la Manche. Dans ce dispositif, la force qui maintient le véhicule en lévitation résulte d'un fort courant d'air soufflé vers le sol par de puissantes turbines. Pour flotter en permanence, comme le font les landspeeders, il faut bien sûr souffler de l'air en continu et le piéger par une sorte de « jupe » fixée tout autour du véhicule. Deux arguments imparables obligent à abandonner cette séduisante hypothèse. D'abord, aucune jupe n'est montée sur les landspeeders. Ensuite, les nuées de sable que le fort courant d'air devrait soulever sur la désertique planète Tatooine sont totalement absentes du film. Une autre solution consiste à utiliser un dispositif de lévitation magnétique comme ceux des Maglevs, ces trains expérimentaux japonais

qui flottent au-dessus des rails en utilisant la lévitation magnétique<sup>29</sup>. Dans ce cas, la sustentation est obtenue en opposant, dans le train et sur les rails, des aimants de polarités identiques. L'inconvénient de cette idée est patent : pour se déplacer en flottant au-dessus du sol, il faut suivre des rails magnétiques adaptés dont on ne voit nulle trace dans le sol de Tatooine. On peut aussi faire léviter des objets en les plongeant dans un champ magnétique intense ou variant rapidement dans l'espace. Ainsi, des scientifiques ont fait léviter des insectes et même une grenouille, en les plongeant dans un champ magnétique intense. Pour léviter, la grenouille devait rester à l'intérieur de la toute petite zone d'expérience. Cette contrainte est contraire au principe même du véhicule, qui est fait pour nous mener où bon nous semble.

Si les idées simples et réalisables par notre pauvre technologie du XXI<sup>e</sup> siècle ne peuvent fonctionner, il faut donc se rabattre sur un concept déjà introduit dans la science-fiction : l'antigravité. Ne serait-il pas possible d'imaginer un dispositif capable de faire écran au champ gravitationnel ? Cette idée remonte à H. G. Wells (1866-1946) qui, dans son roman *Les Premiers Hommes dans la Lune* paru en 1901, imagina la cavorite. Le mot est forgé d'après le nom du héros du roman, le docteur Cavor, qui la réalisa en « *fondant ensemble quelques métaux et diverses autres choses* ». Cette substance a la propriété singulière de se comporter comme un écran gravitationnel, à la manière d'une cage de Faraday est un écran pour les champs électromagnétiques. Opaque à la gravitation, la cavorite permet donc de construire un appareil se déplaçant par antigravitation. La physique est malheureusement très prosaïque et interdit l'existence de ce type de matériau extraordinaire bien qu'il existe effectivement des corps opaques à la lumière, aux ondes électromagnétiques ou aux rayonnements ionisants. En effet, un matériau opaque à la gravitation permettrait de fabriquer une machine à mouvement perpétuel. Il suffirait par exemple d'en placer un morceau sous la moitié d'une roue. Celle-ci se mettrait aussitôt à tourner du seul fait de l'annulation de son poids apparent du côté masqué à la pesanteur par l'écran-miracle !

S'il est impossible de masquer le champ gravitationnel, il reste en revanche possible de créer un champ qui s'oppose localement la gravité de

---

<sup>29</sup> Le seul maglev vraiment rapide en service est celui assurant la liaison centre ville-aéroport à Shanghai, sur une ligne de 30 km, à la vitesse moyenne de 251 kilomètres par heure.

la Terre. Pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif, constatons d'abord qu'il y a une grande similarité entre le champ électrique et le champ gravitationnel. Ainsi, le champ électrique d'une charge ponctuelle est radial (c'est-à-dire qu'il rayonne dans toutes les directions) et proportionnel à la valeur de la charge électrique et à l'inverse du carré de la distance à la charge. Nous savons, grâce à Newton, que le champ gravitationnel d'une masse ponctuelle se comporte de façon semblable : il est radial et proportionnel à la masse et à l'inverse du carré de la distance à la masse. Dans la théorie électromagnétique, le champ électrique est toujours complété par un champ magnétique. Pourquoi ne pas pousser l'analogie jusqu'au bout et compléter la théorie classique de la gravitation en adjoignant au champ de gravité un nouveau champ, analogue au champ magnétique ?

En électromagnétisme, le champ électrique trouve sa source dans les charges électriques, et le champ magnétique est créé par un déplacement de ces charges. Ce phénomène fut découvert en 1820 par le physicien danois Hans Christian Ørsted (1777-1851), qui constata que l'aiguille d'une boussole était déviée par un courant électrique. Notons au passage que cela implique que champ électrique et magnétique ne sont pas aussi différents qu'on le pense. Une charge produit donc un champ électrique et, mise en mouvement, elle crée aussi un champ magnétique qui n'est perçu que par les observateurs voyant la charge en mouvement. Le champ magnétique n'est donc pas un champ différent, mais un champ électrique vu depuis un référentiel en mouvement.

Fort de l'analogie entre champs électrique et gravitationnel, osons hardiment affirmer l'existence d'un champ qualifié de « gravitomagnétique », couplé au champ gravitationnel comme le champ magnétique l'est au champ électrique : il trouve son origine dans les mouvements de la matière. L'existence de ce champ peut aussi être fondée sur une base plus solide que celle qu'offre notre analogie. La théorie de la gravitation mise au point par Einstein au début du XX<sup>e</sup> siècle généralise en effet celle de Newton : elle la contient, celle de Newton se comportant comme un cas limite, celui dans lequel le champ gravitationnel est faible et les mouvements se font à des vitesses petites par rapport à celle de la lumière. Ces simplifications appliquées à la théorie d'Einstein conduisent aussi à l'apparition de termes de faibles amplitudes, qui se comportent à la manière du champ magnétique en électromagnétisme. Ainsi, un courant de matière engendre un champ gravitomagnétique qui exerce une force sur les masses, comme le champ magnétique le fait sur les charges. Par exemple, la rotation de la Terre crée un champ gravitomagnétique qui entraîne faiblement le mouvement d'un corps en orbite. Cet effet fut prédit en 1918 par les physiciens autrichiens Joseph Lense (1890-1985)

et Hans Thirring (1888-1976) et a été observé grâce au satellite Gravity Probe B qui a pu précisément mesurer le très faible entraînement de son plan orbital dû à la rotation de la Terre.

En 1831, le physicien anglais Michael Faraday (1791-1867) découvre l'induction électromagnétique en montrant qu'un champ magnétique variable dans le temps engendre aussi un champ électrique. C'est sur ce principe que repose le fonctionnement des plaques de cuisson à induction, dans lesquelles circule un courant électrique variable. Cette idée peut aussi être utilisée pour arriver à nos fins : un courant de matière variable dans le temps crée un champ gravitomagnétique variable qui induira un champ gravitationnel. Comment mettre cela en pratique ? Facile ! Remplissons de matière un tuyau adoptant la forme d'une spirale se refermant sur elle-même, un solénoïde torique disent les savants. La matière accélérée dans le solénoïde engendre un champ gravitomagnétique variable qui induit un champ gravitationnel. Correctement orienté, ce dispositif s'oppose au champ terrestre et, si le tout est bien calculé, le champ gravitationnel induit annule le champ terrestre : le landspeeder lévite ! Passons maintenant aux mauvaises nouvelles. Quelle matière mettre dans le tube ? Vu la faiblesse du champ induit par de la matière ordinaire, il faut absolument prendre quelque chose de vraiment dense, genre matière d'étoile à neutrons par exemple. Cela risque de poser problème, car la matière d'une étoile à neutrons ne peut conserver sa fantastique masse volumique — des milliards de tonnes par centimètre cube — que si elle reste confinée par l'énorme gravité de l'étoile. De plus, il faut que l'accélération soit tellement énorme que la matière contenue dans le tube atteindrait la vitesse de la lumière en quelques millièmes de secondes... La prouesse ne durera donc guère longtemps. Et n'oublions pas : à ces difficultés pratiques s'ajoute le prix prohibitif du kilo d'étoile à neutrons sur les marchés de la Bordure Extérieure...

