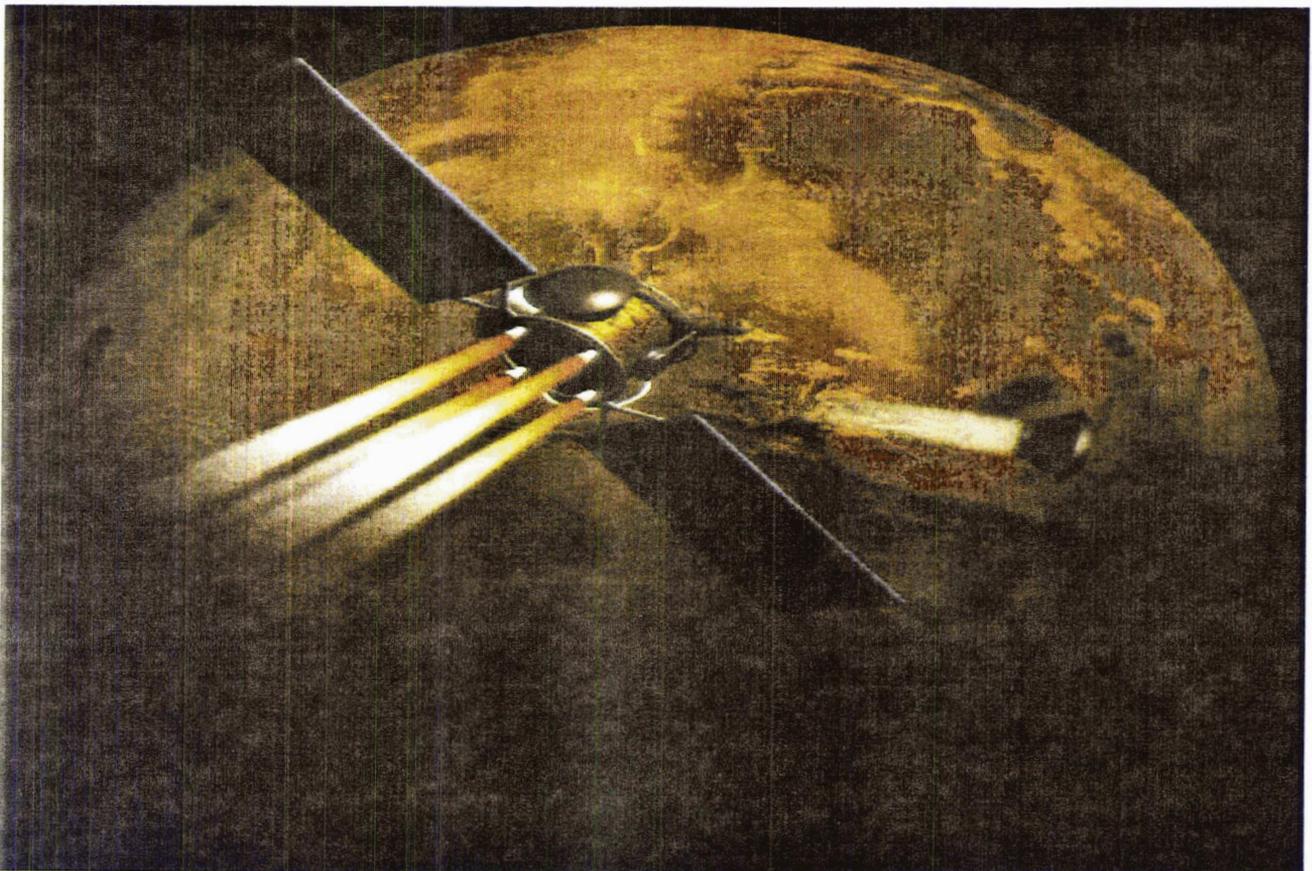


Rapport de stage dans le cadre de la Maîtrise de Physique  
Sciences de l'Univers

Présenté par Pierre SABIN et Frédéric ARIB

# ETUDE DES PROPULSIONS AÉRONAUTIQUES ET SPATIALES DU FUTUR



*Directeur de stage :* **Jean-Jacques VELASCO**  
Directeur du Service d'Expertise des Phénomènes de Rares Atmosphériques au  
sein du Centre National d'Etudes Spatiales de Toulouse

**Rapport de stage dans le cadre de la Maîtrise de Physique  
de l'université Paul Sabatier**

**Présenté par Pierre SABIN et Frédéric ARIB**

**ETUDE DES PROPULSIONS  
AÉRONAUTIQUES ET SPATIALES DU  
FUTUR**

*Directeur de stage :* **Jean-Jacques VELASCO**  
**Directeur du Service d'Expertise des Phénomènes de Rares Atmosphériques au  
sein du Centre National d'Etudes Spatiales de Toulouse**

Rapport de stage dans le cadre de la Maîtrise de Physique Spécialité  
Sciences de l'univers

Présenté par Pierre SABIN et Frédéric **ARIB** (Promotion 2000)

# **Étude des propulsions aéronautiques et spatiales du futur**

*Directeur de stage :* Jean-Jacques VELASCO  
Directeur du Service d'Expertise des Phénomènes de Rentrées Atmosphériques  
au sein du Centre National d'**Études** Spatiales de Toulouse  
18, Avenue Edouard Belin – 31401 TOULOUSE Cedex 4

# **REMERCIEMENTS**

*Nous tenons beaucoup à remercier...*

*Jean CACHENX du CNES, pour toutes ses précisions concernant la quasi totalité des propulsions abordés dans ce rapport.*

*Michel PREVOST du FAUGA MAUSAC de l'ONERA-CERT et professeur à SUP'AERO, pour ses conseils et ses renseignements.*

*Jean-Jacques VELASCO directeur du SEBRA au sein du CNES pour l'ensemble de son aide à la conception du présent document.*

*Laurent GONN, pour sa participation à la construction de ce rapport et ses contacts au sein du CNES et du milieu aéronautique toulousain.*

*Alexandre Szames, pour toutes références dans la recherche avancée sur les propulsions et son ouvrage sur l'antigravitation.*

*Mais surtout un grand merci à Elisabeth JAMMET du centre de documentation du CNES, pour son aide bibliographique et ses contacts au sein de la communauté aéronautique.*

# SOMMAIRE

. Contacts	5
. Bibliographie	6
<b>I. Introduction</b>	<b>7</b>
1. Objectifs de ce rapport	7
2. Présentation du CNES	7
3. Problématique abordée	8
4. Limite de l'étude	9
<b>II. Energies</b>	<b>10</b>
<i>Propulsion Photonique</i>	11
<i>Antimatière</i>	15
<i>L'énergie du vide</i>	17
<i>Antigravitation</i>	19
<b>III. Applications</b>	<b>23</b>
<i>Propulsion ionique</i>	24
<i>MHD</i>	27
<i>Catapulte Spatiale</i>	31
<i>LASER</i>	36
<i>Propulsion nucléaire</i>	39
<b>IV. Conclusion</b>	<b>41</b>
<b>Synthèse</b>	<b>42</b>
<b>V. Annexes</b>	<b>44</b>

## Nos Contacts

~

### . Centres de recherches aux Etats Unis d'Amérique

- Laboratoire national de Lawrence-Livermore (LLL ou 3L)
- Le Breakthrough Propulsion Physics Program, qui travaille sur les modes de propulsion du futur.
- JPL (Jet Propulsion Laboratory)
- NASA (National Aeronautic and Space Agency)

### . Centres de recherches en Europe

- En France, l'institut franco-allemand de St-Louis, près de Mulhouse, qui expérimente des lanceurs électriques
- U3P ONERA (France Toulouse)
- World Space Foundation
- Ecole Centrale de Lille
- CNES Ivry
- ONERA CERT

### . Chercheurs

- Jacques Breton, du CNES Toulouse U3P – Voiles solaires
- Guy Pignolet, du CNES à Paris
- Olivier BOISARD, concepteur d'un site web consacré aux voiles solaires
- Michel Prévost, professeur à Sup'Aero, chercheur à l'ONERA FAUGA MAUSAC

# Bibliographie

~

## . Livres :

- . « L'effet Biefeld Brown, histoire secrète de l'antigravitation » par Alexandre Szames (AZS éditions)
- . « Space propulsion analysis and design » Edition **GRAWHILL**, livre présent à Sup' Aéro
- . « Astronomie et Astrophysique » de Marc Seguin et Benoît Villeneuve, éditions MASSON

## . Revues :

- . « Planètes extra solaires » (*Science & Vie n° 929, Science & Vie n° 940 et Science & Vie n° 942*)
- . « Les magiciens de l'univers » par Roman IKONIKOFF (*Science & Vie N°947, Août 96, page 80 et 83*)
- . « MHD et sous marin » par Roman IKONIKOFF (*voir Science & Vie n° 883*)
- . « Propulsions du futur » (*Science & Vie N°947, Août 96, page 83*)
- . « La catapulte spatiale » par Renaud DE LA TAILLE (*Science & Vie N°873, Juin 90, page 40*)
- . « Aux frontières du possible » par Leïla HADDAD (*Science & Vie N°969, Juin 98, page 166*)
- . « Super Canon » par Renaud DE LA TAILLE (*Science & Vie N°929, Février 95, page 44*)
- . « Un mois pour atteindre mars ! » par Philippe HENAREJOS (*Science & Vie N°944, Mai 96, page 7*)
- . « Antimatière » (*Science & Vie n° 942*)
- . « Propulsion » (*Science & Vie N°947, Août 96, page 76*)
- . « L'odyssée des petits hommes verts » par Roman IKONIKOFF (*Science & Vie N°947, Août 96, page 76*)
- . « Rider on the shock wave » par Mike Ross (*New Scientist, Mars 1996*)
- . « Le transport spatial du futur » par Tim Beardley (*Pour la science, n°258, Avril 1999*)
- . « Strategic defense initiative » par William B. Scott et Edouards **Afb** (*AviationWeek and space technology, Mars 1988*)
- . « USAF et antigravitation » par Pierre Guérin (*Lumières dans la nuit, Mars 1998*)
- . « Evgueni PODKLETNOV, l'émigré qui enfreint la gravité » par Charles Platt (*Le Courier International, 20-26 Août 1998*)
- . « Gravity » par Charles Platt (*Wired, Mars 1998*)
- . « Un bouclier antigravité » par Pierre-Marie Préveloux (*Sciences et Avenir, Novembre 1996*)

# **J. Introduction**

## **1. OBJECTIFS DE CE RAPPORT**

Ce document a pour but de collecter un maximum d'informations et de réaliser un état de l'art concernant les différents moyens de propulsion appliqués principalement au spatial, afin de devenir une source de données scientifiques. Nous nous attacherons essentiellement aux propulsions adaptées aux voyages d'hommes ou de robots, aussi bien au sein du système solaire que dans l'ensemble de notre galaxie, autrement dit aux voyages interstellaires. Le présent rapport s'attachera à présenter le plus simplement possible les sujets traités, afin que les explications de ces derniers soient les plus clairs possibles. Aussi, dans chaque type de propulsion, nous présenterons parfois une liste, non exhaustive, des centres et des personnes les plus qualifiées et qui travaillent actuellement sur ces recherches.

## **2. PRÉSENTATION DU CNES**

Avec les premiers satellites artificiels, mis en orbite par l'homme vers la fin des années 50, l'espace devenait le rendez-vous des nouvelles conquêtes. Les pays industrialisés développèrent dès lors des moyens considérables pour participer à cette grande aventure de l'espace. A cette époque, la France, qui poursuivait des recherches dans ce domaine depuis une quinzaine d'années, décidait de donner une impulsion déterminante à sa politique spatiale.

En 1962, elle crée le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) pour devenir une puissance spatiale indépendante. En 1968, avec la décentralisation, une nouvelle étape est franchie : le centre technique du CNES est installé à Toulouse.

Chargé d'orienter et de développer les recherches pour mettre en œuvre les moyens de la conquête spatiale, le CNES a fait de son centre technique un véritable catalyseur des activités spatiales, regroupant autour de lui toute une communauté scientifique, industrielle et universitaire prestigieuse. Les laboratoires d'études et de recherches scientifiques voisinent avec les grandes écoles et les universités, formant un véritable réservoir de matière grise indispensable aux activités spatiales.

Outre les organismes précités, le CNES, dans le cadre des activités du SEBRA, fait appel aux compétences d'autres laboratoires et écoles en France.

Le sujet s'inscrit dans le contexte mondial actuel des études relatives à la compréhension du phénomène communément appelé O.V.N.I. (Objet Volant Non Identifié). Cette mission fut celle du G.E.P.A.N. (Groupe d'Etude des Phénomènes Aérospatiaux Non Identifiés), créé en 1977 par le CNES afin de répondre à trois objectifs qui furent :

1. le souci de répondre à une légitime curiosité publique (aspect sociologique)
2. une volonté d'accroître la connaissance de notre environnement aérospatial (aspect scientifique)
3. la nécessité de vérifier une éventuelle menace naturelle ou artificielle (aspect défense)

Ces trois objectifs s'inscrivent dans la politique générale du CNES, créé en 1962, dont l'ambition est d'orienter et de développer la mise en œuvre des programmes européens dans l'accès à l'espace sous toutes ses formes. Cette ambition est aussi relevée par le contexte historique de la guerre froide et de la course à l'espace. Cet accès est d'autant plus facilité que la connaissance de notre environnement aérospatial progresse. Pourtant, la nécessité de repousser les limites dans la compréhension des phénomènes rares n'est pas forcément mentionnée dans les plans stratégiques actuels du CNES, soucieux des enjeux socio-économiques du secteur spatial.

