

41

Mars 2003

SPACE CONNECTION

DOSSIER Menace de l'espace



La science est partout

sauf dans un petit coin sombre




Les Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC) ont conçu spécialement pour les jeunes un nouveau site web interactif. Les SSTC sont ainsi la première administration publique du pays à présenter ses activités à un jeune public.

Le site 'jeunes' des SSTC

"La science est partout" présente un échantillon des activités des équipes de recherche sur des thèmes tels que l'espace, les nouvelles technologies, la mer du Nord, la restauration d'œuvres d'art, la gestion de l'environnement, les satellites d'observation de la Terre, etc. On y trouve aussi des tests, une banque d'images, des liens, un glossaire bilingue, etc. De plus, le visiteur peut donner son avis ou envoyer une contribution à publier.




<http://www.belspo.be/young>

Sommaire



- 03 Dossier:** Menace de l'espace
- 03** L'espace représente-t-il une menace pour la Terre ?
- 04** L'activité solaire
- 08** Rayonnement de l'univers
- 15** Impacts
- 28** Dangers de la conquête spatiale

- 31 Point de vue:** Lune à vendre
- 34** Actualités



**Services fédéraux des affaires
scientifiques, techniques
et culturelles (S.S.T.C.)**

Space Connection est une lettre d'information éditée par les Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles (S.S.T.C.) contenant des informations sur les réalisations récentes dans le domaine spatial. Cette lettre d'information s'adresse à tous les passionnés de l'espace et en particulier aux jeunes.

*Comment obtenir gratuitement
le Space Connection ?*

Envoyez vos nom et adresse à la :

S.S.T.C.

Cellule e-info

Ria D'Haemers

Rue de la Science, 8

1000 Bruxelles

ou envoyez un e-mail à

dhae@belspo.be

<http://www.belspo.be>

Editeur responsable:

Ir. Eric Beka

Secrétaire général des S.S.T.C.

Rédaction:

S.S.T.C.

Cellule e-info

Rue de la Science, 8

1000 Bruxelles

Collaboration extérieure:

Benny Audenaert, Paul Devuyst,

Christian Du Brulle, Théo Pirard,

Steven Stroeykens (dossier).

Coordination:

Patrick Ribouville

Gestion des abonnements:

Ria D'Haemers

e-mail: dhae@belspo.be

Photo de couverture:

(document ESA/NASA)

Numéro 41 - Mars 2003

Introduction

L'espace représente-t-il une *menace* pour la Terre ?

Nous avons coutume - et c'est probablement le cas des lecteurs de *Space Connection* - de considérer l'univers comme un lieu accueillant, ne demandant qu'à être exploré. Ou encore comme un endroit intéressant, fascinant. Peut-être aussi comme quelque chose de mystérieux, étrange, inhospitalier ou bizarre. Mais il est rare que nous considérions l'espace comme une menace directe. Nous avons tendance à penser que l'espace recèle peut-être un danger pour les astronautes, mais pas pour nous, terriens ordinaires.



(NASA)

Néanmoins, il existe dans l'espace des dangers qui peuvent nous inquiéter. Inutile d'exagérer - en réalité, le risque de collision prochaine entre la Terre et un énorme planétoïde, représenté parfois dans des films catastrophes, est minime, mais cette menace est cependant réelle. Ce dossier aborde les principaux dangers qui nous menacent, du plus réaliste aux conséquences limitées, telle l'activité solaire, en passant par le risque souvent évoqué de chutes de planétoïdes, pour terminer par la très improbable, mais néanmoins très intéressante éventualité théorique d'une explosion gamma à proximité de la Terre.

Dossier Menace de l'espace

→ Le Soleil : menace pour la Terre ? (Soho)

L'activité *solaire*

Le Soleil ne se contente pas d'assurer l'énergie indispensable à la vie sur Terre. Il s'agit également d'un astre complexe, turbulent, dont les mystères sont difficiles à sonder et qui de temps à autre s'avère dangereux pour nous, habitants de la planète Terre.

L'émission de lumière dans notre direction n'est pas la seule activité du Soleil. Cette étoile envoie aussi dans l'espace quantité d'autres rayonnements électromagnétiques : des ondes radio aux rayons X. Le danger potentiel réside dans les rayonnements dont les longueurs d'onde sont inférieures à celles de la lumière. Les photons (particules lumineuses) du rayonnement ultraviolet et des rayons X ont une énergie suffisante pour endommager des molécules de notre organisme. Les rayons X en particulier sont nocifs et, à fortes doses, sont même mortels.

Fort heureusement, la plupart des rayons ultraviolets et X sont arrêtés par l'atmosphère terrestre. Seul le fameux "proche ultraviolet", c'est-à-dire le rayonnement ultraviolet aux longueurs d'onde relativement longues, présent dans le spectre jouxtant la zone de la lumière visible, pénètre dans l'atmosphère et parvient jusqu'à la surface de la Terre. Et ce proche ultraviolet n'est pas dénué de danger. Ce rayonnement nous permet de bronzer, mais, en cas d'exposition excessive à la lumière solaire, il provoque également des brûlures et, à plus long terme, le cancer de la peau.

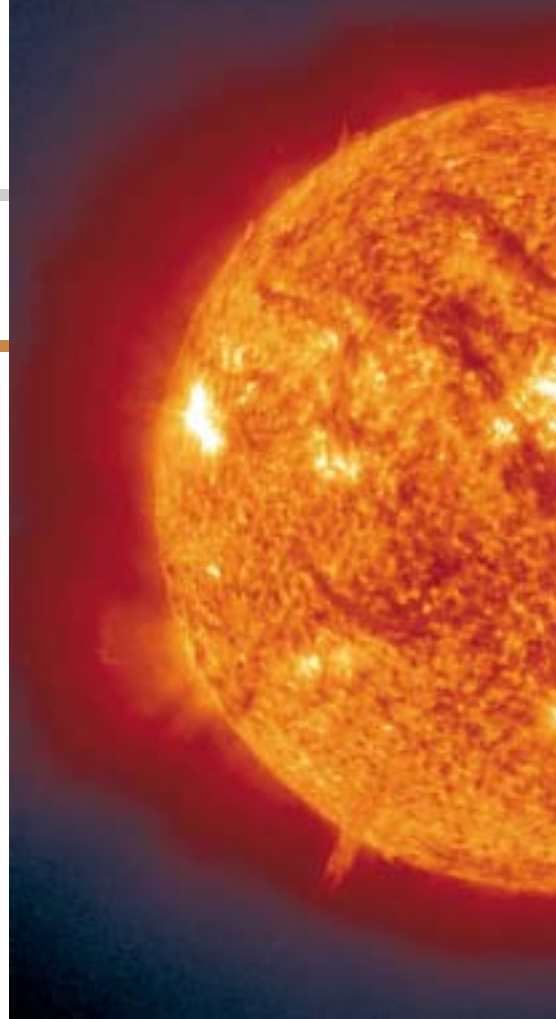
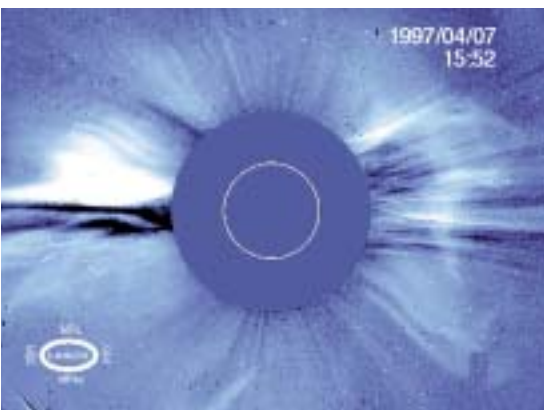
Outre la lumière et d'autres types de rayonnements électromagnétiques, le Soleil diffuse également dans l'espace le fameux "vent solaire". Le vent solaire est un vent lent de particules de matière, se déplaçant dans l'espace à la vitesse moyenne d'environ 470 kilomètres par seconde (près de 1,7 million de kilomètres par heure). Le vent solaire doit en réalité être considéré comme la partie extérieure de l'atmosphère brûlante et raréfiée du Soleil s'échappant dans l'espace.

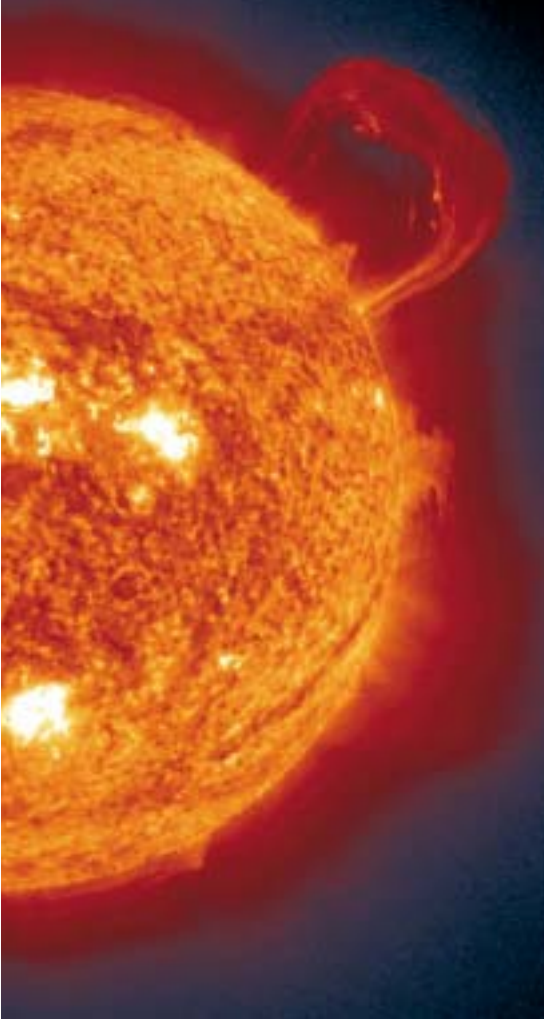
Le vent solaire est essentiellement composé de protons, soit des noyaux d'atomes d'hydrogène. Les protons représentent environ 80 pour cent de la masse du vent solaire. Le reste est principalement constitué de noyaux d'hélium. Il y a également des ions et électrons plus lourds. Le vent solaire est particulièrement lent : à proximité de la Terre, sa densité est en moyenne d'à peine neuf protons par centimètre cube. Normalement, le vent solaire ne présente aucun danger pour nous ou pour nos technologies. Ces particules sont bloquées par l'atmosphère et par le champ magnétique de la Terre.

Néanmoins, les conditions ne sont pas toujours normales. Même si à première vue, le Soleil semble être calme et inaltérable, il dissimule en réalité un monde tempétueux et turbulent. Il lui arrive parfois de propulser des particules dans l'espace avec une telle violence que les conséquences s'avèrent nettement plus radicales que celles liées au vent solaire habituellement calme.

Lors des fameuses facules (régions très chaudes et brillantes observées à la surface du Soleil), provoquées par une sorte de court-circuit dans le champ magnétique

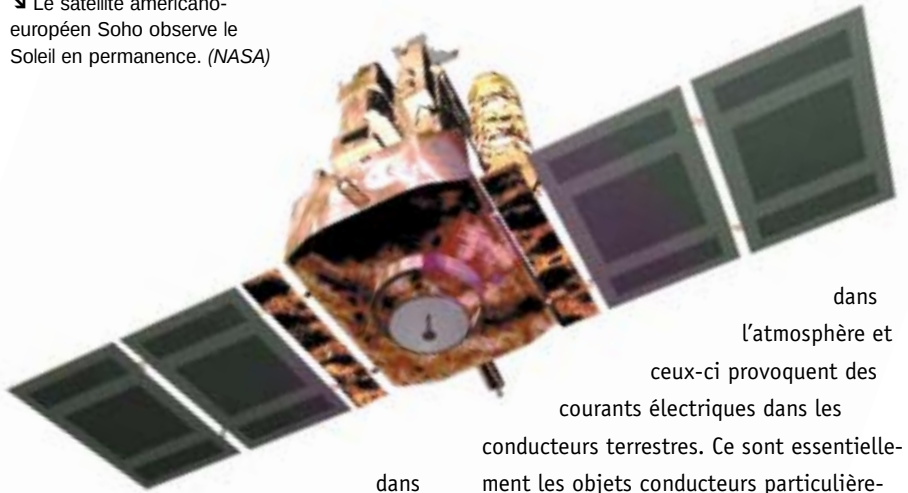
↓ Début d'une éjection de masse coronale observée par le satellite américano-européen Soho. Le Soleil est dissimulé sur la photo par le disque au centre. (NASA)





← Aurore australe
au-dessus du pôle Sud.
(British Antarctic Survey)

↘ Le satellite américano-européen Soho observe le Soleil en permanence. (NASA)



dans
l'atmosphère et
ceux-ci provoquent des
courants électriques dans les
conducteurs terrestres. Ce sont essentielle-
ment les objets conducteurs particulière-
ment longs, comme les câbles télépho-
niques et électriques en surface qui
souffrent des conséquences de ces champs
dans l'atmosphère. Des tensions et courants
électriques apparaissent alors dans ces
câbles et risquent parfois de les endomma-
ger gravement.

Dès le dix-neuvième siècle, cette activité
solaire était déjà perceptible dans la télé-
graphie. Les champs génèrent du courant
continu dans des câbles électriques kilomé-
triques, destinés à transporter du courant
alternatif. S'il acquiert trop de puissance, ce
courant provoque une surchauffe et endom-
mage les transformateurs du réseau élec-
trique. C'est ainsi qu'en 1972, un grand
transformateur explosa en Colombie britan-
nique au Canada. En 1989, l'activité solaire
entraîna une gigantesque panne d'électricité
au Québec. Des régions importantes du Qué-
bec restèrent plongées dans l'obscurité
durant neuf heures.

Une grande partie du continent étant située
à proximité du pôle nord magnétique,
l'Amérique du Nord est plus vulnérable aux
orages solaires que l'Europe. Dans les zones
sensibles, les entreprises d'électricité sui-
vent désormais attentivement les prévisions
"météo de l'espace".

complexe et en mutation permanente du
Soleil, protons et électrons atteignent prati-
quement la vitesse de la lumière et de puis-
sants faisceaux de rayons X sont propulsés
dans l'espace. Si la Terre croise la route de
l'éruption, l'ionosphère (couche supérieure
de l'atmosphère terrestre caractérisée par la
présence de particules chargées) est pertur-
bée, entraînant une interruption du trafic
radio en ondes courtes. Les contacts radio
terrestres entre des lieux éloignés s'ap-
puient sur la réflexion des ondes radio par
l'ionosphère (du moins en l'absence de
recours aux satellites de communication).

L'atmosphère du Soleil, la "couronne", cata-
pulte parfois dans l'espace de gigantesques
quantités de plasma (gaz ionisé brûlant),
traversé par des champs magnétiques. Il
s'agit des fameuses coronal mass éjections
ou éjections de la masse coronale, traver-
sant l'espace à une vitesse supérieure à trois
cents kilomètres par seconde. Elles peuvent
atteindre la Terre en quelques jours. Notre
planète est alors victime d'orages magné-
tiques, menaçant de nombreuses installa-
tions techniques et provoquant parfois de
multiples et remarquables aurores polaires.
Celles-ci s'observent d'ordinaire uniquement

polaires. Elles naissent de
la collision dans les couches supérieures de
l'atmosphère entre particules chargées pro-
venant de l'espace et atomes. Ces particules
se déplacent selon une sorte d'orbite héli-
coïdale le long des lignes de force du champ
magnétique terrestre et à proximité des
pôles, ces lignes de force convergent et s'in-
clinent vers la surface de la Terre.

Mais lors de violentes "tempêtes solaires",
l'aurore polaire (appelée "aurore boréale"
dans l'hémisphère nord) est parfois visible
chez nous, à cause des énormes quantités de
particules chargées submergeant le champ
magnétique terrestre. L'activité du Soleil
augmente et diminue ensuite, selon un cycle
d'environ onze ans. Le dernier paroxysme de
l'activité solaire a été enregistré en 2000 et
2001 : le précédent datait de 1989.

Orages magnétiques

D'énormes champs magnétiques apparais-
sent lors des orages magnétiques. Les
électrons qui déboulent dans l'atmosphère
près des pôles, le long des lignes de force
magnétiques, créent de puissants courants
électriques à haute altitude. Ces courants
génèrent à leur tour des champs magnétiques

→ Par rapport aux avions ordinaires, à bord du Concorde, volant à très haute altitude, les passagers sont exposés à des doses de rayonnement supérieures (mais toujours inoffensives). (*Rolls Royce*)

↘ La station spatiale internationale ISS. Si, lors d'une sortie dans l'espace pour la construction de l'ISS, une énorme flamme solaire survenait, les astronautes seraient exposés à une dose nocive de rayonnement. (NASA)

Satellites fragiles

Les satellites en orbite autour de la Terre peuvent également ressentir les retombées de l'activité solaire. En 1998, une défaillance du satellite Galaxy 4 entraîna une paralysie du trafic sémaphone pour 45 millions d'utilisateurs en Amérique du Nord. La cause n'a jamais été déterminée avec certitude, mais de fortes présomptions imputent cette défaillance au "temps spatial", provoqué par le Soleil. Il est probable que l'activité solaire entraîna la panne de Telstar 401 en 1997 et des satellites canadiens Anik E1 et Anik E2 en 1994.

Les particules à forte intensité énergétique endommagent les panneaux solaires des satellites et réduisent l'alimentation en électricité. Des électrons à l'énergie puissante réussissant à pénétrer l'électronique d'un satellite sont capables d'entraîner des erreurs informatiques à la suite d'une modification arbitraire des bits. Le Soleil n'est pas le seul et unique responsable de ces défaillances : le rayonnement provenant de points plus éloignés de l'univers peut également engendrer de telles perturbations.

Mais le Soleil dispose encore d'autres moyens pour gêner les satellites. Une activité solaire intense provoque une dilatation de l'atmosphère terrestre, augmentant ainsi les frottements subis par les satellites dans les couches supérieures de l'atmosphère. L'orbite des satellites descend et leur durée de vie est abrégée. Ce phénomène fut notamment fatal à la première station spatiale américaine Skylab. Elle s'abîma en Australie, au-dessus de l'Océan Indien en 1979.

Dans l'espace, lors d'orages solaires, les astronautes sont exposés à des rayonnements nocifs. Si une énorme facule apparais-



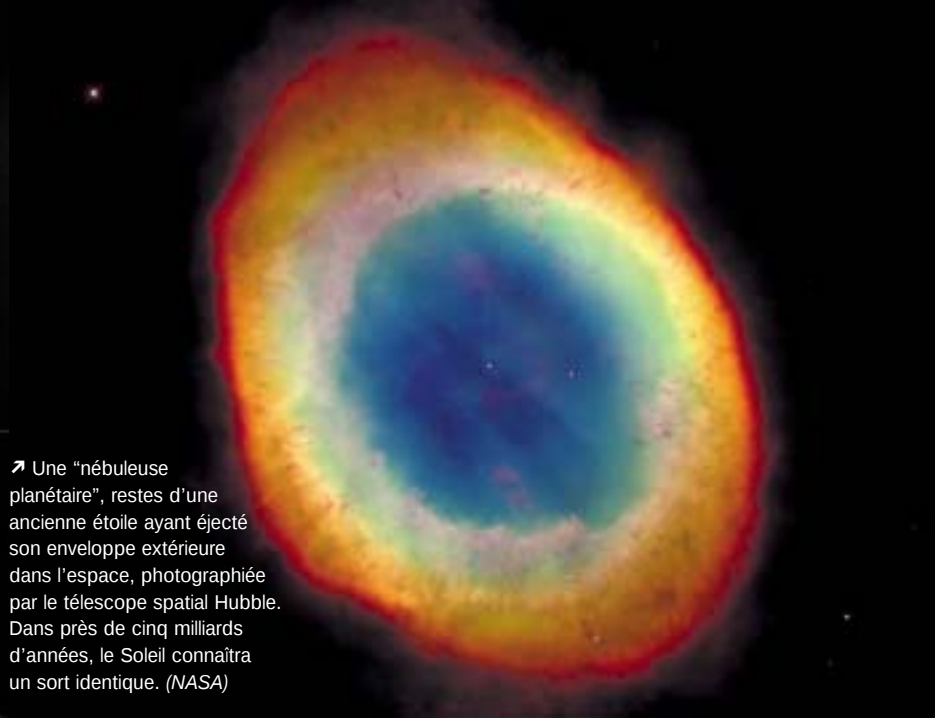
sait lors d'une sortie des astronautes dans l'espace, par exemple pour effectuer des travaux de construction à la station spatiale internationale ISS, un astronaute absorberait en une fois plus de rayons que les normes admises par la NASA pour l'ensemble d'une carrière. Ce rayonnement comporte également des dangers pour des non astronautes. A bord du Concorde, qui vole à très haute altitude, lors d'un orage solaire, les passagers risquent d'être exposés, durant tout le voyage, à une dose de rayonnement équivalente à une radiographie toute les heures.

