THE RIGHT SPIN

November 24, 2005

BOB OSSERMAN (narration)

La station spatiale russe MIR a permis les premiers séjours de longue durée dans l'espace. Avec ses panneaux solaires semblables à des ailes diaphanes, MIR fait penser à une libellule géante et désorganisée. Elle a ouvert la voie à son successeur, la Station Spatiale Internationale.

MICHAEL FOALE (NASA video from ISS)

Bonjour. Ici Michael Foale, commandant de la huitième expédition et officier scientifique à bord de la Station Spatiale Internationale. Enfant, je voulais déjà devenir explorateur, et aujourd'hui, après six vols spatiaux, je me rends compte que je n'ai pris part qu'à l'un des episodes d'une longue série de découvertes.

BOB OSSERMAN (narration)

Michael Foale a commandé la Station Spatiale Internationale pendant six mois. A son retour sur terre, il avait passé plus d'un an dans l'espace, c'est un record parmi les astronautes américains. Lors d'une mission en 1999, il s'est longuement promené dans l'espace pour réparer et améliorer le Télescope Spatial Hubble.

NASA VOICE

Belle vue par-dessus l'épaule de Mike Foale qui ouvre la porte. Derrière cette porte, il y a l'ordinateur du Télescope Spatial Hubble. Foale est dans l'espace depuis plus de 5 heures. On aperçoit son reflet dans le telescope, qu'il referme maintenant.

BOB OSSERMAN (narration)

Mais la carrière de Michael Foale dans l'espace a bien failli être écourtée lorsque lui et la station MIR ont survécu à une rencontre brutale avec un vaisseau russe sans pilote du type Progress. Foale a débarqué sur MIR en mai 1997 pour relayer l'astronaute américain Jerry Lienenger, qui faisait équipe

avec le commandant Vassili Tsibliev et l'ingénieur Alexander Lazutkin. A cette occasion, Jerry Linenger a guidé une visite télévisée de MIR.

JERRY LINENGER (MIR tour)

On va faire un tour en partant de la table. Maintenant, voilà une vue comme on pourrait en voir lors d'une interview à la télé. On est tournés vers le socle, l'endroit d'où partent les quatre autres modules. Ici, le poste de commandement, *un endroit intéressant.* Voilà le commandant Vassili. Vassili ?

VASILY TSIBLIEV

Salut!

JERRY LINENGER

Vassili salue tout le monde, mais il est occupé au poste de commande. Ici, un scope, deux tubes CRT, et plein de commandes différentes dans ce coin. Bon, maintenant, je m'envole vers le socle,... on va devoir couper... Me voici dans le socle, et là, je suis toujours un peu perdu. Ah! Ca ressemble à une boîte à gants, ce module, c'est Priroda. Par là, je vois la salle de bains, les toilettes. Chaque chose à sa place. On va s'arrêter une minute pour regarder l'intérieur du Soyuz. L'écoutille est là, dans le socle, alors c'est étroit. Je vais montrer comment on entre, mais ce n'est vraiment pas facile d'entrer dans ce petit engin.

BOB OSSERMAN (narration)

MIR a été assemblée pièce par pièce dans l'espace. Chaque module était fixé à un module precedent, ou au socle. Le socle a six écoutilles rondes dans les quatre murs, le plafond et le plancher. Cinq s'ouvrent sur des modules. La sixième conduit à un engin spatial nommé Soyuz. Pendant des décennies, le Soyuz a été la pierre angulaire du programme spatial russe, transportant des passagers et du fret de la terre à l'espace, et retour. En cas d'urgence, c'est l'unique canot de sauvetage de la station. Un jour, lors d'un incendie, Jerry Linenger a dû rejoindre le Soyuz.

Quand Foale est arrive sur MIR, Linenger lui a donné en privé des details sur cet incendie. Mais rien ne pouvait le preparer à l'incident navrant qui l'attendait. Cette histoire a déjà été racontée. Mais ce qu'on n'a pas raconté, c'est le rôle joué par les mathématiques et la science dans le sauvetage dramatique de MIR et de son equipage. C'est cette histoire que Michael Foale va revivre pour nous.

BOB OSSERMAN (on camera with Foale)

Est-ce que vous pourriez nous raconter par le menu cette journée mémorable à bord de MIR ?