## Le quadripode AT-AT

Les quadripodes de combat font aussi partie des véhicules marquants de la saga *Star Wars*. Énormes éléphants mécaniques, leur taille immense et leur puissance frappent l'ennemi de stupeur, comme les éléphants d'Hannibal stupéfièrent les troupes romaines à la bataille de Cannes. La comparaison s'arrête là car, contrairement aux éléphants, les quadripodes n'avancent qu'une seule patte à la fois. Leur taille est gigantesque et peut être estimée en se fondant sur une séquence de l'épisode V où l'on voit clairement Luke Skywalker grimper le long d'un câble pour attaquer l'un de ces monstres. Un arrêt sur image et un double décimètre montrent que, quinze fois plus grand que le héros, le quadripode doit dépasser 25 mètres de hauteur. Si l'on exclut la terreur qu'ils peuvent inspirer, il est permis de douter que ces engins soient de bonnes machines de combat. D'abord, ils sont trop hauts sur pattes. L'essentiel de la masse étant concentrée dans le « corps », leur centre de gravité est placé bien loin du sol. Un quadripode est donc facile à renverser — ce dont les rebelles ne se privent pas avec leurs câbles — et ne doit pas être bien commode à conduire sur un terrain un peu trop accidenté. Par ailleurs, les articulations des membres sont autant de points faibles que les intercepteurs rebelles peuvent atteindre pour immobiliser l'engin. Enfin, leur taille les contraint sûrement à une mobilité réduite et une attaque par l'arrière ne peut être supportée que grâce à un blindage très épais, qui augmente d'autant le poids de la bête. Avec une taille et une masse si considérables, une chute ne peut avoir que des conséquences catastrophiques. Comme on le voit, les ingénieurs de l'Empire n'ont pas que des bonnes idées...

# Les planètes

Qu'elle soit proche ou lointaine, abritant la vie ou totalement stérile, la planète est l'un des éléments incontournables de nombreuses histoires de science-fiction. Si la façon la plus classique d'en construire une peut se résumer en un décalque de la Terre (auquel on ajoutera quelques éléments exotiques pour faire bonne mesure), il faut bien reconnaître qu'imaginer une planète originale et parfaitement crédible est un travail considérable. Il faut créer de toutes pièces une géographie et ses climats, une faune et une flore, sans même parler d'une société complète, avec ses habitants et leurs interactions. Pour rendre l'ensemble cohérent, chaque point doit être étudié attentivement, à commencer par les paramètres physiques attribués à la planète en question. Par exemple, sa masse et sa taille imposeront l'intensité de la gravité de surface qui, entre autres choses, limitera la hauteur maximum des montagnes, de la végétation, des êtres vivants, la densité de l'atmosphère ou la vitesse des vents — il est ainsi physiquement regrettable qu'une planète à forte gravité abrite des animaux géants ou, inversement, qu'une planète de petite taille ait une atmosphère aussi dense que celle de la Terre. Mais la spécificité d'une planète, le trait qui lui réserve une place particulière dans notre imaginaire, c'est la possibilité qu'elle puisse abriter la vie. De ce point de vue, la découverte de Kepler 186f, une planète de taille terrestre située dans la zone habitable de son étoile, vient nous rappeler que la perspective de la découverte d'exoplanètes semblables à la Terre, ayant de l'eau sous forme liquide et donc un milieu potentiellement

favorable à l'apparition de la vie telle que nous la connaissons, est sans doute le moteur le plus puissant de la recherche exoplanétaire. A cette aune-là, que peut-on dire des planètes de la science-fiction ? Sont-elles plausibles ? Peut-on déterminer leurs caractéristiques ? Menons l'enquête et décortiquons quelques-unes des plus emblématiques de la galaxie *Star Wars*.

## Quelle est l'orbite de Tatooine ?

La plus célèbre planète de la saga est sans aucun doute Tatooine, repère de brigands galactiques de tout poil sur lequel règne le fameux et puissant Jabba le Hutt. Vous avez sûrement remarqué que cette planète a pour particularité de posséder deux soleils. Force est de constater que cette propriété n'est pas si improbable qu'on pourrait l'imaginer : les étoiles doubles sont en effet légion dans notre Galaxie, les deux tiers des étoiles visibles à l'œil nu faisant partie d'un système double ou multiple. Le problème n'est donc pas de trouver une étoile double, mais de comprendre quelle peut être l'orbite de Tatooine dans un tel système.

Pour commencer, Tatooine pourrait tourner autour d'un seul de ses deux soleils. Cette situation est tout à fait envisageable car l'étoile 16 Cygni B possède une planète géante alors que son compagnon, 16 Cygni A en est dépourvu. Pourtant cette hypothèse est peu vraisemblable car, dans l'épisode IV de *Star Wars*, Luke Skywalker voit se coucher en même temps les deux soleils de Tatooine, avec des tailles apparentes comparables. Si Tatooine tournait autour d'un seul de ses soleils, celui-ci devrait avoir une taille apparente plus importante que son compagnon, plus éloigné, si l'on suppose leurs tailles réelles comparables. En revanche, si elles n'ont pas la même taille réelle, la planète la plus éloignée doit, pour avoir la même taille apparente que la proche, être celle qui a la plus grande dimension. Ce serait le cas par exemple si la seconde étoile était une géante rouge, dont le rayon se compte en dizaines, voire centaines, de rayons solaires. L'inconvénient de cette hypothèse est que les étoiles géantes ont une durée de vie de quelques dizaines de millions d'années tout au plus, soit nettement moins que les

étoiles communes, comme notre Soleil, qui peuvent durer des milliards d'années. La fin de vie — souvent explosive — de cette énorme étoile serait incontestablement fâcheuse pour les planètes alentours...

Une autre possibilité est de placer Tatooine à l'un des points de Lagrange L4 ou L5 des deux étoiles. Les points de Lagrange, ainsi nommés en l'honneur de leur découvreur, l'astronome français Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), désignent les cinq positions pour lesquelles la force de gravité des deux astres est exactement compensée par la force centrifuge due au mouvement orbital d'un objet qui s'y trouverait placée<sup>30</sup>. Les trois premiers de ces points, L1, L2 et L3, placés exactement sur la ligne joignant les centres des deux étoiles, correspondent à des positions d'équilibre instable. Autrement dit, un astre qui se trouve en un tel point s'en éloignera indéfiniment sous l'effet de la moindre perturbation : une planète ne peut donc y demeurer durablement. Les deux autres points, L4 et L5, qui forment chacun un triangle équilatéral avec les deux étoiles, correspondent, eux, à des positions d'équilibre stable. Autrement dit, un corps placé en l'un de ces points y demeure, même s'il subit une petite perturbation. Par exemple, les points L4 et L5 du système Soleil-Jupiter abritent des astéroïdes, les Troyens. Cette solution ne peut cependant être envisagée pour Tatooine car, si tel était le cas on devrait toujours voir, depuis sa surface, les soleils jumeaux séparés de 60°, mesure des angles d'un triangle équilatéral. Les directions voisines des soleils lors de leur coucher observé depuis la surface de Tatooine oblige à ignorer cette possibilité.