C'est pour toutes ces raisons que les scientifiques tentent actuellement d'établir la météo de l'espace en fonction de l'activité solaire. Des satellites observent le Soleil 24 heures sur 24 et les scientifiques essaient quant à eux de prévoir, à partir des signes d'activité magnétique sur et autour du Soleil, l'apparition de phénomènes tels que les éjections de masse coronale. D'autres satellites effectuent des mesures dans l'espace entre la Terre et le Soleil, pour déterminer directement la quantité et la nature des particules en route vers notre planète.

L'intensité du rayonnement solaire ordinaire est un danger d'une toute autre nature provenant lui aussi du Soleil. Certains scientifiques supposent que le rayonnement solaire

n'a pas toujours une intensité égale et que ces variations pourraient expliquer le changement climatique actuel sur la Terre. Des indices permettent de penser qu'il y a quelques siècles, la puissance du rayonnement solaire était moins intense, et que cela expliquerait la petite "ère glaciaire" dont l'Europe fut victime du quinzième au début du dix-neuvième siècle. Par rapport au reste du millénaire, cette période fut sensiblement plus froide, avec un record pour le dernier quart du seizième siècle. Les mesures précises de l'intensité du rayonnement solaire n'offrent pas encore le recul nécessaire pour pouvoir attribuer avec certitude un caractère exceptionnel à ces écarts et déterminer si au cours des décennies et des siècles prochains, nous pouvons espérer un rayonnement solaire raisonnablement constant.

Heureusement, le plus grand péril émanant du Soleil se situe à très long terme. Lentement mais sûrement, les réserves d'hydrogène à l'intérieur du Soleil s'épuisent. Depuis 4,5 milliards d'années, notre astre est approvisionné en énergie grâce à la fusion nucléaire, transformant l'hydrogène en hélium. Que se passera-t-il lorsque les réserves d'hydrogène seront taries ? Les astronomes ont une réponse étonnamment précise à cette question. Grâce à l'observation par télescope des différents stades d'évolution des étoiles et



➤ Une "nébuleuse planétaire", restes d'une ancienne étoile ayant éjecté son enveloppe extérieure dans l'espace, photographiée par le télescope spatial Hubble. Dans près de cinq milliards d'années, le Soleil connaîtra un sort identique. (NASA)

aux modèles informatiques simulant mathématiquement l'évolution des étoiles, ils ont acquis au cours de ces dernières décennies, une idée précise de l'évolution des étoiles.

La durée de vie totale du Soleil a été estimée depuis longtemps à 10 milliards d'années.

Des calculs datant des années nonante indiquent une durée de vie totale un peu plus longue, jusqu'à presque treize milliards d'années dans le cas le plus optimiste. Tous les calculs sont convergents en ce qui concerne la question de ce qui va se passer avec le Soleil. Nous donnons ci-après les prévisions détaillées pour l'avenir de notre étoile, basées sur des calculs datant de 1993 d'astronomes du California Institute of Technology et de l'Université de Toronto. Une de leurs premières conclusions s'avère inquiétante: le Soleil deviendra de plus en plus clair. En d'autres termes, plus ses réserves de carburant diminuent, plus il devient dispendieux. A ce rythme, dans 1,1 milliard d'années, le Soleil fournira déjà dix pour cent de lumière et de chaleur de plus qu'aujourd'hui. Cela suffira à déstabiliser durablement le climat de la Terre et rendre la vie telle que nous la connaissons actuellement impossible.

Dans 3,5 milliards d'années, date à laquelle le stock de carburant devrait être pratiquement épuisé, le dérapage est total. Le Soleil

va alors se dilater. Un milliard d'années plus tard, il sera 170 fois plus gros qu'aujourd'hui. Suffisamment grand pour engloutir la planète Mercure et faire bouillir la surface de la Terre. Le Soleil sera alors devenu le type d'étoile que les astronomes ont coutume d'appeler un géant rouge.

Suivra alors une phase provisoire de contraction, suivie d'une nouvelle expansion encore plus forte. Le Soleil brillera alors brièvement plus de cinq mille fois plus intensément qu'aujourd'hui et portera la température sur Terre à 1.600 degrés. Il est impossible de déterminer avec certitude si la Terre, à l'instar de Mercure (et probablement Vénus) sera absorbée par le Soleil. Les calculs indiquent simplement que la situation deviendra critique ; les marges d'incertitudes sont provisoirement trop grandes encore pour pouvoir trancher.

Enfin, dans environ 4,5 milliards d'années, dans d'ultimes soubresauts, le Soleil expulsera une large part de son enveloppe extérieure. Le reste sera réduit à la taille d'une petite boule pas plus grande qu'une planète, un 'nain blanc'. Au début, elle sera encore brûlante, mais se refroidira progressivement. Si la Terre existe encore à ce moment, elle sera définitivement plongée dans une profonde et obscure période glaciaire.



➤ La planète Mercure risque d'être engloutie par le Soleil, lorsque ce dernier qui aura pratiquement épuisé ses "réserves de carburant" nucléaire se dilatera pour se transformer en un astre rouge géant. (NASA)

Dossier Menace de l'espace

Rayonnement de l'univers

➤ L'étoile "maudite" Éta Carinae, qui va exploser en supernova très prochainement, en terme de temps astronomique. La photo montre que l'astre est entouré de grands nuages de gaz. Heureusement Éta Carinae est loin de notre système solaire car, dans le cas contraire, cette menaçante supernova aurait représenté un énorme danger pour nous. (NASA)

Le Soleil n'est pas l'unique source de rayonnement potentiellement dangereux pour la Terre.

Des sources de rayonnement plus éloignées dans l'univers telles que les étoiles, supernovae (explosions d'étoiles) et les noyaux actifs de systèmes stellaires envoient des ondes électromagnétiques hautement énergétiques (rayonnement ultraviolet, rayons X, voire même rayonnement gamma) ainsi que des particules de matières se déplaçant à grande vitesse. Dans des circonstances normales, le rayonnement électromagnétique émanant du reste de l'univers est

toujours inférieur au rayonnement électromagnétique provenant du Soleil et ses éléments nocifs sont intégralement bloqués par l'atmosphère.

Le fameux "rayonnement cosmique", composé de particules élémentaires propulsées à très grande vitesse, a parfois des retombées sur la Terre. Ce rayonnement cosmique est une composante non négligeable des "radiations ionisantes" naturelles nocives que l'homme doit absorber sa vie durant. Cette dose (toutes sources confondues) s'élève à environ 2,7 millisievert (mSv) par an. C'est la moyenne estimée pour la population

mondiale, mais le chiffre précis varie sensiblement en fonction de l'endroit où l'on vit sur Terre. Le rayonnement cosmique (y compris le rayonnement solaire) fournit environ 0,2 à 0,4 millisievert de cette dose totale. Cette quantité est comparable à la dose annuelle que nous absorbons en moyenne dans le cadre d'applications médicales comme les radiographies ou à la dose de radioactivité émanant du sol et des bâtiments ou encore à la dose de radioactivité contenue dans notre alimentation et dans les boissons. Le radon présent dans l'air est une source nettement plus importante. Le sievert est une

← Supernova 1987A, étoile que les astronomes ont vu exploser en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan, un des systèmes accompagnant notre Galaxie. (NASA)

↓ Le grand accélérateur de particules LHC, construit par le laboratoire européen de physique des particules, le CERN, à Genève. Même avec cet accélérateur de plusieurs kilomètres, les physiciens ne réussissent pas à insuffler aux particules élémentaires la même énergie que celle produite par les particules les plus énergétiques du rayonnement cosmique. (CERN)



unité mesurant la quantité de rayonnement nocif. Par définition, 1 sievert est égal à une quantité de rayonnement aussi nocif pour l'organisme que la quantité de rayons gamma ou X assurant l'absorption par le corps d'une énergie de 1 joule par kilogramme de poids corporel. Il est admis qu'une dose de 1 sievert (ou 1000 millisievert) accroît le risque de cancer de cinq pour cent. La dose émise par le rayonnement cosmique ne représente dès lors qu'une fraction infime de cette quantité.

Certaines particules du rayonnement cosmique déploient une énergie intense, largement supé-

rieure à celle pouvant être obtenue par le plus puissant accélérateur de particules existant. Le LHC (Large Hadron Collider) est un accélérateur de particules en construction au CERN, le laboratoire européen de la physique des particules, situé près de Genève. Le LHC pourra produire des particules dont l'énergie atteindra 7 TeV (téra-électronvolt; 1 électronvolt = $1,6 \times 10^{-19}$ joule), bien plus que n'importe quel autre accélérateur de particules de la Terre. Mais dans le rayonnement cosmique, des particules d'une énergie de 3×10^{20} électronvolts ont déjà été observées, soit près de quarante millions de fois plus.

Lorsqu'une particule aussi énergétique pénètre dans l'atmosphère, elle se heurte très rapidement à un atome dans les couches aériennes supérieures. L'atome touché reçoit une énorme giflle. Le noyau de l'atome sera probablement disloqué, éjectant des particules élémentaires à grande vitesse. Celles-ci entrent à leur tour en collision avec d'autres atomes dans l'atmosphère, libérant de nouvelles particules et ainsi de suite. Tout cela se traduit par une "douche" de particules "secondaires", principalement des muons, dont une partie atteint finalement le sol. Chacune de ces particules

secondaires dispose d'une énergie nettement inférieure à la particule initiale qui a pénétré dans l'atmosphère.

Les particules du rayonnement cosmique sont probablement poussées à ces paroxysmes d'énergie à certains des endroits les plus "violents" de l'univers. Parmi les exemples, figurent les restes de supernovae, restes d'explosions stellaires et les "chaudrons de sorcières" à proximité des gigantesques trous noirs dans les noyaux de systèmes stellaires. La matière atteint des températures très élevées à proximité d'un trou noir et les particules chargées sont probablement



↑→ Les environs d'un trou noir géant dans le noyau du système stellaire NGC 7052. C'est probablement à ces endroits que naissent les particules les plus énergétiques du rayonnement cosmique. (NASA)



portées à des vitesses élevées par les champs magnétiques.

Le mystère plane toujours quant à l'origine des particules du rayonnement cosmique atteignant l'énergie la plus extrême, dépassant 10^{20} .

Explosions stellaires

Quelques scientifiques ont laissé entendre que le rayonnement électromagnétique à forte intensité énergétique et le rayonnement cosmique de l'univers pourraient, dans certaines conditions, représenter une menace pour la vie sur Terre. Nous pourrions par exemple, songer à une supernova (explosion d'une étoile) proche de la Terre.

Les supernovae observées jusqu'à présent par les astronomes se situaient toutes à une distance respectable de notre système solaire. Depuis l'invention du télescope, aucune supernova n'a été détectée dans notre galaxie; la plus proche se trouvait dans le

Grand Nuage de Magellan, l'un des plus petits systèmes satellitaires de la Galaxie. La majorité des supernovae observées apparaissent dans d'autres galaxies situées à plusieurs millions d'années-lumière et détectables uniquement à l'aide d'un télescope. Mais une supernova située plus près de la Terre pourrait avoir des conséquences fatales. Lors de l'explosion, le rayonnement d'une supernova est temporairement aussi intense que l'ensemble d'une galaxie. Mise à part la lumière, d'autres types de rayonnement électromagnétique et de particules de matière énergétiques (ainsi que des ondes gravitationnelles et une masse de neutrinos) sont également libérés. Si l'une des étoiles proche de la Terre, à quelques années-lumière, se transformait en supernova, le cataclysme écologique ne pourrait probablement pas être évité.

Les astronomes Scott Sandford et Jesse Bregman de l'Ames Research Center de la NASA à

Moffett Field en Californie ont calculé la distance à laquelle une supernova représenterait un péril pour la Terre. Une supernova de type Ia (explosion d'un nain blanc ayant absorbé une masse trop importante d'une étoile annexe), située à une année-lumière aurait un rayonnement équivalent à celui du Soleil. Une supernova de type II (un astre ayant une masse considérable et explosant après épuisement de son combustible nucléaire) aurait, à 0,7 année-lumière de distance, la même intensité lumineuse apparente. A titre de comparaison : l'étoile la plus proche du Soleil se situe à 4,2 années-lumière.

D'après les chercheurs de la NASA, la principale menace d'une supernova réside probablement dans l'intense rayonnement gamma émis par les isotopes radioactifs comme le nickel-56. Même à plusieurs milliers d'années-lumière, leur effet est comparable à celui des flammes solaires les plus intenses. Il est

difficile, d'après les astronomes, de définir la limite précise à laquelle une supernova constituerait une menace pour la vie sur Terre, mais ils estiment néanmoins que le rayonnement gamma d'une supernova située à quelques dizaines d'années-lumière s'avérerait extrêmement dangereux. Plus près de nous, les ions à forte intensité énergétique deviendraient également dangereux, de même que les neutrinos issus de l'explosion. Les neutrinos sont des particules élémentaires qui pénètrent facilement tout type de matière. Ils sont dès lors considérés comme totalement inoffensifs. Chaque seconde, des milliards de neutrinos provenant du Soleil traversent notre corps, sans que nous le remarquions le moins du monde. Mais il arrive parfois qu'un neutrino entrant en collision avec un atome, déclenche une réaction nucléaire. Les risques sont tellement minimes qu'ils sont totalement négligeables dans des circonstances normales. Mais une supernova libère d'énormes quantités de neutrinos (en réalité la majeure partie de l'énergie de l'explosion est emportée par les neutrinos, en quantité supérieure à l'énergie contenue dans le rayonnement électromagnétique ou dans l'énergie cinétique de l'étoile explosée). Il en résulte, d'après les astronomes de la NASA, qu'une supernova proche pourrait libérer de la radioactivité sur Terre par l'intermédiaire de l'intense flux de neutrinos.

Heureusement, un tel événement n'est pas pour demain. Aucune

des étoiles situées à proximité de la Terre ne présente le profil de types d'étoiles susceptibles d'entraîner des explosions de supernovae. Deux types d'étoiles peuvent éventuellement exploser en supernova : les étoiles ayant une masse très importante et les nains blancs faisant partie d'étoiles doubles proches. Les étoiles ayant une très grande masse consomment très rapidement leurs réserves de "combustible" nucléaire. Lorsque la source est tarie, leur noyau implose sous l'influence de la pesanteur, donnant naissance à une étoile à neutrons ou à un trou noir. Les couches supérieures de l'étoile explosent à grande vitesse dans l'espace. Dans l'autre catégorie de supernovae (le fameux "type Ia"), un nain blanc rassemble la matière d'une autre étoile dans un système stellaire double, jusqu'à ce que sa masse dépasse la masse maximale d'un nain blanc (la fameuse "limite de Chandrasekhar"). L'explosion suit.

Heureusement, il n'existe dans notre galaxie ni étoile d'une masse exceptionnelle, ni nains blancs risquant de franchir la limite de Chandrasekhar. Il est totalement exclu que notre Soleil puisse un jour se transformer en supernova. Il s'éteindra paisiblement en expulsant son enveloppe extérieure et deviendra un nain blanc (solitaire).

→ Observation d'une explosion gamma par le satellite BeppoSAX. (NASA)

Les mystérieuses explosions gamma

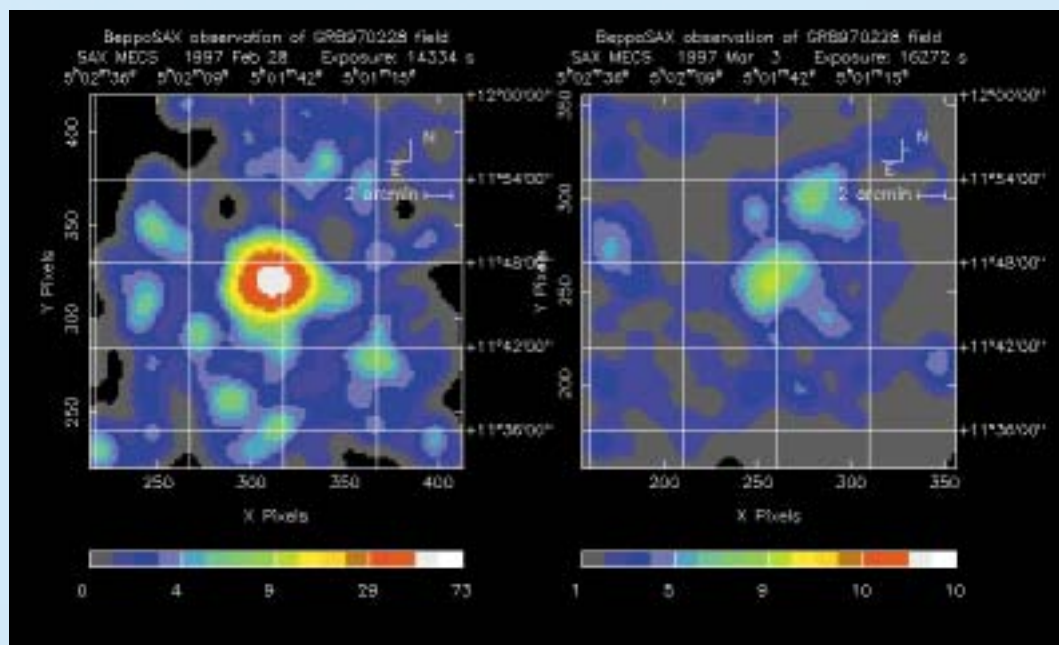
Les fameux "éclairs gamma" ou "explosions gamma" (en anglais : gamma ray bursts ou GRB) représentent un péril particulier. Les GRB sont de mystérieux éclairs de rayonnement gamma issus de l'univers, observés pour la première fois par les satellites militaires conçus pour détecter les explosions nucléaires sur la surface terrestre. Au grand étonnement des militaires et des astronomes, les satellites ont également observé des explosions régulières dans l'espace. Grâce à des observatoires spécialisés dans le rayonnement gamma comme le satellite américain Compton Gamma Ray Observatory ou le satellite italo-hollandais BeppoSAX, de nombreuses explosions gamma ont pu être observées. Il y en a environ une par jour ; la durée classique varie entre quelques secondes et plusieurs

minutes. Elles sont également réparties dans l'ensemble du ciel.