MICHAEL FOALE

Bob, vous pensez à ce 25 mai ? C'était un mercredi, vers midi GMT, en 1997. Un cargo Progress devait venir s'attacher en bas de la station MIR, dont voici un modèle réduit. Ce cargo, on l'avait détaché et envoyé sur une orbite plus élevée depuis 3 ou 4 jours, pendant que le commandant Vasily Tsibliev et Sasha Lazutkin préparaient une console qui leur permettrait de piloter à distance le cargo. Ce qui était vraiment inhabituel, et dangereux, ce jour-là, c'est qu'on nous avait donné l'ordre d'éteindre les antennes du cargo si bien que le cargo ne savait pas à quelle vitesse il s'approchait de la station spatiale. Il ne pouvait pas non plus mesurer sa distance. Tout ce qu'on avait comme moyens de mesure était une camera télé montée sur le cargo et tournée vers le bas de la station spatiale.

Cela veut dire qu'on pilotait un cargo de 7 tonnes équippé de propulseurs très très faibles, avec un délai d'environ deux secondes avant que l'effet d'une commande ne se fasse sentir sur le cargo.

Le pire, c'est que le cargo était à deux ou trois kilomètres quand il a été confié à Vassili, le commandant.

Pourquoi prendre de tels risques ? Parce qu'à l'époque, la Russie sortait de l'effondrement de l'Union Soviétique, et que le programme spatial russe était dans une situation financière très très critique. Et dans chaque vaisseau spatial, il y a une boîte, à peu près de la taille de la table sur lequel ce modèle réduit est posé, pleine d'électronique datant de la période soviétique, qui contrôle les systèmes de guidage automatique *et de mesure* pour les manoeuvres d'approche. Cette boîte était fabriquée en Ukraine. Depuis que l'Ukraine ne faisait plus partie de l'Union Soviétique, *ni de la Russie,* le prix de ces boîtes était devenu très élevé – des millions de dollars, c'était trop cher pour l'Agence spatiale russe. C'est pourquoi ils voulaient voir si on pouvait tout faire manuellement en se passant de la boîte.

Autre chose qu'il faut savoir à propos de l'arrimage ou du pilotage d'engins spatiaux. Les mathématiciens le savent, mais pas le grand public. La station tourne autour de la terre dans un referentiel inertiel. Donc si on ne la fait pas tourner volontairement, elle se promène comme cela autour de la terre. Si on exerce une poussée – si je me propulse dans votre direction – ma trajectoire sera courbe, parce que je suis dans un référentiel qui tourne, et il y a une force de Coriolis qui me dévie. Cette force de Coriolis, elle se trouve dans

le plan de l'orbite, orientée vers la terre. Si un véhicule se trouve là ou là, il va rester relié à la station spatiale. Mais s'il se trouve ici ou là, plus haut ou plus bas que la station, il y a une différence de gravité entre la station et l'objet satellite, c'est l'effet de marée. Donc si on met l'objet ici, il a tendance à s'éloigner. Si on le met là, il a tendance à descendre. Dès qu'il est en mouvement, comme on est dans un référentiel en rotation, il ressent la force de Coriolis. Par conséquent, si la station spatiale tourne autour de la terre comme celà, le véhicule est entraîné vers le bas et vers l'avant. S'il se trouve par ici, il est entraîné vers l'arrière. Ces trajectoires courbes affectent tous les véhicules qui se propulsent en direction du quai d'arrimage.

Vassili n'était pas bien entraîné à cette tâche. *En fait, il n'était pas entraîné du tout. Et* le centre de contrôle à Moscou n'avait pas bien planifié la manoeuvre. Cette expérience était mal préparée, et elle allait nous mettre sérieusement en danger. Donc, quand il a lancé la manoeuvre, il ne savait pas que ces facteurs allaient jouer contre lui. En plus, la caméra ne lui donnait qu'une image sur un tout petit écran grand comme ça, noir et blanc, avec des interruptions fréquentes à cause de l'émetteur du cargo. Ce qu'il voyait, c'était une image de la station, avec les panneaux solaires, et il devait littéralement compter combien de carrés dans le réticule étaient occupés par les panneaux solaires, puis regarder dans un abaque à quelle distance cela correspondait. Il lançait ensuite son chronomètre, et dix secondes, ou trente secondes plus tard,... regardait de combien les panneaux solaires avaient grandi sur l'écran, pour déterminer la distance et la vitesse d'approche.

