



**Comité des utilisations pacifiques
de l'espace extra-atmosphérique**

**Recherche nationale sur la question des débris spatiaux,
sécurité des satellites équipés de sources d'énergie nucléaires
et problèmes relatifs à la collision de sources d'énergie
nucléaires avec des débris spatiaux**

Note du Secrétariat

Table des matières

	<i>Paragraphes</i>	<i>Page</i>
I. Introduction	1-3	2
II. Réponses reçues des États Membres		2
Chypre		2
Irlande		2
Israël		2
Pays-Bas		3
République de Corée		3
Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du nord		3

I. Introduction

1. Au paragraphe 31 de sa résolution 53/45 du 3 décembre 1998, l'Assemblée générale a jugé essentiel que les États membres portent une attention accrue aux problèmes des collisions d'objets spatiaux, y compris ceux équipés de sources d'énergie nucléaires, avec des débris spatiaux et à d'autres aspects de la question des débris spatiaux, et a demandé que la recherche nationale se poursuive, que les techniques de surveillance des débris spatiaux soient améliorées, que les données sur ces débris soient rassemblées et diffusées et que, dans toute la mesure possible, le Sous-Comité scientifique et technique du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique en soit informé.
2. Le Secrétaire général a adressé à tous les États membres une note verbale en date du 30 août 1999, les invitant à communiquer au Secrétariat, au plus tard pour le 31 octobre 1999, les informations demandées afin que celui-ci puisse établir un rapport pour présentation au Sous-Comité à sa trente-septième session.
3. Le présent document a été établi par le Secrétariat sur la base des informations reçues des États membres et des organisations internationales au 10 décembre 1999. Les informations reçues ultérieurement feront l'objet d'additifs.

II. Réponses des États Membres

Chypre

[Original: anglais]

En ce qui concerne la question des débris spatiaux et de l'utilisation de sources d'énergie nucléaires dans l'espace extra-atmosphérique, le Gouvernement de Chypre a l'honneur d'informer le Secrétaire général qu'il n'a pas d'observation à formuler.

Irlande

[Original: anglais]

L'Irlande est consciente du problème croissant des débris spatiaux et des risques de collisions qui y sont associés, et est disposée à appuyer la recherche et la mise en place de normes appropriées pour contrôler et éliminer les matériaux envoyés dans l'espace.

Des sources d'énergie nucléaires thermoélectriques sont de temps à autre utilisées par divers organismes, par exemple dans l'espace lointain où l'énergie photoélectrique solaire est inadéquate, et l'Irlande est disposée à appuyer toute action de recherche et de promotion de normes strictes et de garanties concernant ces sources d'énergie.

Israël

[Original: anglais]

Israël n'exerce aucune activité, quelle qu'elle soit, faisant intervenir des sources d'énergie nucléaires dans l'espace extra-atmosphérique.

Pays-Bas

[Original: anglais]

Les Pays-Bas n'exercent aucune activité se rapportant à l'identification des processus terrestres et des normes techniques susceptibles d'être appliqués aux sources d'énergie nucléaires dans l'espace extra-atmosphérique. Il est par conséquent impossible aux Pays-Bas de poursuivre la réflexion sur les facteurs qui pourraient distinguer l'utilisation de sources d'énergie nucléaires dans l'espace extra-atmosphérique des applications nucléaires terrestres.

République de Corée

[Original: anglais]

En ce qui concerne la question des débris spatiaux, la République de Corée a proposé le principe du "lanceur payeur", selon lequel les pays avancés qui produisent des déchets spatiaux sont responsables de la présence de débris dans l'espace extra-atmosphérique. Ce principe est conforme à la tendance des politiques relatives à l'environnement terrestre. Les pays qui ont laissé des débris spatiaux dans l'espace extra-atmosphérique, tels les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie et la France, devraient exercer un rôle de pointe pour l'élimination des débris, l'établissement de normes et la recherche de mesures d'atténuation. Ils doivent aussi appuyer les pays en développement afin de réduire dans l'avenir le nombre des débris spatiaux, en établissant un fonds international à l'appui des activités dans ce domaine.

L'utilisation de sources d'énergie nucléaires devrait être strictement limitée, sauf pour les missions spéciales telles les missions dans l'espace lointain. Des normes de sûreté et de conception doivent être établies pour ces cas particuliers. Les technologies doivent être mises en commun entre les pays développés et les pays en développement pour que la Terre et l'espace extra-atmosphérique demeurent des lieux sûrs et exempts de déchets.

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

[Original: anglais]

A. Introduction

Le Royaume-Uni continue d'exercer un rôle déterminant dans l'étude des problèmes posés par les débris spatiaux. Cette action est menée à l'échelon national dans le cadre du groupe de coordination nationale sur les débris spatiaux, et à l'échelon international dans le cadre du Comité de coordination interinstitutions sur les débris spatiaux (IADC) et du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique. Le Centre spatial national britannique continue de coordonner la participation du Royaume-Uni à ces instances.