La nature des GRB est longtemps restée une énigme et aujourd'hui encore, les astronomes n'ont aucune certitude quant à l'origine du phénomène. Il y a toutefois de fortes présomptions semblant indiquer qu'il existe un lien entre éclairs gamma et supernovae. Le gros problème est que les explosions gamma ont été longtemps observées uniquement dans le rayonnement gamma. En dépit de tous les efforts, jamais il ne fut possible d'observer en même temps d'autres ondes électromagnétiques comme la lumière visible provenant de la même source. Les détecteurs de rayonnement gamma n'avaient qu'une faible résolution : ils pouvaient tout au plus déterminer approximativement la direction dont provenait le rayonnement gamma capté. La détermination de la position des

GRB était dès lors très imprécise et les astronomes étaient incapables d'orienter leurs puissants télescopes optiques vers l'endroit où le phénomène était localisé.

Il a fallu attendre le satellite européen BeppoSAX pour que la situation change. Ce satellite observait une même portion du ciel simultanément à l'aide d'un détecteur gamma et d'un télescope à rayons X. Il s'avéra, comme espéré, que les éclairs gamma étaient également détectables dans le rayonnement X. Le télescope à rayons X a permis de déterminer la position du phénomène avec une précision accrue. En transmettant rapidement aux astronomes au sol les coordonnées ainsi définies, il fut alors possible d'orienter les télescopes pour la lumière visible dans la bonne direction, avant que le phénomène ne se soit totalement évanoui.



↓ La collision de deux étoiles à neutrons est l'une des explications avancées pour les explosions gamma. (NASA)



En 1997, on réussit ainsi à observer pour la première fois dans la lumière visible, les "restes d'incandescence" d'une explosion gamma. Pour la première fois, les astronomes purent braquer la totalité de leurs équipements destinés à l'étude de la lumière visible, sur les mystérieuses explosions gamma. Les observations du télescope Keck à Hawaï, le télescope le plus puissant du monde, permirent de calculer la distance à laquelle l'explosion se produisait. Le calcul fut réalisé en prenant un spectre de la lumière dégagée par les restes incandescents du GRB et d'en mesurer les variations de rouge. Cette première mesure de la distance à laquelle se produisait un GRB marqua une véritable avancée. L'explosion semblait s'être produite hors de notre système stellaire, hors de notre galaxie, pratiquement aux confins de l'univers observable, c'est-à-dire à plusieurs milliards d'années-lumière.

Les GRB mesurés ensuite semblaient également se manifester très loin dans l'univers. En dépit de ces énormes distances, nous réussissions néanmoins à les voir rayonner jusque sur Terre. Pour ceux équipés d'yeux gamma, les explosions gamma seraient les lumières les plus

brillantes du ciel, plus brillantes que le Soleil. Tellement lointaines, mais néanmoins parfaitement visibles, il fallait qu'il s'agisse d'explosions exceptionnellement puissantes, "the biggest bang since the big one", pour reprendre les termes d'un commentateur. A titre de comparaison: si nous réussissions à transformer la planète Terre en un gigantesque amas de bombes atomiques et si nous rassemblions ensuite dix milliards de ces planètes explosives, nous ne ferions qu'approcher la puissance explosive d'un GRB.

Plusieurs hypothèses circulent à propos des causes de ces gigantesques explosions. L'une d'entre elles affirme qu'il s'agit d'une collision entre deux étoiles à neutrons (noyaux implosés de lourdes étoiles, restes de multiples explosions de supernova). Il existe des étoiles doubles, composées de deux étoiles à neutrons et dont les composantes ne cessent de se rapprocher au fur et à mesure de leurs gravitations. Cette évolution entraîne irrémédiablement une collision.

Selon une autre hypothèse, les explosions gamma seraient provoquées par un type de supernova extrêmement puissante, les fameuses hypernovae. Il s'agirait de l'explosion d'étoiles particulièrement lourdes, dont le noyau plutôt que de se transformer en étoile à neutrons deviendrait un trou noir.

Selon une idée récente, les GRB seraient la conséquence de

l'évolution asymétrique des supernovae (ou du moins de certaines d'entre elles). Dans cette hypothèse, l'étoile ne se contenterait pas d'exploser en projetant des fragments en parts égales dans toutes les directions. Lors de l'explosion, la matière serait projetée essentiellement dans deux directions, celles des pôles de l'étoile. C'est ainsi qu'apparaîtraient des "jets" ou flux de rayonnement, propulsés par l'étoile désintégrée avec une extrême puissance dans deux directions.

Si cette hypothèse est avérée, nous voyons la plupart des supernovae "de côté", mais il arrive parfois que l'un des deux "jets" soit précisément orienté dans notre direction. Dans ce cas, l'éclair observé est nettement plus lumineux que celui observé latéralement. Vu de profil, nous observons une supernova ordinaire, mais si le "jet" est dirigé dans notre direction, il s'agit, selon cette hypothèse d'un GRB. Le "projecteur" est littéralement braqué sur nous. Cette configuration est rare. Néanmoins dans ce cas, l'éclair observé est tellement lumineux que le phénomène peut être tranquillement observé à des milliards d'années-lumière, contrairement à une supernova ordinaire. Dans les cas très rares où l'éclair est dirigé dans notre direction, le phénomène est dès lors observable sans problème, quel que soit l'endroit dans l'univers où l'explosion se déroule. Voilà pourquoi des GRB sont observés relativement fréquemment.

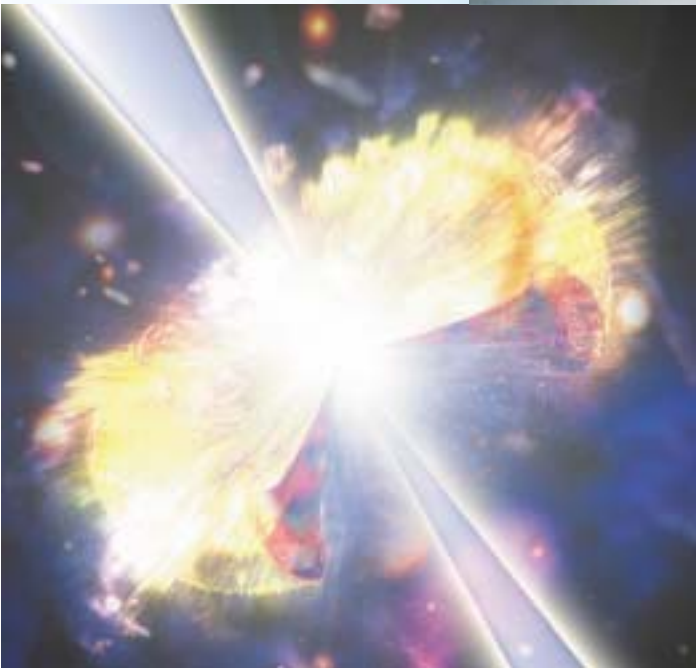
Une explosion gamma dans la proche galaxie pourrait avoir des conséquences désastreuses pour la Terre, qu'il s'agisse d'un éclair de supernova dirigé vers nous, d'une collision d'étoiles à neutrons ou de toute autre super-explosion. C'est un scénario auquel Hollywood, qui a déjà réalisé des films sur les catastrophes naturelles les plus diverses, y compris la chute de planétoïdes, n'a pas encore songé.

Heureusement, une moitié de la Terre seulement serait durement touchée: l'hémisphère ayant le malheur d'être orienté dans la direction de l'explosion au moment où l'éclair le plus intense de rayonnement gamma atteindrait la Terre. La principale conséquence immédiate serait la destruction de la couche d'ozone, entraînant un dérèglement écologique total à la surface de la Terre. Il est probable que l'éclair gamma soit suivi durant des mois de bombardements intenses de particules de rayonnement cosmique à forte intensité d'énergie. La santé des hommes et des animaux serait menacée, et la surface terrestre pourrait devenir radioactive pour des milliers d'années. Si les GRB résultent de la collision d'étoiles à neutrons, ils pourraient, d'après les calculs de trois astronomes israéliens Nir Shahiv, Arnon Dar et Ari Laor, se succéder environ tous les cent millions d'années à moins de trois mille années-lumière. A moins de trois mille années-lumière, les dégâts provoqués par un éclair gamma pourraient être désastreux.

Si un GRB frappait à cette distance, quelles en seraient les répercussions perceptibles sur Terre ? Tout d'abord, pendant une courte période, la Terre entière baignerait dans l'éclat intense du rayonnement gamma, plus puissant que la lumière du Soleil. Nous verrions une partie du ciel briller dans une lumière bleutée, générée par le fameux rayonnement (visible) de Cerenkov, émis lorsque les photons gamma atteignent les couches supérieures de l'atmosphère et accélèrent des particules de matière. D'après les estimations, cette tache bleue serait aussi lumineuse et légèrement plus

→ Esquisse de Swift, projet de satellite destiné à observer les explosions gamma. (NASA)

↓ L'"hypernova" (explosion de type supernova d'une étoile à l'occasion de laquelle des faisceaux de rayons très intenses sont émis dans deux directions) est le modèle le plus plausible pour expliquer l'apparition d'une explosion gamma. (NASA)



grande que la pleine Lune. Selon Stephen E. Thorsett de l'université de Princeton, les photons gamma provoqueraient la fragmentation des molécules dans les couches supérieures de l'atmosphère. Une série de réactions chimiques en résulterait, libérant d'énormes quantités d'oxyde d'azote dans l'atmosphère, du moins du côté de la Terre exposé à l'éclair gamma.

Les oxydes d'azote sont des agents polluants bien connus de notre environnement. Ils apparaissent notamment dans le

"smog" urbain. D'après les calculs de Thorsett, quelques secondes à peine après le début du GRB, l'air de la partie de la Terre malheureusement touchée, s'obscurcirait sous l'action des énormes quantités d'oxydes d'azote libérés. Il ne faudrait ensuite que peu de temps à ces oxydes d'azote pour détruire la couche d'ozone. C'est elle qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs du Soleil. La disparition de la couche d'ozone ne se cantonnerait pas à un seul côté de la Terre. Le vent transporterait les oxydes d'azote partout dans le monde, leur permettant

de poursuivre leur œuvre de destruction.

L'homme est capable de se protéger contre l'augmentation phénoménale du rayonnement ultraviolet, provoquée par la disparition de la couche d'ozone, mais les plantes et les animaux sont sans défense. Certaines espèces végétales ou animales risquent de disparaître, bouleversant gravement de nombreux écosystèmes. Il faudrait des décennies pour évacuer les quantités phénoménales d'oxydes d'azote.

Néanmoins, dans un article publié dans la revue *Sky & Telescope*, les astrophysiciens Peter Leonard et Jerry Bonnell qualifient de "bonne nouvelle", les conséquences des oxydes d'azote, pour ce qui est d'un GRB. La "mauvaise nouvelle" réside dans le déluge d'intense rayonnement cosmique qui débiterait quelques jours après l'éclair gamma et se prolongerait pendant environ un mois. Les deux chercheurs comparent la Terre tournant sur son axe à "un poulet à la broche", exposé au rayonnement cosmique. Après être entrées en collision pour la première fois à haute altitude avec un atome, les particules de rayonnement à forte intensité d'énergie, provoqueraient au sol des "douches" de muons et d'autres particules (comme elles le feraient en temps normal, mais en moindre quantité). D'après les astrophysiciens, la dose de muons au sol équivalait à cent fois la dose mortelle

pour l'homme. Les muons, très rapides, pourraient même pénétrer plusieurs centaines de mètres sous l'eau et même sous Terre. Seules les espèces les plus résistantes au rayonnement comme certains insectes, survivraient. En outre, les muons endommageraient les noyaux des atomes et rendraient dès lors le sol radioactif pour de longues années.

En l'espace d'un mois, la Terre devrait absorber la quantité de rayonnement cosmique qu'elle absorbe normalement en dix millions d'années. Selon Shahiv, Dar et Laor, les GRB pourraient expliquer la disparition en masse de nombreuses espèces végétales et animales par le passé. D'autres chercheurs font preuve de scepticisme à l'égard de cette théorie. Des traces d'isotopes radioactifs laissées par ce type d'événement dans les couches terrestres n'ont pas encore été identifiées. Les connaissances relatives aux explosions gamma restent insuffisantes pour pouvoir se prononcer avec certitude sur leur fréquence dans notre partie de la galaxie, sans parler de leurs conséquences pour la Terre. De plus, des explications cohérentes, comme nous le verrons par la suite, existent déjà pour élucider les principaux épisodes d'extinction à grande échelle dans l'histoire de la géologie.

Même si les GRB représentent un péril largement hypothétique pour la Terre, Leonard et Bonnell ont néanmoins envisagé

quelques méthodes pour nous protéger en cas de nécessité. Tout d'abord, les auteurs font observer que les explosions gamma sont extrêmement rares et il est possible de les prévoir longtemps à l'avance. Les étoiles géantes susceptibles d'exploser ne passent pas inaperçues. Il en va de même pour les couples d'étoiles à neutrons dont le comportement est particulièrement prévisible. L'arrivée d'un éventuel GRB dans notre environnement proche devrait dès lors pouvoir être annoncé des millions d'années à l'avance et par conséquent, d'après Leonard et Bonnell il n'est pas insensé de réfléchir à des parades.

Et la parade imaginée par les deux auteurs requiert une préparation extrêmement longue. Il faudrait d'abord démanteler un robuste planétoïde pour le transformer en un large disque de matériaux d'un diamètre au moins équivalent à celui de la Terre et d'une épaisseur d'un bon kilomètre. Ensuite, ce disque devrait être placé avec une extrême précision sur une orbite soigneusement déterminée autour du Soleil. Au moment du GRB prévu (il est évidemment essentiel que cette explosion puisse être prévue avec une marge d'erreur ne dépassant pas quelques jours), le disque se trouverait précisément entre l'éclair gamma et la Terre, nous protégeant ainsi contre le rayonnement nocif. Il existe des orbites autour du Soleil où un tel disque pourrait

rester positionné un mois environ entre nous et le GRB, suivant le mouvement de la Terre. Le disque nous protégerait contre l'éclair initial du rayonnement gamma, mais également contre le bombardement prolongé de particules de rayonnement cosmique. Mais il va de soi que cette démarche relève pour l'instant du domaine de la science-fiction.

Dossier Menace de l'espace

Impacts

Tout le monde a déjà observé un météore ou "étoile filante".

Ce phénomène lumineux, un éclair de lumière fulgurant dans le ciel nocturne, est provoqué par un petit morceau de pierre ou de métal venant de l'espace, pénétrant dans notre atmosphère à grande vitesse et s'y consumant sous l'action du frottement avec les couches supérieures de l'atmosphère.



↑ Un météore ou "étoile filante" est provoqué par la combustion dans l'atmosphère d'une petite roche. (NASA)

Ces fragments portent le nom de "météoroïdes" ou "météorites" (certains auteurs réservent la seconde appellation aux objets retombés sur Terre). Par rapport à la Terre, ils peuvent se déplacer à des vitesses dépassant les soixante kilomètres par seconde (plus de deux cent mille kilomètres par heure), même si certains sont nettement plus lents, en fonction des orbites terrestres et du météoroïde autour du Soleil. Lorsqu'un météorite se déplace à grande vitesse dans les couches supérieures de l'atmosphère raréfiée, le frottement le porte à une température tellement élevée qu'un nuage d'air est ionisé autour de l'objet et provoque ce phénomène lumineux.

Il semble que de nombreux météoroïdes soient issus de comètes ou de collision entre planétoïdes. A plusieurs moments de l'année, la Terre se déplace dans un nuage de météoroïdes, abandonnés dans le sillage d'une comète. Le nombre de météores visibles est alors plus important et on parle d'une nuée de météores ou d'une pluie de météores. La pluie de météores la plus célèbre de l'année est celle des "Perséides", vers le 12 août.

Même si on imagine parfois qu'une telle nuée est composée d'une énorme "pluie" de petites pierres, les météoroïdes présents dans la nuée sont encore très éloignés les

uns des autres, et le risque pour les satellites gravitant dans l'espace d'être touché par un météoroïde est très limité. Cela ne signifie pas que le danger soit inexistant. Dans la nuit du 11 au 12 août 1993, Olympus, satellite européen expérimental de communication connut une défaillance soudaine, dérégulant complètement le système de positionnement. Il a finalement fallu renoncer au satellite. L'explication la plus plausible est qu'Olympus fut touché par un météorite de la nuée des Perséides. Lors de l'impact, apparut un petit nuage de plasma, provoquant un court-circuit dans l'électronique du système de positionnement.

Les satellites sont régulièrement touchés par de petits micrométéorites, provoquant tout au plus des perturbations temporaires, mais les collisions avec des objets de plus grande taille, ayant par exemple la dimension d'un petit caillou, voire d'un grain de sable, sont extrêmement rares. Lors de nuées très intenses, comme les Léonides, qui ne reviennent que tous les 33 ans, pendant quelques années et ne durent que quelques heures ou quelques jours autour du 17 novembre, les directeurs de vol sont parfois inquiets des éventuelles retombées pour les satellites. Lors des dernières tempêtes Léonides, à chaque fois, une série de satellites furent placés en "sécurité", afin d'être

préparés à d'éventuels impacts. Le télescope spatial Hubble fut détourné de la direction dont provenaient les Léonides, afin de protéger le miroir fragile de l'observatoire contre les impacts. En 1998, Intelsat, exploitant d'une série de satellites de communication, estimait à 1 sur 500 le risque pour l'un des satellites géostationnaires de communication d'être touché par les Léonides.

La plupart des météoroïdes n'atteignent que rarement le sol ; ils se désintègrent complètement, longtemps avant de toucher Terre. Il en va de même pour les météoroïdes ne faisant pas partie d'une nuée, mais décrivant une orbite solitaire dans le système solaire et susceptibles d'atteindre la Terre à n'importe quel moment. Mais il arrive parfois qu'un débris provenant de l'espace soit suffisamment grand et solide pour qu'une partie survive à l'épreuve du feu de l'atmosphère. Il y a régulièrement des objets qui, alors qu'ils étaient compacts dans l'espace, se disloquent lors de leur plongée dans l'atmosphère et s'éparpillent au sol en de multiples petits météorites.

Pour autant que des certitudes existent en la matière, il semble que pour l'instant, aucun météorite n'ait provoqué de dommages significatifs. Il n'existe aucun cas connu et dûment étayé signalant le décès d'un individu

à la suite de la chute d'un météorite, même si il y a quelques années, un jeune ougandais fut blessé à la tête par un petit météorite, mais s'en tira avec une simple écorchure. Il existe toutefois quelques cas rapportés d'animaux tués par des météorites. En 1490, dans la province chinoise de Shanxi, dix mille personnes furent tuées par "des chutes de pierre", mais aucune preuve ne permet d'affirmer qu'il s'agissait véritablement de chutes de météorites.

Les dégâts matériels sont plus fréquents. Même s'il y a parfois des compensations : un Américain dont la vieille voiture d'occasion fut victime d'un météorite, perçant un trou dans son capot, tira largement son épingle du jeu : il réussit à vendre le météorite ainsi que l'épave de son véhicule pour une coquette somme.

Les impacts de météorites pourraient-ils s'avérer dangereux, dans l'hypothèse où un très gros objet, d'un diamètre de plusieurs dizaines ou centaines de mètres, voire de plusieurs kilomètres, venait à s'écraser sur Terre ? Le système solaire abrite différentes catégories de corps célestes de cette dimension, susceptibles d'entrer en collision avec la Terre. Il y a tout d'abord les planétoïdes

ou astéroïdes ou petites planètes. Ce sont des objets dont les plus inoffensifs gravitent autour du Soleil sur des orbites entre Mars et Jupiter, mais dont quelques uns peuvent se rapprocher de la Terre. La plupart sont composés de pierre et/ou de métal. Leurs dimensions varient de la taille d'un caillou jusqu'à près d'un millier de kilomètres (même si parmi les plus grands, aucun n'est susceptible de se rapprocher de la Terre). Viennent ensuite les comètes. Il s'agit d'objets essentiellement composés de glace. Ils décrivent des orbites étirées autour du Soleil et nombreux d'entre eux peuvent se rapprocher de la Terre. Ils ont des diamètres de quelques kilomètres ou dans des cas exceptionnels, de plusieurs dizaines de kilomètres.