Depuis 1988, le CNES a donc changé son objectif qui n'est plus d'engager une recherche scientifique dans la compréhension des phénomènes aérospatiaux rares. C'est ainsi que le **GEPAN** est devenu le **S.E.P.R.A.** (Service d'Expertise des Phénomènes de Rentrées Atmosphériques), répondant plus au besoin de coordonner l'information des prévisions et de suivi des rentrées atmosphériques. La nouvelle organisation doit également saisir, expertiser et organiser officiellement des enquêtes approfondies sur des observations de témoins qui n'ont pu être identifiées au moment de la collecte de la gendarmerie nationale. L'entité du **SEBRA** poursuit l'engagement du CNES dans sa collaboration avec l'ensemble des organismes civils et militaires (gendarmerie et armée de l'air notamment) depuis 1977 en exploitant la démarche scientifique rigoureuse mise en place par le **GEPAN**.

### **3. PROBLÉMATIQUE ABORDÉE**

Nous savons aujourd'hui que des systèmes stellaires semblables au notre existent dans notre Galaxie, la Voie Lactée. Le plus souvent il s'agit de plusieurs étoiles liées entre elles par la gravitation. Pour des raisons techniques (de stabilité gravitationnelle) il semble difficile de trouver des systèmes comportant plus de **6** étoiles ainsi regroupées. Cependant ces systèmes multiples sont les plus nombreux dans les galaxies. On peut remarquer que l'étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure se trouve dans un système triple (*i.e.* **3** étoiles tournant les une autour des autres dans un mouvement plus ou moins complexe), système connu sous le nom d'Alpha du Centaure. De plus si Jupiter avait une masse un tout petit peu plus importante, la fusion aurait pu se déclencher et nous serions alors dans un système double. Pour les mêmes raisons qui nous poussent à penser qu'un seuil est atteint avec **6** étoiles dans un système stellaire, nous pensons que les planètes extra solaires viables se trouvent principalement dans un système simple, *i.e.* qu'elles tournent autour d'une seule étoile. Après plusieurs décennies de traque infructueuse, le ciel s'est montré clément en 1995. Masquées par les étoiles autour desquels elles tournent, ces petites sœurs de la Terre se sont laissées piéger, les unes après les autres, grâce à des techniques d'observation perfectionnées. Aujourd'hui, en 2000, nous comptabilisons plus d'une soixantaine de planètes extra solaires, toutes dans des systèmes types solaires et il ne se passe plus un mois sans qu'une nouvelle planète soit découverte.

Pour bien saisir l'ampleur de la question, brosons à grands traits le décor de notre environnement cosmique. L'Univers visible (le seul qu'on connaisse) a **40 milliards d'années-lumière(AL)** de diamètre; la Voie lactée (la galaxie, parmi des centaines de milliards, où se trouve notre étoile le Soleil) a un diamètre de **100 000 AL**. Autre repère remarquable : l'étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure, est à **4,4 AL**, c'est-à-dire à **40 000 milliards de kilomètres** ! Il faut bien le dire, à ce stade, tout déplacement dans l'univers consiste à franchir de véritables abîmes, spatiaux et temporels. Existe-t-il une technologie qui permette à des êtres humains de faire de tels voyages ?

En fait, il y a une limite absolue, qu'a posée Einstein (avec l'assentiment de la nature !). La théorie de la relativité restreinte, énoncée en 1905, interdit à tout élément porteur d'information (une particule matérielle, un grain de lumière, une onde électromagnétique..) de dépasser la vitesse de la lumière (notée  $c$  pour célérité), soit 299 792 kilomètres par seconde. Et il existe de très fortes présomptions que cette limite s'applique à tout l'univers.

Cela signifie-t-il que les voyages aux confins de notre galaxie, dans des durées «raisonnables», sont impossibles ? Non. Du moins, en théorie. Car, si la relativité restreinte borne toute vitesse à  $c$ , elle dilate, en contrepartie, le temps des voyageurs ! Plus on se rapproche de  $c$ , plus le temps s'écoule lentement.. En toute rigueur, lorsqu'on atteint la vitesse de la lumière, le temps se fige littéralement.

Dès lors, les problèmes de distance posent des problèmes de temps... Imaginons une planète gravitant autour de l'étoile Rigel dans la constellation d'Orion (à 540 années-lumière de la Terre), peuplée d'êtres qui ont repéré la Terre et décidé de s'y rendre. En augmentant la vitesse de leur vaisseau de 10 mètres par seconde chaque seconde pendant 345 jours, ils atteindraient une vitesse égale à 99,99 % de la vitesse de la lumière. A cette allure folle, lorsqu'une seconde s'écoule dans le vaisseau, il s'écoule sur leur planète (et sur Terre) 8 minutes et 20 secondes. Les voyageurs effectueront le voyage aller retour en 5 ans et 45 jours (compte tenu de la phase d'accélération et d'une phase de freinage). Malheureusement, sur leur planète d'origine, plus de 700 ans se seront écoulés ! Détail qui risque de glacer le sang, même vert.

Ainsi, emportés par cet élan de soif de conquête, les chercheurs ont mis au point depuis quelques années différents types de propulsion, qui sont pour une grande partie seulement théoriques. A partir de là il est nécessaire d'organiser un tri sélectif et c'est ce que nous nous proposons de faire ici. On peut concevoir diverses sortes de propulsion : des moteurs à fusion ou des moteurs ioniques. On peut aussi imaginer des navires à voiles «gonflées» par le « vent stellaire», ou encore des vaisseaux accélérés par un « tremplin gravitationnel » ...

La recherche avance très vite et il était nécessaire de faire un bilan de ce que nous savons en pratique ou en théorie, et comment nous exploiterons nos connaissances. Le domaine du voyage interstellaire semble être sans nul doute l'un des plus grands domaines de recherche et d'avenir. Car l'homme se déplace et explore depuis la nuit des temps, de Christophe Colomb en Amérique à Neil Amstronng sur la Lune, notre espèce ne cesse de repousser les limites des « *terras incognitas* » et ses moyens de transport ne cessent d'évoluer. C'est pourquoi dans ce qui suit nous allons regarder de plus près ce qui se passe dans le monde, où en sont les recherches, de quoi sommes nous capable aujourd'hui et qu'envisageons nous de développer dans les années à venir.

#### **4. LIMITE DE L'ÉTUDE**

Certaines propulsions, nous pensons notamment à l'utilisation de l'antimatière ou des moteurs ioniques, demanderaient une étude plus poussée, qu'il ne nous est pas possible d'engager, en raison des trop courts délais relatifs à la présentation de ce rapport de stage. Certains autres sujets, plus abstraits demanderaient une analyse argumentée par un raisonnement mathématique rigoureux plus fin que celui présenté dans ce rapport. Mais il s'agit pour nous de faire un état des lieux des recherches entreprises partout dans le monde et non de re-démontrer les théories en question. La difficulté réside aussi dans le fait que peu d'articles, sur ce sujet, sont publiés. Mais aussi la faible disponibilité de nos interlocuteurs, qui pour la plupart se trouvent sur Paris, quand ce n'est pas de l'autre coté de l'Atlantique. Or les moyens mis à notre disposition ne nous permettent pas de telles rencontres.

## II. Energies

Dans le domaine du réalisable, du moins en ce qui concerne les aspects énergétique et technologique, nous envisageons différents moyens de propulsion.

L'un de ces système de propulsion serait la propulsion par moteur à fusion nucléaire. Son principal avantage est que son carburant, l'hydrogène, est abondant dans l'espace, donc gratuit. En effet, l'hydrogène constitue l'élément le plus abondant dans l'univers, plus de 90% en nombre d'atomes. Or, pour en récolter une quantité suffisante, le vaisseau doit avoir une forme d'entonnoir d'un diamètre supérieur à.. 40 km ! Ce qui n'est pas sans poser quelques problèmes conceptuels. Mais on serait le faire. N'oublions pas que la station spatiale internationale (ISS surnommée Alpha) est aussi grande qu'un terrain de football. Donc avec le temps et beaucoup de bonne volonté, nous pourrions imaginer construire un tel engin.

L'un des plus **high-tech** des moyens de propulsion est certainement la propulsion par faisceau laser, qui se fait grâce à la pression de la lumière sur la surface d'un vaisseau. Mais la portée d'un rayon laser n'est pas infinie. Ce système ne permettrait donc pas d'aller très loin.

Le moteur ionique, est un système de propulsion actuellement utilisé par plusieurs sondes. Il utilise des atomes dépouillés d'un électron (ionisation), qui sont accélérés à l'aide d'un champ électrique. Après avoir utilisé cette source d'énergie, on restitue aux atomes ionisés leurs électrons.

Mais le plus puissant des systèmes de propulsion sera certainement lié à la réaction d'annihilation matière-antimatière, qui est de loin la plus énergétique des réactions. Le vaisseau spatial « idéal » utilisera donc très certainement de l'antimatière comme carburant. Mais, pour en produire suffisamment, du moins sur Terre, il faudrait faire fonctionner nos accélérateurs de particules pendant des siècles !

Le système le plus écologique serait qu'un vaisseau utilise les rayons de lumière des étoiles (ou « vent stellaire ») comme les bateaux se servent du vent. Mais, pour être efficace, sa voile doit mesurer plusieurs centaines de kilomètres de diamètre. C'est ce que nous nous proposons de voir dans le paragraphe qui suit.

# PROPULSION PHOTONIQUE

Voyager dans l'espace par le seul effet de la lumière solaire, cette idée, curieuse au premier abord, n'a pourtant rien de fantaisiste. Dès le **XVII<sup>ème</sup>** siècle, Kepler avait remarqué que la queue des comètes ne se déployait pas dans le sillage de leurs trajectoires, comme on pouvait logiquement s'y attendre, mais à l'opposé du rayonnement solaire. Il attribua ce phénomène à l'existence d'une pression de la lumière, repoussant les particules émises par la comète. Il fallait attendre la fin du **XIX<sup>ème</sup>** siècle, avec les travaux de Maxwell sur l'électromagnétisme, pour qu'une première assise théorique confirme cette hypothèse.

Comme des bateaux poussés par le vent à la surface de la Terre, la propulsion photonique vise à propulser des engins équipés de voiles, par le vent solaire. Avec leur fine voile réfléchissante, ils profiteront de la faible, très faible poussée qu'exerce la lumière solaire sur tout objet qu'elle croise sur sa course. Ce mode de propulsion aux ressources inépuisables\* leur permettra de naviguer dans l'espace pour croiser la Lune d'abord, puis poursuivre leur route sans limite à travers le système solaire.

*\* Remarque : il est utile de préciser que les étoiles épuisent leur carburant, donc la source de leur énergie n'est pas inépuisable. Mais à l'échelle de l'homme et même plus, ces réserves sont gigantesques et peuvent, à juste titre être considérées comme inépuisables. De plus, le vent stellaire n'est pas uniforme et la force qu'il exerce diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'étoile. Il est donc indispensable d'avoir recours à une deuxième propulsion à partir d'une certaine limite. Cependant, suivant ce que l'on envisage de faire et dans certaines conditions cela ne sera pas nécessaire, mais nous verrons tout cela en détails dans ce qui suit.*

## Principe :

Les particules qui constituent le vent solaire, les photons, aussi nommés grains de lumière, heurtent à près de **300 000 km/s** les voiles dont sont équipés nos engins, des sondes par exemple. Au moment de la collision, les photons cèdent une partie de leur quantité de mouvement, selon le principe de conservation de l'impulsion. Ceci se traduit par une pression exercée sur la voile, qui fait avancer la sonde.

### Explication :

Le photon heurte la voile et repart en sens inverse. La conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$P_{\text{initial}} = P + 0 = P_{\text{final}} = -P + P_{\text{reçue}}$$

Avec  $P = m v$ , où  $m$  est la masse et  $v$  la vitesse

Dans le cas des photons la masse est nulle, on considère alors l'énergie qui est égale à :

$$E = h \nu \equiv P^2 / (2 m)$$

Où  $\nu$  est la fréquence du photon et  $h$  la constante de Planck.  
La valeur numérique de cette constante est  $h = 6.626184.10^{-34}$  Joule seconde

On obtient donc que :  $P_{\text{reçue}} = 2 P$

Le voilier reçoit le double de la quantité de mouvement initiale de la particule. Deux phénomènes peuvent se produire. Soit le photon entre en collision élastique avec les atomes qui constituent la voile, il est alors réfléchi. Soit il est absorbé par le matériau, ce qui chauffe légèrement la voile. Dans les 2 cas l'engin est accéléré et l'accélération qui en résulte est 2 fois plus importante dans le cas de la réflexion ( $2 P$ ) que dans le cas de l'absorption ( $P$ ). Il apparaît alors un problème, lorsque la température de la voile augmente, à la suite de l'absorption, la surface devient moins réfléchissante. On peut imaginer que cette énergie pourrait être récupérée, comme avec des panneaux solaires, ou simplement évacuée par la circulation d'un liquide de refroidissement.

On sait aujourd'hui qu'au niveau de la Terre, la lumière émise par le Soleil exerce une pression de l'ordre de 9 micro newtons par mètre carré, soit le poids d'une pièce de monnaie pour la surface d'un terrain de football. Cet effet apparemment négligeable ne l'est plus lorsqu'il s'applique, dans les conditions d'impesanteur spatiale où il n'y a pas de résistance, à des structures possédant un bon rapport **surface/masse** (petite masse grande surface). Dans le meilleur des cas, cette propulsion photonique ne produira pas une accélération supérieure à quelques **mm/s<sup>2</sup>**. Celle-ci pourtant, contrairement aux modes de propulsion "classiques" (les réacteurs chimiques par exemple), **s'exerce de façon constante et sans aucune limitation dans le temps.**

Les premiers travaux sur la propulsion photonique, datent de 1915 en Russie réalisés par **Yakov Perelman**, puis poursuivis par **Fridrikj Tsankov**. Mais la propulsion photonique entre dans une véritable phase opérationnelle en 1973 lorsque la NASA, envisageant le rendez-vous d'une sonde spatiale avec la comète de Halley, engage un programme de recherche sur les voiles solaires. Pour de multiples raisons, le projet est abandonné en 1977. Il a su toutefois prouver sa faisabilité technique, et continue à vivre dans l'esprit de plusieurs chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory), qui décident de poursuivre leurs travaux avec des ressources privées au sein d'une association qu'ils créent pour la circonstance, la World Space Foundation (WSF). En 1981, l'intérêt des professionnels de l'aéronautique pour les voiles solaires se traduit en Europe par la création de l'**Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique (U3P)**, association composée notamment d'ingénieurs du CNES et de l'ONERA dont le but, à l'instar de WSF, est de concevoir un voilier dans un cadre amateur.