La réunion la plus récente du groupe de coordination du Royaume-Uni a été tenue en avril 1999 à l'Agence nationale d'évaluation et de recherche pour la défense (DERA). Ont participé à cette réunion tous les principaux groupes de recherche du Royaume-Uni, de l'industrie comme des milieux scientifiques, notamment: Century Dynamics, l'Agence nationale d'évaluation et de recherche pour la défense (DERA), Fluid Gravity Engineering,

le Ministère de la défense, Matra Marconi Space, ainsi que les Universités du Kent, de Londres et de Southampton. Les communications présentées à cette occasion ont porté sur divers sujets, à savoir notamment: activités menées à la réunion précédente de l'IADC à Toulouse; progrès relatifs au développement de matériel de poursuite de déchets spatiaux; progrès et résultats dans le domaine des nouveaux modèles de débris/météoroïdes; et activités de recherche relatives au blindage contre les débris.

Au plan international, le Royaume-Uni a participé à la réunion plénière de l'IADC à Toulouse en novembre 1998, ainsi qu'à la réunion du groupe directeur de l'IADC tenue à Vienne en juillet 1999.

Au cours de l'année passée, le Royaume-Uni a mené les activités de recherche/développement relatives aux débris spatiaux qui sont résumées ci-après.

B. Mesure de la population de débris

1. Détecteurs de débris

La détection en temps réel dans l'espace ouvre des perspectives précieuses sur un environnement caractérisé par la présence de débris spatiaux et de météoroïdes. La méthode de détection, fondamentalement, utilise l'énergie d'une particule provoquant un impact pour déclencher une mesure, et par conséquent, détruire l'entité physique de cette particule. Le Département de sciences spatiales et d'astrophysique de l'Université du Kent à Canterbury a maintenu les options prises sur trois occasions de vol pour son capteur de débris spatiaux connu sous le nom de DEBIE. Un consortium finlandais apporte son concours à l'un de ces vols, en se chargeant de fabriquer le capteur que le satellite PROBA de l'Agence spatiale européenne (ESA) emportera, le lancement étant prévu vers le milieu de 2000. Les capteurs de vol devraient être livrés à l'Université du Kent pour étalonnage en novembre 1999. À la deuxième occasion de vol, avec le véhicule de recherche sur les technologies spatiales du DERA (Satellite STRV 1C), l'étalonnage des capteurs de vol a été effectué, et tout le matériel de vol a été livré en août et septembre 1999. Tous les éléments ont été intégrés dans l'engin spatial, dont le lancement est prévu pour le premier trimestre 2000. La dernière occasion de vol est prévue à bord de la Station spatiale internationale (SSI). L'installation européenne d'expérimentation scientifique et technologique (ESTEF) de l'ESA sera lancée en juin 2002, pour un vol d'une durée de trois ans et retour ultérieur sur Terre. Il sera donc possible d'inspecter après le vol les surfaces récupérées.

L'Université du Kent étudie aussi l'utilisation d'une nouvelle technique de détection, baptisée "capteur Aerogel d'impact sensible à la position" (APGIS), qui combinera la détection en temps réel et l'analyse d'échantillons récupérés¹. En mesurant la position et le moment de l'impact sur un collecteur récupérable, le balayage consécutif au vol et l'analyse des résidus permettent d'obtenir des données chimiques et physiques sur la cause de l'impact. En outre cette étude de l'impact, combinée au vecteur vitesse de l'engin spatial au moment de la détection, permet de connaître la trajectoire dans le cadre de référence orbital approprié. Les résultats de l'analyse des besoins système militent en faveur du déploiement d'APGIS sous la forme d'un détecteur de grande surface, ce qui en fait un candidat idéal pour la SSI.

2. Analyse des surfaces récupérées

Comme dans le cas des détecteurs *in situ*, l'analyse des surfaces récupérées après séjour dans l'espace fournit des données précieuses sur l'environnement spatial. Très

récemment, l'Université du Kent a analysé les cellules solaires de l'un des panneaux du télescope spatial Hubble, récupéré après 3,62 années dans l'espace. Les techniques d'analyse par microscopie électronique ont permis d'identifier l'origine de 23 des 29 cratères d'impact relevés sur les cellules choisies. La classification chimique des résidus d'impacts, météoroïdes ou débris, correspond bien aux projections établies au moyen des modèles de flux. Par ailleurs, les résultats relatifs aux résidus ont fait l'objet d'une évaluation critique en les comparant avec des essais d'impact réalisés au sol sur des cellules solaires au moyen du canon à gaz léger (LGG) de l'Université de Kent. Les observations ont confirmé la similarité des textures et des effets chimiques produits dans les cratères, ce qui tend à valider les résultats de l'analyse microscopique. Diverses communications sur ces travaux ont été présentées à l'occasion de conférences et dans des publications réputées^{2,3}.