Toungouska

Il n'existe dans toute l'histoire qu'un cas soigneusement documenté d'impact d'un objet relativement imposant. L'événement se produisit en 1908 en Sibérie. Le 30 juin de cette année, la fin du monde semblait être arrivée au-dessus de la rivière Toungouska. Une énorme explosion, à huit kilomètres d'altitude détruisit en un clin d'œil un territoire de la taille d'une province belge.

La détonation fut entendue à plusieurs centaines de kilomètres. Partout dans le monde, les aiguilles des sismomètres se mirent à trembler. Selon les estimations, le tremblement de Terre provoqué atteignit la magnitude cinq sur l'échelle de Richter. De gigantesques incendies de forêt suivirent l'explosion et brûlèrent durant des semaines. Dans les semaines qui suivirent, partout dans le monde, on observa de superbes couchers de Soleil aux couleurs flamboyantes et des "nuits blanches", probablement provoqués par des particules de matière présentes dans la haute atmosphère. Heureusement, en 1908, la région de Toungouska était encore assez peu peuplée.

La situation politique en Russie se compliquant au cours des années qui suivirent l'explosion, avec tout d'abord la Première Guerre mondiale, ensuite la révolution russe, suivie de la guerre civile, il a fallu attendre près de vingt ans avant qu'une expédition scientifique puisse se rendre sur les lieux de l'explosion. Ce n'est qu'en 1927 qu'une expédition pénétra pour la première fois dans ce *ground zero*. Elle y découvrit un désastre incroyable. Dans une zone de plus de vingt mille kilomètres carrés, tous les arbres avaient été fauchés par le souffle de l'explosion. Des pans entiers de forêt étaient carbonisés. Bizarrement, tous les arbres fauchés étaient disposés de manière assez "radiale", loin du centre de l'explosion. Il est évident que l'onde de choc les avait littéralement soufflés. Au centre, restaient quelques troncs debouts, privés de leurs branches.

→ Territoire détruit par l'explosion de Toungouska, comparé à la ville de Londres. (NASA)

↓ Arbres tombés dans la région de Toungouska, des années après l'impact qui avait frappé la zone. (NASA)



L'expédition ne retrouva pas le moindre morceau de météorite. Manifestement, lors de l'explosion, le météorite avait été totalement pulvérisé et vingt ans après, il était difficile de retrouver ou d'identifier les petits fragments retombés au sol. L'absence de cratère ou de morceaux de météorite fit longtemps baigner l'incident du Toungouska dans une atmosphère de mystère. Les spéculations allèrent bon train, comme si



← Meteor Crater en Arizona, creusé par un petit planétoïde, il y a 50000 ans. (NASA)

furent soulevées en un clin d'œil. La poussière retomba à plusieurs kilomètres autour du site de l'explosion. Trente tonnes de lourds blocs de roche furent propulsées à plus d'un kilomètre.

D'après les calculs, pour un spectateur en Arizona, la boule de feu observée immédiatement avant l'impact, devait avoir un éclat dix mille fois supérieur à celui du Soleil. Il n'y avait pas âme qui vive en Arizona il y a cinquante mille ans. Mais le météore a dû aveugler d'innombrables animaux.

A l'époque, l'Arizona était peuplé de mam-mouths, bisons et mastodontes. Selon les estimations, l'explosion a probablement décimé tous les grands animaux à une distance de six à douze kilomètres et provoqué de graves blessures jusqu'à une distance de 24 kilomètres. L'explosion a probablement été accompagnée d'une boule de feu et d'un nuage en forme de champignon, comparable à celui des explosions nucléaires les plus puissantes. A quelques kilomètres du point d'impact, l'onde de choc a dû atteindre une amplitude cent fois supérieure à la pression atmosphérique normale et la vitesse du vent atteindre deux mille kilomètres par heure. De véritables ouragans ont dû souffler jusqu'à quarante kilomètres du point d'impact. On estime à la magnitude de 5,5 sur l'échelle de Richter, la puissance du tremblement de Terre déclenché par l'impact. Il a probablement fallu un siècle avant que l'écosystème de la région ne se rétablisse. Les conséquences de l'impact en Arizona sont probablement restées circonscrites à la région. L'explosion n'était pas suffisamment puissante pour que le monde entier en perçoive les retombées.

Le tueur de dinosaures

Un impact d'un calibre supérieur à celui de Toungouska et de l'Arizona a probablement touché, il y a plus longtemps encore, l'actuelle côte de la péninsule mexicaine du Yucatan. Il y a fort à parier que cet impact,

l'explosion avait été provoquée par un vaisseau spatial extraterrestre ou par un essai nucléaire secret. Ces spéculations semèrent le scepticisme chez un certain nombre de scientifiques plus réalistes et l'incident fut nié par la science pendant un certain temps. Ces dernières années toutefois, un consensus semble s'être dégagé pour attribuer l'explosion à l'impact (naturel) d'un objet extraterrestre. Les discussions se poursuivent néanmoins sur la nature de l'objet; s'agissait-il d'un fragment de comète composé essentiellement de glace ou d'un petit planétoïde essentiellement composé de pierre. Récemment, l'opinion dominante penche plutôt en faveur d'un planétoïde rocheux.

Selon les dernières estimations, l'objet ayant pénétré dans l'atmosphère au-dessus de Toungouska avait un diamètre de cinquante à cent mètres, plus près semble-t-il de soixante mètres. Il pénétra dans l'atmosphère du côté sud est (déduction faite à partir de la disposition précise des arbres renversés) et provoqua une explosion d'une puissance de quinze mégatonnes de TNT, comparable aux types de bombes thermonucléaires les plus lourdes (bombes à hydrogène).

Si un impact équivalent à celui de Toun-gouska se produisait aujourd'hui au-dessus d'un territoire à forte densité de population comme la Belgique, l'explosion provoquerait

des millions de victimes. L'explosion pourrait d'un coup rayer de la carte une grande métropole.

Le Meteor Crater

Une explosion d'une puissance encore supérieure à celle de Toungouska a dû se produire il y a bien plus longtemps, cinquante mille ans selon les estimations, en Arizona aux Etats-Unis. A l'origine, un petit planétoïde d'une composition différente de celui à l'origine de l'incident de Toungouska. Le planétoïde qui frappa l'Arizona avait une haute teneur en métal (en particulier en fer) et était par conséquent plus dur et plus solide; il s'écrasa dès lors au sol au lieu de se désintégrer dans l'atmosphère. Le célèbre "Meteor Crater" (autrefois connu sous le nom de Barringer Crater), situé à 55 kilomètres de Flagstaff, Arizona, non loin du Grand Canyon, témoigne de l'impact.

Le planétoïde qui a creusé ce cratère avait probablement un diamètre de quelques dizaines de mètres. Il déboula dans l'atmosphère à la vitesse estimée de quarante mille kilomètres par heure et au moment de l'impact au sol, provoqua une explosion de quinze à quarante mégatonnes, soit mille à deux mille fois plus que la puissance de la bombe atomique qui détruisit Hiroshima en 1945. 175 millions de tonnes de roche

→ Luis Alvarez, un des pères de l'hypothèse selon laquelle les dinosaures ont été décimés par la chute d'un planétoïde.



remontant à environ 65 millions d'années a mis un terme au règne des dinosaures. La découverte de cet impact constitue un épisode intéressant de l'histoire de la science.

Les paléontologues savaient depuis longtemps déjà que les dinosaures disparurent (à quelques exceptions près, puisqu'il est apparu récemment que les oiseaux actuels sont des descendants d'une famille de dinosaures qui avait survécu), il y a 65 millions d'années, de même qu'une large part de la faune et de la flore terrestre et sous-marine. Le passage à une nouvelle ère, il y a 65 millions d'années, est appelé frontière entre le crétacé et le tertiaire, puisqu'il signe la fin de l'ère géologique du crétacé et le début de l'ère tertiaire.

Longtemps, la disparition des dinosaures et de nombre de leurs contemporains demeura une énigme. On envisagea notamment un changement de climat (éventuellement causé par d'importantes éruptions volcaniques) ou encore des facteurs purement biologiques, comme la concurrence accrue de nouvelles espèces animales comme les mammifères (ce qui n'explique pas pourquoi en dehors des dinosaures, des milliers d'autres espèces furent rayées de la planète). La plupart des paléontologues pen-

saient que l'extinction des espèces à la fin du crétacé était la conséquence d'un processus progressif, probablement étalé sur plusieurs millions d'années.

Iridium suspect

En 1980, Luis W. Alvarez, lauréat du prix Nobel de physique, publia un article dans la célèbre revue professionnelle américaine *Science*, dans lequel il avançait des arguments indiquant que les dinosaures avaient probablement disparu à la suite de l'impact d'un planétoïde ou d'une comète de plusieurs dizaines de kilomètres. Alvarez et ses co-auteurs, parmi lesquels son fils Walter Alvarez, laissaient entendre que l'impact d'un planétoïde ou d'une comète de ce type avait soulevé un nuage de poussière noire ayant encerclé la planète, empêchant des mois ou des années durant, la lumière du Soleil d'atteindre la Terre et la plongeant dans une nuit glaciale. En l'absence de lumière solaire, la photosynthèse des plantes devenait impossible. Privés de plantes, les herbivores auraient d'abord disparu, suivis des carnivores.

Alvarez et ses collègues ont puisé les principaux indices étayant leur hypothèse dans une étrange strate contenant de l'iridium.

Près de la ville moyen-âgeuse de Gubbio en Italie, Alvarez et ses collègues avaient découvert une intéressante strate d'argile, précisément entre les strates de la fin du crétacé et celles du début du tertiaire. Précisément sous la couche d'argile d'un centimètre d'épaisseur, la pierre calcaire grouillait de fossiles de plancton datant de l'ère crétacée, tandis que la couche de calcaire recouvrant la fine couche d'argile ne contenait que peu de fossiles, à peine formés. D'après le raisonnement des chercheurs, la couche argileuse était liée à la période d'extinction. L'analyse de la couche argileuse révéla la présence de concentrations élevées d'iridium.

L'iridium est très rare sur Terre. L'iridium existant provient pour l'essentiel de l'espace, plus particulièrement de météorites (même si l'activité volcanique peut également générer de l'iridium). Il est bien connu que les météorites recèlent souvent d'importantes quantités d'iridium. La plupart des roches terrestres ont une teneur en iridium oscillant entre 0,1 et 0,3 particules par milliard. Dans les sédiments datant de la transition entre



← Le planétoïde Ida, photographié par la sonde spatiale Galileo. (NASA)
↓ Le planétoïde Gaspra, habitant typique de la "ceinture de planétoïdes" entre Mars et Jupiter, photographié par la sonde spatiale Galileo. (NASA)





← Conséquences de la collision entre la comète Shoemaker-Levy 9 et la planète Jupiter: d'énormes taches sombres sur la planète. (NASA)

crétacé et tertiaire, selon Alvarez, la teneur tournait autour de 9 particules par milliard, soit trente à nonante fois plus que la normale. L'impact d'un planétoïde riche en iridium aurait pu facilement répandre cette substance aux quatre coins de la planète. Alvarez et ses collègues supposaient que la couche argileuse provenait des retombées des gigantesques nuages de poussière propulsés dans l'atmosphère par l'impact du planétoïde et l'explosion en découlant. On estime à 360.000 tonnes la quantité totale d'iridium contenue dans la couche de transition entre le crétacé et le tertiaire pour l'ensemble de la planète.

L'hypothèse d'Alvarez à propos de l'impact recueillit d'emblée un large écho que ce soit dans la communauté scientifique ou dans la presse populaire. Cette théorie se heurta à une forte résistance du côté des paléontologues et experts pour ce qui est de la disparition des dinosaures. La controverse prit parfois une tournure personnelle et Alvarez se vit même conseiller de se cantonner à la physique.

Mais les indices venant corroborer l'hypothèse de l'impact se multiplièrent rapidement. Alors qu'au début l'excédent d'iridium se limitait à quelques endroits dans la couche entre crétacé et tertiaire, le nombre de sites s'éleva rapidement à plusieurs dizaines partout dans le monde. L'iridium a désormais été détecté à plus de deux cents endroits, sur la Terre, dans des sédiments de rivières et dans les profondeurs marines. La haute concentration temporaire d'iridium fut manifestement un phénomène mondial. De nombreux endroits recèlent le fameux "quartz traumatisé". Il s'agit de petits morceaux de quartz portant la trace d'une énorme pression, pression apparaissant uniquement en cas d'impact violent, lors d'explosions atomiques et peut-être lors d'éruptions volcaniques extrêmement violentes. Dans le même temps, des paléontologues ont décelé dans les fossiles de formes de vie datant de la fin du crétacé, des indices confirmant la disparition soudaine et non progressive comme on l'avait toujours pensé. L'apparente progressivité s'appuyait sur la rareté des fossiles découverts, pouvant laisser supposer qu'une espèce déterminée n'apparaissait déjà plus avant sa véritable extinction.

Némésis

L'enthousiasme en faveur de l'hypothèse de l'impact atteignit de tels sommets qu'on commença à spéculer sur des impacts répétés susceptibles d'expliquer d'autres extinctions en masse. En se basant sur l'âge attribué aux cratères présents sur la Lune, certains scientifiques pensaient même avoir trouvé des indices indiquant une régularité de ces impacts. Environ tous les trente millions d'années, la Terre (et la Lune) seraient exposées à un risque accru d'impacts de comètes ou de planétoïdes aux conséquences catas-

trophiques. Cette périodicité avait même trouvé une explication: le Soleil ne serait pas un astre isolé, mais aurait bel et bien un compagnon, une petite étoile peu brillante, très éloignée, ayant jusqu'à présent toujours échappé à l'attention des astronomes. Tous les trente millions d'années, ce compagnon décrirait une orbite autour du Soleil et viendrait ainsi perturber, à intervalles réguliers, le nuage de Oort des comètes très loin du Soleil. A chaque fois, plusieurs millions de comètes issues du nuage de Oort seraient entraînées vers les parties centrales du système solaire, où elles pourraient entrer en collision avec notre planète. L'hypothétique compagnon du Soleil, l'astre ayant semé la mort et la dévastation se vit même prématurément affublé d'un nom : *Némésis*.

Mais il apparut très rapidement que les indices en faveur de la périodicité des impacts ne tenaient pas suffisamment la route pour être crédibles. Les impacts avaient probablement été multiples, mais pour autant qu'on ait pu le vérifier, ils intervenaient à des moments arbitraires dans l'histoire de notre planète. Pour les autres impacts, les preuves sont par ailleurs moins solides que pour l'impact crétacé-tertiaire. Parmi les hypothèses, la plus fiable est l'éventuel impact à la fin du permien, il y a 250 millions d'années, entraînant l'extinction de nonante pour cent des espèces de l'époque.

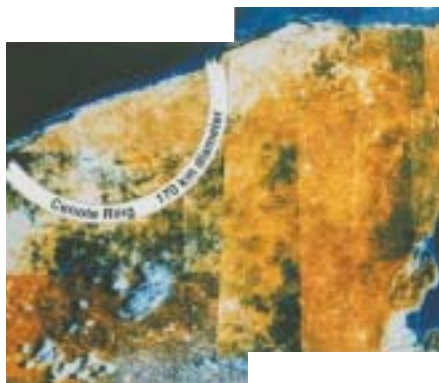
Le cratère de Chicxulub

La thèse de l'impact crétacé-tertiaire présentait toujours une lacune: où était le cratère qu'aurait dû creuser un planétoïde ou une comète d'une dizaine de kilomètres dans la croûte terrestre ? Un objet de ce genre, heurtant la Terre à une vitesse probablement supérieure à cent mille kilomètres par heure (trente kilomètres par seconde) aurait dû creuser un cratère d'un diamètre variant entre cent et deux cents kilomètres, et un tel cratère, précisément âgé de 65 millions d'années était introuvable sur Terre.



← Noyau de la comète Halley, photographié par la sonde spatiale européenne Giotto. (ESA)

↓ Carte indiquant la localisation du cratère souterrain de Chicxulub. (NASA)



Cela ne signifiait pas pour autant qu'il ne fallait pas ajouter foi à l'hypothèse de l'impact. Il n'était pas impossible qu'un cratère de 65 millions d'années ait été largement érodé et éventuellement recouvert de nouvelles strates. Autre possibilité : la tectonique des plaques sur notre planète (phénomène à l'origine du glissement des continents) aurait pu entraîner le cratère dans les profondeurs du manteau de la planète et disparaître ainsi de la surface de la Terre. Si, par exemple, le planétoïde était tombé à l'ouest de l'océan Pacifique, le cratère aurait progressivement glissé vers l'ouest pour finalement plonger dans les profondeurs, en même temps que le fond de l'Océan Pacifique, là où il glisse sous l'Asie. Selon une autre hypothèse originale, le planétoïde serait tombé précisément sur une dorsale océanique, déclenchant une activité volcanique tellement intense qu'elle aurait effacé toute trace du cratère d'origine.

Mais toutes ces recherches s'avérèrent inutiles, puisque le cratère de l'impact crétaé-tertiaire avait été découvert depuis longtemps, par hasard, à l'époque même où Alvarez publiait son hypothèse de l'impact. Rares étaient ceux qui en avaient été informés. Le cratère avait longtemps échappé à l'attention, car il était enterré sous des strates d'un kilomètre d'épaisseur.

Les tous premiers indices avaient émergé dès les années cinquante, lorsque des géo-

logues de la société pétrolière mexicaine Pemex avaient décelé diverses anomalies géologiques dans une zone circulaire sur les côtes de la péninsule mexicaine du Yucatan. Dans l'espoir d'y trouver du pétrole, Pemex avait réalisé des sondages qui avaient confirmé l'existence dans le sol d'une étrange structure circulaire, indécidable en surface. La structure fut baptisée Chicxulub, nom de la localité où avaient eu lieu les premiers sondages. Dans la langue Maya, le terme signifie "la queue du diable".

Pemex poursuivit ses sondages jusque dans les années septante et les géologues mexicains trouvaient la structure Chicxulub de plus en plus étrange. Dans la structure, dont le diamètre semblait osciller entre 140 et 200 kilomètres, on détecta notamment la présence de couches de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur de roches broyées, semblant indiquer une catastrophe ou une explosion. Vers 1980, Penfield et Camargo, géologues de la Pemex conclurent que la structure Chicxulub était probablement un gigantesque cratère enfoui, creusé par un impact (même si l'hypothèse d'une origine volcanique de la structure circulaire n'était pas écartée). La découverte de ce probable cratère ne recueillit pas un large écho.

Au début des années nonante, sous la conduite de Hildebrand, des chercheurs américains tombèrent par hasard sur les anciennes données mexicaines. Rapidement, ils se rendirent compte que le cratère enfoui de Chicxulub pourrait bien être le cratère de l'impact crétaé-tertiaire, recherché depuis longtemps. L'analyse en laboratoire des échantillons recueillis lors des sondages démontra sans la moindre ambiguïté que la structure de Chicxulub résultait d'un impact. Des mesures d'écarts locaux de la pesanteur et d'écarts du magnétisme terrestre faisaient pencher la balance en faveur d'une structure circulaire enfouie. La stratigraphie révéla que le cratère datait du passage du crétaé au tertiaire. De petites bulles de

verre, découvertes à plusieurs endroits en Amérique, composées de matériaux coagulés, entraînés au moment de l'impact sous la forme de gouttelettes incandescentes, présentaient une composition identique à celle du sol de Chicxulub. Grâce à la datation par l'argon, l'âge du cratère fut très précisément fixé à 65,07 millions d'années, avec une marge d'erreur d'à peine cent mille ans. Un âge, marge d'erreur comprise, correspondant exactement aux estimations les plus fiables de l'âge du passage entre le crétaé et le tertiaire.