En définitive, il est plus probable et plus raisonnable que l'orbite de Tatooine englobe ses deux soleils à la fois. Ce genre d'orbite est stable si la distance qui sépare la planète de ses soleils est au moins quatre fois plus grande que celle qui sépare les deux étoiles. Tout se passe alors comme si, du point de vue gravitationnel, les étoiles ne faisaient qu'une. Dans cette configuration, on peut même estimer le rayon de l'orbite de Tatooine. Les deux étoiles sont probablement assez semblables à notre Soleil : l'une est jaunâtre l'autre tire plus vers l'orange, laissant supposer qu'elle est un peu plus froide. Si les deux étoiles sont trop proches l'une de l'autre, elles doivent être déformées par leurs gravités mutuelles : leur forme devrait alors être celle d'une sphère déformée par les forces de marée. Comme on ne voit à l'œil nu aucune déformation lors du coucher

---

<sup>30</sup> Pour les physiciens, ce raisonnement est mené dans le référentiel en rotation avec les deux étoiles.

des étoiles, cela implique, après calcul, que leur distance doit être supérieure à une dizaine de millions de kilomètres. L'estimation de la séparation angulaire des étoiles lors de leur coucher nous permettra de préciser le rayon de l'orbite de Tatooine. Si l'on suppose que le diamètre apparent des deux étoiles est voisin de celui de notre Soleil, soit  $0,5^\circ$ , la séquence du film permet d'estimer que leur séparation est de l'ordre de  $3^\circ$ . Voici un exemple d'emplacement cohérent pour une planète désertique comme Tatooine : à deux cent millions de kilomètres, une planète aurait une orbite stable et verrait ses soleils séparés d'au plus  $3^\circ$ . Elle recevrait 12 % d'énergie en plus de celle que reçoit la Terre du Soleil, expliquant ainsi la température élevée qui règne à sa surface. Son année serait alors égale à 1,1 année terrestre et l'on devrait pouvoir y observer d'intéressants effets de marées ainsi que de spectaculaires éclipses...

Un dernier point : ne vous abandonnez pas à un romantisme béat lorsque vous reverrez le célèbre coucher du double soleil de Tatooine : n'oubliez pas que nous sommes bel et bien dans un film de fiction. La preuve ? Observez le sol aux pieds des habitants de la planète : on n'y voit qu'une seule ombre !

## Hoth, un monde de glace

Au début de l'épisode V, l'alliance rebelle s'est réfugiée sur la planète Hoth située dans la Bordure extérieure. C'est à la surface glacée de cette planète hostile, sans cesse fouettée par de violents blizzards, que les Rebelles ont construit une base secrète, finalement prise d'assaut par les forces de Dark Vador. Pour les géologues, la planète Hoth, aussi fictive soit-elle, n'est pas sans rappeler la Terre d'il y a plus de 650 millions d'années. En effet, d'après le célèbre modèle nommé *snowball earth* (« Terre boule de neige », qu'il serait plus juste de remplacer par « Terre boule de glace »), la Terre aurait subi plusieurs épisodes de glaciation plus ou moins intenses il y a entre 850 et 635 millions d'années, une période nommée Cryogénien. Si l'idée d'une glaciation globale a d'abord été avancée par le géologue australien — et grand

explorateur de l'Antarctique — Douglas Mawson en 1949, le modèle «Terre boule de glace» a été largement développé et argumenté par les géologues américains Joseph Kirschvink et Paul Hoffman dans les années 1990, pour expliquer la présence de roches sédimentaires d'origine glaciaire (nommées diamictites) à des latitudes proches de celles de l'équateur. S'il demeure assez consensuel, ce modèle est cependant discuté par des géophysiciens qui pensent que la Terre n'aurait pas pu sortir d'une situation glacée aussi stable, ou que la quantité d'eau n'était pas suffisante pour recouvrir toute la surface terrestre d'une couche de glace continue. Les débats se concentrent donc plutôt sur la superficie et l'extension de cette hypothétique croûte de glace.

Le Système solaire contient plusieurs corps glacés, comme Europe, un satellite de Jupiter dont la température de surface avoisine  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Environ quatre fois plus petit que la Terre, ce satellite est entièrement recouvert d'une croûte de glace dont l'épaisseur est estimée à quelques dizaines de kilomètres. Cette calotte glaciaire couvrirait un océan liquide profond d'environ 90 kilomètres. De nombreux indices confirment l'hypothèse d'eau liquide. En surface, la glace striée et craquelée présente de nombreuses lignes, sortes de dépressions rectilignes interprétées comme des fossés d'effondrement. Ces structures témoigneraient d'une tectonique glaciaire importante et active, comme c'est le cas de la banquise terrestre qui flotte sur l'océan. Par ailleurs, des geysers d'eau ont été récemment détectés sur Europe. On retrouve une structure similaire sur Encelade, un satellite de Saturne. Comme ces deux satellites sont petits, l'eau n'atteindrait pas une pression suffisante pour devenir solide en profondeur. Le fond de l'océan serait alors en contact avec un manteau silicaté. À cette interface, une chimie complexe pourrait se développer, renforçant l'espoir — loin d'être confirmé — que des formes de vie dites extrémophiles, comparables à celles que l'on trouve dans les dorsales océaniques terrestres ou dans les lacs subglaciaires d'Antarctique<sup>31</sup>, pourraient apparaître. Pour bon nombre d'exobiologistes, Europe et Encelade sont les meilleurs candidats à la présence de vie dans le Système solaire. Un nouveau programme rassemblant les agences spatiales européenne, américaine, japonaise et russe, est envisagé à l'horizon de 2020 pour explorer les lunes glacées de Jupiter. La dernière

---

<sup>31</sup> Le plus grand des 140 lacs subglaciaires de l'Antarctique est le lac Vostok, situé à environ 4 000 mètres sous la surface de la glace.

sonde en date ayant visité Jupiter et ses satellites est Galileo, restée en orbite autour de la géante gazeuse entre 1995 et 2003...

Au Cryogénien les océans terrestres abritent déjà quantité d'algues et de bactéries mais aucune vie n'est encore présente sur le supercontinent de l'époque, la Rodinia. Ce n'est pas le cas de la planète Hoth qui est peuplée d'animaux plus complexes et visibles comme les wampas, sortes de yétis au pelage blanc, et dont un spécimen donne du fil à retordre à Luke Skywalker. Le film suggère aussi que ces prédateurs carnivores se nourrissent d'autres animaux que sont les tauntauns, des bipèdes cornus, mi-bélier mi-dinosaure, domestiqués par les rebelles qui en font des montures pour les patrouilles de surface. L'écosystème de Hoth est donc plus complexe que celui de la Terre au Cryogénien car il contient des organismes de surface. Sur Terre, il faut attendre la fin du Silurien, il y a 420 millions d'années environ, pour voir apparaître les premiers réseaux trophiques continentaux : ceux-ci sont alors composés de plantes et d'arthropodes terrestres (mille-pattes, proto-scorpions, etc.), auxquels il faut rajouter les fameux stégocéphales (amphibiens fossiles) au début du Carbonifère, il y a 360 millions d'années environ.