C. Modélisation de la présence de débris dans l'espace

La modélisation de la présence de débris, son évolution à long terme et les risques potentiels que ceux-ci présentent pour les systèmes spatiaux futurs restent au nombre des grandes activités que mènent les chercheurs du Royaume-Uni dans le domaine des débris. Les effets de l'introduction continue de nouveaux engins dans l'espace proche, et donc les conséquences de la présence de débris, constituent aussi un domaine important de recherche.

1. Modélisation des sources de débris

L'une des principales difficultés que présente la modélisation des débris dans l'espace est de représenter avec exactitude des populations de débris de petite taille (inférieure à 1 mm), que les modèles actuels sous-représentent dans une mesure appréciable. L'une des raisons en est que ces modèles n'incluent pas toutes les sources de débris. Par exemple, la perte d'éclats de peinture des surfaces des engins spatiaux en orbite n'a pas encore été prise en compte. Toutefois, les recherches menées aux Collèges Queen Mary et Westfield de l'Université de Londres, avec des financements et sous la direction de la DERA, ont permis d'étudier les mécanismes de production de tels micro-débris. Un modèle de la génération de micro-débris est actuellement développé, et il prend en compte les effets de l'oxygène à l'état atomique, des cycles thermiques et du rayonnement ultraviolet. Des mesures ont été effectuées expérimentalement pour identifier le rôle de chacun de ces phénomènes physiques, et la question de la préparation initiale des surfaces et des défauts a servi à produire des courbes de distribution statistique en fonction de la taille de micro-débris potentiels. Enfin, il est prévu d'incorporer le modèle dérivé dans les modèles caractérisant un environnement contenant des débris et l'évolution de ceux-ci, par exemple la suite intégrée d'évolution des débris du DERA (IDES), éliminant ainsi l'une des principales causes du déficit de prévisions.

2. Modélisation des débris spatiaux sur l'orbite terrestre géosynchrone

Alors que les modèles relatifs aux débris présents sur l'orbite terrestre basse (LEO) deviennent désormais relativement complets, beaucoup plus d'incertitudes demeurent en ce qui concerne les altitudes géostationnaires (à savoir sur l'orbite terrestre géosynchrone (GEO)). Un consortium associant l'Université de Kent, DERA, l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) (Toulouse), l'Institut Max Planck (Heidelberg) et l'Université du Maryland a conclu un contrat avec l'ESA pour étendre la modélisation des débris spatiaux et d'autres facteurs caractérisant l'environnement spatial de l'orbite

basse à l'orbite géosynchrone. Ce travail se poursuit, et fera l'objet d'un rapport l'an prochain.

3. Évolution à long terme de l'environnement de débris

Le modèle IDES de la DERA a récemment été renforcé et revalidé à mesure que de nouvelles données sur les nouvelles sources de débris et les nouveaux milieux contenant des débris devenaient disponibles. L'époque de référence du modèle a été révisée pour correspondre désormais à la situation au 31 mars 1998, grâce à l'intégration d'une nouvelle base de données chronologiques sur les objets ayant fait l'objet de lancements, et couvrant les lancements de 1957 à la mi-1998, et à la simulation de phénomènes de fragmentation intervenus depuis l'époque de référence antérieure du modèle, à savoir au 1^{er} janvier 1996. L'IDES inclut désormais un modèle révisé des sources de gouttelettes de sodium-potassium liquide de refroidissement, qui a permis d'améliorer de façon spectaculaire la précision des prévisions pour ce qui est des débris de l'ordre du centimètre. Le modèle amélioré de débris de l'IDES a été utilisé systématiquement pour étudier l'évolution à long terme des débris sur l'orbite terrestre basse, dans le détail, y compris l'influence des constellations de petits satellites et les mesures de protection contre les effets des débris. En raison de la réception tardive de certaines données d'essai de l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) des États-Unis, le modèle IDES a permis au BNSC de disposer de données pour réaliser une étude comparative internationale des modèles LEO dans le long terme, que réalise l'IADC. L'achèvement de cette étude comparative de base ouvrira la voie à des comparaisons plus élaborées, fondées sur un cadre analogue et sur des données communes à modéliser. Ces études plus avancées de l'IADC pourraient conduire à un consensus international sur des questions importantes, telles l'efficacité des différentes mesures de protection contre les débris comme il en est mis en œuvre pour la population générale des satellites et pour les systèmes commerciaux de constellations de satellites.