L'étendue précise du cratère de Chicxulub n'a pas encore pu être exactement déterminée. La structure souterraine semble se présenter sous la forme d'une série d'anneaux concentriques, autorisant diverses interprétations quant au diamètre du cratère d'origine. Les chiffres cités dans la littérature divergent, allant de 140 à pas moins de 300 kilomètres. Le cratère est partiellement immergé et son centre se situe approximativement le long de la côte du Yucatan. La ville la plus proche est la cité balnéaire de Progreso.

La destruction de l'Amérique

L'impact d'il y a 65 millions d'années a dû provoquer un cataclysme d'une ampleur inimaginable. Selon les chercheurs Peter Schultz de la Brown University et Steven D'Hondt de l'Université de Rhode Island, le planétoïde a pénétré l'atmosphère par le sud-est formant un angle d'à peine vingt à trente degrés avec la surface terrestre. Ses déductions s'inspirent du modèle des déformations du sol dans les environs de Chicxulub.

Si leur hypothèse est avérée, la direction depuis laquelle le planétoïde a déboulé n'a fait qu'aggraver le désastre. L'impact en oblique a soulevé d'énormes quantités de roches en fusion, essentiellement vers le nord-ouest. Une grande partie du continent nord américain fut ainsi détruite en un clin

d'œil. Au moment de l'impact, l'explosion creusa un cratère provisoire de plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur. Selon les estimations, pas moins de deux cent mille kilomètres cubes de rochers furent dissous et propulsés dans l'air.

Il est probable que la composition du sol sur le lieu d'impact du planétoïde ait contribué à amplifier la catastrophe. Les deux kilomètres supérieurs du sol étaient composés de carbonate de calcium et de sulfate de calcium. Exposées à la chaleur extrême de l'impact, ces roches libèrent d'énormes quantités de dioxyde de carbone et d'aérosols de sulfate, provoquant des pluies acides et du smog. Ce phénomène a sans aucun doute aggravé les conséquences du nuage de poussière obscurcissant l'atmosphère. Les retombées de roches incandescentes ont très certainement allumé de gigantesques incendies de forêt partout sur la planète. Ces incendies ont dégagé d'importantes quantités de fumée noire dans l'atmosphère, obscurcissant la lumière du Soleil.

Les incendies ont probablement libéré par la même occasion énormément de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Une période exceptionnellement chaude a dû commencer après la disparition de la poussière et l'arrêt des longs mois de nuit glaciale. La présence dans l'atmosphère d'importantes quantités de dioxyde de carbone a probablement entraîné un effet de serre, faisant planer pendant de nombreuses années sur la Terre, une vague de chaleur exceptionnelle. Il convient d'ajouter qu'il n'existe aucune certitude quant aux conséquences précises de l'impact sur le climat. La cause précise de la disparition des espèces de dinosaures n'a pas encore été élucidée. La catastrophe a été tellement effrayante que les scientifiques semblent avoir le choix entre de nombreuses hypothèses pour ce qui est de l'extinction d'espèces. Hypothèses partant des importants changements climatiques, ayant entraîné une pénurie de plantes

comestibles, provoquée par l'obscurité, jusqu'à celles de l'empoisonnement de l'environnement par les matières toxiques présentes dans l'atmosphère.

Tous les scientifiques ne sont pas convaincus que les dinosaures aient disparu à la suite de l'impact du planétoïde. Un groupe minoritaire continue à prétendre que leur disparition est due à d'autres causes. Les dinosaures étaient peut-être déjà en voie d'extinction et l'impact leur a donné le coup de grâce. L'impact n'est peut-être que l'un des éléments ayant mis fin à leur règne. Mais la réalité de l'impact remontant à 65 millions d'années n'est pratiquement plus contestée.

Des impacts hors norme

A la suite de l'érosion et d'autres processus entraînant la disparition des cratères ou les rendant invisibles, les grands cratères d'impact sont rares sur notre planète. Mais sur la Lune, les cratères ne sont pas "effacés" par les phénomènes géologiques et ils attestent des dangers que recèle ou du moins recelait notre système solaire. D'innombrables cratères d'impact géants témoignent des milliers d'impacts probablement plus violents encore que l'impact crétacé-tertiaire qui a frappé la Terre. La plupart d'entre eux remontent à un lointain passé, peu après la naissance du système solaire, il y a environ quatre milliards d'années. La Lune et, par conséquent la Terre, ont dû être exposés à un véritable feu nourri de débris provenant de l'espace. Le système solaire grouillait encore de blocs détachés, débris de la formation des planètes. Cette tempête se déclencha après la disparition de la plupart des débris. Mais quelques cratères relativement jeunes sur la Lune révèlent que dans les milliards d'années qui ont suivi, un impact violent est survenu de temps à autre. Si la Lune fut régulièrement touchée, la Terre qui, de par ses dimensions et sa forte gravité, constitue une cible bien plus

importante, n'a certainement pas réussi à échapper à ces coups.

Un impact "hors norme" a dû survenir tout au début de l'histoire de notre planète. Les scientifiques émettent l'hypothèse selon laquelle la Lune résulte d'une collision entre la Terre à peine née et une autre planète d'une dimension équivalente à celle de la planète Mars. Quantités de matière furent projetées dans l'espace au moment de la collision ; cette matière se rassembla ensuite en une orbite autour de la Terre pour former la Lune.

Quelles seraient les conséquences de l'impact d'un planétoïde exceptionnellement énorme ? Un article de synthèse publié en 1999 dans le magazine Nature résume l'impact sur notre planète, en fonction des dimensions du planétoïde qui nous heurterait. La liste, mettant l'accent sur les "plus gros calibres", considère l'impact crétacé-tertiaire comme un incident "moyen". Huit catégories sont établies :

1. "Très petits impacts" par un objet de plus de cent mètres, comparable à l'explosion de Tungouska en 1908. L'impact a d'importantes répercussions locales, des conséquences limitées ailleurs dans le monde, principalement dans l'hémisphère où l'impact a eu lieu. L'atmosphère devient plus poussiéreuse. Les effets globaux sur la vie restent limités, même si les auteurs observent que la poussière présente dans l'atmosphère déclenche de romantiques couchers de Soleil, faisant remonter le taux de natalité.

2. "Petits impacts", par un objet de plus d'un kilomètre. Durant des mois, l'atmosphère aux quatre coins de la planète est remplie de poussière. La photosynthèse des plantes est interrompue. De nombreux individus meurent, mais l'extinction des espèces reste limitée. La civilisation humaine est menacée.

3. "Impacts moyens", par un objet d'au moins dix kilomètres, comparable à l'impact crétacé-tertiaire d'il y a 65 millions d'années. Cet impact perturbe le climat partout dans le monde et provoque d'énormes variations thermiques. La moitié des espèces disparaît.

4. "Grands impacts", par un objet dépassant trente kilomètres (à l'exemple de la comète Hale-Bopp). Un tel impact n'est probablement plus survenu au cours des deux derniers milliards d'années. Cet impact porterait la température de la Terre et de l'atmosphère à mille degrés et exterminerait toute forme de vie sur les continents.

5. "Impacts extra grands", par un objet dépassant septante kilomètres. Un tel impact entraînerait l'ébullition des cent mètres supérieurs des océans et décimerait l'essentiel de la vie sur la planète.

6. "Impacts géants", par un objet dépassant les deux cents kilomètres. L'impact provoquerait l'évaporation des océans. Seuls les micro-organismes profondément enfouis peuvent éventuellement survivre à l'impact. Le dernier impact de ce type remonte à quatre milliards d'années.

7. "Impact colossaux", par un objet de plus de sept cents kilomètres. Un impact de cette catégorie ferait fondre l'écorce terrestre et signifierait la mort de toute forme de vie.

8. "Impacts super colossaux", par un objet de plus de deux mille kilomètres. Un impact de cette ampleur entraînerait la fonte de la planète entière. Dans l'état actuel des connaissances, l'histoire de la Terre n'a connu qu'un impact de cette ampleur, il y a 4,45 milliards d'années, lors de l'impact qui a donné naissance à la Lune.

Peur des impacts

Un impact géant de planétoïde ou de comète pourrait-il à nouveau intervenir et effacer de la Terre la civilisation humaine, voire même la totalité de l'espèce humaine ? Les astronomes savent que de nombreux planétoïdes et de nombreuses comètes gravitent sur des orbites proches de la Terre et que, autrefois, de temps en temps il y a eu de graves collisions. Devons-nous dès lors nous inquiéter ?

En tout cas, la menace des impacts de planétoïdes a déjà frappé les imaginations.

Diverses productions hollywoodiennes ont abordé ce thème. Le film *Deep Impact* met en scène un astronome amateur découvrant une comète qui s'avère ensuite en route de collision avec la Terre. Une tentative de destruction du corps céleste menaçant à l'arme nucléaire échoue partiellement et la chute dans l'Océan Atlantique provoque un raz-de-marée détruisant une grande partie de la côte est de l'Amérique. Dans *"Armageddon"*, la Terre est menacée par un planétoïde géant peu réaliste "aussi grand que le Texas".

Une équipe de héros intrépides est envoyée pour le neutraliser, tandis que des salves bien ciblées de planétoïdes plus modestes frappent des villes comme Paris et New York.

A plusieurs reprises au cours de ces dernières années, les médias ont annoncé, à tort, la chute d'un grand planétoïde sur la Terre.

A chaque fois, à l'origine de l'information, il y avait bel et bien la découverte d'un planétoïde susceptible d'entrer en collision avec la Terre. Mais à chaque fois, les médias ont amplifié le caractère alarmiste de cette information. Un exemple éloquent est celui du planétoïde 1997 XF11. En 1998, des astronomes avaient prédit une collision de ce planétoïde avec la Terre pour 2028. Quelques jours plus tard, cette prédiction a dû être corrigée sur base d'informations plus précises. Mais entre-temps, la presse s'était déjà longuement étendue sur la prétendue menace.

Pour éviter à l'avenir de telles dérives, quelques experts diffusent l'utilisation d'une échelle indiquant le degré de gravité de la menace représenté par un planétoïde potentiellement dangereux. Cette échelle porte le nom d'échelle de Turin et a été conçue par analogie avec la très célèbre échelle de Richter. Les valeurs de l'échelle de Turin ont été choisies de manière à être perçues par le public comme des valeurs correspondantes à celles de l'échelle de Richter. Elle a été mise au point par Richard Binzel du Massachusetts Institute of Technology (MIT), et discutée lors d'une réunion de l'Union Astronomique

internationale (UAI) à Turin (ce qui explique son nom). L'échelle de Turin répartit les menaces d'impact en onze catégories qui sont regroupées en cinq groupes plus larges, caractérisés comme suit (assortis d'une "couleur d'alarme" symbolique):

0 ("blanc") : sans conséquences probables
1 ("vert") : doit être surveillé attentivement
2-4 ("jaune") : préoccupant
5-7 ("orange") : menaçant
8-10 ("rouge") : collisions certaines

L'ensemble des signalements d'éventuelles collisions futures entre la Terre et un planétoïde enregistrés jusqu'à présent n'auraient atteint que le degré 0 ou 1 sur l'échelle de Turin.

Une appréciation réaliste du danger

Pour obtenir une appréciation réaliste du risque d'impacts destructeurs, il faudra d'abord et avant tout vérifier le nombre d'objets potentiellement dangereux et de tailles diverses présents dans notre partie du système solaire, et évaluer ensuite l'importance du risque que l'un d'entre eux entre en collision avec notre planète dans un avenir proche. Les objets décrivant une orbite les rapprochant de temps à autre de la Terre sont appelés *Near Earth Objects* (NEO) ou géocroiseurs.

La plupart des planétoïdes (objets principalement composés de roches ou de métaux) gravitent autour du Soleil sur des orbites situées entre celles de Mars et Jupiter, mais il y en a d'autres gravitant sur des orbites différentes, par exemple à proximité de la Terre. Généralement, leur orbite est d'un type relativement "régulier" : assez circulaire, et avec un sens de rotation autour du Soleil identique à celui des planètes (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pour l'observateur qui scrute le système solaire à haute altitude au-dessus du pôle nord). Lorsqu'il se rapproche de la Terre, un tel planétoïde se déplace dès lors à une

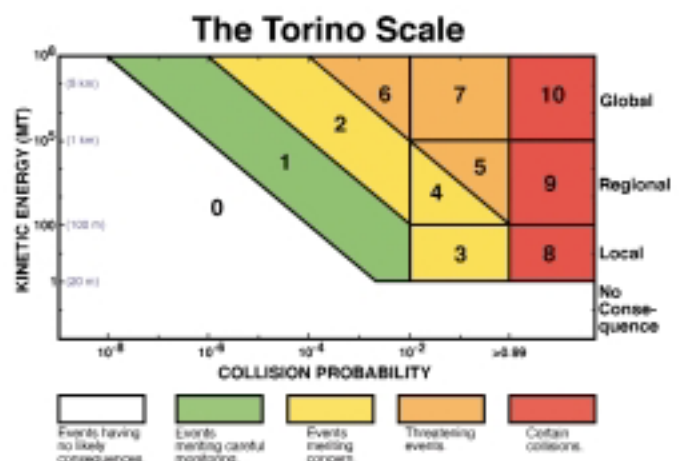
vitesse relative lente par rapport à notre planète (atténuant ainsi les conséquences d'une éventuelle collision).

Les comètes (composées essentiellement de glace) gravitent autour du Soleil sur des orbites très elliptiques (étirées). Pour certaines comètes, le sens de rotation est contraire à celui des planètes (soit "rétrograde"), leur permettant de se déplacer à une vitesse relative élevée par rapport à la Terre et aggravant les conséquences d'une éventuelle collision. Leur composition légère (essentiellement de la glace) atténue toutefois les effets d'une collision, comparé aux planétoïdes composés de roches ou de métaux.

Il est important de distinguer les comètes à révolution courte et celles à révolution longue. Les premières tournent autour du Soleil en quelques années ou décennies (parmi elles, la comète de Halley qui accomplit une révolution autour du Soleil en 76 ans). Le point le plus éloigné de leur orbite autour du Soleil n'est pas trop éloigné (entre quelques centaines de millions et quelques milliards de kilomètres). Un programme d'observation systématique et permanent devrait permettre de dresser l'inventaire de toutes les comètes à révolution courte. Leurs déplacements peuvent être prévus de longues décennies à l'avance et nous serions ainsi avertis bien à temps d'une éventuelle collision. Les comètes à révolution longue sont bien plus "traîtres". Elles décrivent des orbites très étirées, et une révolution se prolonge sur plusieurs siècles, millénaires, voire davantage. Lorsqu'une telle comète pénètre dans la partie intérieure du système solaire et devient visible, c'est très certainement la première fois qu'elle le devient depuis l'avènement de l'astronomie moderne. C'est dès lors à chaque fois une 'nouvelle' comète, dont l'orbite était jusqu'alors inconnue. Lorsqu'une telle comète semble se situer sur une route de collision, le délai d'avertissement peut être très court, de l'ordre de un ou deux ans, voire

L'échelle de *Turin*

- 0 La probabilité d'un impact est égale à zéro, c'est-à-dire sensiblement inférieure à la probabilité qu'un objet (imprévu) de même dimension ne vienne heurter la Terre au cours des prochaines décennies. Cette indication vaut également pour tous les objets tellement petits qu'ils ont peu de chance de tomber sur la Terre, dans l'hypothèse où leur itinéraire venait à croiser celui de la Terre (les petits objets se consomment généralement entièrement dans l'atmosphère)
- 1 Le risque de collision est hautement improbable, à peu près égal au risque qu'un objet (imprévu) de même dimension ne vienne heurter la Terre au cours des prochaines décennies.
- 2 Une rencontre relativement proche, mais pas extraordinaire. Une collision est très improbable (risque inférieur à 1 pour cent).
- 3 Une rencontre proche, avec un risque de collision de 1 à 99 pour cent, avec un objet d'un diamètre entre vingt et cent mètres, c'est-à-dire un objet capable de provoquer des destructions locales.
- 4 Une rencontre proche, avec un risque de collision supérieur à 1 pour cent, collision pouvant entraîner des destructions régionales (objets d'un diamètre variant entre cent mètres et un kilomètre, pour le plus petit d'entre eux le risque de collision se situe entre 1 et 99 pour cent, pour le plus grand, le risque de collision est légèrement supérieur à 1 pour cent).
- 5 Une rencontre proche avec un risque significatif de collision susceptible d'entraîner des destructions régionales (objets d'un diamètre variant entre cent mètres et un kilomètre, pour le plus petit, le risque de collision est proche de 99 pour cent, pour le plus grand, le risque de collision varie entre 1 et 99 pour cent).
- 6 Une rencontre proche avec un risque significatif de collision pouvant provoquer une catastrophe globale (objets dépassant un kilomètre, avec un risque de collision se situant entre 0,01 et 1 pour cent).
- 7 Une rencontre proche avec un risque extrêmement significatif de collision pouvant provoquer une catastrophe globale (objets dépassant un kilomètre, avec un risque de collision se situant entre 1 et 99 pour cent).
- 8 Une collision pouvant entraîner des destructions locales (objets entre vingt et cent mètres, avec un risque de collision supérieur à 99 pour cent). D'après les estimations, de telles collisions surviennent entre une fois tous les cinquante ans et une fois tous les mille ans.
- 9 Une collision susceptible de provoquer des destructions régionales (objets entre cent mètres et un kilomètre, avec un risque de collision supérieur à 99 pour cent) D'après les estimations de telles collisions surviennent entre une fois tous les mille ans et une fois tous les cent mille ans.
- 10 Une collision pouvant provoquer une catastrophe climatique globale (objets dont la taille est supérieure à un kilomètre, avec un risque de collision supérieur à 99 pour cent). De telles collisions surviennent moins d'une fois tous les cent mille ans.



→ Le télescope du programme de détection Linear.

quelques mois à peine. De plus, ces comètes à révolution longue sont très souvent des exemplaires de grande taille, se déplacent relativement fréquemment de manière rétrograde ou à des vitesses élevées par rapport à la Terre. Les planétoïdes et comètes à révolution courte peuvent être détectés et inventoriés et ce travail a déjà commencé, mais les comètes à révolution longue demeureront toujours un facteur d'incertitude.

Les chercheurs qui s'occupent de la détection des géocroiseurs concentrent actuellement leurs activités sur des objets dont la taille dépasse un kilomètre. Cette frontière est assez arbitraire, partiellement inspirée par des considérations de faisabilité (les grands objets sont évidemment plus faciles à repérer que les petits), mais il est néanmoins admis qu'à partir d'un kilomètre, des objets peuvent provoquer un cataclysme planétaire et représentent une menace pour l'humanité. Mais il ne faut toutefois pas oublier que même des objets de taille plus modeste peuvent provoquer de véritables catastrophes, il suffit pour cela de se souvenir de l'incident de Tougouska.

Certains géocroiseurs conservent toujours un certain mystère, de même que les géocroiseurs dont la taille dépasse un kilomètre. La majorité des experts estiment à près de mille, le nombre d'objets dont la taille est supérieure à un kilomètre (comètes à révolution longue non comprises), mais la marge d'incertitude est significative.

Eugene Shoemaker, expert en matière d'impacts, estimait il y a vingt ans le nombre de planétoïdes potentiellement dangereux d'une taille supérieure à un kilomètre, à deux mille. Il fondait cette estimation sur la comptabilisation des cratères d'impact relevés sur la Lune.