Sur Hoth, les wampas mangent des tauntauns, c'est entendu. Mais que mangent ces derniers ? Probablement de l'herbe, ce qui trahit la présence de steppes plus ou moins étendues et sous-entendant que la glaciation de Hoth n'est pas totale. C'était sans doute aussi le cas de notre « Terre boule de glace ». En outre, ces herbivores sont à sang chaud : on se souvient que pour éviter que Luke Skywalker ne tombe en hypothermie et ne meurt de froid, Han Solo, alors prit dans un violent blizzard, sacrifie sa mouture et glisse son ami dans la dépouille encore chaude en attendant les secours. Avec de tels êtres évoquant des mammifères, la faune de Hoth rappelle plutôt celle de la dernière glaciation terrestre, qui s'est produite en entre -110 000 et -10 000 ans. À cette époque, les rhinocéros laineux côtoyaient les mammouths, et les chasseurs-cueilleurs pouvaient joindre à pied l'Eurasie et l'Amérique du Nord grâce à une calotte glaciaire recouvrant alors toute une partie de l'hémisphère Nord. Les animaux de la planète Hoth, avec leur sang chaud et leurs fourrures, semblent donc bien adaptés aux températures extrêmes.

## Voyage au centre de Naboo

L'épisode I *La Menace fantôme* nous fait découvrir la planète Naboo et les Gungans, un peuple étonnant, dont Jar Jar Binks est le plus célèbre représentant. Voilà une civilisation qui utilise des bêtes de somme pour le transport, des lances et des catapultes en guise d'armes de combat, mais dont la capitale est une incroyable cité sous-marine. En outre, celle-ci est certainement située à une grande profondeur, car la lumière du soleil de Naboo ne parvient pas à l'illuminer. Et pour cause : la lumière visible est fortement absorbée par l'eau : une faible fraction atteint 100 mètres de profondeur et la nuit noire règne au-delà de 500 mètres. C'est pourquoi les quelques tentatives humaines pour implanter une base sous-marine permanente ont toujours privilégié une faible profondeur, de l'ordre de 10 à 20 mètres, afin de profiter de la lumière solaire.

Située à une grande profondeur, la cité Gungan offre au visiteur le spectacle féérique de milliers de lumières illuminant sa nuit perpétuelle. Pour se protéger de la pression considérable qui règne à ces profondeurs (au bas mot plusieurs dizaines de fois supérieure à celle qui règne à la surface de la planète), les Gungans disposent d'un bouclier plutôt énigmatique : bien qu'il soit totalement étanche à l'eau environnante, le corps humain, composé à 70 % d'eau, peut le traverser sans difficulté. Le même type de bouclier est utilisé lors de la bataille qui, dans les plaines de Naboo, oppose les Gungans aux forces de la Fédération du Commerce. Là encore, le mystère est total : le bouclier, transparent à la lumière du soleil de Naboo, reste imperméable aux projectiles des tanks et des droïdes de la Fédération. Et alors qu'il est capable d'arrêter de puissants tirs d'assaut, il peut être traversé à pied par un droïde de combat. La technologie des Gungans est décidément pleine de surprises ! Et la physique du XXI<sup>e</sup> siècle est bien loin d'être à même de savoir comment on pourrait construire un tel bouclier de protection...

La structure de la planète recèle aussi une belle surprise. Pour se rendre de la cité Gungan à la capitale de Naboo, Anakin Skywalker et

Qui-Gon Jinn empruntent un raccourci sous-marin qui passe par le « noyau de la planète ». Or il semble fort improbable que nos valeureux amis soient réellement passés par le centre de la planète Naboo : les régions internes d'une planète ne sont pas remplies d'eau, mais de roche en fusion ; au centre de la Terre règne une pression trois cent milliards de fois supérieure à celle de la surface et la matière reste solide malgré une température de 5 800 °C, identique à celle de la surface du Soleil ! Difficile d'imaginer un raccourci passant par un tel endroit... Il est donc probable que le nom du trajet emprunté par les Jedi fasse allusion aux profondeurs abyssales que doit atteindre leur sous-marin, ce qui laisse imaginer que l'on se rapproche du centre de la planète. De ce point de vue, la situation est similaire à celle du professeur Lidenbrock qui, dans *Voyage au centre de la Terre*, atteint des profondeurs plus modestes que celles que suggère le titre du roman de Jules Verne.

## Les anneaux de Geonosis

Dans l'épisode II *L'Attaque des clones*, Obi-Wan Kenobi approche de la planète Geonosis alors qu'il est à la poursuite du chasseur de prime Jango Fett. Ils pénètrent alors dans la ceinture d'astéroïdes entourant la planète. Au premier abord, cet anneau paraît fort semblable à celui que l'on trouve, dans notre système solaire, non seulement autour de la planète Saturne, mais aussi autour des trois autres géantes gazeuses que sont Jupiter, Uranus et Neptune.

Pourtant, certains détails clochent. Obi-Wan et Jango Fett doivent en effet faire des prouesses de pilotage à bord de leurs vaisseaux pour éviter de percuter l'un des énormes blocs rocheux de la ceinture planétaire, ce qui semble logique. Mais avec un environnement tellement dense, pourquoi n'assiste-t-on pas à de nombreuses collisions entre blocs ? Celles-ci auraient un double effet. D'abord, les rochers se fragmenteraient sous le choc, ce qui aurait pour conséquence de faire diminuer leur taille moyenne ; petit à petit, les énormes blocs seraient réduits en fine poussière. Ensuite, certains des débris quitteraient leur orbite sous l'effet des nombreuses perturbations gravitationnelles induites

par leurs voisins, soit en s'échappant définitivement de l'attraction de la planète Geonosis, soit, au contraire, en y tombant à grande vitesse.

Les images du film permettent d'estimer la densité et la taille des astéroïdes de la ceinture de Geonosis et donc la fréquence de leurs collisions<sup>32</sup>. La conclusion est impitoyable : en quelques mois la majorité des objets de l'anneau de Geonosis devraient avoir atteint une taille variant de celle d'une poussière à celle d'un gros caillou. C'est d'ailleurs ce que l'on observe dans les anneaux de Saturne, constitués de particules dont la taille varie du centimètre au mètre. De plus, le diamètre respectable de ces anneaux (plus de 250 000 kilomètres) ne doit pas faire oublier que leur épaisseur ne dépasse guère 1 kilomètre. Cela explique que les quelques sondes interplanétaires qui les ont traversés n'aient subi aucun dommage.

Quelle peut être l'origine de l'anneau de Geonosis ? Concernant les anneaux de Saturne, la réponse fut apportée au XIX<sup>e</sup> siècle par Édouard Roche (1820-1883). Il proposa que les anneaux soient le produit de la destruction d'un ancien satellite de la planète par les forces de marées : trop près de Saturne, la différence entre la force d'attraction que la planète exerce entre deux points extrêmes du satellite est supérieure à la force de cohésion du satellite et celui-ci est brisé. Cette situation s'est déjà produite en juillet 1992, quand la comète Shoemaker-Levy 9 passa à 20 000 kilomètres de Jupiter. Elle fut alors brisée en 21 fragments dont le plus gros mesurait deux kilomètres de diamètre. Ces fragments se dispersèrent le long de la trajectoire cométaire et entrèrent en collision avec Jupiter les uns après les autres en juillet 1994. On pense que cette situation se produira dans moins de 30 millions d'années avec Phobos, un des deux satellites de Mars.