L'idée nouvelle proposée par l'U3P est d'organiser entre plusieurs voiliers compétiteurs, une course de la Terre à la Lune.

### Inconvénients :

**... des voiles de quelques dizaines de mètres de large et plusieurs kilomètres de long, pour seulement dix microns d'épaisseur ! ...**

C'est à un réel défi technologique que se heurtent aujourd'hui les promoteurs de la propulsion photonique. En effet, quelques calculs liés aux structures ultra légères qui doivent composer le voilier solaire, montrent que les caractéristiques physiques et mécaniques sont inconcevables à la surface de la Terre : certains concepts proposent des voiles de quelques dizaines de mètres de large et plusieurs kilomètres de long, pour seulement dix microns d'épaisseur !

On doit par exemple, utiliser une voile de 100 m sur 100 m pour obtenir une poussée de 0,1 N seulement. Si les matériaux en eux mêmes restent abordables dans des coûts raisonnables, leur mise en place pose un énorme problème. Seule solution à l'heure actuelle serait de suivre la méthode de Koryo Miura, qui propose de déplier les voiles dans l'espace. Ceci sera développé dans la suite. Le plus gros inconvénient reste le fait que plus la charge, i.e. l'objet à transporter (instruments de mesures, vivres, hommes...) sera importante, plus les dimensions du voilier solaire seront grandes, et il ne s'agira pas de rajouter quelques mètres de voiles pour permettre d'emporter un kilogramme de plus, mais plusieurs centaines de mètres de voiles seront nécessaires au minimum !

De plus, le flux solaire diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne, selon une variation en  $1/r^2$ ,  $r$  étant la distance de l'objet au Soleil. Donc la poussée ne cesse de diminuer quand on sort du système solaire. Et bien sur, elle est un frein si l'on veut faire le chemin inverse, c'est similaire à vouloir remonter le courant dans une rivière.

### Avantages et applications :

Nous pourrions nous permettre de ne citer qu'un seul avantage sur les autres types de propulsion tellement il est important : pas de moteur donc pas de carburant. Mais ce n'est pas tout et les applications de la propulsion photonique peuvent être nombreuses et de façon indirecte, son développement peut avoir de nombreuses "retombées" technologiques. Il faut citer ici l'exemple du pliage de voiles inventé par l'ingénieur japonais Koryo Miura.

Dans le domaine spatial, la propulsion photonique quant à elle trouve de multiples applications tel que le contrôle d'altitude de satellites : on sait que l'orbite des satellites artificiels, pour ne pas "dériver", doit être corrigée de façon constante le plus souvent par de petits réacteurs aux capacités nécessairement limitées. Des brevets ont été déposés afin d'exploiter par des systèmes appropriés la pression photonique - faible mais permanente - pour effectuer ces corrections.

Le maintien d'une sonde sur une orbite héliocentrique de période égale à celle de l'orbite terrestre, mais plus proche du Soleil, pourrait aussi utiliser cette propulsion. Les équipements de cette sonde permettraient de surveiller l'environnement spatial à plusieurs

millions de kilomètres de la Terre, et en particulier de prévenir l'arrivée de flux importants de particules constituant le vent solaire. Ce scénario de mission, nommé VIGIWIND, a fait l'objet d'une présentation de l'U3P au congrès IAF-1996 de Pékin.

On peut envisager de modifier des paramètres quelconques d'une orbite donnée. Ce principe a déjà été utilisé en 1970, durant le vol de Mariner 10 vers la planète Mercure, afin de contrôler la trajectoire de la sonde. Il pourrait également permettre d'envisager une approche de la planète Jupiter sur des angles nouveaux, afin de mieux tirer parti de son effet de "catapulte gravitationnelle" déjà souvent utilisé pour des missions interplanétaires. On pense aujourd'hui à l'exploration des astéroïdes, voire même à une mission vers Pluton, la seule planète qui à ce jour n'a jamais été photographiée de près.

On pourrait utiliser cette propulsion afin de transférer à très grande vitesse des objets de faible masse : une sonde miniature d'une masse utile de quelques centaines de grammes attachée à une voile circulaire de cent mètres de rayon, pourrait par ce moyen - simple et économique - atteindre dans un laps de temps très court des vitesses considérables permettant, par exemple, de rejoindre l'orbite de Jupiter depuis la Terre en moins d'un mois. Pourquoi ne pas imaginer utiliser demain cette technique pour établir des communications matérielles avec un vaisseau interplanétaire habité ?

Les sciences des matériaux peuvent aujourd'hui nous permettre de fabriquer des films plastiques de quelques microns d'épaisseur recouverts d'aluminium, ou de "mats" légers et résistants, en fibre de verre par exemple, permettant de rigidifier la structure du voilier.

### ... Les nanosatellites ...

Une nouvelle chance pour les voiles solaires pourrait venir des Nanosatellites universitaires. Il s'agit de satellites très petits et donc très légers, conçu par des universitaires. Un article paru dans *Space News* du 20 septembre 1999 disait ceci : « *Les experts en robotique de l'université Carnegie Mellon, à Pittsburgh, développent le nanosatellite heliogyro Solar Blade ("Lame Solaire") dans la perspective d'un lancement en 2001.* » Preuve est faite que la propulsion photonique est prise au sérieux même si elle ne présente pas de grands intérêts à court terme pour le voyage d'hommes dans l'espace ou l'envoi de missions avec à leur bord de gros instruments. Mais son atout principal est de ne rien coûter en énergie, de plus il n'y a pas de moteur à concevoir, ce qui est loin d'être négligeable. N'oublions pas non plus, qu'une fois lancé, le satellite (ou nanosatellite) acquiert une vitesse qui est constante car il se trouve dans le vide, il n'a aucun frein, sinon gravitationnel, à la poursuite de son objectif.

### En conclusion

Il apparaît donc que la propulsion photonique est un moyen très économique en carburant pour voyager au sein du système solaire. Le problème réside dans la conception des systèmes qui optimiseront la poussée produite par le vent solaire, que ce soit la structure ou les moyens de navigations.

# ANTIMATIÈRE

Nous allons, dans un premier temps donner quelques rappels de physique pour comprendre ce que l'on appelle « antimatière ». Nous verrons ensuite comment cet aspect de la « matière » peut nous être utile afin de voyager ou d'envoyer des engins dans le système solaire et dans notre Galaxie.

## Rappels

On sait que la matière est discontinue, qu'elle est constituée d'atomes, eux même constitués d'un noyau autour duquel gravitent un ou plusieurs particules que l'on appelle les électrons. Le noyau contient des protons et des neutrons, les deux sont appelés nucléons (de nucléus : noyau). On a constaté par l'expérience que le proton et l'électron s'attirent. A partir de là il a été facile de conclure que ces deux particules avaient des charges électriques opposées et l'on a attribué au proton une charge positive et à l'électron une charge négative.

L'antimatière a la même constitution que la matière sauf que les charge électriques attribuées aux particules sont inversées. Autrement dit, l'antiparticule associée à l'électron, que l'on nomme le positron (ou positon) a les mêmes caractéristiques que l'électron excepté sa charge qui est positive. De même pour l'anti-proton qui a une charge négative. Les quarks, particules composants les protons et les neutrons, ont aussi des antiparticules que l'on nomme tout simplement les anti-quarks. Une exception dans la nature, c'est le photon, le « grain de lumière », qui est une particule sans charge électrique et qui est en même temps son antiparticule. Lorsqu'un positron rencontre un électron, ils s'annulent pour donner de l'énergie. C'est ce que l'on nomme l'annihilation matière antimatière. Et à ce jour elle reste la réaction physique la plus énergétique connue. En effet, elle est 35 fois plus énergétique que la fusion nucléaire, réaction qui a lieu au cœur des étoiles à des températures de plus de 10 millions de degrés, elle même 7 fois plus énergétique que la fission nucléaire, utilisée dans nos centrale atomique. A la suite de l'annihilation d'un positron d'avec un électron, il se créé 2 photons (particule de lumière dont la masse est nulle), d'énergie  $E = m_0 c^2$  chacun, où  $m_0$  est la masse au repos de l'électron et  $c$  la vitesse de lumière, soit environ 300 000 km/s. On considère la masse de l'électron au repos car une particule se déplaçant, donc qui n'est pas au repos, voit sa masse évoluer, elle augmente au fur et à mesure que la vitesse augmente. Afin de bien fixer les idées, imaginez... La France consomme environ 400 milliards de kWh d'électricité par an, pour produire une telle énergie, il suffirait d'une seule centrale qui utiliserait seulement **16 kg** d'antimatière, et **16 kg** de matière, la réaction est propre car elle ne produit que de l'énergie.

Quelques grammes (même milligrammes) suffiraient pour faire décoller un fusée, au lieu de brûler des tonnes de propergol. Dans les mêmes proportions, on pourrait facilement

déclencher des réactions de fusion, elles aussi très économiques et « propres ». Avec un verre d'eau, par une réaction de fusion on pourrait produire assez d'énergie pour une ville de plus de 300 000 habitants, et le seul déchet serait de l'hélium, le produit de la fusion de 4 atomes d'hydrogène. Sur Terre, il faudrait quinze Fermilab américains, le plus puissant accélérateur de particules avec celui du CERN (Centre Européen de recherche Nucléaire) en Suisse, fonctionnant simultanément pendant un an pour accumuler l'énergie qui permettrait tout au plus de s'éclairer pendant une heure avec une ampoule électrique de 100 watts !

Si l'antimatière présente autant d'avantages d'une portée aussi considérable, cette « matière » a le gros inconvénient de réagir avec la matière, solide, liquide ou **gaz**. C'est ce qu'on lui demande, me direz-vous. Mais comment la stocker, vous répondrais-je ? Et bien, nous pouvons envisager deux solutions. La première serait de piéger les anti-atomes à l'aide de champs magnétiques intenses et la seconde serait d'utiliser des lasers afin de créer en quelque sorte un genre d'impesanteur. Autre problème, l'immense énergie libérée nécessite l'utilisation de matériaux extrêmement résistant à la chaleur. Nous arrivons aujourd'hui à stocker l'antimatière, mais les durées de stockage n'excèdent pas quelques jours, voire quelques semaines. On utilise actuellement des bouteilles magnétiques qui peuvent contenir environ  $10^{12}$  anti-protons, soit  $10^{-13}$  mg, d'une durée de vie de quelques semaines. Pour limiter les pertes par collisions, Gérald Smith propose de tapisser la surface intérieure des bouteilles d'ammoniac solide. Activé par un rayonnement micro-onde l'ammoniac déclencherait un champ électrique répulsif vis à vis des anti-protons. Une autre astuce consiste à « refroidir » les anti-atomes par un jeu croisé de laser. Le CERN, à Genève a pour objectif de synthétiser de l'anti-hydrogène.

### Un peu d'histoire

L'antimatière fut évoquée pour la première fois par Paul Dirac en 1931, à partir des théories de la relativité et de la mécanique quantique. On peut créer une paire **particule-antiparticule** en fournissant l'énergie cinétique de la collision d'autres particules. Des anti-noyaux ont été obtenus à Berkeley (USA) en 1965, puis en 1970 à Serpoukhov. En juillet 1978 des physiciens du CERN ont réussi à stocker 99 noyaux d'anti-tritium. En 1981, Gérald Gabriel Se a proposé une expérience de confinement et de stockage d'anti-protons au Fermilab, puis au CERN où il a maintenu « en vie » pendant plus de 3 mois des anti-protons dans un cylindre de 15 cm et à une température de  $-269^{\circ}\text{C}$ . En septembre 1995, 9 atomes d'anti-hydrogène ont été créés au CERN.

### Les études en cours

*Projet AMS lancé par la NASA. Gérald Smith et Steven Howe aux USA à Penn State et au Fermilab pour le compte du NIAC. Prochainement aux USA, le projet « supercollider » devrait permettre de produire des anti-protons à un million de dollars le milligramme. A suivre...*

### **En conclusion**

On peut dire aujourd'hui que l'antimatière est une immense source d'énergie, mais les problèmes techniques liés à sa nature et à ses propriétés restent très largement à résoudre. Actuellement, il faudrait entre 1 et 10 milliards de dollars (ou euros) pour produire un milligramme d'antimatière.

# L'ÉNERGIE DU VIDE

Afin de bien cerner ce qu'est l'énergie du vide, son origine et comment elle a été introduite dans la physique moderne, il est nécessaire de commencer par discuter d'une branche plus spécifique de cette même physique, que l'on nomme la cosmologie. La cosmologie est l'étude de l'univers dans son ensemble, que l'on nomme le Cosmos. Et dans le paragraphe qui suit nous allons nous intéresser plus particulièrement à une constante introduite dans les équations de l'univers, qui porte le nom de constante cosmologique, qui est en quelque sorte à la base de la notion d'énergie du vide, et qui encore aujourd'hui est à l'origine de nombreux débats au sein de la communauté scientifique.