Une analyse plus fouillée réalisée par une équipe conduite par David Rabinovitz de la Yale University et Eleanor Helin du Jet

Propulsion Laboratory, publiée dans Nature, arrivait en janvier 2000 à environ la moitié de ce chiffre. Rabinovitz et Helin basaient leurs estimations sur les statistiques de découvertes de géocroiseurs du projet NEAT (cf. infra). En juin 2000, une équipe internationale d'astronomes publiait dans Science une estimation évaluant à 900 le nombre de géocroiseurs dont le diamètre dépasse un kilomètre. Une étude plus récente encore de J. Scott Stuart du MIT Lincoln Observatory, également publiée dans Science, estime le nombre de géocroiseurs dont le diamètre est supérieur à un kilomètre à 1250.

Quel que soit leur nombre, la recherche des géocroiseurs se poursuit activement. Ces recherches ne sont pas encore menées de manière systématique ou à grande échelle et les programmes de détection opèrent en marge de la recherche astronomique, avec des budgets ne représentant qu'une infime fraction des budgets alloués à la recherche spatiale. Néanmoins, la découverte de géocroiseurs se poursuit à un rythme relativement soutenu. Même si, sur la base des budgets disponibles, certains experts doutent de la faisabilité, l'objectif de la NASA, l'agence spatiale américaine, est d'ici à la fin de cette décennie d'avoir répertorié nonante pour cent des géocroiseurs dont le diamètre dépasse un kilomètre. Les principaux programmes de détection sont les suivants :

- **LINEAR** (Lincoln Near Earth Research) utilise deux télescopes de 1 mètre de la force aérienne américaine sur la White Sands Missile Range à Socorro, Nouveau Mexique. Le projet a été lancé en 1998. LINEAR est à l'origine de la plupart des découvertes de géocroiseurs (des dizaines par an) et de nombreuses comètes (il y a actuellement toujours quelque part dans le ciel une "comète Linear" à observer dans le ciel).
- **NEAT** (Near Earth Asteroid Tracking) utilise un télescope de 1,2 mètre de la force aérienne américaine sur l'île Maui à Hawaïi. Le télescope recherche les géocroiseurs dix-huit nuits par an.

- **LONEOS** (Lowell Observatory Near Earth Object Search) utilise un télescope de 60 centimètres à Flagstaff en Arizona.
- **Catalina Sky Survey** utilise quatre télescopes, deux dans l'hémisphère nord et deux dans l'hémisphère sud. Dans l'hémisphère nord, il s'agit du télescope Catalina 0,7 du Steward Observatory et du télescope Mount Lemmon de 1,5-mètre pour les observations de suivi ; dans l'hémisphère sud, opèrent un télescope de 0,6 mètre et un autre de 1 mètre, tous deux situés à l'observatoire de Siding Spring.
- **Spacewatch** est le plus ancien des programmes de détection de géocroiseurs. Il a débuté dès 1984, avec un télescope de 0,9 mètre du Steward-Observatory à Kitt Peak en Arizona. Il a été rejoint fin 2000 par un télescope de 1,8 mètre, installé au même endroit. Contrairement aux autres programmes de détection de géocroiseurs scrutant de larges parties du ciel à la recherche d'objets en déplacement, Spacewatch effectue des recherches plus "fouillées", en sondant en détail de plus petites sections du ciel. De plus petits géocroiseurs sont ainsi découverts (de même par exemple que de nombreux objets de la ceinture de Kuiper, à proximité de Pluton).
- **Spaceguard** est un programme japonais utilisant un télescope de 0,5 mètre et un second de 1 mètre à Bisei sur l'île de Honshu.

Les différents projets de détection ont déjà permis de répertorier environ six cents géocroiseurs d'un diamètre supérieur à un kilomètre (le chiffre s'élevait à 638 début décembre 2002, mais au moment où vous lirez ces lignes, des dizaines d'autres seront probablement venus s'y ajouter). En y ajoutant les objets d'un diamètre inférieur à un kilomètre, plus de 2100 géocroiseurs ont été découverts à ce jour.

Compte tenu uniquement des objets dont le diamètre dépasse un kilomètre, en fonction de l'estimation du nombre total, un peu plus ou un peu moins de la moitié des objets poten-



tiellement dangereux ont été détectée. Au moins des objets dont le diamètre est supérieur à un kilomètre ; il est fort probable qu'il y ait bien plus d'objets plus petits, susceptibles de provoquer, par exemple, un désastre comparable à celui de l'incident de Toun-gouska, mais ils sont pour l'instant ignorés.

Parmi les quelque six cents géocroiseurs de plus de 1 kilomètre actuellement identifiés, aucun ne risque de heurter la Terre dans un avenir proche, pour autant que des calculs précis puissent être réalisés. Ces 600 objets ne présentent aucun danger pour les prochaines décennies. Mais les géocroiseurs non encore identifiés, dont le nombre, selon les estimations est égal à ceux déjà répertoriés, pourraient en principe s'avérer dangereux. Les orbites de ces objets ne sont pas encore connues. Il est peu probable, mais néanmoins pas impossible que l'un d'entre eux fasse actuellement route vers notre planète. Quant à la probabilité précise de ce risque, il s'agit là d'une question importante, mais à laquelle il est difficile de répondre.

Dans l'étude déjà citée de David Rabinowitz et Eleanor Helin (publiée en janvier 2000 dans *Nature*), l'estimation du nombre total de géocroiseurs dépassant un kilomètre est convertie en risque de collision avec la Terre. Le risque de collision avec la Terre est d'environ 0,5 pour cent par million d'année, par géocroiseur. En d'autres termes, un géocroiseur classique a de fortes chances de heurter la Terre dans deux cents millions d'années,

Estimations de *risque d'impact*

Diamètre	Explosion	cratère (km)	intervalle (an)	
75 m	10 à 100	1,5	1000	Un impact de cette ampleur en surface pourrait détruire une grande ville.
160 m	100 à 1000	3	4000	Un impact dans l'océan peut déclencher un tsunami. En surface, un tel impact pourrait dévaster une grande métropole comme New York et ses environs.
350 m	1000 à 10000	6	16000	Au-dessus de la mer, l'impact pourrait déclencher un tsunami sur tout un océan (ex. toutes les côtes de l'océan Atlantique). Sur la terre ferme, un territoire de la taille de la Belgique pourrait être anéanti.
700 m	10000 à 100000	12	63000	Cet impact détruirait totalement la Belgique et les Pays-Bas. Un impact dans l'océan (le plus probable) déclencherait des tsunamis provoquant d'importants dégâts dans un hémisphère entier.
1,7 km	0,1 à 1 million	30	250000	Un impact de cette ampleur, sur Terre ou en mer, soulèverait suffisamment de poussière dans l'atmosphère pour perturber gravement le climat de la planète. Plus de récoltes. En mer, les tsunamis provoqueraient des dégâts aux quatre coins de la planète. La couche d'ozone serait détruite. A la suite de l'explosion, un impact sur Terre détruirait un territoire de la superficie de la France. Le nombre total de victimes est estimé à un milliard et demi.
3 km	1 à 10 millions	60	1 million	Sur Terre, une zone équivalente à l'Inde serait détruite. Des débris incandescents allumeraient des incendies de forêt sur toute la planète. Le climat serait sérieusement affecté.
7 km	10 à 100 millions	125	10 millions	Le changement de climat est durable. L'explosion ravage un territoire égal à l'Europe. Une extinction massive des espèces est probable.
16 km	0,1 à 1 milliard	250	100 millions	Cet impact provoque presque certainement une disparition massive des espèces. Il est probable que l'humanité tout entière soit rayée de la carte.

pour autant qu'il reste suffisamment longtemps dans le même environnement du système solaire, ce qui, d'après les calculs, n'est pas le cas. Généralement, les orbites des géocroiseurs ne sont pas très stables à long terme et ils ne séjournent que quelques millions d'années dans notre environnement proche. De nouveaux géocroiseurs apparaissent toutefois (objets migrant à partir d'autres zones de notre système solaire) et la disparition de géocroiseurs n'influence nullement les calculs de risque pour la Terre. A partir de ces données, Rabinowitz et Helin en déduisent que pour le prochain millénaire, le risque de collision catastrophique s'élève à 1 pour cent. En gros, un objet d'une taille supérieure à un kilomètre pourrait heurter notre planète une fois tous les cent mille ans. Les impacts plus modestes devraient être plus nombreux, les impacts plus importants moins nombreux. Le tableau

qui suit donne un aperçu des estimations de risque d'impact pour des objets de diamètre différent. Ce tableau est extrait d'un rapport concernant les risques d'impact, établi en septembre 2000 par un groupe d'experts à la demande du gouvernement britannique et intitulé *Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects*.

La première colonne mentionne le diamètre de l'objet, la deuxième, la puissance de l'explosion exprimée en "mégatonne TNT" (1 mégatonne est comparable à la puissance d'une bombe à hydrogène classique; la puissance de l'explosion d'Hiroshima était de 0,015 mégatonne). La troisième colonne indique le diamètre du cratère creusé par une explosion de cette ampleur et la quatrième reprend l'intervalle moyen entre deux impacts de même puissance. Une dernière colonne décrit brièvement les conséquences prévisibles.

Partant des estimations relatives au nombre d'objets de diamètres variables, des risques de collision avec la Terre et des dégâts que ces objets seraient susceptibles de provoquer, un calcul de l'étendue du risque devient possible. Quel serait le nombre de victimes humaines à la suite de la chute d'un planétoïde ou d'une comète ? Le risque d'un impact majeur est à vrai dire assez restreint, mais s'il se concrétise, le nombre de victimes serait extrêmement élevé. Pour un homme ordinaire, le risque de mourir à la suite d'un impact est-il significatif ou négligeable ?

D'après David Jewitt de l'université de Hawaï, ce risque est d'environ 1 sur 20000 – du même ordre que le risque de périr dans un accident d'avion. D'autres experts contestent néanmoins cette probabilité élevée. Selon le rapport britannique précédemment cité, les risques sont supérieurs aux risques admissibles conformément aux normes en vigueur dans l'industrie nucléaire.

Sommes-nous désarmés ?

Imaginons qu'un planétoïde ou une comète en route vers la Terre soit découvert. Pourrions-nous intervenir pour échapper à ce danger ou sommes-nous totalement impuissants ?

La première idée qui vient à l'esprit consiste à bombarder l'objet à l'aide de fusées nucléaires. Cette solution est-elle efficace ? Un grand planétoïde pourrait être fragmenté et en lieu et place d'un impact majeur, il y aurait plusieurs impacts de moindre ampleur, mais aux conséquences peut-être plus graves. De plus, les débris seraient radioactifs. Une autre question à se poser concerne l'efficacité des explosions nucléaires sur les planétoïdes. On suppose que de nombreux planétoïdes sont en réalité un agglomérat de morceaux de roche isolés. Une explosion nucléaire n'endommagerait que légèrement un tel 'amoncellement' et, dans le meilleur des cas, seuls quelques morceaux seraient encore davantage morcelés.

Dans l'état actuel des technologies, le seul moyen de détourner l'impact consiste à intervenir suffisamment tôt. Si le risque d'impact est identifié des dizaines d'années à l'avance, un petit coup ou une série de petits coups portés à un objet suffit pour en modifier l'orbite de manière à ce qu'il frôle la Terre plutôt que de la heurter. Plus l'intervention est précoce, moins grande est la puissance nécessaire. Il a déjà été proposé d'expulser un planétoïde de son orbite à l'aide d'une série de petites explosions ou encore en projetant de plus petits planétoïdes ou d'autres projectiles. On peut même envisager de fixer à un objet dangereux des moteurs alimentés par l'énergie solaire ou nucléaire, capables d'exercer, des années durant, une faible puissance afin de modifier l'orbite de l'objet. Une proposition circulant à la NASA implique le vol prolongé d'un vaisseau spatial inhabité aux côtés du planétoïde ou de la comète dangereuse, en exerçant une puissance à l'aide d'un puissant faisceau laser provoquant l'évaporation d'une partie de la surface. L'avantage de cette méthode est l'absence d'atterrissage nécessaire.

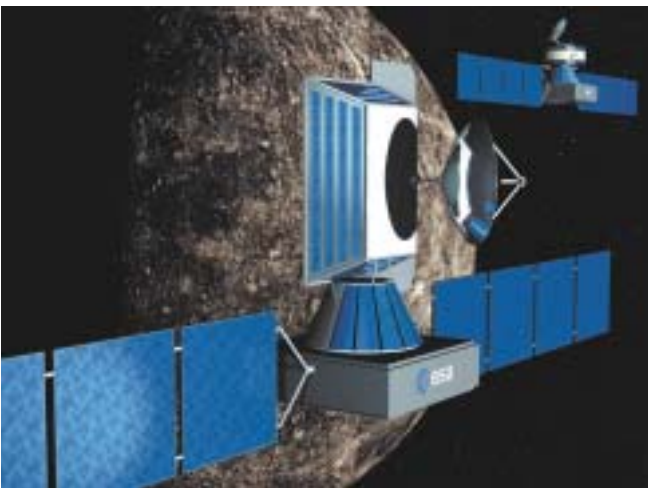
Le talon d'Achille de la plupart des méthodes proposées pour protéger la Terre se situe à l'échelon des comètes à révolution longue apparaissant de manière inopinée. N'étant découvertes que peu de temps avant le moment de la collision (dans de nombreux cas, moins d'un an avant), la marge de temps disponible est courte pour agir. De plus, ces comètes à révolution longue sont souvent de gros calibres, avec un noyau de plus de dix kilomètres de diamètre. Par rapport à la Terre, leur vitesse relative peut être très élevée et par conséquent elles se précipitent sur la Terre à grande vitesse et leur impact est de grande puissance.

Observations nécessaires

Il serait probablement prématuré d'élaborer des plans de systèmes de défense planétaires contre les planétoïdes ou comètes dangereux.

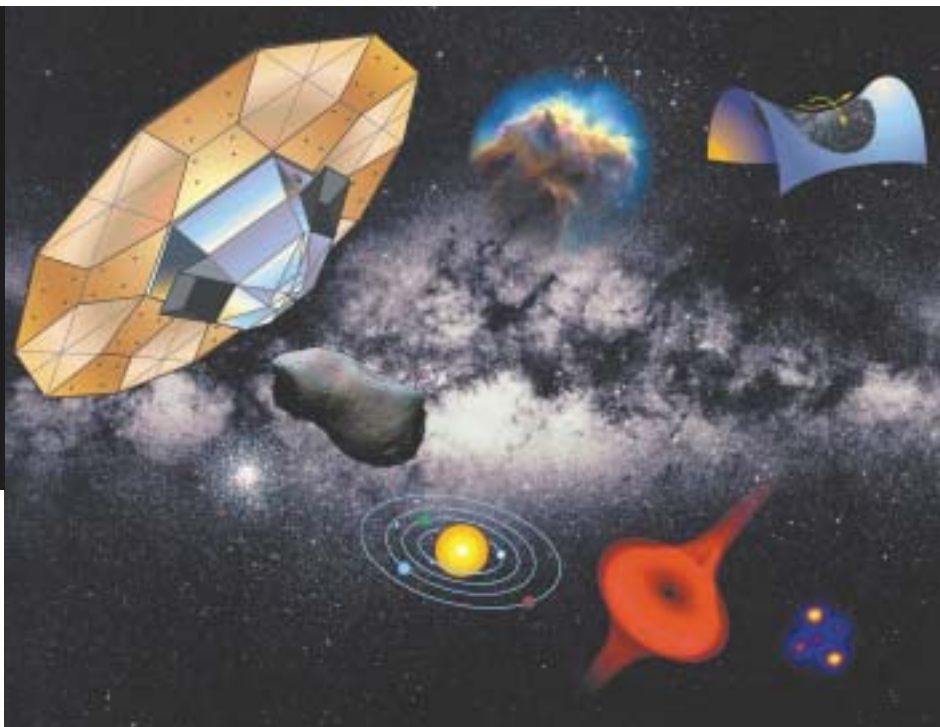
Mais il devient néanmoins urgent d'affiner et de multiplier les observations. Pour environ cinq cent millions d'euros (chiffre inférieur aux recettes du film "Armageddon"), il devrait être possible de dresser rapidement un inventaire précis de tous les grands géocroiseurs. Une fois établi, les probabilités évoquées dans les paragraphes précédents se transformeraient en certitudes. Il est hautement probable qu'il n'y ait aucun objet en route de collision et moins sûr encore qu'il faille agir rapidement. Le problème actuel est que nous pourrions être touchés de manière totalement imprévue par l'un des centaines de géocroiseurs non encore découverts. Actuellement, il reste parfaitement possible qu'un planétoïde déboulant à toute vitesse ne soit découvert que quelques semaines ou quelques jours à l'avance, trop tard pour entreprendre la moindre parade. Il n'est pas exclu que nous soyons frappés sans avertissement, les programmes de détection actuels ne suffisant pas à scruter de manière systématique la totalité du ciel à la recherche de géocroiseurs menaçants.

Éliminer les incertitudes ne requiert pas d'énormes efforts. Grâce à l'actuel réseau de télescopes, la NASA espère avoir bouclé pour 2008 environ, à nonante pour cent, l'inventaire des grands géocroiseurs. Dans quelques décennies, l'inventaire des objets de plus de 1 kilomètre pourrait être relativement complet et nous pourrions ainsi avoir identifié une grande part des objets plus petits. Moyennant un petit effort supplémentaire - quelques télescopes de plus - l'inventaire devrait pouvoir être clôturé plus tôt. Si le programme de détection pouvait être complété par une "observation" continue permettant de nous avertir de l'apparition soudaine de comètes à révolution longue, nous pourrions être passablement rassurés et ne pas être victimes un beau jour du même sort que celui réservé aux dinosaures.



↑ BepiColombo, le futur explorateur spatial européen qui doit rendre visite à la planète Mercure, peut aussi découvrir des planétoïdes dans la partie interne du système solaire, là où ils sont difficile à voir depuis la Terre. (ESA)

→ Le futur satellite européen Gaia (à gauche sur l'image), conçu plus spécialement pour dresser la carte détaillée de la Galaxie, découvrira également de nombreux planétoïdes. (ESA)



Des instruments conçus au départ à d'autres fins peuvent également s'avérer utiles dans la détection de géocroiseurs potentiellement dangereux. Les astronomes envisagent par exemple la construction d'un grand télescope (dans la catégorie des six mètres ou plus) pouvant servir au sondage systématique du ciel. En marge de son activité ordinaire, ce genre d'instrument pourrait également découvrir de nombreux géocroiseurs. Un grand télescope est capable d'observer de petits objets ou encore, d'observer des objets plus éloignés de la Terre. Des observatoires en orbite autour de la Terre, de même que des sondes interplanétaires peuvent contribuer à la détection de planétoïdes et de comètes dangereux. Les projets de l'ESA, *Gaia* et *Bepi-Colombo* sont des exemples d'éventuels futurs vaisseaux spatiaux qui pourraient (outre leurs autres missions) servir à la détection de géocroiseurs. *Gaia* est un satellite astrométrique, successeur d'*Hipparcos*, chargé de mesurer avec une extrême précision et de manière répétée, la position de multiples étoiles et qui pourrait, *en passant*, mesurer la position de nombreux géocroiseurs. *BepiColombo* est une sonde qui sera envoyée vers la planète Mercure. Observant le système solaire sous un angle différent, elle pourrait détecter les géocroiseurs qui échappent facilement à notre attention à cause de leur orbite.