Comme les vitesses sont de l'ordre de six mètre par seconde, quand on commence à six kilomètres on ne voit pas la station grandir. Ca ne se produit qu'au tout dernier moment. Et tout d'un coup... l'angle augmente brutalement, on prend conscience de la vitesse, mais quand on n'a que de très très petits propulseurs, ils faut très longtemps pour contrebalancer la vitesse. Donc quand il a perçu la vitesse, il était trop tard pour ralentir. La décélération fournie par ces moteurs n'était pas assez forte. Le cargo dérivait, et à ce moment-là, Sasha, qui regardait par une fenêtre par là, vit la station... le cargo qui passait, et m'a crié "Michael, au Soyuz!"

Voila notre Soyuz. C'est notre canot de sauvetage, c'est le vaisseau qui nous ramènera à terre. Donc je me suis lancé vers la cabine. Au moment où je traverse le socle, le cargo, soit 7 tonnes à 6 mètres par seconde, emboutit ce panneau-là, à l'arrière du module Spektr. Au moment où je passe,... je ne touche rien,.. je ne touche pas la paroi, je ne ressens pas le choc, mais je vois... les appareils bouger et les câbles osciller. J'entends un gros craquement. A

ce moment je pense qu'on va peut-être tous mourir, parce que les parois sont si minces,... elles ne font que trois millimètres d'épaisseur, en aluminium. Et je pensais "Après tout, *je ne sais pas...* je ne sais pas où l'impact a eu lieu. Je n'ai rien vu, mais peut-être que l'un des modules va se détacher. Dans ce cas, l'air s'échapperait extraordinairement vite, et, en une ou deux secondes, privés d'oxygène, on perdrait conscience, puis on mourrait.

Ca ne s'est pas passé comme ça. J'ai attendu, on a entendu le craquement et j'ai compté, tout en continuant en direction du Soyuz, et la sirène s'est déclenchée. *C'était le détecteur de dépressurisation.* Ca voulait dire que oui, il y avait un trou dans la station. *Ca le confirmait.* Bientot, j'ai senti dans mes oreilles la baisse de pression. C'est comme quand on prend un ascenseur qui monte haut, ou dans un avion. Je savais qu'on était en dépressurisation.

La peur s'est estompée, rien qu'au bout de deux ou trois secondes, parce que *je savais...* je me disais, ça dépressurise assez lentement. Je savais que je devais aller là-bas et que j'avais le temps d'y aller. Je savais aussi que les deux collègues derrière moi auraient le temps d'y arriver aussi, s'il le fallait. Devions nous y aller ? C'était la question suivante.

Maintenant, je suis là, dans le Soyuz, le cargo nous a percutés et dérive maintenant, en s'éloignant. On était orientés pour communiquer avec... la Russie. Quelques minutes plus tard, on a pu envoyer notre premier rapport sur l'accident et la dépressurisation. Sasha, qui avait vu le cargo percuter le module Spektr, vint me rejoindre. Pendant que je débranchais le tuyau du Soyuz qui traverse l'écoutille et nous empêcherait de fermer le Soyuz en cas d'évacuation – *Sacha m'avait demandé de le débrancher* – lui commença à débrancher fébrilement les dix-huit gros câbles, gros comme ça, qui transportaient tout ce courant – trente pour cent de l'électricité de la stations passe dans ces gros câbles, à travers les écoutilles du socle. Et bien sûr, si on ne pouvait pas fermer cett écoutille... Et Sacha voulait fermer cette écoutille. Je n'avais pas compris son plan, à ce moment-là. Mais il débranchait les câbles et essayait de fermer l'écoutille. Il ne suivait aucune procédure, aucune situation prévue à terre, à l'entraînement. Mais Sacha était le seul qui ait vu la collision, il pensait que le trou était dans le module Spektr et non dans la zone du socle. C'était bien vu. Je n'en était pas si sûr, je pensait que le trou pouvait être dans le socle.

En 5 ou 6 minutes, j'en ai eu fini avec le Soyuz, tout était prêt, mais Vassili ne venait toujours pas. Il était sorti et revenait avec des bonbonnes d'air comprimé, des grosses sphères. Et il a commencé à les vider pour nous donner plus de temps, pour remplacer l'air qui fuyait par le module Spektr.