Certains anneaux de Saturne, essentiellement constitués de poussières, posent un problème particulier. Les particules qui les constituent sont si petites qu'elles sont sensibles non seulement à la gravitation de la planète, mais aussi à la pression du rayonnement solaire. Or cette force supplémentaire les élimine rapidement, ce qui impose que, pour perdurer, les anneaux en question soient alimentés en permanence, par exemple par de la matière issues des satellites. Cela indique que les

---

<sup>32</sup> La fréquence de collision est égale au produit de la section géométrique des astéroïdes par leur densité numérique et par leur vitesse relative moyenne. Les deux premiers paramètres peuvent être estimés par comparaison avec la taille du vaisseau d'Obi-Wan Kenobi et le dernier se déduit d'une hypothèse raisonnable sur l'altitude à laquelle est située cet anneau.

anneaux de Saturne sont relativement jeunes et qu'ils ont peut-être été détruits et reformés plusieurs fois durant la vie du Système solaire. Du coup, si la ceinture de Geonosis contient encore de gros débris, c'est qu'elle est de formation très récente — un ou deux mois tout au plus — car les collisions entre débris n'ont pas encore eu le temps de produire leurs effets. On peut alors émettre l'hypothèse suivante : Geonosis avait un petit satellite naturel dont la destruction a engendré ses anneaux. La cause de cette destruction pourrait être les forces de marée de la planète, mais ce serait une coïncidence extraordinaire qu'Obi-Wan Kenobi arrive tout juste après cet événement. Il est plus probable que les ingénieurs du peuple insectoïde qui domine Geonosis, responsable de la conception du turbolaser qui équipe l'Étoile de la mort, aient testé leur invention sur leur satellite naturel !

## Kamino, une planète océan

Dans l'épisode II *L'Attaque des clones* Obi-Wan Kenobi mène une enquête à travers la galaxie pour localiser une armée secrète. Il se rend alors sur la planète Kamino, un monde entièrement recouvert d'eau et lieu de vie des Kaminoans, de brillants scientifiques ayant mis au point des techniques de clonage très sophistiquées. Est-il possible d'imaginer une planète-océan comme Kamino ? Même si l'on dispose d'assez peu d'informations sur les caractéristiques des 2 000 exoplanètes découvertes jusqu'à présent, cela n'a pas empêché les astrophysiciens d'imaginer à quoi elles pourraient ressembler. Le premier à avoir sérieusement envisagé la possibilité d'une planète complètement recouverte d'eau est le l'astrophysicien français Alain Léger.

Pour former une planète-océan, les chercheurs ont proposé un scénario fondé sur l'évaporation d'une géante gazeuse de la taille de Neptune, qui se serait formée près de son étoile. Cette possibilité semble plausible si l'on en croit la répartition des planètes extrasolaires découvertes à ce jour. Une fois l'épaisse atmosphère évaporée sous l'effet du rayonnement de l'étoile, une partie du manteau de glace aurait fondu, entraînant la formation d'un immense océan dont la profondeur moyenne

atteindrait vingt-cinq fois la profondeur moyenne des océans terrestres. La pression au fond de celui-ci resterait suffisante pour qu'une partie du manteau demeure à l'état solide<sup>33</sup>. Selon les calculs, la structure interne d'une planète aquatique consisterait en un noyau métallique d'un rayon d'environ 4 000 kilomètres ; au-dessus, un manteau rocheux d'une épaisseur de 3 500 kilomètres, puis un second manteau constitué de glace et pouvant atteindre une épaisseur de 5 000 kilomètres, le tout étant recouvert d'un océan d'une centaine de kilomètres de profondeur. D'après ce scénario, une planète-océan pourrait donc être environ deux fois plus grande et six fois plus massive que notre planète. Elle serait séparée de son étoile d'une distance voisine de celle qui sépare la Terre du Soleil et sa gravité de surface serait 1,5 fois supérieure à celle de notre planète. Cela ne ressemble pas à la planète Kamino. En effet, l'épisode II permet de conclure qu'elle est dotée d'une gravité plutôt faible, ce qui permet aux créatures au long cou de maintenir leur tête en équilibre sans trop de peine. Étant donné l'avance technologique de ces êtres, il est aussi envisageable de penser qu'ils puissent agir sur la gravité de leur habitat ; mais cette hypothèse est probablement à rejeter car, dans ce cas, Obi-Wan aurait été surpris par le changement de pesanteur en arrivant sur leur plate-forme.

Si la possibilité d'une planète-océan a été sérieusement envisagée c'est que l'eau est un élément essentiel au développement de la vie telle que nous la connaissons. L'une des propositions sur l'origine de la vie est fondée sur la présence de sources chaudes dans les fonds océaniques, consécutives à une activité volcanique comparable à celle donnant naissance aux sources hydrothermales que l'on trouve dans les profondeurs des océans terrestres. Sur une planète-océan cette possibilité semble devoir être abandonnée, car plusieurs milliers de kilomètres de glace séparent le fond de l'océan de toute source hydrothermale potentielle.

---

<sup>33</sup> En effet, lorsque la pression augmente, la température de fusion augmente également.

## Mustafar, la planète infernale

Le duel final de l'épisode III *La Revanche des Siths*, opposant Obi-Wan Kenobi à Anakin Skywalker, se déroule dans le décor grandiose et incandescent de la planète Mustafar. Couverte de volcans en éruption et de fleuves de lave, Mustafar est une bonne approximation de l'enfer. Peut-on envisager l'existence d'une telle planète ?

Mustafar ressemble peut-être à ce qu'a été la Terre primitive, entre 4,56 et 3,8 milliards d'années dans le passé. Son histoire reste mal connue car les roches formées durant cette période sont très rares à la surface de la Terre. Cette période fut nommée Hadéen (Hadès est le dieu grec des enfers) pour rappeler les conditions qui régnaient à la surface de la Terre à cette époque. L'Hadéen est une période clef de l'histoire de la Terre car plusieurs traits majeurs de notre planète y sont apparus : formation de la croûte et des continents, démarrage de la tectonique, apparition du champ magnétique, formation de l'atmosphère, stabilisation des océans et, peut-être, apparition de la vie. De ce point de vue, Mustafar serait alors une toute jeune planète en train de se remettre des affres de sa naissance.

Mustafar pourrait aussi être le théâtre d'une activité géologique exceptionnelle. Les géologues ont montré que notre planète avait aussi subi plusieurs épisodes d'intense activité volcanique. Une des plus connues, car en partie responsable de l'extinction des dinosaures (oiseaux mis à part), remonte à plus de 65 millions d'années. L'immense plateau basaltique du Deccan, en Inde, dont l'épaisseur varie de 1 à 2 kilomètres, s'est formé durant cette période, en raison de l'ouverture d'énormes failles, dont les plus importantes dépassaient 400 kilomètres de longueur. Des geysers de lave dépassant le kilomètre de hauteur ont déversé, durant plusieurs siècles, des millions de kilomètres cubes de basalte ! Vu de l'espace, le Deccan a d'ailleurs dû, comme on le voit sur Mustafar, rougeoyer durablement à cause des très massives éruptions qui le ravageaient.