Pour 2020 ou plus tard, la NASA a proposé la mise en place dans l'espace d'un réseau d'observatoires automatiques qui sonderait, de manière systématique et avec une extrême précision, le système solaire et détecterait tous les géocroiseurs dangereux, y compris les exemplaires relativement petits qui, actuellement ne sont pas tellement repérés. Un réseau de ce type garantirait la détection extrêmement précoce des dangereuses comètes à révolution longue, évitant ainsi de perdre un temps précieux à essayer de les détourner de leur route menaçante.

A plus court terme, le *Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects* britannique formule notamment les recommandations suivantes :

- Il faut installer dans l'hémisphère sud un nouveau télescope moderne de la classe des 3 mètres chargé exclusivement de la détection des géocroiseurs.
- Les télescopes et satellites existants ou destinés à d'autres fins doivent être exploités de manière optimale afin de pouvoir contribuer, en dehors de leurs activités ordinaires, à la recherche des géocroiseurs, à l'exemple du satellite *Gaia*.
- Il faut envoyer une série de sondes spatiales petites et peu coûteuses vers les géo-

croiseurs, afin d'en étudier la composition et les propriétés physiques.

- Il faut une coordination internationale pour la détection des géocroiseurs dangereux, de même qu'un financement stable.

Récemment, et suite aux recommandations du rapport britannique, l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) a décidé d'organiser un workshop sur le thème des géocroiseurs dans le cadre de son *Global Science Forum*. Ce workshop a eu lieu du 20 au 22 janvier 2003 à l'ESA (ESRIN) à Frascati en Italie. Il avait comme objectif d'analyser l'état des choses sur la connaissance des dangers liés aux géocroiseurs et de formuler des recommandations aux gouvernements des Etats-membres de l'OCDE en matière de systématisation des observations et des possibilités de se prémunir du danger. Un des objectifs majeurs du workshop était également de sensibiliser, pour la première fois, les services publics de protection civile au thème des géocroiseurs en vue de mobiliser un financement supplémentaire pour la recherche et les observations. Les SSTC, avec le Ministère de la Défense et l'Observatoire Royal de Belgique, ont participé à ce workshop.

Dossier Menace de l'espace

La conquête spatiale représente-t-elle une menace pour les terriens ? Le Space Connection n° 30 s'est déjà longuement étendu sur le problème des déchets de l'espace en orbite autour de la Terre. Ces débris de l'espace sont notamment composés de satellites défectueux ou hors service, de débris de vaisseaux spatiaux désintégrés, de morceaux de lanceurs abandonnés en orbite et même d'outils perdus par les astronautes. Un ensemble d'objets indésirables gravitant en orbite autour de la Terre. Mais ces déchets représentent avant tout un problème pour la conquête spatiale, plutôt que pour les terriens.

☛ La station spatiale américaine Skylab, dont des débris sont retombés en Australie. (NASA)

Dangers de la conquête spatiale

Par sa grande vitesse, en cas de collision, un très petit débris peut facilement mettre un satellite hors d'usage, comme ce fut le cas du satellite français *Cérise*, touché par un débris de la fusée Ariane. L'orbite de la station spatiale internationale est régulièrement modifiée pour échapper à un débris de l'espace.

Mais pour nous, sur Terre, ces déchets de l'espace ne posent généralement pas de problème. Lorsqu'ils sont précipités vers la Terre (ce qui arrive tôt ou tard

à tout satellite sur une orbite relativement basse à la suite des frottements avec les couches supérieures de l'atmosphère) ils se consomment généralement complètement dans l'atmosphère.

Même des satellites entiers ou des stations spatiales complètes retombant sur Terre posent rarement de problèmes majeurs, surtout s'ils demeurent maîtrisables jusqu'au dernier moment. C'est ainsi que la station spatiale russe *Mir* fut ramenée tranquillement sur Terre en 2001. *Mir* fut dirigée vers une

zone inhabitée au sud de l'océan Pacifique. Les experts avaient calculé que l'essentiel de la station spatiale devait se consumer tandis que quelques gros morceaux de métal devaient retomber sur Terre. Ils échouèrent finalement en mer, loin de toutes les îles ou routes de navigation sans que personne ne s'en aperçoive. S'il reste des morceaux de *Mir*, ils sont à présent éparpillés sur un territoire de plusieurs centaines de kilomètres au fond de l'océan. Le grand satellite gamma américain *Compton Gamma Ray Obser-*

vatory fut également ramené sur Terre sans problème au-dessus de l'océan Pacifique.

Mais le résultat n'est pas toujours aussi parfait. Au début de 2002, le satellite scientifique américain *Euve* (Extreme Ultraviolet Explorer), un observatoire pour le rayonnement du lointain ultraviolet de l'univers a été ramené sur Terre. Après que la NASA ait successivement annoncé que les débris du satellite retomberaient dans l'océan Indien, la forêt amazonienne et le Golfe persique, ils échouèrent



← Lancement de la sonde spatiale Cassini, équipée d'une source d'énergie alimentée au plutonium. (NASA)

finalément dans le désert égyptien. Selon les informations, les débris de Euve (pour autant qu'ils aient atteint le sol) n'ont provoqué aucun dégât.

Contrairement à Mir, le retour sur Terre d'une précédente station spatiale américaine, l'énorme Skylab ne se déroula pas selon les prévisions. La NASA aurait voulu que Skylab, lancé en 1973, dans le prolongement du programme d'alunissage Apollo, reste en orbite autour de la Terre jusqu'à la mise en service de la navette spatiale. L'orbite de la station spatiale avait commencé à décliner, à la suite des frottements de l'atmosphère, mais la NASA espérait que les navettes pourraient rendre visite à la station spatiale et relever son orbite.

Le programme de navette spatiale connut des retards et la première navette ne fut lancée qu'en 1981, des années après la date initialement prévue. De plus, une activité solaire intense provoqua une dilatation imprévue des couches supérieures de notre atmosphère, exposant la station à des frottements accrus et la faisant descendre plus rapidement. Skylab fit sa rentrée sans pilote dans l'atmosphère le

11 juillet 1979. Les débris non consumés dans l'atmosphère retombèrent principalement dans l'océan Indien, mais quelques-uns retombèrent en Australie, heureusement sans le moindre dommage.

L'incident avec le satellite militaire russe Kosmos 954 fut plus grave. Le 24 janvier 1978, il s'écrasa sur le nord du Canada, plus précisément au-dessus des North West Territories. Le satellite disposait d'un réacteur nucléaire compact. Lors de sa chute, du matériel radioactif fut dispersé sur un vaste territoire. Les autorités canadiennes entreprirent des recherches pour recueillir un maximum de débris radioactifs et les mettre en sécurité. Les recherches s'étalèrent sur plusieurs mois et leur coût s'éleva à 14 millions de dollars. Le Canada récupéra de cette somme environ trois millions de dollars de dommages et intérêts versés par l'Union soviétique de l'époque.

Deux membres d'un groupe de six aventuriers en randonnée dans les environs manipulèrent le matériel radioactif. Ils découvrirent un cratère dans la glace contenant des morceaux de métal calcinés. L'un des deux hommes toucha un des débris de la main (revêtue d'un gant). A leur retour au campement peu après, ils apprirent ce qui se passait, les autres ayant entendu parler de Kosmos 954 à la radio. Il leur fut conseillé de ne pas approcher des débris à plus de trois cents mètres. Heureusement, la radioactivité du débris touché s'avéra

peu élevée. Les équipes de recherche tombèrent plus tard sur des débris nettement plus dangereux. L'un d'entre eux émettait un rayonnement suffisant pour tuer un homme en l'espace de deux heures.

Les exemples cités ne concernent que quelques-uns des nombreux satellites retombés sur Terre depuis le début de l'ère de la conquête spatiale. A ce jour, les retombées de débris de satellite (de même que les retombées de météorites naturels) n'ont fait aucune victime humaine.

Energie nucléaire dans l'espace

Ces dernières années, la controverse a rebondi à propos de l'utilisation de la technologie nucléaire dans l'espace et l'exemple de Kosmos 954 est régulièrement cité.

Il y eut de nombreuses protestations aux USA à l'occasion du projet Cassini. Cassini est une sonde inhabitée américano-européenne actuellement en route vers la planète Saturne. L'Europe a fourni Huygens, une sonde plus petite, emportée dans la soute du vaisseau amiral Cassini et qui devrait se poser en douceur sur Titan, lune de Saturne. Sur sa route vers Saturne, Cassini est passée très près de la Terre pour profiter de la pesanteur de notre planète et bénéficier d'une petite poussée supplémentaire. La sonde spatiale a pu ainsi être lancée par une fusée plus légère (et donc moins chère).

L'énergie de Cassini est fournie par un RTG (radioisotope thermoelectric generator), sorte de "pile nucléaire". Il s'agit d'un instrument dans lequel un matériau radioactif (dans le cas de Cassini, il s'agit de plutonium) dégage de la chaleur servant à produire de l'électricité. Il ne s'agit donc pas d'un réacteur nucléaire.

Les détracteurs du projet craignaient que le plutonium ne s'échappe du RTG et se répande dans l'atmosphère, soit en cas de problème lors du lancement ou à l'occasion de passage de Cassini à proximité de la Terre. L'un des plus célèbres porte-parole de la protestation (principalement soutenue par les associations locales de protection de l'environnement de Floride) était le physicien Michio Kaku. Si on en croit les critiques, le risque d'erreur de navigation lors du passage à proximité de la Terre était trop important et Cassini et sa charge nucléaire risquaient de se retrouver dans l'atmosphère. D'après la NASA, la marge d'erreur lors de la manœuvre était minime et le risque d'accident négligeable.

Aucun incident ne fut noté, ni lors du lancement le 15 octobre 1997, ni lors du passage de Cassini aux environs de la Terre, le 18 août 1999. Plus tard, l'erreur de navigation de la NASA avec le *Mars Climate Orbiter*, qui s'écrasa sur la planète au lieu d'être placé en orbite, raviva les questions quant à la fiabilité des manœuvres de précision effectuées dans l'espace.



← La station spatiale russe Mir, retombée sur Terre sans provoquer le moindre dégât. (NASA)

A l'aube de l'ère de la conquête spatiale, il était pratiquement acquis que l'avenir de l'espace serait nucléaire. Mais dès la fin des années soixante, la mise au point des technologies spatiales nucléaires commença à stagner. Il apparut en effet qu'après l'ère Apollo, les budgets des grands projets astronautiques seraient sensiblement revus à la baisse et d'autre part, les manifestations contre le nucléaire commencèrent à se multiplier. Aux USA, la mise au point du moteur nucléaire *Nerva*, destiné aux missions interplanétaires, fut interrompue.

Il semble néanmoins que les technologies spatiales nucléaires pointent à nouveau le bout du nez. Le budget 2003 de la NASA, récemment présenté par le gouvernement du président George W. Bush, prévoit des fonds pour le lancement d'un

ambitieux programme de développement pour de nouvelles sources d'énergie nucléaire. Il est notamment question d'une nouvelle génération de RTG et de réacteurs nucléaires compacts. La 'propulsion électrique nucléaire' est l'une des applications dans laquelle l'énergie du réacteur nucléaire vient accélérer un faisceau d'ions et l'éjecte du vaisseau spatial pour le propulser. Il s'agit d'une variante de la propulsion électrique solaire déjà utilisée (cf. *Space Connection* n° 37), basée sur le même principe, mais où ce sont les panneaux solaires qui fournissent l'énergie nécessaire pour l'accélération du faisceau d'ions. La sonde *Deep Space 1* qui, l'année dernière rendit visite à la comète Borelly était propulsée par ce système de propulsion électrique solaire. L'explorateur lunaire européen inhabité

Smart 1 est également équipé de ce système de propulsion.

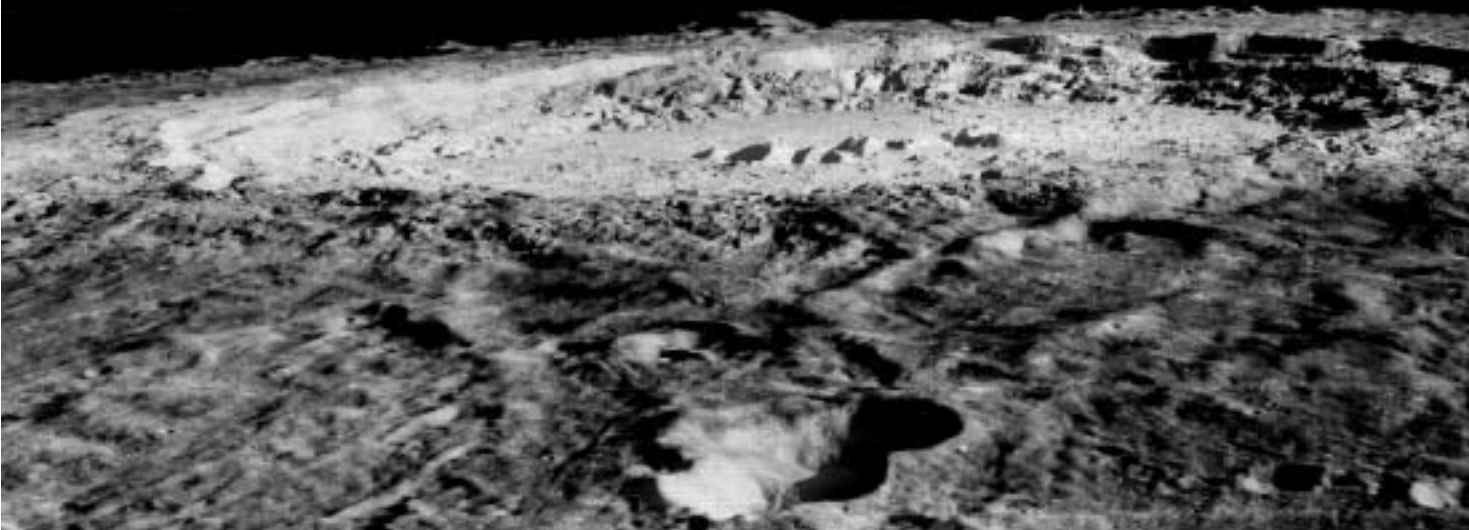
Grâce à la propulsion électrique nucléaire, une sonde spatiale pourrait également opérer à l'extérieur de notre système solaire, dans les zones où le rayonnement solaire est insuffisant pour alimenter les panneaux solaires. Ce système de propulsion permettrait d'atteindre plus rapidement les planètes extérieures, comparé aux actuelles fusées chimiques qui se contentent d'accélérer la sonde lors du lancement. Il serait par ailleurs possible de placer par exemple une sonde en orbite autour de Pluton, plutôt que de se contenter de survoler la planète à grande vitesse.

Dans le domaine spatial, le développement de l'astronautique militaire constitue une autre source de préoccupation,

mais représente également un tremplin supplémentaire pour les technologies spatiales nucléaires. Les USA songent notamment à des vaisseaux spatiaux de combat. Des satellites par exemple, munis d'un système de propulsion leur permettant de modifier leur orbite à plusieurs reprises et qui pourraient être mobilisés pour détruire des satellites ennemis. L'énergie nucléaire conviendrait parfaitement à ce type de "satellites de combat". Les satellites équipés d'armes de rayonnement destinés à frapper des cibles dans l'atmosphère ou au sol représentent une application plus inquiétante encore. Ils furent déjà envisagés à l'époque *Star Wars* ou *Strategic Defense Initiative* sous le président Reagan dans les années quatre-vingt du siècle dernier, mais l'idée a été relancée dernièrement. Les USA travaillent déjà d'arrache-pied à la mise au point d'un puissant laser de combat, installé dans un Boeing 747, capable par exemple, de mettre hors d'état de nuire des fusées lancées par l'ennemi et ceci de très loin. Un laser installé dans un satellite, propulsé par de l'énergie nucléaire constitue logiquement, l'étape suivante. Etape envisageable pour une prochaine génération de systèmes anti-missiles, succédant aux systèmes "ballistic missile defense" avec des projectiles lancés depuis la Terre et actuellement développés aux USA.

Point de vue

Lune à vendre



(NASA)

Depuis quelques années, des initiatives lancées par certaines sociétés et relayées par l'internet ont ouvert un commerce pour le moins novateur et dont le marché s'annonce juteux: il s'agit, ni plus ni moins, de vendre des parcelles de sol extra-terrestre: pour quelques dollars, vous voici propriétaire d'un superbe terrain sur la Lune, Mars ou Vénus. Et si vous êtes assez riche, rien ne vous empêche d'acquérir l'astre tout entier.

Le site www.lunarembassy.com propose un choix de produits matérialisés par des titres de propriété vendus 35 à 40 euros l'acre (1 acre = un peu plus de 4.000 m²) et qui sont commercialisés en France par la société *LuneImmo*. Certes, les prix sont modiques, surtout en comparaison de ceux pratiqués dans les grandes capitales du globe. Le problème, c'est que cette entreprise s'apparente à tout le moins à un attrape-nigaud. Pourtant, ces commerçants d'un nouvel âge ont tout prévu: leur site internet développe une longue justification juridique censée rassurer tout candidat-acquéreur face à ses états d'âmes de dernière minute. On y aborde des questions fondamentales telles que celle de la loi applicable en matière d'appropriation de corps célestes, des recours possibles

contre la NASA en cas d'"alunissage" en plein sur une propriété privée, etc. L'audace des *Ambassadeurs* (c'est ainsi que les représentants de cette compagnie se font appeler) va même jusqu'à encourager leurs clients à dénoncer toute initiative concurrente de vente foncière extra-terrestre "de manière à ce que toute disposition judiciaire soit prise à son égard" (!).

Leur justification juridique ne tient évidemment pas la route. Non seulement elle se base sur des contre-vérités grossières, mais en plus elle fait fi de principes généraux de droit international, voire de droit tout court...

L'un de ces principes veut que nul ne puisse transmettre des droits qu'il ne possède pas.

On ne peut vendre une chose dont on n'est pas propriétaire, on ne peut louer une chose dont on n'a pas l'usage, etc. Selon le droit civil classique, la propriété dont on est titulaire peut être acquise de deux manières:

- soit par voie originaire: un droit nouveau est créé dans le chef du propriétaire;
- soit par voie dérivée: un droit existant lui est transmis par une autre personne.

Dans le cas de la Lune, un mode d'acquisition originaire aurait pu être l'occupation (au sens du droit international), c'est-à-dire le fait pour un Etat d'occuper un territoire et de revendiquer la souveraineté sur celui-ci. On ne parle plus de "propriété" mais plutôt de territorialité. Or, lors des visites successives des Américains sur la Lune, aucune revendication de ce type n'a été exprimée, du moins officiellement. Et pour cause: depuis les Résolutions des Nations Unies de 1963, faisant suite au lancement du premier *Sputnik* six ans plus tôt, le principe de non-appropriation et de non-revendication de souveraineté sur l'espace extra-atmosphérique (y compris les corps célestes), notamment par voie d'occupation, est consacré par le droit international. Mieux encore, le Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et

(NASA)



d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes (dit *Traité de l'Espace*), fait le 27 janvier 1967, donne force conventionnelle à ce principe. Enfin, une majorité de la doctrine considère qu'il s'agit là d'une règle coutumière qui s'impose à l'ensemble de la communauté internationale. Alors, d'où vient la propriété acquise puis vendue par LuneImmo ? Une réponse se trouve, encore une fois, sur le site internet:

"En 1980, un Américain du nom de Dennis M. Hope, connu sous le nom de Président du Gouvernement Galactique, s'appropriait de droit la Lune et toutes les autres planètes et lunes de notre système solaire. (...) Notre exclusivité (de vente), ainsi que le droit d'Ambassade, a été octroyé par Denis M. Hope, qui a effectué et déposé une déclaration de propriété pour la Lune Terrestre, ainsi que les planètes Mars, Venus, Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton, ainsi que leurs lunes respectives, le 22 Novembre 1980. Cette déclaration de propriété fût originellement déposée aux bureaux du Comté de San Francisco, puis enregistrée aux assemblées générales des États-Unis d'Amérique, de l'Union Soviétique URSS, ainsi que l'assem-

blée Générale des Nations Unies. Une copie de cette déclaration est jointe à chaque titre de propriété acheté.