## La constante cosmologique

On commença à parler de l'énergie du vide avec l'avènement de la théorie de la relativité générale d'Einstein au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Einstein bâti cette théorie, comme une nouvelle interprétation de la gravitation. Au contraire des autres interactions pour lesquelles l'espace-temps n'est que le cadre des événements physiques dont elles sont à l'origine, la gravitation agit sur l'espace et sur le temps. Afin d'appliquer sa théorie à l'univers tout entier, il considéra en première approximation que l'univers était rempli de matière distribuée uniformément jusqu'à l'infini. La conclusion à laquelle il aboutit fut incroyable : *sous l'effet de la présence de matière, l'espace lui-même devait être soit en expansion, soit en contraction, et la matière de l'Univers devait être emportée par ce mouvement.* Mais l'idée d'un univers non statique ne plaisait pas à Einstein. Pour lui, l'univers se devait d'être immuable. Pourquoi l'univers serait en contraction ou en expansion ? Ayant bouleversé à maintes reprises la physique, Einstein ne craignait pas de le faire à nouveau, mais cette fois, la révolution était bien plus grande et cette révolution le heurtait jusque dans ses convictions les plus profondes. Convaincu du bien fondé que l'univers était statique il se dit qu'il avait fait une erreur, et n'arrivant pas à l'identifier, il rajouta dans ses équations une constante, qu'il appela constante cosmologique et qui lui permis d'obtenir un univers statique. Einstein dira plus tard que la constante cosmologique était la plus grosse erreur de sa vie. Alexandre Friedmann fut, en 1922, le premier physicien à interpréter correctement les équations d'Einstein sans constante cosmologique. Il aboutit à de nouvelles équations portant son nom. Mais cette constante peut s'interpréter dans les équations de Friedmann comme une densité d'énergie qu'il faut ajouter à la densité de la matière et de rayonnement. Quelques années plus tard, autour de 1925, un astronome américain, Edwin Hubble, découvrit en constatant l'éloignement des galaxies, que l'univers était en expansion et la constante cosmologique, comme l'éther (fluide baignant les planètes) auparavant, tomba dans l'oubli.

Dans les années 30, elle réapparue lorsqu'on commença à essayer d'unifier la gravitation et la mécanique quantique. On parla alors de la grande unification qui devait régner à l'origine de la formation de notre univers. La théorie de la grande unification est la théorie selon laquelle à l'origine (le Big Bang), toutes les forces étaient unifiées et il ne

régnait qu'une seule interaction. Des physiciens montrèrent à travers différents modèles que la matière s'était créée à partir du vide à peu près à cette époque, donc le vide n'était pas vide !

Aussi surprenant que cela puisse paraître, le vide, pour la physique moderne, n'est pas vide dans le sens où nous l'entendons dans la vie de tous les jours, et ce vide a même une masse. Si aujourd'hui sa masse est très faible, et quand on dit très faible il faut comprendre proche de zéro, il faut bien se rendre à l'évidence qu'il a existé une époque pendant laquelle ce n'était le cas. Pour exemple, des physiciens, par des calculs complexes, ont montré qu'un mètre cube de vide à l'époque de la grande unification (soit jusqu'à  $10^{-33}$  s après l'instant de Planck, période très proche du Big Bang) avait une masse de l'ordre de  $10^{73}$  kg ou  $10^{70}$  tonnes !

On comprend maintenant plus facilement comment le vide, pourtant dépourvue de toutes particules, contribue à l'évolution de l'univers et contient en lui-même une certaine énergie, la fameuse **énergie du vide**.

L'électrodynamique quantique nous dit que le vide est le siège de fluctuations de champ. Ces fluctuations sont en moyenne nulles mais présentent un écart quadratique moyen non nul. Cela signifie que si l'on effectue une mesure de champ dans le vide, on pourra trouver un résultat non nul, même si aucun photon n'est présent dans cet espace. Ce sont ces fluctuations qui permettent d'interpréter « l'émission spontanée » de photons par les atomes. Dans certaines expériences, les chercheurs ont réussi à comprimer les fluctuations du vide. Ils ont créé une zone où ces fluctuations sont plus faibles, et ces dernières semblaient alors posséder une énergie positive, car son énergie était plus faible que celle de référence (énergie de point zéro). On peut citer ici l'exemple de l'effet Casimir, dans lequel deux feuilles métalliques parfaitement plates, non chargées, parallèles et propres, sont placées très proches l'une de l'autre dans un vide poussé. On remarque alors que les deux feuilles s'attirent faiblement avec une force que l'on peut attribuer à une densité d'énergie négative dans le vide compris entre elles deux. Voir le schéma suivant, qui présente le principe de l'expérience ainsi que le dispositif.



## En conclusion

La maîtrise d'une telle énergie serait évidemment très utile. Mais il faudrait pour cela réussir l'unification de la théorie de la gravitation et de la mécanique quantique, ce qui a été entrepris par la théorie des super cordes mais qui reste largement incomplète.

# ANTIGRAVITATION

*Précision concernant les auteurs de ce rapport.. ■*

*Les réflexions portées sur les résultats des expériences nous ont posé quelques problèmes conceptuels relatifs à la physique qui nous a été enseigné depuis le Lycée jusqu'à la maîtrise, et que nous **qualifierons** de « classique » au vue des arguments et des théories qui vont être développer dans ce qui suit. Ces théories n'engagent donc que **leur(s) auteur(s)** dont nous rapportons les conclusions, bien que nous ne soyons pas en total accord avec celles-ci et incapable d'en apporter de nouvelles. Car le but de ce rapport n'est pas de porter une réflexion sur des domaines si vastes, qu'une année entière à leur consacrer n'y **suffirait** pas, mais plutôt de faire un bilan de ce que les scientifiques proposent afin de développer de nouveaux modes de propulsion, quitte à établir de nouvelles théories. De plus, nous ne sommes pas en mesure de prétendre à combler les lacunes des physiques exotiques.*

La gravitation, cette loi empirique qui nous permet de comprendre le mouvement des planètes, la formation du système solaire et qui nous empêche de nous échapper de la surface de la Terre comme de tout autre astre. Loi issue des observations d'Isaac Newton et complétée plusieurs siècles après par Albert Einstein et sa théorie de la relativité. A l'échelle de l'Univers la gravité domine sans partage. Elle est la plus puissante de toutes les forces, et partout où se trouve de la matière elle s'exerce sans limite d'espace, allant même **jusqu'à** modifier ce dernier ainsi que le temps dans lesquels elle règne.

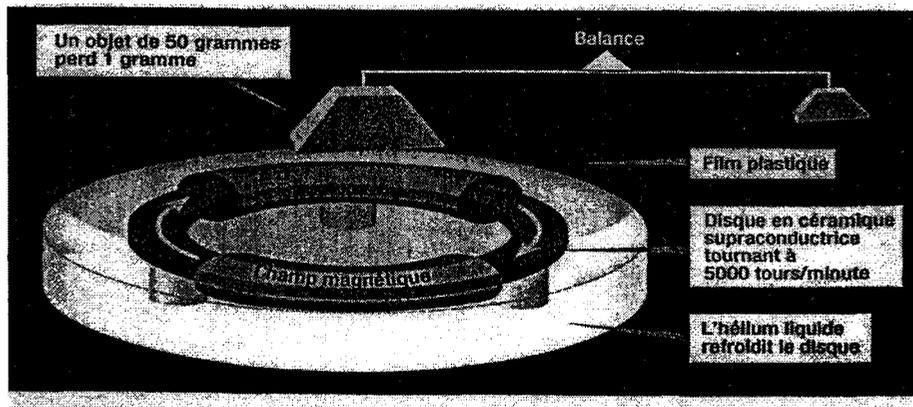
Mais depuis peu, elle semble avoir trouvé son maître en la personne d'Eugène PODKLETNOV, physicien russe travaillant en Finlande. Ses travaux l'auraient conduit construire un bouclier antigravité. Ses conclusions, toutes aussi surprenantes soient-elles, semblent attirer l'intérêt d'un grand nombres de scientifiques du monde entier. En effet, qui un jour n'a pas rêvé de s'envoler et de partir dans l'espace à bord d'un vaisseau capable de vols stationnaires et autres prouesses. Mais les faits sont là, et pour y voir plus clair nous allons nous étendre quelque peu sur son expérience.

## L'expérience de PODKLETNOV

L'expérience réalisée, par Evgueni PODKLETNOV, à l'université de Tampere, suggère qu'un disque supraconducteur, en lévitation au-dessus d'un champ magnétique continu et mis en rotation par d'autres champs magnétiques alternatifs, provoque une modification de champ de pesanteur terrestre.

*Les supraconducteurs sont des matériaux dont la résistivité s'annule brusquement à certaines températures (0 K – zéro absolu). Ils ont été découverts en 1911, au Pays-Bas, où l'on avait réussi à annuler la résistance du mercure à environ 0 K. En 1987, le CNRS obtient ce résultat sur une céramique élaborée à Caen pour une température de 30 K, puis à 133 K en 1993.*

Le disque supraconducteur, de type  $\text{YcaCuO}$ , de diamètre de 275 mm structuré en couches, est plongé dans de l'azote liquide (77 K). Lorsqu'il est soumis à des champs magnétiques variables, des courants électriques circulaires de grande intensité (et sans effet Joule), apparaissent en surface et à l'intérieur. Ce phénomène d'induction magnétique est appelé vortex.



Podkletnov fait tourner un disque en céramique supraconductrice classique ( $\text{YbaCuO}$ ) à 5000 tours/minute dans une enceinte à  $-210^\circ\text{C}$ . Puis il pèse des objets qu'il place au-dessus du disque. Il affirme avoir enregistré une perte de poids allant jusqu'à 2 %. Plus la rotation est rapide, plus la perte de poids est importante et ceci indépendamment de la nature propre des objets (bois, métal, plastique...). La perte de poids se maintient tant que le disque tourne, même après coupure du moteur de rotation. Il aurait mis en évidence que la création des vortex dans les supraconducteurs, conduirait à faire écran à la gravitation. Lors de la formation de ces vortex, la lumière serait ralentie et la courbure de l'espace modifiée. Ceci n'est qu'une des théories présentées afin d'expliquer les phénomènes constatés.

Aujourd'hui, la NASA effectue des expériences basées sur les travaux de Podkletnov avec des disques de 31 cm. L'université de Caroline du Sud, mentionne qu'un « gravity

generator » a été réalisé par les docteurs Douglas Torr et Timir Datta. Un brevet a même été déposé par John Schnurer (brevet international W098/23976). Il a effectué ces expériences en plaçant 3 solénoïdes sous un disque de céramique type Sintered YbaCuO de 25 mm de diamètre. Les solénoïdes étant séquentiellement connectés à un générateur. Les docteurs Li Ning, Noever et Roberston ont écrit quelques articles dans le *Physical Review*. Ils ont émis la possibilité de générer un champ gravitationnel artificiel en synchronisant les champs « gravitomagnétiques » des ions au sein de la céramique.

*« Même si l'expérience ne contient aucun artéfact, l'explication est à rechercher ailleurs que dans l'existence d'un champ gravitomagnétique »,* d'après Luc Blanchet, du département d'astrophysique relativiste et de cosmologie de l'observatoire de Meudon.

Aux dernières nouvelles, les industriels qui finançaient ses recherches ont interrompu leur versements. Cela nous a beaucoup surpris et nous n'avons pas réussi à savoir quelle en était la justification. Le problème qui se pose dès à présent, est la reproductibilité de l'expérience. Car si les faits sont authentiques et nous les prendront comme tels, avec certes beaucoup de prudence, il n'est pas imaginable qu'une telle découverte soit délaissée pour quelque raison que ce soit.

Une autre expérience est venue à notre connaissance, celle de Biefeld Brown. Cette expérience, moins connue et beaucoup plus ancienne que la précédente, fait état du comportement d'un condensateur placé dans des conditions particulières. N'ayant que très peu de renseignements nous choisissons de vous présenter les faits et rien que les faits.

### *L'expérience de Biefeld Brown*

Un condensateur contenant une céramique piézoélectrique de constante diélectrique élevée, se déplace dans le sens de son armature positive lorsque la tension dépasse une tension de seuil (environ 40 000 V). Certains interprètent ce résultat comme la preuve de l'énergie du point zéro, énergie qui subsiste lorsque l'espace est dépouillé des rayonnements classiques (i.e. énergie associée à la présence de l'espace-temps).

Certains des auteurs d'ouvrages traitant de ce sujet préfèrent parler d'électrogravité ou d'électrogravitativité plutôt que d'antigravitation pour qualifier les phénomènes en question.

Un brevet a été déposé pour cette découverte et son contenu est le suivant : *« Lorsque deux électrodes de forme appropriée sont maintenues à un certain écartement mutuel fixe et plongées dans un milieu diélectrique et lorsqu'on leur donne une charge opposée de grandeur appropriée, il apparaît une force qui tend à déplacer la paire d'électrodes à travers le milieu. »*

Une autre version est la suivante : *« Cet effet se manifeste par la mise en mouvement stimulée d'un condensateur non parfait dès que l'on porte ses deux armatures à très haute*

*tension en injectant dans le circuit un courant de fuite. Le mouvement observé est dirigé dans le sens de l'électrode positive. »*

### Projet de l'USAF

Le projet de l'USAF utilisant l'électrogravité s'appelle B-2. Des cations sont émis du bord des ailes, ils se dirigent vers l'avant de l'appareil en formant une parabole. Des anions sont injectés à l'arrière de l'appareil. la DDP (différence de potentiel) atteint environ  $15.10^6$  V, ce qui crée des nuages denses d'ions positifs et négatifs. Selon l'expérience de B. Brown, tout se passe comme si l'appareil se trouvait constamment en face d'une énorme planète l'attirant vers l'avant, ce qui lui permettrait d'atteindre une vitesse de croisière supersonique.

Il n'existe pas de théories officielles expliquant ce phénomène mais 3 idées sont à explorer selon les auteurs de ces expériences :

- Le champ électrique créerait un champ antigravitationnel
- Le champ électrique donnerait la possibilité d'extraire l'énergie du vide
- Influencés par le champ électrique, les électrons se comporteraient comme s'ils étaient associés à une masse négative et donc à un champ gravitationnel répulsif.