Pendant ce temps, Sasha et moi on continuait de débrancher les câbles. A la fin, il n'en restait qu'un, le plus mince. On ne trouvait pas la prise. On a essayé de le couper au couteau, ça a fait des étincelles, *et Sasha...* J'ai dit "Sasha, vas-y, coupe, tant pis pour les étincelles", mais il ne voulait pas le faire, et on a encore perdu du temps à débrancher ce dernier câble, encore 2 ou 3 minutes.

Enfin, on y est arrivés, on l'a enlevé, ce câble... Ensuite, il fallait détacher une écoutille. Les 6 écoutilles des 6 passages qui partent du socle ont été montées à l'intérieur du socle, parce qu'elles sont plus larges que le passage qu'elles doivent boucher. Elles ont été montées à l'intérieur lors de la construction de la station, comme ça, on ne risque pas de les jeter par dessus bord. Mais elles étaient fixées très solidement, alors, pour en détacher une... encore du temps perdu – et aussi pour en placer une sur l'entrée du Spektr. Mais une fois l'écoutille en place, j'ai entendu l'effet de succion, pffuit...et j'ai senti tout de suite... enfin, pas immédiatement, il m'a quand même fallu une minute pour être sûr que je ne sentait plus la pression chuter dans mes oreilles. A ce moment-là, l'alerte était terminée. Enfin, cette alerte-là.

On a de nouveau une station spatiale. On peut parler avec la terre. On a mis fin à la fuite d'air. On pourrait croire qu'arrivés à ce point, il n'y a plus grand chose d'autre à faire que se remettre au travail. Bon, il ne faut pas oublier qu'on a débranché l'électricité, on a débranché tous ces panneaux solaires, 30 pour cent de l'énergie de la station. Alors que tout ronronne, que tous les systèmes sont en marche, tout... Les ventilateurs, etc... Tous les ordinateurs.

De plus, la station s'était pris un sacré coup, une très forte impulsion qui l'avait mise en mouvement – elle basculait, en tournant principalement autour de cet axe, l'axe des z de la station. Au bout de vingt, trente minutes, tous les ventilateurs, tous les équipements tombèrent en panne. Et dans la station, ce fut le silence complet.

C'est assez étrange, une station dans l'espace, sans autre bruit que votre respiration et celle des camarades. Et il se met à faire froid, vraiment vraiment froid quand on passe dans l'ombre de la terre, dans la partie obscure de notre orbite. Bien sûr, quand on est exposés au soleil, ces panneaux solaires... Ils sont astucieux, ces panneaux. Ils ont un moteur, ils doivent tourner. Ils tournent à la vitesse d'un degré par seconde au maximum. Je dirais un demi degré par seconde, pour suivre le soleil au fur et à mesure que la station tourne. Mais la station tournait à deux degrés par seconde. Donc les panneaux ne pouvaient pas suivre, à cette vitesse. Le pire qui au-

rait pu arriver, c'est que la station tourne autour d'un axe très stable. Il se trouve que l'axe le plus stable est l'axe des x. *Mais il est vraiment dans la mauvaise direction.* Si le soleil était par là, et si la station tournait comme ça, les panneaux n'arriveraient jamais à voir le soleil. Il n'y aurait plus qu'à abandonner la station, un point c'est tout, rien d'autre à faire.

Avec notre station morte... notre premier souci a été de réfléchir à comment faire tourner la station à l'aide du Soyuz, dont le centre de gravité, notez bien, est à peu près au milieu , là où se trouve le socle, comme par hasard. C'est là que ce trouve la plupart de la masse, juste derrière, je veux dire, un peu en direction de ce gros morceau, là *de la base de la station.*

Les seuls propulseurs disponibles pour corriger l'attitude de cette station morte étaient ceux du Soyuz, qui a une batterie et des commandes indépendantes. Ces propulseurs peuvent agir dans cette direction pour contrôler la rotation autour de l'axe des z. Et dans celle-là pour contrôler la rotation autour de l'axe des y. Le problème, c'est qu'il s'agit de notre canot de sauvetage. Il a juste assez de carburant pour nous ramener sur terre. On ne peut pas se permettre de gaspiller ce carburant à redresser la station, parce qu'on ne pourrait plus revenir sur terre.