Sur ces bases, nous avons acheté les terrains à Denis M. Hope de bonne foi, et à notre tour vous les revendons de bonne foi."

(extrait du site)

La référence à la bonne foi, en l'occurrence, ne manque pas de culot. Il va de soi que cette explication a pour but d'exploiter la crédulité du public et remet en question l'ensemble de notre système juridico-économique. Vous vous réveillez un matin avec l'envie de revendiquer l'Everest, vous envoyez un courrier à ce sujet au Secrétaire des Nations Unies et vous voilà propriétaire du Toit du Monde...

Pourtant, l'argument principal de *Lunar Embassy* pour établir la légalité de ses opérations commerciales ne manque pas d'ingéniosité, même s'il est facilement rejetable par les spécialistes du droit international.

Cet argument est le suivant :

Le Traité de l'Espace de 1967 est un instrument de droit international destiné à imposer aux Etats une série de principes et d'obligations en matière d'utilisation et d'exploration de l'Espace et des corps célestes. Comme le fait remarquer l'argumentation développée par Lunar Embassy, ces dispositions (de même que celles des Déclarations des Nations Unies) ne s'adressent qu'aux Etats et à leur gouvernement. Elles ne sont pas directement applicables dans l'ordre interne des Etats parties et ne lient pas les particuliers (personnes morales ou physiques). Dès lors, selon cet organisme, rien n'empêche un individu ou une société commerciale de s'approprier tout ou partie de l'espace extra-atmosphérique, y compris les corps célestes, et de le mettre sur le marché.

Le hic, c'est que, pour exister, un droit subjectif (c'est-à-dire un droit dont on est titulaire, comme la propriété ou un autre droit patrimonial), requiert un système de droit

objectif (une loi, par exemple) qui le reconnaisse comme tel. Par exemple, on est propriétaire d'une voiture achetée en Belgique parce que la *loi belge* reconnaît le droit de propriété né de cette vente. L'acquisition d'un droit subjectif n'est possible que par référence à un système juridique donné (droit civil en France, en Belgique, etc., common-law au Royaume-Uni, aux Etats-Unis).

Or, le droit international prohibe toute souveraineté nationale sur l'Espace: il est donc impossible d'y appliquer une loi quelconque en dehors de celles prévues par les traités pertinents. Ni le droit américain, ni le droit français, ni aucun autre droit national n'est applicable à l'espace extra-atmosphérique, y compris les corps célestes. Dès lors, même si les particuliers ne sont pas directement assujettis au Traité de l'Espace, ils ne peuvent revendiquer de droits subjectifs sur ce domaine parce que ces droits n'ont pas de base légale.

En outre, l'argumentation du Gouvernement Galactique (*sic*) fait référence à l'Accord régissant les activités des Etats sur la Lune et les autres corps célestes (dit *Accord sur la Lune*), fait le 18 décembre 1979. Cet Accord est entré en vigueur dans l'ordre international le 11 juillet 1984¹. L'Accord sur la Lune est traditionnellement considéré comme un échec au regard de son application. Seuls une petite dizaine d'Etats y sont parties. Pourtant, cet Accord énonce des principes fondamentaux: il est le premier à traiter de la question de l'*exploitation* des corps célestes. Pour résumer, l'Accord prévoit que les Etats parties doivent coopérer dans l'exploration et l'utilisation des corps célestes de notre système solaire, qu'ils doivent s'abstenir de les utiliser à des fins d'installations ou d'équipements militaires (ce qui plus restrictif que la notion d'utilisation "pacifique") et que, lorsque des ressources naturelles exploitables auront été identifiées, ils devront mettre sur pied un régime ad hoc destiné à faire profiter l'ensemble de l'Humanité de ces ressources.



*"L'espace extra-atmosphérique,
y compris la Lune et les autres corps
célestes, ne peut faire l'objet
d'appropriation nationale par
proclamation de souveraineté,
ni par voie d'utilisation ou
d'occupation, ni par aucun
autre moyen."*

(Article II du Traité de l'Espace)

(NASA)

Ce système rejoint celui défini en 1982, puis revu en 1994, dans le cadre de la Convention de Montego Bay sur le Droit de la Mer. Les grands fonds marins, dont les ressources minérales et pétrolières attirent la convoitise de certains Etats industrialisés, ont fait l'objet d'un régime approprié: leur exploitation a été confiée à une Autorité internationale chargée de répartir les concessions entre les pays en tenant compte du statut de patrimoine commun de l'Humanité applicable à ces ressources. La mise au point finale de ce régime a toutefois fait l'objet d'âpres négociations qui ont duré une dizaine d'années. Ceci explique en partie le relatif insuccès de l'Accord sur la Lune qui consacre des principes similaires (sans aller aussi loin que la Convention de Montego Bay...). Le régime des fonds marins est toutefois resté très théorique. Il en sera sans doute de même pendant longtemps pour celui applicable à l'exploitation des corps célestes, même si la Lune fait l'objet de nouveaux projets d'exploration scientifique à court et moyen termes.

Toujours est-il que l'Accord sur la Lune est en vigueur et qu'il réitère un principe fondamental du droit international de l'Espace: l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris des corps célestes, doit se faire *pour le bien et dans l'intérêt de tous les*

pays, quel que soit le stade de leur développement économique ou scientifique.

Néanmoins, le principe de "non-appropriation" dans l'Espace doit être relativisé. L'Espace n'appartient à personne mais doit être utilisé au bénéfice de tous. Utiliser l'Espace, l'exploiter, revient, dans une certaine mesure à s'approprier ses ressources. Notre système économique repose sur la propriété ou sur des droits similaires qui permettent de valoriser de telles ressources. C'est d'ailleurs l'objet des dispositions de l'Accord sur la Lune. En outre, il ne faut pas confondre la propriété **de** l'Espace avec la propriété **dans** l'Espace. La propriété des engins spatiaux et des biens y embarqués n'est pas concernée par les principes du Traité de l'Espace de 1967. La question de la propriété intellectuelle générée à bord d'engins spatiaux est, elle, plus complexe, notamment eu égard au principe d'utilisation de l'Espace au bénéfice universel.

Autres exemples: les installations lunaires éventuelles peuvent faire l'objet d'un droit de propriété et l'exploitation de minerais devrait logiquement passer par leur appropriation à un moment donné, même si cette appropriation est réservée à une entité désignée chargée de mettre en œuvre les principes de droit international.

Bref, les heureux propriétaires de parcelles lunaires devront certainement faire preuve d'une certaine philosophie en apprenant qu'ils ont payé 40 euros pour un bout de papier sans autre valeur que celle que leur imagination lui confère. Car, comme le conclut l'Ambassadeur lunaire en France sur son site internet, *"la Lune est le symbole de l'espoir, du romantisme et du changement (...). Il n'y a rien de plus symbolique et romantique sur Terre que chacun peut offrir à un être cher ("décrocher la Lune", "demander la Lune", etc.)"*. N'empêche, un bouquet de fleurs, ce n'est pas mal non plus...

Jean-François Mayence
Conseiller et Chargé de mission -
Affaires juridiques et Relations internationales
Service de recherche
et applications spatiales des SSTC

¹ En 2001, la Belgique a initié une procédure d'adhésion à cet Accord.

Actualités

Sur la piste de la *participation de la Belgique* à l'aventure spatiale européenne

Les envols extraterrestres de Dirk Frimout en 1992 et de Frank De Winne en 2002 sont hautement symboliques. Ils révèlent la part de la Belgique au sein de l'aventure spatiale. Cette participation a connu depuis la fin des années cinquante un développement important au niveau politique, scientifique et industriel.



Frank De Winne (NASA)

L'intérêt pour la recherche spatiale est né en Belgique dans la foulée de l'Exposition universelle de Bruxelles en 1958 et des travaux de l'*Année Géophysique Internationale (AGI)* dont le siège était à Uccle. L'intérêt des astrophysiciens et la compétence de l'industrie belge en électromécanique ont accéléré l'adhésion du monde politique aux premières organisations spatiales européennes. Ainsi, le Gouvernement signa-t-il, au début des années soixante, les conventions de la *COPERS (Commission Préparatoire Européenne de la Recherche Spatiale)*, puis de l'*ESRO (European Space Research Organisation)*, de l'*ELDO (European Launcher Development Organisation)* et de la *CETS (Conférence Européenne de Télécommunication par Satellites)*.

La petite taille de la Belgique fut compensée par un engagement constant de notre pays en faveur de l'Europe spatiale.

La station de Redu fut choisie dès 1965 par l'*ESRO* pour y installer une station de suivi et de télémesure des satellites. A l'*ELDO*, l'industrie belge assura la construction de la station de guidage pour la mise en orbite des premiers lan-

ceurs européens de satellites. Si aucune de ces fusées *Europa* ne parvint à franchir l'atmosphère, la station belge installée en Australie permit aux ingénieurs de parfaire leur savoir-faire. L'industrie belge acquit également une maîtrise dans le domaine spatial en développant des satellites scientifiques et en participant à l'étude des premiers engins d'application en télécommunication, contrôle aérien et météorologie. De plus, les astrophysiciens de Bruxelles et de Liège élaborèrent des charges scientifiques à embarquer à bord de fusées-sondes, puis de quelques-uns des premiers satellites scientifiques européens tels *HEOS A1* et *TD 1*.

Dès le milieu des années soixante, l'Europe spatiale eut à faire face à d'importants problèmes de financement, de gestion et de cohésion. De 1966 à 1975, la *Conférence Spatiale Européenne* réunit régulièrement les ministres concernés afin de définir une politique spatiale cohérente. Au sein de cet organe de médiation, il faut souligner le rôle majeur joué par les ministres belges Théo Lefèvre et Charles Hanin comme président de la Conférence. Pendant plus de quatre années, Théo Lefèvre se battit sur plusieurs fronts pour sauver l'Europe spatiale. A l'*ELDO*, il ne douta pas de la nécessité d'assurer une capacité autonome de lancement de satellites pour l'Europe. La Belgique fut d'ailleurs, avec la France et l'Allemagne, le dernier pays à être resté membre de l'*ELDO*. A partir de 1969, Théo Lefèvre négocia avec les Etats-Unis une collaboration européenne à l'ambitieux programme américain post-Apollo. Mais c'est sous la présidence de Charles Hanin, et grâce à son bon sens et à sa ténacité, que l'Europe sortit de l'impasse lors de la Conférence Spatiale Européenne du 31 juillet 1973. C'est à cette occasion que les pays européens se mirent d'accord sur trois points essentiels : la fusion de l'*ELDO* et de l'*ESRO* en une agence spatiale européenne unique, le démarrage du programme Ariane et la participation européenne au programme américain post-Apollo par la construction du laboratoire orbital *Spacelab*.

En avril 1975, c'est à nouveau sous la présidence d'un Belge, le Ministre Gaston Geens, que

le texte de la Convention de l'ESA (l'European Space Agency) fut formellement adopté. A l'Agence, l'action de la Belgique se manifesta par une contribution financière, technique, industrielle et scientifique importante. La fidélité de notre pays s'inscrit également dans l'appui qu'il apporta à chacun des grands projets spatiaux européens tels Ariane, Spacelab, Hermès ou Columbus. De plus, tant au niveau scientifique qu'industriel, la Belgique fut et demeure active dans le domaine des satellites scientifiques et d'application¹.

Une histoire aussi passionnante que celle de la participation belge à l'aventure spatiale européenne mérite d'être écrite. Depuis le mois de mai 2001, une historienne belge, Dawinka Laureys, s'y est attachée. Grâce à l'initiative et avec le soutien de l'Agence Spatiale Européenne et du service spatial des SSTC, près de vingt mois ont été consacrés à la collecte de documents écrits, à l'interview de témoins et à la rédaction partielle de cette histoire. La direction scientifique de son travail est assurée par le Professeur John Krige du *Georgia Institute of Technology* d'Atlanta et par le Professeur Robert Halleux, Directeur du *Centre d'Histoire des Sciences et des Techniques* de l'Université de Liège.

Le but final du programme est l'élaboration d'une synthèse historique sur l'effort consenti par la Belgique dès les années soixante jusqu'à l'envol de Dirk Frimout. Cela aboutira à une publication vers la fin 2003, début 2004. L'Agence Spatiale Européenne se montre disposée à publier les fruits de cette recherche historique, tout comme elle l'a déjà fait pour la Suisse et la Suède. En réalité, ce travail s'inscrit dans le cadre d'un de ses programmes : l'*Extended History Project*².

A ce jour, deux articles ont été rédigés. Le premier s'intitule "Un petit pays dans la *Big Science*. Contribution de la Belgique aux origines de l'Europe Spatiale Européenne" et a été publié dans une revue internationale de renom³. Il retrace de manière détaillée l'histoire des origines de 1958 à 1964. Le second article est une synthèse retraçant les étapes clefs de la participation belge de

Ariane 5 (ESA)

1958 à 1992. Il sera prochainement publié dans la série ESA HSR (*History Study Report*) de l'ESA.

Un historien n'est rien sans ses sources, sans les archives qu'il rassemble. Il apparaît aujourd'hui que les documents témoignant de la participation belge à l'Europe spatiale sont en bonne partie conservés. Ils sont cependant éparpillés dans des établissements et chez des particuliers. Les archives des SSTC et les papiers du spatial européen conservés aux Archives de la Communauté européenne (à Florence) figurent parmi les centres de documentation les plus précieux. Néanmoins, les archives des différents ministères, des laboratoires scientifiques et des établissements industriels concernés par les affaires spatiales devront être examinées.

En outre, la nécessité de recourir à l'histoire orale s'impose. La proximité des événements permet de recourir à cette démarche de sauvegarde de la mémoire humaine. Jusqu'à présent, Dawinka Laureys a interviewé une dizaine de témoins clefs des sphères politiques, scientifiques et industrielles. Leurs témoignages sont enregistrés, transcrits et seront déposés aux Archives de la Communauté Européenne à la demande de l'*Extended History Project* de l'ESA. Une telle démarche permet de récolter des informations ne figurant pas dans les archives, soit parce qu'elles n'ont pas été conservées par celles-ci, soit parce qu'il y a des choses qui se ressentent et qui se disent, plus facilement qu'elles ne s'écrivent.

La participation de la Belgique à l'effort spatial européen fut importante et le reste. La rédaction de son histoire progresse. Si vous avez été témoin de cette histoire ou si vous possédez des documents susceptibles d'enrichir cette recherche, Dawinka Laureys vous serait reconnaissante de le lui faire savoir.

Dawinka Laureys
Centre d'Histoire des Sciences et des Techniques
Université de Liège
Quai Banning, 5 - Bât. D1 - 4000 Liège
Fax : +32 (0)4 366 94 47
e-mail : dawinka@hotmail.com



¹ Lors des premières décennies de l'ESA, la Belgique participa notamment aux programmes scientifiques GEOS 2, ISEE 2, EXOSAT et HIPPARCOS et aux programmes d'applications OTS, ECS, L-SAT, H-SAT et Marecs.

² Depuis plusieurs années déjà, l'ESA a pris conscience de la nécessité de se tourner vers son passé afin de dresser un bilan de son action. En 1990, l'Agence mit sur pied le comité ESA History Project, dont les travaux aboutirent à la publication d'un ouvrage très étoffé sur l'histoire de l'effort spatial européen. L'œuvre de sauvegarde et de communication de la mémoire du spatial européen se poursuit actuellement au sein du groupe de travail dénommé Extended History Project. Coordonné par les "historiens de l'Agence" et par des pionniers de

celle-ci, ce groupe réunit des historiens de chacun des pays membres. Le but du projet est double. D'une part, il s'agit de faire connaître à un large public l'histoire de la contribution de chacun des pays membres à l'effort spatial. D'autre part, les historiens auront ainsi la possibilité de dégager de chacune de ces synthèses historiques : les spécificités, les similarités et les différences de stratégies nationales. Depuis mai 2001, George Van Reeth – Directeur administratif de l'ESA de 1975 à 1991 – le Professeur Robert Halleux et Dawinka Laureys représentent la Belgique au sein de l'Extended History Project de l'ESA.

³ La revue : Archives Internationales d'Histoire des Sciences, diffusée par l'Istituto della Enciclopedia Italiana (*Estratto dal n° 147*, vol. 51/2001).

Actualités

Jean-Jacques Dordain futur Directeur Général de l'ESA

A l'occasion de sa 161^e session, le Conseil de l'ESA a annoncé la nomination de Jean-Jacques Dordain au poste de Directeur général de l'ESA pour une durée de quatre ans. Il succédera à Antonio Rodotà, dont le mandat s'achève le 30 juin 2003.

Né en 1946, de nationalité française, Jean-Jacques Dordain est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Ecole centrale, obtenu en 1968. Il a occupé plusieurs fonctions à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA). En 1977, il a été choisi par le CNES parmi les premiers candidats astronautes français.

Dès son entrée à l'ESA en 1986, il a été nommé Chef du nouveau Département Promotion et Utilisation de la Station spatiale et des plates-formes. Il a ensuite été appelé à la tête du Département Utilisation de Columbus et de la

microgravité. En 1993, il est devenu Directeur associé pour la stratégie, la planification et la politique internationale. En 1999, il a été appelé à la tête de la Direction de la stratégie et de l'évaluation technique, qui venait d'être créée. Enfin en 2001, il a été nommé Directeur des lanceurs.

(Communiqué ESA, 11 décembre 2002)



(ESA)

La NASA invite ses partenaires de l'ISS

Mi-octobre, à l'occasion de l'ouverture du *World Space Congress* à Houston, la NASA a invité les Délégations des Etats partenaires dans le cadre de la station spatiale internationale à visiter le Johnson Space Center. C'est dans ce centre, notamment, que s'entraînent les astronautes et cosmonautes qui seront amenés à séjourner à bord de l'ISS. Les délégations ont pu assister à l'entraînement de plusieurs astronautes, dont Michael Lopez-Alegria qui se prépare à rejoindre l'ISS quelques jours après le retour de Frank De Winne. Le programme incluait également la visite de plusieurs installations, dont l'impressionnante piscine au fond de laquelle une réplique partielle de la station sert à l'entraînement en "apesanteur". C'est également dans ces installations que furent tournés plusieurs films comme *Armageddon*, *Space Cowboys* et *Apollo 13*. Le lendemain, les délégués participaient au *Space Policy Summit*, accueillis par l'ancien Secrétaire d'Etat James Baker et en présence de Sean O'Keefe, Administrateur de la NASA. Chaque délégation a en outre reçu un petit drapeau national ayant volé à bord de l'ISS à l'occasion de la mission STS-111 en juin 2002.

De gauche à droite: Michael C. Kostelnik, NASA Deputy Associate Administrator, Jean-François Mayence (SSTC) et William H. Gerstenmaier, Manager du NASA Space Station Program Office. (NASA)



Espace et catastrophes majeures

Les SSTC ont organisé, le 26 mars, en partenariat avec l'ESA, un forum consacré à la présentation en Belgique de la Charte "Espace et catastrophes majeures" établie par l'ESA, le CNES (agence spatiale française) et la CSA (agence spatiale canadienne). Ce Forum a rassemblé des acteurs belges, européens et internationaux de la gestion des crises et de la R&D orientée vers ce type d'activités. Vous trouverez plus d'informations sur notre site: http://www.belspo.be/belspo/ostc/agenda/index_fr.stm