En conclusion

Ce procédé, à condition qu'il soit validé, permettrait d'atteindre des vitesses très élevées tout en atténuant la bang supersonique, par ionisation de l'air, ce dernier verrait sa densité diminuer et serait donc plus facile à traverser. De plus, on aurait, toujours d'un point de vue théorique, la possibilité de l'utiliser dans le vide et dans l'air. un frein à la réalisation d'un tel projet est le coût faramineux d'un appareil : 1 milliard de dollars. Il resterait néanmoins à utiliser des matériaux de constante diélectrique élevée, comme des céramiques et de densité massique importante (92% de l'uranium dans le cas du B2) ce qui en soit impose un certain nombre de contraintes. Il sera aussi nécessaire de veiller à l'altération des composants électroniques en présence de champs électrique et magnétique importants.

### III. Applications

Dans cette partie nous allons étudier les différents types de propulsions qui trouvent une application de nos jours ou qui sont testés sur des engins expérimentaux. Et pour commencer, nous allons nous intéresser à la propulsion ionique, aussi appelée propulsion électrique. Hors ergols et poudres, elle est la propulsion la plus utilisée dans le domaine du spatial, et elle est aussi celle vers laquelle les chercheurs semblent s'orienter le plus, du fait de ses faibles coûts et de ses performances. :

<i>Propulsion ionique</i> _____	24
<i>MHD</i> _____	27
<i>La Catapulte Spatiale</i> _____	31
<i>LASER</i> _____	36
<i>Propulsion nucléaire</i> _____	39

## PROPULSION IONIQUE

Le principe de la propulsion ionique est d'ioniser un gaz sous faible pression avec une haute tension, puis d'accélérer les particules avec des champs encore plus élevés. En quittant le moteur, les particules ionisées fournissent une poussée  $P = m v$  où  $m$  est le débit massique de particules et  $v$  leur vitesse d'éjection. Il existe plusieurs modes de fonctionnement des moteurs ioniques, le plus efficace est le moteur MPD (MagnétoPlasmaDynamique).

### Descriptif rapide de la méthode utilisée

Ce type de moteur a une géométrie cylindrique. L'axe central constitue la cathode et la surface du cylindre l'anode. Une fois introduit dans le moteur, le propergol gazeux est ionisé par l'intense champ électrique produit par les électrodes. Le champ magnétique, créé par la cathode dévie le courant de particules vers l'extérieur, ce qui crée une poussée  $P$ . On peut montrer que

$$P = \frac{\mu J^2}{4\pi} \left( \ln \frac{ra}{rc} + c \right)$$

Où  $\mu$  est la perméabilité du vide,  $J$  le courant de particules ionisées,  $ra$  et  $rc$  les rayons de l'anode et de la cathode et  $c$  une constante inférieure à 1 qui dépend de la géométrie du système. Si on se met dans une situation dans laquelle on néglige le poids, on obtient :

$$d(m v) / dt = \text{poussée} = P = m' u = m' v + m v'$$

où  $v$  est la vitesse de la fusée, et  $u$  la vitesse d'éjection

d'où

$$Av = u \ln (m_i / m_f)$$

où  $A_v$  est la variation de vitesse

Au est élevé :

- si la différence ( $m_f - m_i$ ) est élevée : c'est la propulsion chimique
  - si  $v_1$  est élevée : c'est la propulsion ionique,
- la masse embarquée est donc plus faible.

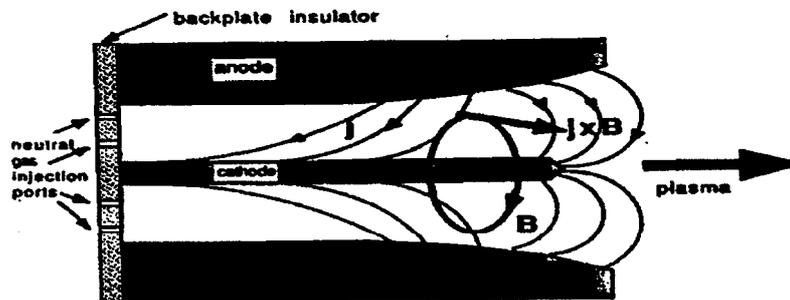


Fig. 8. Current, field and force patterns in an MPD thruster.

### Avantages

Le grand avantage de cette propulsion par rapport à la propulsion chimique est la vitesse d'éjection des particules. L'ISP (l'impulsion spécifique) est donc plus élevée et la quantité de carburant est plus faible. On rappelle que l'ISP mesure les performances d'un moteur. Elle est définie comme la durée pendant laquelle un kg de carburant peut fournir une poussée de un N (Newton), soit environ la vitesse d'éjection des particules divisée par l'accélération de la gravitation à la surface de la Terre.

De plus, la fiabilité d'un système utilisant cette propulsion est relativement élevée. En effet, plusieurs sondes sont déjà parties dans le système solaire explorer des planètes ou des satellites des planètes géantes, comme DEEP SPACE 1. Les américains envisagent d'utiliser ce système afin d'envoyer une sonde sur Pluton, la seule planète encore inexplorée par une sonde, du fait de son orbite inclinée d'environ  $17^\circ$  sur le plan de l'écliptique et de son éloignement, environ 39 unités astronomiques. Les chercheurs de la NASA pensent pouvoir atteindre Pluton, grâce à la propulsion ionique, en moins de 9 ans !

Les moteurs ioniques sont intéressants aussi, car on a la possibilité d'utiliser un grand nombre de gaz différents. On utilise souvent l'hydrogène ou d'autres gaz rares ou même de l'air. Ce moteur a l'avantage d'avoir une bonne maîtrise du flux de particules dans la tuyère, donc une bonne manœuvrabilité.

### Inconvénients

L'érosion des électrodes et de l'isolateur reste un problème qui sera sans doute très vite résolu.

### En conclusion

Outre les sondes dont on a déjà parlé, les moteurs ioniques sont utilisés, depuis plus de 30 ans, afin de corriger les orbites des satellites. L'énergie électrique étant fournie par les panneaux solaires, la poussée ainsi obtenue est 10 fois celles des propulsions classiques. Le satellite français de télécommunication STENTOR devrait être équipé d'un moteur ionique, ainsi que TELA DESIC et SKY BRIDGE.

# LA MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE OU MHD

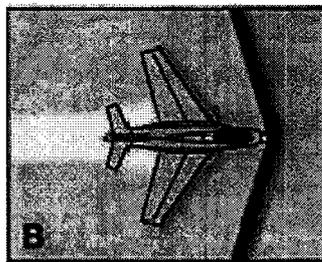
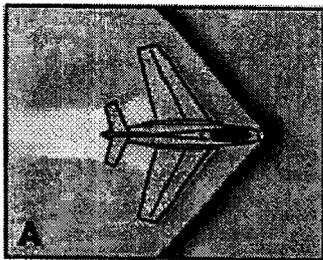
*Une technologie déjà en service dans les sous-marins !*

Les futurs voyageurs interstellaires sont confrontés à un grave problème : au vide cosmique succèdent les milliards d'atomes et de molécules d'une atmosphère. Autant faire voler un oiseau dans l'eau de mer ! Ils doivent impérativement adapter leur système de propulsion pour faire face à la pesanteur et aux couches denses de l'air. Le système à envisager serait peut être la MHD. Nous allons voir dans une première partie son principe de fonctionnement et dans une deuxième, les applications avec ses avantages et ses inconvénients.

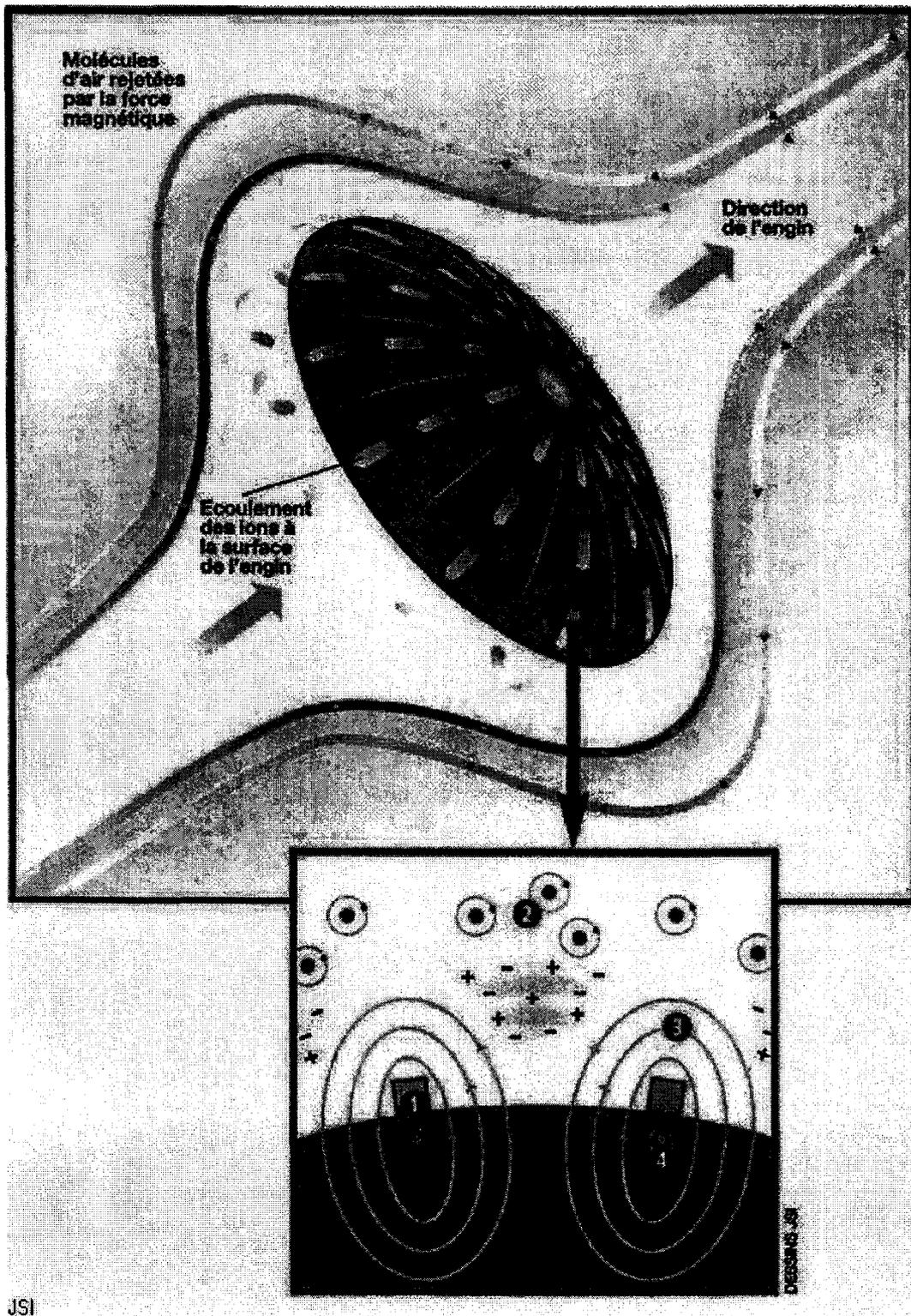
## Principe

La propulsion MHD est basée sur la loi de Laplace. Un fil conducteur de longueur  $\underline{L}$ , parcouru par un courant  $\underline{I}$  et soumis à un champ magnétique  $\underline{B}$  subit la force  $\underline{F} = \underline{I} \cdot \underline{L} \wedge \underline{B}$ . Dans le cas de la MHD, le courant est constitué de particules d'air ionisées en mouvement, et le champ magnétique est créé par un aimant supraconducteur.

## Le mur du silence



Dans une atmosphère, un avion en vol percute des molécules atmosphériques provoquant une « vague » d'air comprimé qui le freine (A). Plus l'avion va vite, plus l'énergie s'accumule sur ce front qui s'élargit (B). A la vitesse du son, l'air ne peut dissiper l'énergie accumulée, et l'avion perce le front en produisant un « bang » caractéristique (C). On dit qu'il passe le mur du son. Si l'air est moins dense, le bang s'atténue mais il est toujours présent. Une solution connue pour éviter ce bruit est la propulsion magnétohydrodynamique (MHD).



JSI

Deux phénomènes sont en jeu. Le premier consiste, grâce à des électrodes placées sur la surface de la soucoupe (1), à arracher les électrons des molécules d'air, qui devient conducteur d'électricité (2). Le second système, placé sous la surface, est un générateur de champ magnétique (3) grâce à des fils supraconducteurs (4). L'air « électrisé » (les ions) est ainsi entraîné vers l'arrière qui poussera l'engin vers l'avant au lieu de le freiner. Il n'y a donc plus de front à percer ni de « bang » .

**... c'est le fluide qui pousse l'engin !**

Apparue à la fin des années 60, la MHD est une technologie de propulsion dont les principes sont à cheval sur la théorie du magnétisme et la mécanique des fluides. Les systèmes de propulsion classiques (ceux des bateaux et des avions) « poussent » sur le fluide (eau ou air). Le système MHD, lui, fonctionne à l'envers : c'est le fluide qui pousse l'engin !