Enfin, une troisième solution est envisageable. La Terre n'est pas le seul endroit du système solaire où l'on peut observer des volcans actifs. Io, l'un des gros satellites de Jupiter, est lui aussi le siège de spectaculaires éruptions volcaniques. Mais aucune autre planète n'a une activité interne suffisamment intense pour entretenir pareil phénomène. Comment l'expliquer ? L'orbite de Io reste proche de Jupiter et son volcanisme résulte des gigantesques forces de marée qu'exerce la planète

géante sur son frêle satellite. Sur Terre, la force de marée lunaire soulève les océans de plusieurs mètres et la croûte rocheuse d'environ trente centimètres. L'action de la Terre sur la Lune soulève sa croûte d'un bon mètre. Sur Io, dépourvue d'océan, la marée de Jupiter soulève le sol d'environ cent mètres ! Ces mouvements produisent de la chaleur par le frottement qui s'exerce alors entre les couches internes. Certains panaches des éruptions volcaniques d'Io ont été observé depuis la Terre et montent jusqu'à plus de 300 kilomètres de hauteur, avec une vitesse d'éjection pouvant atteindre 3 500 kilomètres par heure. L'orbite de Io traverse également le champ magnétique de Jupiter, ce qui génère un courant électrique dissipant une puissance supérieure à mille milliards de watts. Il entraîne au loin des atomes provenant d'Io au rythme d'une tonne par seconde. Ces particules forment autour de Jupiter une sorte de boudin qui rayonne intensément dans l'ultraviolet. Les particules qui s'échappent de ce boudin sont partiellement responsables de la magnétosphère exceptionnellement étendue de Jupiter. Mustafar pourrait donc être un satellite d'une planète géante. Son orbite aurait un rayon si faible que Mustafar se trouverait littéralement broyée par l'action des forces de marée de sa planète mère. Quoiqu'il en soit, voilà un endroit où il ne fait pas bon mettre les pieds...

## Quel bilan ?

Nous voici donc arrivés au terme de notre excursion scientifique dans l'univers de *Star Wars*. En plus de cette œuvre emblématique, de nombreux autres films tels que *Spiderman*, *Total Recall*, *Armageddon*, *Contact* ou *Interstellar* offrent également d'intéressantes bases de travail. Et, au-delà du cinéma, d'autres supports se prêtent bien à ce genre d'analyse, comme les romans de science-fiction ou la bande dessinée. Dans tous les cas, l'enquête que l'on peut alors mener n'est pas sans rapport avec le travail du chercheur qui échafaude des modèles fondés sur des hypothèses et des théories déjà validées avant de les confronter aux faits expérimentaux. Il se rapproche même tout à fait du travail de l'astrophysicien qui n'a pratiquement que la lumière à sa disposition pour étudier les astres qu'il observe. Comme le spectateur devant son écran, il voit se jouer devant lui une réalité hors d'atteinte et sur laquelle il s'interroge. De plus, l'astrophysicien fait l'hypothèse implicite que la réalité qu'il observe obéit aux mêmes lois que le monde terrestre, ce qui ne va pas de soi. Il s'agit là de l'héritage de Galilée qui, contredisant vingt siècles de physique aristotélicienne, fut le premier à affirmer l'identité des lois du Ciel et de la Terre, posant ainsi les fondements de l'étude de l'univers par l'étude des lois terrestres.

Mais si l'univers de *Star Wars* obéit aux mêmes lois que le nôtre, que nous manque-t-il pour égaler les réalisations que l'on y voit ? Au-delà des difficultés techniques propres à la construction d'un instrument fonctionnel, que ce soit une voiture, un sabre-laser ou un vaisseau spatial,

la différence se situe surtout dans la capacité à maîtriser une grande quantité d'énergie. En physique, l'énergie quantifie la capacité à agir sur les choses et à les transformer. L'évolution technique de l'espèce humaine est étroitement liée à sa maîtrise de diverses formes d'énergie et à la quantité dont elle dispose. La découverte du feu, il y a environ 400 000 ans, marqua le début de cette évolution qui aboutit, vers le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, à la maîtrise de l'énergie nucléaire. La consommation énergétique humaine, et donc sa production, augmente d'environ 1,5 % par an depuis les années 1960 et les spécialistes estiment qu'elle a été multipliée par au moins 100 entre le début de la révolution industrielle et aujourd'hui. Multiplier par 1 000 la production actuelle d'énergie donnerait à l'humanité la possibilité de partir vers les étoiles. Mais, au vu des difficultés énergétiques annoncées avec la disparition inéluctable des combustibles fossiles, ce n'est certainement pas pour demain...

En 1964, le physicien russe Nikolai Kardashev proposa de classer les civilisations en trois catégories, de type I à III selon l'ordre croissant de leur niveau de maîtrise de l'énergie. Dans une civilisation de type I, cette maîtrise est d'ampleur planétaire. Une telle civilisation contrôle toutes les formes d'énergie (énergie fossile, fission et fusion nucléaire, biomasse, énergies hydroélectrique, marémotrice, géothermique, éolienne, solaire, etc.) et les utilise à très grande échelle. Sa production totale d'énergie est de plusieurs milliers à plusieurs millions de fois supérieure à la nôtre. Cela lui donne la capacité de contrôler le climat, d'agir volontairement sur l'ensemble de la biosphère ou de modifier l'activité tectonique. Nous n'y sommes pas encore, même si l'humanité commence à rivaliser avec les forces de la nature au point de modifier profondément, mais de façon plutôt désorganisée, la biosphère terrestre. Il est vraisemblable qu'après plusieurs milliers d'années d'évolution, une civilisation de type I aura totalement épuisé l'énergie de sa planète et devra puiser ses ressources directement dans son étoile, seule source importante et durable dans son coin de galaxie. Une civilisation capable de capter l'essentiel de l'énergie de son étoile accède au deuxième rang du classement de Kardashev et produit des millions de fois plus d'énergie qu'une civilisation de type I. C'est le niveau atteint par la Fédération des planètes de *Star Trek*. Pour atteindre ce but, le physicien américain Freeman Dyson a proposé d'utiliser la matière d'une grosse planète, comme Jupiter par exemple, pour construire une colossale sphère autour de l'étoile afin d'en capter toute la lumière. La surface interne de ladite sphère, si elle est mise en rotation, pourrait d'ailleurs être utilisée comme habitat par une innombrable population. C'est d'ailleurs sur un artefact de ce genre, nommé Omale, que l'auteur de science-fiction Laurent Genefort place une série d'aventures. À ce stade, l'activité de cette civilisation devient

visible depuis l'espace, car la surface externe de la sphère de Dyson doit émettre du rayonnement infrarouge. Dyson a même proposé aux astronomes de chercher spécifiquement les émissions infrarouges (plutôt que radio) pour identifier ces civilisations de type II. Disposant d'une gigantesque quantité d'énergie, une civilisation de ce type a bien sûr complètement colonisé son système solaire et entrepris le voyage interstellaire. La seule menace qui pourrait sérieusement l'inquiéter serait l'explosion d'une supernova proche, qui pourrait dévaster son système solaire.