Il n'y avait pas moyen de communiquer avec la terre, comme la station était morte. La situation n'avait pas l'air de s'arranger, et on avait fait déjà pas mal de révolutions autour de la terre sans courant. A la fin, Vassili, Sasha et moi nous sommes mis d'accord, tous les trois. Je suis monté en haut de ce module là, il s'appelle Kvant-2, c'est d'ailleurs là que j'ai dormi tout le reste de la mission. Tout là-haut, il y a des fenêtres, trois fenêtres tout autour. Je regarde, je tends mon pouce devant les étoiles. Et je peux déterminer notre vitesse de rotation autour de l'axe des y en regardant par les fenêtres. Je sais que la lune fait environ un demi degré de largeur. Je sais que mon pouce, bras tendu, est en gros trois fois plus large, donc mon pouce mesure un degré et demi. C'est comme ça que j'allais mesurer les vitesses de rotation, en regardant par la fenêtre les étoiles passer derrière mon pouce.

Pour mesurer la rotation autour de cet axe, il fallait utiliser les fenêtres du bas de la station, dans la base, là.

J'étais là-haut, ou dans la base, regardant par la fenêtre. On n'avait aucun moyen de communication... Il y a plus de 30 mètres d'un bout à l'autre. Alors, je devais, et Vassili aussi, crier les ordres, vous savez, à gauche, en haut, en bas, d'un bout à l'autre. Lui ne devait pas se demander où on allait, ce qu'on faisait, c'est nous qui donnions les instructions. Et on regardait par la fenêtre pour vérifier la vitesse. Et on lançait un ordre. Je me souviens du

premier ordre que j'ai lancé, j'ai crié "Vassili, essaie ça". Et j'ai regardé par la fenêtre, j'ai tendu le bras, rien ne changeait. J'ai dit "Vassili, as-tu fait quelque chose ?" Toujours aller d'un côté, crier, dans l'autre sens, recrier. "Tu as fait quelque chose ?" "Non". Il n'était pas très chaud pour mettre toute la gomme, parce qu'on n'était pas riches en carburant. A chaque fois, on n'en utilisait que quelques kilos. On avait une marge de 100 ou 200 kilos. Mais ce n'était que le début d'une longue série de pannes, donc il avait raison d'économiser le carburant.

J'ai dit "Vassili, il faut en mettre plus", et il a redonné une poussée, pendant trois secondes. Très lentement, j'ai vu la vitesse changer. J'ai regardé : elle avait augmenté ! On allait dans le mauvais sens. Alors on a encore discuté ensemble. *Il s'est écoulé dans les 10 minutes.* On a des nuits d'au plus 30 minutes. J'ai dit "On essaie encore, dans l'autre sens, cette fois". Il l'a fait, et j'ai dit "Continue, continue". Trois secondes pour défaire ce qu'on avait fait, et encore trois secondes pour voir s'il y aurait un changement, dans la direction opposée. En mettant mon pouce, j'ai vu que la rotation s'était presque arrêtée.

Notre but à ce moment-là était de stabiliser la station, la rendre immobile dans l'espace. Comme celà, les panneaux solaires trouveraient le soleil, une fois sortis de la nuit, et rechargeraient les batteries. C'est ce qui s'est produit. On ne pouvait pas éliminer la rotation autour de l'axe des x, donc on continuait à tourner très lentement autour de cet axe, mais on ne tournait plus autour de cet axe. Et pas trop non plus autour de cet axe. Les vitesses étaient de l'ordre d'un tour complet en deux heures. Pas très grandes, mais pas négligeable pour les panneaux solaires. Néanmoins, il y avait assez de courant pour communiquer avec la terre, et ils nous ont donné des consignes, comment actionner les propulseurs de la station spatiale, en particulier celui-là, tout en haut. Ils l'avaient monté là justement pour qu'on ait un grand moment par rapport à l'axe des x, cela permettait de contrôler la rotation en x. Ca a marché, et on a été enfin stabilisés.