Quand un avion se déplace dans l'atmosphère, il heurte les molécules d'air qui se trouvent sur son passage et, grâce aux turbines, les envoie mécaniquement vers l'arrière. Il se crée sur le nez de l'appareil une accumulation de molécules, ou « front d'énergie », qui tend à le freiner. L'élasticité de l'air permet la dissipation de l'énergie concentrée à l'avant de l'avion. Mais, lorsque ce dernier atteint la vitesse du son (331 m/s), le front d'énergie n'a pas le temps de se dissiper. Pour dépasser cette vitesse, l'engin doit traverser ce « mur du son », produisant un « bang » caractéristique. Dans le système MHD, les couches d'air qui entourent l'appareil sont rejetées vers l'arrière par une force magnétique, formant une sorte de vent. Contrairement au cas classique, des molécules d'air s'accumulent à l'arrière, poussant le vaisseau, tandis qu'à l'avant leur raréfaction crée un vide qui l'aspire. Il n'y a plus de mur énergétique s'opposant à la progression de l'engin : la « soucoupe volante » peut allégrement dépasser la vitesse du son sans « bang ». De plus, ce phénomène n'est pas mécanique mais magnétique ; il n'engendre qu'un son, celui des molécules qui s'écoulent vers l'arrière : un léger sifflement. C'est donc le champ magnétique créé à la surface de l'engin qui est à l'origine du déplacement d'air. Un champ magnétique a en effet le pouvoir de mettre de dévier des particules chargées (électrons et ions). Ainsi, quand on approche un aimant de l'écran d'un téléviseur, on observe une distorsion locale de l'image, car celle-ci est constituée d'électrons. L'air ne devrait pas être sensible à un champ magnétique, puisque ses molécules (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>...) ne sont pas chargées. Pour qu'il le devienne, il faut d'abord ioniser l'atmosphère (lui arracher des électrons), de manière que ses molécules soient chargées positivement. Outre le générateur de champ magnétique, un système de propulsion MHD destiné à des voyages aériens contient donc un ioniseur - un système d'électrodes créant un champ électrique ou encore un système pulsant des micro-ondes. Dans l'eau de mer, qui contient naturellement des ions chlorure et sodium, un sous-marin à MHD peut se passer d'ioniseur. Or, lorsque l'air environnant l'engin est ionisé, il devient fluorescent. Le fort champ magnétique engendré par le moteur MHD peut être à l'origine d'autres phénomènes : calage des moteurs de voiture, malaises chez les êtres humains, altérations cellulaires chez les végétaux. Il est fort probable que des militaires français, américains ou russes travaillent activement sur la propulsion MHD, mais de là à savoir à quel stade ils en sont... Car comment produire l'énergie nécessaire à un si grand champ magnétique sans que le poids du générateur cloue l'appareil au sol ?

### Avantages

- **Discrétion.** En effet, on peut facilement montrer que le système MHD atténue l'accumulation des particules sur le nez de l'appareil, il n'y a donc pas de bang lorsque ce dernier dépasse la vitesse du son. L'appareil n'émet qu'un léger sifflement.
- **Manœuvrabilité.** On a la possibilité en contrôlant les champs de réaliser des demi-tours ou des virages à 90 degrés !
- **Vitesse.** En théorie la vitesse d'un appareil utilisant cette propulsion est beaucoup plus grande que celle de n'importe quel autre appareil, à cause des faibles frottements de l'air ionisé.

## Inconvénients

- Le principal inconvénient est l'immense **quantité d'énergie** nécessaire pour l'obtention des hautes tensions et inductions à mettre en jeu pour obtenir un effet exploitable. En effet, si aujourd'hui nous pouvons obtenir des champs de l'ordre de 10 Teslas assez facilement, il sera nécessaire pour exploiter la MHD d'obtenir et de contrôler des champs de l'ordre de 20 à 30 Teslas minimum. A cela s'ajoute la masse du générateur qui alourdi considérablement l'appareil, car à l'heure actuelle nous ne savons pas réaliser de **mini-générateurs**.
- La **température**. L'utilisation de matériaux supraconducteurs nécessite de les maintenir à très basse température. D'où utilisation d'azote, d'hydrogène ou d'hélium liquide, qui alourdissent encore l'appareil.
- Les **champs électromagnétiques** intenses détériorent les systèmes électroniques. Donc nécessité de les protéger par des boucliers électromagnétiques.

## **En conclusion**

La propulsion MHD est aujourd'hui à l'étude dans de grands laboratoires, surtout aux Etats Unis d'Amérique et en Russie. Dans ces deux pays, les centres de recherches militaires sont ceux qui ont le plus investi, les applications stratégiques étant évidentes. Certains européens, travaillent aussi dessus, notamment Jean-Pierre Petit en France, qui est directeur de recherche au CNRS de Marseille. Les avancées dans ce type de propulsion sont surtout attendues dans la réalisation et l'amélioration des supraconducteurs. Si la MHD présente de nombreux avantages pour l'armée, il n'en est pas de même pour les civils. En effet, cela fait plus d'un siècle que l'homme se déplace dans le ciel, avec des appareils certes, moins sophistiqués, mais surtout moins coûteux. Notons simplement, que cette propulsion est souvent évoquée afin d'expliquer certaines observations d'OVNI.

# LA CATAPULTE SPATIALE

La piste d'un porte-avion n'offrant pas une longueur suffisante pour décoller, une catapulte à vapeur lance l'avion à sa vitesse de sustentation ; la même idée va être appliquée pour l'espace : un lanceur électrique donnera le coup d'envoi aux satellites pour les mettre en orbite. Pour quitter la Terre - pour s'en aller vraiment jusqu'aux étoiles, il faut au niveau de la mer une vitesse de 11 km/s, soit 40 000 km/h ; vitesse fantastique qui est bien au-delà de ce que fait l'obus le plus rapide (5400 km/h) ou le meilleur avion (3000 km/h). Mais il s'agit là d'une vitesse balistique, celle d'un coup de canon, et non d'une vitesse soutenue, comme les 130 km/h d'une voiture sur autoroute. Mais les obstacles ne sont pas moindres : s'il suffit de 280 km/h (en négligeant la résistance de l'air) pour sauter d'un bond en haut de la tour Eiffel, il faut 40 000 km/h, nous l'avons vu, pour aller d'un seul jet de la Terre à la Lune. Or, c'est une vitesse qu'il est tout à fait impossible d'atteindre par des moyens conventionnels, et de plus on ne peut pas négliger la résistance de l'air, car, à ces allures, l'atmosphère est aussi dure à traverser qu'une falaise de béton.

La solution, on le sait, a consisté à inverser le processus balistique : au lieu de tirer des balles vers la Lune, on retourne la mitrailleuse et on tire les balles vers la Terre ; le recul hissera l'engin. De fait, le moteur-fusée ne fait que tirer des millions de projectiles - les molécules des gaz de combustion - et le recul, qui n'est autre que la réaction liée à cette action, repousse l'engin vers l'espace.

La fusée est une solution maintenant très au point qui permet de quitter progressivement l'attraction terrestre et d'aller aussi loin qu'on veut ; mais elle a le lourd inconvénient, de devoir emporter une immense charge de combustible et de structures. Pour 100 tonnes au départ, il n'y aura guère que 3 ou 4 tonnes en orbite dans le meilleur des cas. Le rendement global est faible et le procédé extrêmement coûteux. Par principe même, il ne peut en être autrement : la force de réaction vers le haut n'est là que si on envoie une masse de projectiles vers le bas, et il faut donc emporter cette masse avec soi dès le départ. Il restait tout de même un moyen de contourner l'obstacle en coupant la poire en deux, et les chercheurs y avaient pensé depuis longtemps : n'utiliser le moteur-fusée qu'après avoir donné à l'engin spatial une vitesse ascensionnelle importante au moyen d'une source d'énergie basée au sol.

La première idée qui se présenta fut de tirer une fusée avec un canon : au lieu de partir du sol avec une vitesse nulle, elle aurait déjà au moment d'allumer sa tuyère une vitesse de 1 ou 2 km/s. Aux Etats-Unis, le procédé est étudié depuis une trentaine d'années, mais il se heurte à de grosses difficultés : l'accélération au départ du coup, la longueur du tube (plus de 1 km), le rendement qui reste faible. Les canons habituels à poudre ne peuvent guère dépasser 2 km/s avec un obus de 8 kg pour un calibre de 15 cm, ce qui est proche de la limite théorique

imposée par la vitesse du son dans les gaz de combustion. Pour aller au-delà, il faut des canons à double action qui combinent la poudre et l'air comprimé : la charge de poudre lance un gros piston dans un cylindre, et celui-ci comprime à son tour un fort volume de gaz léger (hélium ou hydrogène). C'est ce gaz hyper comprimé qui va lancer un petit projectile (quelques centaines de grammes seulement) à des vitesses qui peuvent aller de 10 à 12 km/s : on est donc au niveau de la vitesse de libération (11 km/s), mais le tir doit se faire sous vide, faute de quoi le frottement de l'air volatiliserait le projectile. Le prototype étudié aux Etats-Unis par le laboratoire national de Lawrence-Livermore fonctionne selon ce principe, mais avec une vitesse de 4 km/s qui est compatible avec les boucliers thermiques actuels ; la charge utile serait de l'ordre de 5 kg. Le coup de lancement avec un explosif garde toutefois l'inconvénient d'un redoutable choc au départ et d'une absence totale de contrôle une fois l'amorçage percuté. A l'opposé, les moyens de propulsion habituels sont trop lents pour être intéressants : même en emportant la fusée sur un avion, on ne lui donnerait que quelques centaines de mètres par seconde là où il faut une impulsion de départ de plusieurs km/s.

### ... le lanceur électrique ...

Restait quand même un processus de lancement tout à fait inhabituel, mais sur lequel les Américains fondent de grands espoirs - au point d'y consacrer des millions de dollars -, le lanceur électrique. A l'origine, l'étude et la mise au point de ce procédé concernaient surtout le lancement de projectiles antichar ou antimissile : c'est ainsi qu'en France l'institut franco-allemand de St Louis, près de Mulhouse, expérimente des lanceurs électriques capables d'accélérer des projectiles de quelques grammes jusqu'à des vitesses allant de 4.5 km/s à 8 km/s. Pour être juste, il vaudrait mieux parler de renouveau d'un processus auquel les ingénieurs avaient pensé dès la fin du siècle dernier. En 1902, l'Allemand Birkeland avait construit un canon électrique qui lançait des boulets de 10 kg à 100 m/s. En 1918, le Français Fauchon-Villeplée atteignait 200 m/s avec des fléchettes de 50 grammes ; en Allemagne, Hansler parvenait à 1200 m/s, en 1944, avec des fléchettes de même poids. En réalité, l'idée d'un lanceur électrique remonte à la découverte du champ magnétique des courants - Ørsted (1819), puis Faraday, Laplace, Lenz, Lorentz, etc. Quand un courant circule dans un conducteur, il engendre autour de lui un champ magnétique exactement semblable à celui d'un aimant, donc orienté avec un pôle nord et un pôle sud. Or, on sait, et on le vérifie sans peine avec deux aimants, que l'intérêt des champs magnétiques vient de ce qu'ils engendrent des forces attractives ou répulsives : deux pôles de même nom se repoussent, et deux pôles de noms contraires s'attirent. Ces forces sont déjà importantes avec des aimants permanents. Avec les électro-aimants, ou le champ est créé par le passage d'un courant dans des bobinages, leur intensité peut devenir colossale.

Tous les moteurs électriques reposent sur les attractions ou répulsions d'électro-aimants, lesquelles sont assez puissantes pour tirer un TGV de 300 tonnes à 500 km/h ; il était donc logique de leur demander la propulsion d'un boulet de quelques tonnes à 20 000 km/h. On se heurtait toutefois à un problème de taille : l'intensité des forces magnétiques décroît avec le carré de la distance entre pôles aimantés. Si cette intensité est, par exemple, de 100 daN à 1 mm, elle tombe au quart de cette valeur à 2 mm (l'écart a doublé) et n'en vaut plus que le centième à 10 mm. Avec les machines tournantes où l'intervalle entre électro-aimants (l'entrefer) est constant et aussi réduit que possible, cet inconvénient est négligeable ; mais il ne l'est plus du tout avec un lanceur linéaire où l'écart entre pôles aimantés va augmenter dès le départ.



Le principe qui est à la base du lanceur magnétique est simple : on prend deux barreaux aimantés, on met en contact les deux pôles de même signe, et on lâche brusquement ; la force de répulsion rejette les deux barreaux de part et d'autre, où projette l'un des deux si l'autre est fixe. Mais, comme on peut le vérifier facilement, ce lanceur manque singulièrement de vigueur : l'aimant projectile n'est envoyé qu'à quelques décimètres, au mieux à un mètre. C'est bien insuffisant pour un lanceur spatial, mais cela découle directement de la loi d'attraction (ou de répulsion) en  $1/d^2$ , à peine le projectile s'éloigne-t-il du lanceur que la poussée chute à une valeur dérisoire. Avec des aimants permanents, il est impossible de concevoir un assemblage tel que le pôle nord (ou sud) du projectile progresse à travers une série rapprochée de pôles identiques qui le repousseraient de plus en plus vite. En revanche, c'est chose tout à fait faisable avec les champs magnétiques des courants : deux procédés sont maintenant expérimentés, l'un continu, dit lanceur à rails (voir schéma ci-dessus), l'autre discontinu, qui est le lanceur à bobines. Le premier, de loin le plus simple dans son principe, repose sur les forces d'induction réciproques - forces de Laplace, d'où découle la règle du flux maximal, ou forces de Lorentz. Considérons un tronçon de voie ferrée dont on suppose les deux rails bien isolés par les traverses en bois ; on pose en travers une barre de fer ronde. On relie ensuite les deux rails d'une même extrémité de la voie à une batterie : la barre de fer se met à rouler en s'éloignant de la source de courant - on peut d'ailleurs inverser le sens du courant, la barre s'éloignera toujours de la batterie. Cela vient de ce que le courant qui va d'un rail à l'autre en passant par la barre engendre des champs magnétiques (rail aller, barre, rail retour) dont les polarités sont de même signe ; les forces de répulsion liées à ces champs tendent donc à écarter les deux rails et à repousser la barre mobile. Tel est le principe du canon à rails - le processus inverse donne le freinage à induction. En pratique, ces forces ne commencent à être importantes qu'avec des intensités très élevées - plusieurs centaines de milliers d'ampères -, et se posent alors des problèmes de contact glissant qui sont difficiles à maîtriser. Les canons à rails ont fait l'objet de nombreuses expérimentations aux Etats-Unis, et en France à l'institut de St Louis. Les rails, généralement en cuivre, sont séparés par un isolant et le tout est maintenu dans une structure en acier très résistante, car les forces de répulsion, nous l'avons dit, tendent à écarter les rails. Le courant de haute intensité est fourni par des générateurs homo polaires, ou plus souvent par des batteries de condensateurs. Quant à la partie conductrice du projectile, elle est faite en général d'une mince feuille de métal volatilisée par la décharge des condensateurs ; le plasma qui en résulte sert de conducteur propulseur entre les deux rails.