Au bout de quelques milliards d'années, l'énergie d'une étoile ordinaire est épuisée. Cela laisse amplement le temps d'entreprendre la colonisation de la galaxie et d'accéder au troisième rang de la classification de Kardashev. Mais, avant d'y parvenir, une civilisation de type II pourrait gagner du temps en rajeunissant son étoile ! Dans une étoile semblable au Soleil les ennuis commencent quand l'hydrogène vient à manquer en son centre. Il en reste pourtant encore des quantités considérables, puisqu'à ce moment l'étoile n'a encore brûlé que les 10 % les plus internes de ses réserves totales. Pour raviver la flamme intérieure, on pourrait donc injecter du combustible frais depuis la périphérie vers le centre en « remuant » l'intérieur de l'étoile. Pour obtenir cet effet, il « suffirait », à l'aide de puissants lasers, d'injecter de grandes quantités d'énergie à l'intérieur de l'étoile pour la chauffer et y induire de vastes mouvements de convection. Évidemment, l'énergie nécessaire à un tel projet est colossale et l'injection doit être brève, sous peine de ne pas obtenir l'effet escompté. Il faut donc disposer d'une autre source que le Soleil lui-même, dont le débit d'énergie est trop lent, et se résoudre à faire fusionner de façon explosive une bonne partie de la masse d'une planète géante comme Jupiter... Si toutefois on parvenait à faire fusionner encore 10 ou 20 % de la masse du Soleil, sa vie serait prolongée de dix à vingt milliards d'années... ce qui donnerait vraiment le temps de voir venir !

Quant à la civilisation de type III, avec sa maîtrise de l'énergie rayonnée par plusieurs millions d'étoiles, aucune catastrophe imaginable n'est capable de la détruire. Combien de temps faut-il pour atteindre une civilisation de type II ou III ? La réponse à cette question est évidemment difficile à donner. Mais constatant qu'une croissance annuelle de notre production actuelle d'énergie de 1 % durant 3 200 ans suffit à égaler la puissance émise par le Soleil, il se pourrait bien que la réponse soit : « Moins longtemps que prévu. » Un obstacle majeur à la naissance d'une civilisation de type III se dresse néanmoins, sous la forme d'une loi intangible de la physique : la vitesse de la lumière dans le vide est une limite absolue, qui impose des difficultés considérables concernant les

voyages et les communications interstellaires. La gestion d'un empire galactique devient alors très problématique... Dyson estime que cela pourrait retarder la transition vers le niveau III de quelques millions d'années.

L'Empire de Star Wars fait certainement partie d'une civilisation de type II en transition vers le type III, comme le montre par exemple l'énergie dont dispose l'Étoile de la mort. La maîtrise d'une telle quantité d'énergie confère des pouvoirs quasi divins, mais on constate, une fois de plus, que les grandes responsabilités associées aux grands pouvoirs ne sont pas toujours bien assumées...

# Annexes

## Remerciements

Je remercie chaleureusement mon ami et collègue Jean-Sébastien Steyer, paléontologue au CNRS-MNHN à Paris, pour ses indispensables contributions « biologiques » à cet ouvrage. Manchu, immense artiste de la science-fiction, m'a fait l'honneur et le plaisir d'en illustrer la couverture. Les éditions du Béliat ont accepté avec enthousiasme de publier ce travail. Je remercie aussi mon ancien Padawan Daniel Suchet pour sa relecture attentive. Ses talents en font désormais un grand Jedi de la physique. Les fautes qui pourraient rester dans ce texte restent, bien sûr, de mon seul fait. J'ai une pensée particulière pour tous ceux qui ont assisté aux dizaines de conférences que j'ai donné sur l'analyse scientifique des films de la saga *Star Wars* et dont l'enthousiasme, qui m'a initialement poussé à écrire ce livre, m'a aussi incité à produire cette nouvelle version. Enfin, ce travail n'aurait jamais vu le jour si George

Lucas n'avait décidé de nous transporter il y a bien longtemps, dans une lointaine galaxie...

## Droits

Cet ouvrage est mis gratuitement à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 Internationale.

## À suivre

La revue *Bifrost* ([www.belial.fr](http://www.belial.fr)), dans laquelle j'écris la rubrique « Scienfiction » qui analyse les œuvres et les thèmes de la science-fiction.

La revue *Pour la science* ([www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)) où je tiens chaque mois la chronique « Science et fiction » avec J.-S. Steyer.

## Sélection de livres de l’auteur

*Planète exquise*, R. Lehoucq, J.-S. Steyer, J.-P. Demoule & P. Bordage, éditions Odile Jacob, 2014.

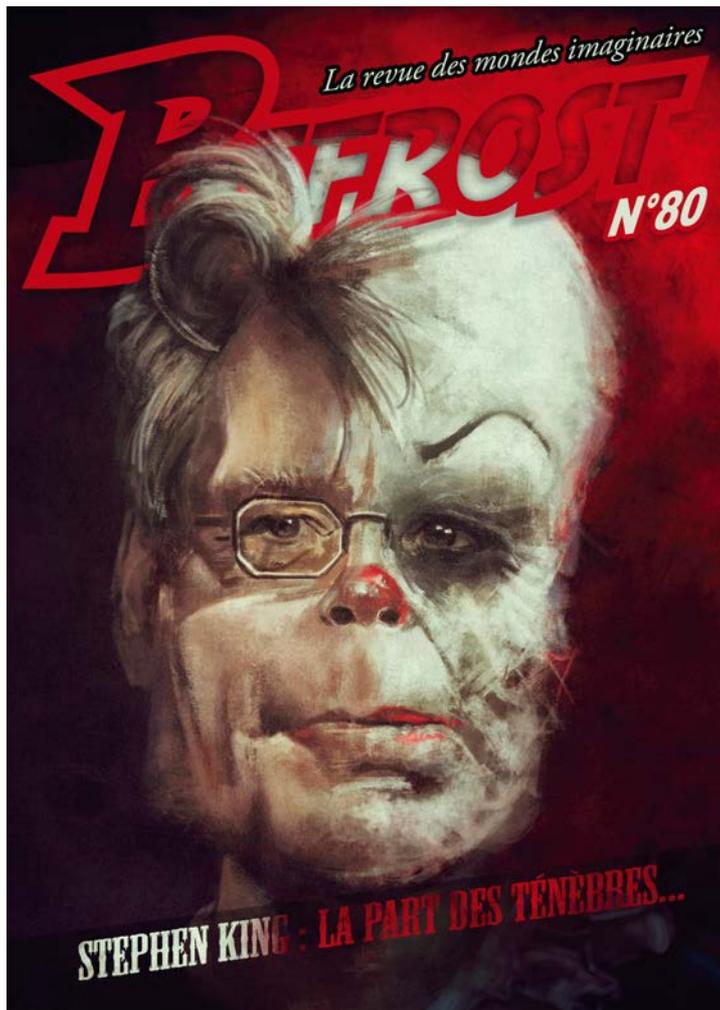
*La SF sous les feux de la science*, R. Lehoucq, éditions Le Pommier, 2012.

*Les extraterrestres expliqués à mes enfants*, R. Lehoucq, éditions Le Seuil, 2012.

*SF : la science mène l’enquête*, R. Lehoucq, éditions Le Pommier, 2007.

*Où est passé le Temple du Soleil, enquête scientifique au pays d’Hergé*, R. Lehoucq et R. Mochkovitch, éditions Flammarion, 2003.

*D’où viennent les pouvoirs de Superman ? Physique ordinaire d’un super-héros*, R. Lehoucq, EDP Sciences, 2003.