On aurait pu croire que c'était la fin de notre aventure, mais on a eu des pannes de courant répétées... C'est parce qu'on avait coupé tous ces câbles, la station était en limite de rupture, on a eu trois ou quatre pannes après *le jour de* la collision. Et c'est alors que j'ai commencé a sentir l'importance des nuances entre les différents moments d'inertie de la station.

ROBERT OSSERMAN

Ce que je tiens là, dans ma main s'appelle un volant d'inertie, comme il y en a dans toutes les voitures. Les deux choses à remarquer, c'est, d'abord,

que c'est lourd, et ensuite, que le poids est réparti aussi loin que possible du centre autour duquel le volant tourne. Cette forme est celle qui est la plus efficace pour que le volant tourne à une vitesse constante.

Les mathématiciens savent calculer un nombre qui dit à quel point un objet en rotation résiste quand on veut le ralentir ou l'accéler. Ce nombre s'appelle le moment d'inertie, c'est un mot que Mike Foale répète à plusieurs reprises, car il s'applique à tout objet en rotation, d'un volant d'inertie à une station spatiale, et il a joué un rôle essentiel dans le cas de MIR.

Il y a aussi les axes principaux d'inertie, découverts par le grand mathématicien suisse Léonard Euler, qui a écrit les équations d'un corps en rotation. Ce sont les équations d'Euler. Pour un objet à la forme bizarre, comme une pomme de terre ou MIR, on peut calculer en principe le moment d'inertie quand il tourne autour de n'importe quel axe. Euler a découvert que ces nombres obéissaient à une règle simple. La voici. Il y a toujours une direction qui donne le plus grand moment d'inertie. Il y en a une autre, perpendiculaire à la première, qui donne le plus petit moment d'inertie. Avec la direction perpendiculaire aux deux autres, on obtient les axes principaux d'inertie, ce que Mike Foale appelle l'axe des x, l'axe des y et l'axe des z, et c'est l'axe des y qui correspond au moment intermédiaire.

Quand MIR commence à basculer, elle ne tourne pas autour d'un axe particulier, mais autour d'un axe qui change constamment de direction.

MICHAEL FOALE

Il était impossible de prévoir le mouvement de la station, parce qu'elle contient de choses appelées gyroscopes. Ce sont des volants d'inertie, il y en a six ici, et six là. Ils emmagasinent une énorme quantité de moment cinétique, parce qu'ils tournent à très grande vitesse, dans le vide, par sustentation magnétique. Normalement, ils servent à maintenir l'assiette de la station spatiale. En cas de panne de courant, la station perd l'équilibre parce que les servomécanismes s'arrêtent de fonctionner, mais aussi parce que les gyroscopes ralentissent à des vitesses différentes. Alors la station se met à faire ça, elle oscille et bascule. A la fin, elle tourne en tout sens, sans axe de rotation particulier.

Je voulais comprendre comment contrôler ce mouvement, alors j'ai pris un modèle réduit de MIR, plutôt en mauvais état. Je l'ai fait tourner. Pour le rendre plus ressemblant, j'ai attaché des lampes flash au bout, avec du scotch. Et j'ai demandé à la terre les valeurs des moments d'inertie. Je n'ai jamais pu avoir de réponse claire. Mais après deux ou trois incidents de plus, je me suis convaincu que l'axe autour duquel il était le plus facile de faire

tourner la station à l'aide du Soyuz était l'axe des y. Et cela garantirait que les panneaux solaires... Rappelez-vous, ceux-ci sont inactifs parce qu'on les a débranchés. Imaginez que ceux-là, en haut et à la base, soient orientés vers le soleil. Et qu'on tourne comme ça, avec le soleil droit devant. Maintenant, on donne une petite impulsion. *Mais j'ai appris...* Je me suis aperçu que si, au départ, on pointe comme ça vers le soleil, on se retrouve à osciller comme ça, et tout d'un coup on bascule dans une autre direction, par ici, puis par là. *Et j'ai commencé à avoir l'impression...* Je pensais "je parie que c'est le moment d'inertie intermédiaire... Dans le tenseur d'inertie, il y a trois axes Ixx, Iyy, Izz, et c'était autour de Iyy que nous étions instables.

ROBERT OSSERMAN

Est-ce vous voulez bien illustrer le théorème d'Euler, et l'importance de ces trois axes d'inertie en utilisant ceci, qui a trois dimensions bien distinctes, la plus étroite, la plus longue, et celle qui est entre les deux ?