### ... le lanceur à bobines...

La seconde technique, celle des lanceurs à bobines, est plus complexe, mais semble beaucoup plus prometteuse comme catapulte de satellites puisque les laboratoires nationaux Sandia, d'Albuquerque (Etats-Unis), y consacrent actuellement un budget colossal ; il est vrai, comme on va le voir, que le projet ne l'est pas moins. Le lanceur à bobines fait appel simultanément à deux processus : le champ engendré par un courant, et le courant engendré par un champ variable - si un conducteur est placé dans un champ magnétique variable, un courant se met à y circuler ; ce champ variable peut être créé par exemple en déplaçant un aimant près du conducteur, ou en lançant un courant lui-même variable dans une bobine. On va donc avoir une bobine fixe et, placée contre elle ou à l'intérieur, une bobine libre qui sera le projectile ; quand on lance le courant dans le bobinage fixe, l'intensité n'atteint pas instantanément sa valeur maximale. Il y a donc, dans un temps très court, création d'un champ magnétique croissant, donc variable. Celui-ci traverse la bobine mobile et y engendre un courant, lequel produit à son tour un champ magnétique opposé à celui qui a donné naissance au courant - loi de Lenz. Deux pôles de même nom se font donc face et il y a répulsion : la bobine mobile est repoussée. Avec des courants très intenses on aura une répulsion puissante qui rejettera la bobine mobile fort loin ; toutefois, on va retomber dans le problème des deux aimants mis face à face : la force décroît très vite avec la distance et, au total, l'impulsion de lancement restera faible. La parade consiste à accoler toute une série de bobines fixes que la bobine mobile traversera au fur et à mesure de sa progression, et à lancer le courant au bon moment dans chaque bobine. Cette synchronisation est difficile à obtenir, et de plus les forces magnétiques intenses mises en jeu tendent à déformer les bobines tandis que l'énorme ampérage du courant de lancement se traduit par un échauffement des conducteurs. En revanche, gros avantage par rapport au canon à rails, il n'y a plus de contacts glissants, générateurs d'étincelles et d'arcs destructeurs. Les recherches théoriques associées aux expériences ont toutefois permis à Sandia de maîtriser ces problèmes, et leur projet de catapulte électromagnétique pourrait déboucher un jour sur des lanceurs de satellites efficaces. Au départ, il s'agissait de lancer des projectiles antimissile à des vitesses que ne pouvaient donner les canons habituels. Les chercheurs se tournèrent donc vers les lanceurs électriques et résolurent le premier problème, à savoir l'échauffement et la déformation des bobines. Pour cela, le sens des courants dans les bobines fixes coaxiales et leur séquence menèrent à ce qu'on appelle reconnections magnétique - parce que les lignes de force du champ magnétique se reconnectent entre elles derrière le projectile, ce qui assure la poussée. Il faut donc une synchronisation parfaite entre la position de la bobine propulsive et l'envoi du courant dans les bobines fixes de telle façon que les lignes de champ se recombinent juste derrière elle. Le courant induit dans la bobine mobile circule alors toujours dans le même sens, ce qui évite les problèmes d'échauffement liés aux courants alternatifs. La synchronisation est obtenue par détection optique de la position du projectile dans le tunnel de bobines fixes, un ordinateur se chargeant alors de lancer le courant en fonction de cette position. Le courant lui-même est stocké dans une série d'énormes condensateurs, chaque groupe alimentant une seule bobine du lanceur. Là encore, il y a eu de très gros progrès en quelques années : en 1985, une batterie de condensateurs capable de stocker une énergie électrique de 5 mégajoules occupait un volume de  $8,5\text{m}^3$  ; en 1990, il suffit de  $0,8\text{m}^3$  et cette tendance à la réduction devrait se poursuivre dans les années qui viennent. Les premiers modèles lançaient des projectiles de 160g à  $1000\text{m/s}$  ; les versions actuelles à six étages (six bobines fixes), au calibre de 145 cm, tirent des projectiles de 5 kg à  $335\text{m/s}$ . Le futur modèle, celui qui servira de base au lanceur spatial, aura dix étages, un calibre de 75 cm, et la vitesse

devrait être de 1000m/s avec des projectiles de 380 kg. Au-delà, il ne restera plus qu'à multiplier le nombre d'étages pour atteindre la vitesse de 4500m/s pour une masse de l'ordre de 500 kg.

### ... système hybride...

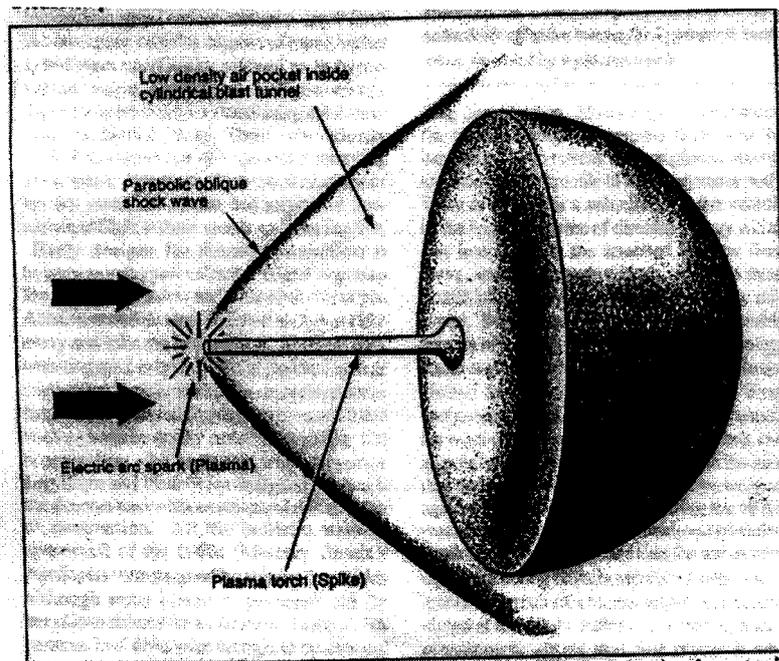
Ce lanceur ne remplacerait pas d'emblée les grosses fusées, mais servirait à envoyer de petites charges en orbite pour un coût moyen cent fois inférieur à celui actuellement pratiqué. Ces charges pourraient être des satellites légers, ou des objets nécessaires aux stations spatiales : carburant, outils, pièces de rechange, aliments, bouteilles d'oxygène, etc. Le projectile tel qu'il est essayé actuellement fait environ 6m de long pour un diamètre de 314 de mètre. Un anneau massif en aluminium ceinture la base : c'est lui la bobine mobile qui sert de propulseur, juste derrière, une série de perforations obliques dans lesquelles sera injecté de l'air comprimé, ce qui assure la rotation du projectile (8000tr/min) et sa stabilisation gyroscopique. Vient ensuite un moteur-fusée, puis la charge utile, et enfin un bouclier thermique très effilé. En mettant de 500 à 1000 étages sur une distance qui avoisinera le kilomètre, le projectile sera catapulté à une vitesse de l'ordre de 4,5 km/s et sous un angle ascendant de 30°. Dès qu'il sera assez haut, la base avec la ceinture conductrice et la partie turbine sera abandonnée. Parvenu au-dessus de l'atmosphère, le projectile se sépare du bouclier thermique et la fusée est allumée. A ce stade, il suffit d'une brève impulsion pour communiquer à l'engin une vitesse propre à le hisser un peu plus haut encore et à le satelliser ; en effet, si la vitesse de libération est de 11 km/s au niveau de la mer, elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne (elle vaut environ 11 sur racine carré de  $(d/R)$ ,  $d$  étant la distance du satellite au centre de la Terre et  $R$  le rayon de la Terre). Le coup d'envoi donné par la catapulte électromagnétique permet donc une considérable économie de l'énergie embarquée, puisque la majeure partie de la puissance nécessaire à l'envol provient de centrales basées à terre. C'est donc un système hybride, mais il constitue aujourd'hui la voie la plus économique pour la satellisation de charges légères. Les installations au sol seront en revanche colossales : pour alimenter les centaines de bobines d'un lanceur de plus d'un kilomètre, il faudra des batteries de condensateurs et de commutateurs occupant des bâtiments entiers, sans compter les générateurs qui auront à charger ces condensateurs. En contrepartie, il ne faudra qu'une dizaine de minutes entre chaque lancement. Toutefois, en l'état actuel de la technique, un tel lanceur ne serait pas adapté à des missions habitées, car l'accélération au départ est de l'ordre de 1 000 ou 2 000g ; c'est nettement moins que ce que supporte un obus (de 20 000 à 30 000g), mais largement suffisant pour aplatir un être vivant. Même l'électronique embarquée devra être renforcée.

### En conclusion

Jules Verne rêvait d'atteindre la Lune avec un canon ; il n'était finalement pas si loin de la vérité. Il fallait seulement remplacer la poudre par un champ magnétique et adjoindre une petite fusée au boulet pour lui laisser le temps de traverser l'atmosphère sans être volatilisé.

# LASER

Me système, très récent, fait appel à la technologie des LASER (Light Amplification of Simulating Emission of Radiation). Elle peut être utilisée seule ou alors en complément d'un autre système de propulsion placé à l'arrière de l'appareil, la torche plasma étant placée à l'avant. Elle est utilisée pour contrôler les manœuvres d'air autour de l'appareil. Le principe est le suivant : un faisceau pulsé d'onde LASER ou de micro ondes est focalisé à l'avant de l'appareil, l'air qui reçoit cette forte densité d'énergie s'ionise jusqu'à devenir un plasma (un plasma est un milieu gazeux globalement neutre composé d'ions et d'électrons libres). Lorsque l'appareil avance, il se crée en chaque nouvelle partie d'air ionisé une onde de choc qui a une forme parabolique. Cette onde de choc agit comme une coquille, l'appareil se trouve ainsi face à une poche d'air de densité plus faible que celle qu'il aurait rencontré sans la torche, donc une pression plus faible à l'avant qu'à l'arrière.



AIR International • December 1998

*Vue schématique du système de propulsion par la torche plasma*

## Avantages

- Diminution de la résistance de l'air qui est plus faible avec la torche, donc moins de combustible embarqué, et le bang supersonique est fortement atténué
- L'appareil n'a plus besoin d'avoir une forme aérodynamique (effilé à l'avant) car on a diminution de la température de contact air-appareil, donc moins de frottements

## Inconvénients

- Aucune utilité dans le vide interplanétaire
- Vulnérabilité des systèmes électroniques vis à vis des micro ondes. Les systèmes doivent être équipés de boucliers et les sous systèmes reliés entre eux par des fibres optiques

Leik Myrabo de l'institut polytechnique de **Rensselaer** à New York, étudie les ondes de choc dans une des rares souffleries au monde où la vitesse peut atteindre mach 25. Il a testé la torche plasma sur un disque pour une vitesse de mach 10 et il a constaté qu'une onde de choc parabolique s'était formée. Son objectif est mach 25, c'est la vitesse nécessaire pour échapper à l'attraction terrestre. Il a testé la torche plasma sur une soucoupe de 10 mètres de diamètre. Les tests ont montrés que l'environnement aérothermique de l'appareil utilisant la torche plasma à mach 25, est la même qu'un appareil conventionnel à mach 3.

L'objectif de ce système est de réduire considérablement les coûts de la mise en orbite des satellites.

Les américains font état d'un nouveau système de propulsion utilisant le LASER et dont le principe est le suivant.

On dirige depuis le sol un faisceau laser sur les surfaces réfléchissantes du « light craft » (avion lumière), celles ci focalisent le faisceau sous la forme d'un anneau qui va chauffer l'air jusqu'à 20 000 K. La dilatation explosive de l'air fournit la poussée nécessaire pour le vol. L'USAF Research Laboratory a déjà essayé avec succès ce type de propulsion sur un appareil de 15 cm de diamètre d'une masse de 50 g. Un laser de 10 kW a permis à l'objet d'atteindre 30 m en 30 s. Cet appareil de démonstration a une structure en aluminium, comprenant une coque, un capot en forme d'anneau et une partie arrière formée d'une tuyère. Durant le vol atmosphérique la section antérieure comprime l'air et le dirige vers l'entrée du moteur. Le capot annulaire reçoit le plus gros de la poussée et la partie arrière sert de miroir collecteur parabolique qui concentre la lumière, tout en fournissant une autre surface sur laquelle la sortie d'air chaud exerce la pression. Le système se retrouve alors auto-stabilisé : si le vaisseau se déplace en dehors du faisceau, la poussée l'incline et le remet dans le droit chemin. Leik Myrabo envisage d'accélérer des micro satellites (1 kg), pour les injecter en orbite basse grâce à un laser classique de 1 MW et ceci pour quelques centaines de francs d'électricité !

L'armée américaine a engagé un budget de 290 millions de francs pour la mise au point d'un étage terminal de fusée qui transférerait les satellites d'une orbite basse à l'orbite géostationnaire pour une fraction seulement des coûts des fusées chimiques. Le SOTV (Solar Orbit Transfer Vehicule) utilisera un miroir très léger qui dirigera la lumière solaire sur un bloc de graphite dont la température atteindra 2100 degrés. L'hydrogène liquide stocké à bord se vaporisera et exercera une poussée par son éjection.