Tous les trois mois dans *Bifrost*, Roland Lehoucq décortique la science au prisme de la fiction dans sa rubrique Scientifiction !

# Catalogue

## À télécharger gratuitement !

[Rien ne bouge](#) de Léo Henry

[Mortelles ritournelles](#) de Greg EGAN

[En apprenant à être moi](#) de Greg EGAN

[Des raisons d'être heureux](#) de Greg EGAN

[Je ne suis pas une légende](#) de Catherine DUFOUR

[En sa tour, Annabelle](#) de Claude ECKEN

## Bifrost en numérique

[Bifrost n° 62](#) : Hommage à Jacques Goimard

[Bifrost n° 64](#) : Spécial Jérôme Noirez

[Bifrost n° 65](#) : Dossier Christian Léourier

[Bifrost n° 67](#) : Spécial George R. R. Martin

[Bifrost n° 68](#) : Spécial Ian McDonald

[Bifrost n° 69](#) : Dossier Culture rock & SF

[Bifrost n° 70](#) : Spécial Stephen Baxter

[Bifrost n° 71](#) : Spécial Michel Pagel

[Bifrost n° 72](#) : Spécial Ray Bradbury

[Bifrost n° 73](#) : Spécial Lovecraft

[Bifrost n° 74](#) : Dossier Léo Henry

[Bifrost n° 75](#) : Spécial Poul Anderson

[Bifrost n° 76](#) : Spécial J.R.R. Tolkien

[Bifrost n° 77](#) : Dossier Mélanie Fazi

[Bifrost n° 78](#) : Spécial Ursula K. Le Guin

[Bifrost n° 79](#) : Dossier Yves et Ada Rémy

[Bifrost n° 80](#) : Spécial Stephen King

### **Poul ANDERSON**

[Trois cœurs, trois lions](#)

[La Saga de Hrolf Kraki](#)

[Le Chant du Barde](#)

[Tau Zéro](#)

[Barrière mentale et autres intelligences](#)

[L'Épée brisée](#)

### **Jean-Pierre ANDREVON**

[La Maison qui glissait](#)

[Zombies, un horizon de cendres](#)

[Demain, le monde](#)

### **Stephen BAXTER**

[Gravité](#)

[Singularité](#)

[Flux](#)

[Accrétion](#)

[Anti-Glace](#)

### **Ugo BELLAGAMBA**

[L'École des assassins](#)

[La Cité du soleil](#)

### **Francis BERTHELOT**

[Forêts secrètes](#)

[Carnaval sans roi](#)

[Hadès Palace](#)

[Le Petit Cabaret des morts](#)

**Leigh BRACKETT**

[Stark et les Rois des étoiles](#)

[Le Grand Livre de Mars](#)

**Xavier BRUCE**

[Incarnations](#)

**Fabrice COLIN & David CALVO**

[Atomic Bomb](#)

**Thomas DAY**

[La Cité des crânes](#)

[Stairways to hell](#)

[Daemone](#)

[Le Trône d'ébène](#)

[Sympathies for the devil](#)

[7 secondes pour devenir un aigle](#)

**Michel DEMUTH**

[À l'est du Cygne](#)

**Thierry DI ROLLO**

[Number Nine](#)

[Archeur](#)

[Les Trois Reliques d'Orvil Fisher](#)

**Catherine DUFOUR**

[L'Accroissement mathématique du plaisir](#)

**Claude ECKEN**

[Le Monde, tous droits réservés](#)

[Enfer clos](#)

[Le Cri du corps](#)

[L'Autre Cécile](#)

**Greg EGAN**

[Zendegi](#)

[Axiomatique](#)

[Radieux](#)

[Océanique](#)

**Laurent GENEFORT**

[Mémoria](#)

[Points chauds](#)

**Daryl GREGORY**

[L'Éducation de Stony Mayhall](#)

[Nous allons tous très bien, merci](#)

**Pierre GRUAZ**

[Genèse 2.0 : Loin des étoiles](#)

**Laurent KLOETZER**

[Mémoire vagabonde](#)

**Loïc LE BORGNE**

[Hysteresis](#)

**Ken LIU**

[La Ménagerie de papier](#)

**Karin LOWACHEE**

[Warchild](#)

[Burndive](#)

[Cagebird](#)

**Xavier MAUMÉJEAN**

[Rosée de feu](#)

**Jean-Jacques NGUYEN**

[Les Visages de Mars](#)

**Jérôme NOIREZ**

[Féerie pour les ténèbres, l'intégrale](#)

[Féerie pour les ténèbres](#)

[Le Sacre des orties](#)

[Le Carnaval des abîmes](#)

**Michel PAGEL**

[Les Escargots se cachent pour mourir](#)

[Pour une poignée d'helix pomatias](#)

[Le Cimetière des astronefs](#)

**Stéphane PRZYBYLSKI**

[Le Château des millions d'années](#)

[Le Marteau de Thor](#)

**Richard Paul RUSSO**

[La Nef des fous](#)

[Le Cimetière des saints](#)

**Lucius SHEPARD**

[Le Dragon Griaule](#)

[Le Calice du Dragon](#)

[Aztechs](#)

[Sous des cieux étrangers](#)

[Louisiana Breakdown](#)

**Francis VALÉRY**

[La Cité entre les mondes](#)

[Bob Morane : un mythe moderne](#)

**Jack VANCE**

[Le Dernier Château et autres crimes](#)

**Roland C. WAGNER**

[L.G.M.](#)

**Ian WATSON**

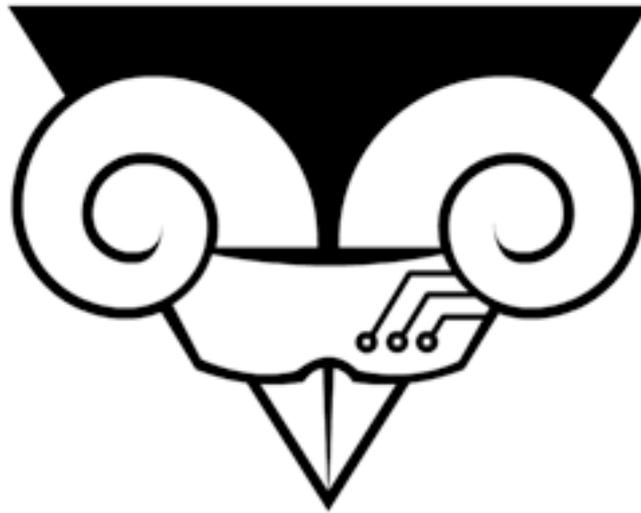
[L'Enchâssement](#)

**Robert Charles WILSON**

[Les Perséides](#)

**Joëlle WINTREBERT**

[La Créode et autres récits futurs](#)



# e-Belial'

Retrouvez tous nos livres numériques sur [e.belial.fr](http://e.belial.fr)

Venez discutez avec nous sur [forums.belial.fr](http://forums.belial.fr)

Retrouvez Le Bérial' sur [Twitter](https://twitter.com/LeBérial) et sur [Facebook](https://www.facebook.com/LeBérial) !

Malgré tout le soin que nous apportons à la fabrication de nos fichiers numériques, si vous remarquez une coquille ou un problème de compatibilité avec votre liseuse, vous pouvez nous écrire à [ebelial@belial.fr](mailto:ebelial@belial.fr). Nous vous proposerons gratuitement et dans les meilleurs délais une nouvelle version de ce livre numérique.