MICHAEL FOALE

Merci, Bob, de me donner cet exercice de coordination musculaire. On sent bien les moments d'inertie, pour un corps comme celui-ci qui a des axes de symétrie bien visibles. Il y a un axe principal par ici. Il lui correspond un grand moment d'inertie, parce que la masse est située loin du centre de symétrie. Donc ça fait un axe. En voici un autre, qui traverse la boîte comme ceci. Dans ce cas, les distances sont courtes, donc ça fait un petit moment d'inertie. Et puis il y en a un autre qui passe par là. Cela donne le moment d'inertie intermédiaire. Quand on lance la boîte, elle se retourne rapidement, et se retourne encore. Elle oscille et se tortille. Je n'arrive pas à le faire avec mes doigts. C'est pourtant ce que faisait la station, avec le soleil par ici. On tournait autour de l'axe des y, le temps de deux révolutions. On chargeait les batteries, tout allait bien. Puis, assez brutalement, la station quittait ce mode. Très rapidement, l'espace d'une moitié ou même d'un quart de révolution, c'était comme si la station basculait autour de l'axe des z, puis tombait, et soudainement elle se trouvait comme ceci, avec le module Spektr par ici, et nous revoila à tourner, avec l'axe de rotation de nouveau dans la même direction.

J'ai essayé d'étudier les équations d'Euler, avec un logiciel appelé Mathematica, sur mon ordinateur portable. Je me suis dit, je vais comprendre une fois pour toute quels couples appliquer, en résolvant les équations d'Euler, en traçant les solutions et en appliquant les résultats obtenus. Je n'avais pas vraiment confiance en mon modèle, alors que j'y pensais sans arrêt. J'ai essayé deux ou trois fois, dans la station,... chaque fois, c'était un dimanche. Et

au moment de sauvegarder mon travail, alors que j'allais y arriver – j'avais enfin trouvé le temps de m'y mettre – la station tombait en panne. Et l'ordinateur rendait l'âme. Plus de batterie, rien. A la fin, j'ai trouvé ça très frustrant. Les équations d'Euler n'ont jamais été résolues de façon satisfaisante sur MIR. Quand je dis résoudre, je veux dire numériquement. Je traçais les solutions d'un modèle. Je prenais un repère x,y,z et je le faisais tourner pour voir les différences suivant les valeurs des moments d'inertie. A la fin, j'ai dû revenir sur terre, réfléchir très dur à cette expérience, analyser à nouveau ce que j'avais fait pour comprendre entièrement l'histoire que je vous ai racontée.

ROBERT OSSERMAN

Quelle histoire surprenante. Ce qui m'intéresse beaucoup, c'est le rôle joué par les mathématiques. J'ai entendu votre aventure racontée plusieurs fois à la télévision, mais à chaque fois, le rôle des mathématiques est passé sous silence. "Oh oui, on a actionné quelques propulseurs, et le problème a été résolu."

MICHAEL FOALE

Bob, les mathématiques ont été la clé qui m'a servi à résoudre ce problème. Je ne savais pas ce qu'il fallait faire. Le plus important, c'est que je ne pouvais être pleinement rassuré tant que j'ignorais si ces axes d'inertie étaient stables ou non. Donc la modélisation, utilisant les mathématiques pour modéliser la dynamique de ce vol spatial, était cruciale dans mon approche du problème.

J'ajoute que, réellement, les mathématiques sont partout dans le vol spatial. J'ai déjà décrit le problème des trajectoires non euclidiennes. Quand on est en orbite autour de la terre, on est confronté à des trajectoires courbes, à la force de Coriolis, aux effets de marées, dès qu'on s'occupe de l'approche de deux véhicules. C'est un problème très mathématique. Le problème de déterminer exactement l'orbite en présence de deux corps en orbite, de trois corps est insoluble, en fait. Donc... les mathématiques sont omniprésentes dans notre métier de l'espace. J'ai utilisé ma description simple de la force de Coriolis, des effets de marées au-dessus et au-dessous de l'orbite, pour enseigner aux pilotes comment s'y prendre, et les évaluer . Les mathématiques jouent un rôle clé, et... on ne peut pas être chef de mission, astronaute, contrôleur de vol ou ingénieur sans connaître les mathématiques.