## **En conclusion**

La technique LASER pourrait avoir de nombreuses applications civiles ou militaires. Efficace à toutes les vitesses, elle élimine le bang supersonique et permet des vitesses et accélérations extrêmes. La possibilité de cibler n'importe quel point de la planète en quelques minutes, de changer rapidement de direction ont des applications militaires évidentes. De plus, la possibilité de coupler la torche plasma avec d'autres types de propulsion (notamment la MHD) est un point positif non négligeable.

# PROPULSION NUCLÉAIRE

La radioactivité fut découverte par Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie au début du 20<sup>ème</sup> siècle. La radioactivité est l'émission de radiations invisibles par le noyau de certains atomes dits radioactifs. On distingue 3 types de radioactivité :

- Alpha : émission de noyaux d'hélium
- Bêta : émission de neutrinos (particules non chargées et de masse très faible)
- Gamma : émission d'ondes électromagnétiques très courtes et très pénétrantes

L'énergie nucléaire repose sur l'équivalence énergie - masse. C'est une réaction au cours de laquelle de la masse est transformée en énergie. Il y a 2 cas possibles :

- Fission : Un noyau très lourd se fractionne en noyaux légers. La différence entre la masse du noyau initial et la masse des noyaux légers formés est transformée en énergie.
- Fusion : Des noyaux légers se réunissent pour former un noyau lourd.

En 1934, la radioactivité artificielle est réalisée par Frédéric et Irène Juliot Curie. En 1938, la première fission a lieu dans le laboratoire de Niels Bohr à Copenhague. En 1942, Enrico Fermi fabrique la première pile à combustible. Aujourd'hui, la fission est à la base du fonctionnement des centrales nucléaires mais aussi de la bombe atomique.

La fusion nucléaire est la réaction qui a lieu dans le cœur des étoiles, où le plus souvent, des atomes d'hydrogène s'associent pour former de l'hélium. son utilisation en est encore au stade expérimental. Les meilleurs résultats sont obtenus dans les tokamaks russes, inventés en 1958. Aujourd'hui, il y a 4 tokamaks en fonctionnement, le TFTR à Princeton, le JT60V à Tokyo, le JET en Grande Bretagne et le Tore Supra à Cadarache. Mais de nombreux projets sont à l'études, et les tokamaks actuels ne cessent de grossir.

## Avantages

La puissance au décollage représenterait le double de celle des fusées à ergols et à poudre actuelles. On estime que par cette propulsion, une sonde pourrait atteindre Saturne en 3 ans seulement et sans assistance gravitationnelle. De plus, l'énergie libérée est très nettement supérieure aux propulsions classiques.

## Inconvénients

Les réacteurs nucléaires produisent des déchets radioactifs. Certains de ces déchets pourraient être en quelque sorte recyclés par les fameux surgénérateurs, comme l'ex-futur Super Phénix. Ces réacteurs sont très dangereux, dans le sens où le moindre problème de fuite condamne immédiatement les environs proches, souvent sur plusieurs km, à devenir des « zones contaminées ». Zones dans lesquelles, les êtres vivants exposés à des radiations

d'origine radioactives, subissent des mutations génétiques irréversibles. Il est facile à partir de là de tirer le scénario catastrophique consécutif à un accident au cours du décollage d'un engin utilisant cette propulsion. Une des solutions serait de n'allumer le réacteur nucléaire qu'à partir d'une certaine altitude et de s'assurer que le véhicule est bien sur sa trajectoire et ne risque pas de retomber sur Terre, Plusieurs sondes sont déjà parties avec des piles à combustibles nucléaires et certains satellites en seraient équipés. Jusqu'ici, officiellement nous ne recensons que deux accidents, à la suite desquels deux sites ont été contaminés, l'un dans les Andes et l'autre au Canada, dus à la chute prématurée de 2 satellites.

### Les recherches en cours

On explore la fusion contrôlée de 2 manières :

La première, la fusion par confinement inertiel est fondée sur des faisceaux lasers ou d'ions, dont le rayonnement chauffe et comprime de minuscules billes de combustible fissible.

La deuxième, la fusion par confinement magnétique est fondée sur de puissants champs magnétiques qui confinent le plasma.

En 1999, des physiciens du tokamak européen JET, ont produits une réaction de fusion dont l'énergie a atteint 65 % de l'énergie fournie pour amorcer la réaction. Lorsqu'on aura dépassé les 100 %, on devra apprendre à stocker suffisamment de combustible (Deutérium et Tritium) et à régler la libération d'énergie produite. De plus, comme le plasma détruirait toute paroi matérielle, de puissants champs magnétiques devront diriger les particules dans la tuyère. Parmi toutes les réactions, la plus facile à réaliser est celle entre le Deutérium et le tritium. Elle libère des neutrons et des particules alpha (noyaux d'hélium). Les particules alpha communiquent une poussée, mais les neutrons ne peuvent être dirigés par des champs électromagnétiques car ils sont de charge nulle.

La réaction entre le Deutérium et l'hélium 3, produit une particule alpha et un proton, tous deux manipulables. Cependant, la réaction est plus difficile à amorcer que la première et l'hélium 3 est extrêmement rare sur Terre. On espère, dès 2003, pouvoir amorcer la réaction de fusion avec un laser dont la puissance atteindra près de 2 millions de Joules pendant 4 milliardièmes de seconde, soit 10 fois la quantité d'énergie nécessaire pour amorcer la réaction. Depuis 1996, plusieurs pays ont financé des recherches sur les techniques de confinement magnétique, comme la configuration à inversion de champ, le tokamak sphérique ou les strictions à champ toroïdal inversé.

En ce qui concerne la fission, aujourd'hui maîtrisée, le département de la défense américain avait, à la fin des années 80, engagé un programme de propulsion thermique nucléaire spatial. Le combustible était constitué de petites particules de carbure d'uranium tassées recouvertes de carbure de Zirconium. Le projet avorta avant la construction d'un modèle de vol, mais le concept était réalisable.

### **En conclusion**

Avec des fusées chimiques notre capacité d'exploration des planètes est très limitée. Les difficultés techniques de construction de systèmes à propulsion nucléaire semblent à l'heure actuelle insurmontables. Mais surtout, les difficultés à s'assurer une totale sécurité quant aux conséquences d'un probable accident, sont loin d'être garanties. Aujourd'hui, la piste des propulsions nucléaires n'est donc pas privilégiée.

## III. Conclusion

La conquête de l'espace interstellaire a déjà commencée. La NASA étudie les modes de propulsion capables d'envoyer une navette hors du système solaire. Le voyage interstellaire, vieille Lune de l'humanité, fait rêver la NASA. La très sérieuse agence spatiale américaine s'est offert un programme de réflexion sur le sujet. Le Breakthrough Propulsion Physics Program cogite sur les modes de propulsion du futur. Bref, pour se lancer dans l'exploration interstellaire, il faudra trouver un mode de propulsion ne nécessitant pas de carburant, produisant sa propre énergie et, surtout, très rapide. Pour atteindre Proxima en un temps honorable, disons une dizaine d'années, il faudrait que le vaisseau file à une vitesse très proche, voire égale, à celle de la lumière (voir annexes). Toutes ces conditions étant impossibles à réunir dans l'état actuel des connaissances scientifiques, il n'y a, pour le Breakthrough Program, qu'un seul moyen de résoudre le casse-tête des voyages interstellaires : harceler les physiciens jusqu'à ce qu'ils trouvent la clef théorique qui permettra aux vaisseaux du futur d'utiliser les structures de l'espace-temps lui-même pour nous emmener dans les étoiles.

Nous pouvons néanmoins regretter, le manque d'enthousiasme dont font preuve les décideurs dans notre pays et même en Europe. Il n'est pas trop tard pour prendre le train en marche et participer à construire l'avenir. Les américains ont pris énormément d'avance, preuve en est ce rapport dont les sources sont quasi exclusivement américaines. Et une rupture technologique est à craindre dans les années à venir si rien n'est fait. La vitesse à laquelle évoluent les sciences et les techniques, nous laisse penser qu'il ne nous manque pas grand chose pour qu'un jour nous soyons les pionniers de la nouvelle aventure qui s'offre à nous : les voyages interplanétaires et interstellaires. Cependant l'humanité a déjà réalisé des exploits tous aussi extraordinaires. Le programme Apollo en est un exemple parfait, et il a démontré ce que l'on peut accomplir lorsqu'on mobilise des efforts et des moyens.

Pour un projet aussi ambitieux que l'étude des propulsions du futurs, il apparaît évident, à la fin de ce rapport, que nous avons négligé beaucoup d'aspects dont nous ne soupçonnions même pas l'existence. De ce fait, le présent document ne présente que sommairement le sommet d'un iceberg, dont la partie immergée reste très largement à explorer.

## Synthèse

Dans la page qui suit, nous avons voulu résumer, sous la forme d'un tableau, les différents types d'énergies et de propulsions qui ont été abordés dans ce document. De ce fait, il est possible de pouvoir comparer, après les avoir étudié, tous ces moyens de propulsions. Nous regrettons, par manque de temps, de ne pas pouvoir approfondir l'étude et l'analyse dans tous ces domaines de recherches, qui auraient pu nous permettre de conclure plus efficacement sur les progrès attendus et peut être, de mettre au jour de nouvelles pistes, explorées par des laboratoires moins connus que ceux cités précédemment.

On rappelle que l'ISP (l'impulsion spécifique) mesure les performances d'un moteur. Elle est définie comme la durée pendant laquelle un kg de carburant peut fournir une poussée de un N (Newton), soit environ la vitesse d'éjection des particules divisée par l'accélération de la gravitation à la surface de la Terre. De cette manière il devient très facile de comparer les différents types de propulsion. En sachant que l'ISP d'une fusée de type Ariane V est de l'ordre 435 secondes.

La colonne présentée comme : « principes théoriques », a pour signification de nous renseigner sur les connaissances que nous possédons pour comprendre et exploiter tel ou tel énergie. Par exemple, nous possédons une théorie suffisante sur l'électromagnétisme, de manière à pouvoir exploiter les conséquences physiques dont il est à l'origine. Ce qui n'est pas le cas de l'antigravitation, où nos modèles théoriques ne suffisent pas expliquer convenablement toutes les observations expérimentales.

La colonne présentée comme : « application de nos jours », fait le bilan de ce que tirons comme applications directes de l'énergie ou propulsion considérée.

Il nous a aussi semblé utile de préciser si la propulsion considérée pourrait être utilisée dans le vide et dans une atmosphère de type Terre.

Les coûts, nous permettent de nous faire une idée sur la faisabilité de l'exploitation de la propulsion ou de l'énergie qui y est associée.



## II. Annexes

### ANNEXE I

# Profiter de l'expansion de l'Univers

Nous avons depuis les observations d'Edwin Powell Hubble la certitude que l'univers est en expansion. Il s'agit d'une confirmation importante dans la théorie du Big Bang, qui veut que l'univers actuel soit le résultat de l'inflation primordiale d'une singularité très dense, dont nous ignorons encore l'origine. Ce qu'il faut bien comprendre, c'est que l'univers est entré en expansion à partir d'un instant, que l'on nomme le Big Bang et que cette expansion se poursuit actuellement. En aucun cas il s'agit d'une explosion. L'univers gonfle et tous les objets en son sein s'éloignent les uns des autres, à la manière de raisins dans un cake en train de cuire. De là, il n'y avait qu'un pas pour imaginer utiliser cette expansion afin de se déplacer dans l'univers entre les galaxies, qu'ont franchit allègrement certains théoriciens. Encore une fois il s'agit d'utiliser une propriété physique de notre univers et non d'une propulsion proprement dite. Nous allons donc dans ce qui suit présenter sommairement cet aspect de la physique, un peu curieux et très théorique.

#### **...sans doute une utopie, mais pourquoi pas...**

Pour parcourir rapidement de grandes distances, nous disposerions d'un autre moyen : nous pourrions mettre à profit les caractéristiques de l'expansion de l'univers. Deux régions de l'univers s'éloignent l'une de l'autre à une vitesse proportionnelle à leur distance, même si, localement, elles sont immobiles (c'est l'espace qui se dilate et non les corps qui bougent). Ainsi, l'espace qui entoure notre galaxie se meut à la vitesse de la lumière par rapport à d'autres espaces situés à 15 milliards d'années-lumière de lui. L'expansion consiste en un mouvement, non pas de la matière ou de la lumière, mais du « cadre » spatio-temporel qui les contient.

Conséquence surprenante : dans ce cadre, la limite de la vitesse de la lumière n'est plus indépassable. Il suffit que deux régions soient distantes de plus de 15 milliards d'années-

lumière pour qu'elles se déplacent l'une par rapport à l'autre à plus de 300 000 km/s ! Nous allons juste évoquer un moyen de se déplacer mais nous ne rentrerons pas dans ce qui pour nous, tient aujourd'hui plus de la science fiction que du potentiellement envisageable en traitant de la maîtrise de l'espace-temps, en créant une expansion « artificielle » autour d'un vaisseau ! Comme une planche de surf, le vaisseau serait entraîné par des vagues d'expansion à une vitesse superluminique, tout en restant immobile par rapport à la lumière et à la matière locales (respectant ainsi Albert Einstein !). Cette maîtrise passerait sans doute par la mise au point d'une technologie apte à créer des faisceaux cohérents (comme les lasers) d'énergie gravitationnelle, pour modeler la courbure spatiale !

## **ANNEXE 2**

### **L'HYDROGÈNE**

**A**utre piste que nous ne pouvons pas explorer mais qui promet beaucoup : l'hydrogène solide.

En effet, une propulsion utilisant les propriétés, assez complexes, de l'hydrogène solide ou l'hydrogène métallique, permettrait d'obtenir une ISP de 2000s. Les dernières données sur le sujet devraient nous arriver tout droit du cœur de Jupiter, au centre duquel les astrophysiciens pensent trouver de l'hydrogène sous cette forme. Une sonde américaine est partie et devrait plonger dans l'atmosphère de la planète géante d'ici à quelques années.