Le succès du modèle IDES de la DERA a conduit l'ESA et le Centre européen d'opérations spatiales (ESOC) à conclure un contrat pour développer une version de l'IDES à leur usage. Ce nouveau modèle, qui sera livré à l'ESA au début de 2000, est intitulé "Analyse à long terme de l'environnement de débris (DELTA)". Il se fondera sur une population initiale de débris dérivée du modèle de référence de l'environnement terrestre de débris météoroïdes et spatiaux (MASTER) élaboré par l'ESA, et récemment mis à jour par l'Université technique de Braunschweig (Allemagne). DELTA établira des projections à long terme pour les débris LEO supérieurs à 1 mm, et calculera les risques de collisions correspondants pour les 100 prochaines années. Le modèle DELTA a fortement progressé récemment en ce qui concerne la vitesse et la précision de la propagation orbitale à long terme; la haute résolution du modèle des lancements futurs; la ventilation des prévisions par source de débris, et la prévision directe du processus de collision en cascade. Globalement, le modèle DELTA de l'ESA devrait être parfaitement à jour, et offrir des capacités plus avancées que tous les autres modèles.

Aux Collèges Queen Mary et Westfield de l'Université de Londres, les chercheurs ont continué de développer leur modèle prometteur de simulation directe par la méthode de Monte Carlo (DSMC). Celui-ci autorise une analyse statistique permettant de prévoir l'évolution à long terme de l'environnement de débris en orbite, et vise à améliorer l'évaluation des risques encourus par les véhicules spatiaux. Cet objectif est poursuivi en prenant pour hypothèse que les débris peuvent être modélisés en utilisant des échantillons de particules pour représenter la population réelle de débris. Sur la base de la théorie

standard de la cinétique des particules, la probabilité de collisions avec des débris peut être évaluée rigoureusement. La combinaison d'un modèle de désintégration d'un engin, d'un modèle de probabilité de collision, et d'un modèle de sortie aérodynamique d'orbite de débris permet de faire des prévisions concernant l'accroissement de la population des débris. Le modèle DSMC a été validé en comparant les prévisions aux résultats du système d'exposition prolongée au milieu spatial (LDEF) et des expériences sur les impacts reçus par les satellites. Des simulations réalisées à partir du modèle ont aussi servi à prévoir le nombre des hublots de la navette spatiale qu'il faudrait remplacer, et de les comparer avec les données effectives. Récemment, des travaux ont été entrepris pour élargir le modèle d'environnement et prendre en compte les micrométéorites naturelles. Des résultats de recherches sur la modélisation des débris DSMC ont été publiés dans une revue spatiale de premier plan⁴.

Les recherches menées au Département de génie aérospatial à l'Université de Glasgow ont principalement porté sur l'évolution à long terme d'une grande constellation de nanosatellites sur orbite terrestre en faisant appel aux méthodes de l'analyse mathématique. Ce travail présente un intérêt croissant, car les nanosatellites apparaissent désormais comme l'un des moyens les moins coûteux d'effectuer des missions novatrices aux applications diversifiées. Les systèmes futurs de nanosatellites pourraient comporter plusieurs milliers de ces satellites, d'une masse comprise entre 0,001 kg et 1 kg. Il est probable que ces satellites ne comporteront pas de commandes actives, et que les effets de l'environnement, comme la traînée aérodynamique, détermineront l'évolution de la constellation. Le travail de modélisation effectué à Glasgow vise à calculer la densité spatiale médiane d'une constellation caractéristique sous l'effet de la traînée aérodynamique, tout en prenant en compte les échecs de mise en orbite et le dépôt de nouveaux satellites pour regarnir la constellation. Une des observations les plus intéressantes est que, dans certaines circonstances, la densité de nanosatellites diminuera avec le temps, mais que sa culmination tendra à évoluer vers des altitudes plus élevées. Les estimations relatives au taux nécessaire de dépôt de nouveaux nanosatellites pour entretenir la constellation peuvent aussi être calculées en utilisant cette technique. Ces conclusions seront prochainement publiées dans une revue scientifique réputée⁵.

4. Risques encourus à court terme par les engins spatiaux du fait des débris

L'Université de Southampton continue d'axer ses travaux sur les collisions et l'analyse des risques à court terme. Elle a ainsi récemment effectué des analyses des risques de collisions pour une constellation de 800 satellites (sur la base de la configuration spatiale d'origine) et pour la nouvelle SSI. Ces deux évaluations se sont fondées sur le progiciel de modélisation pour la simulation des débris spatiaux (SDS), élaboré à Southampton sous contrat avec la DERA. Pour ce qui est de l'évaluation des risques pour les constellations de satellites, deux scénarios potentiellement menaçants ont été envisagés: a) fragmentation d'un satellite constitutif de la constellation; et b) désintégration d'un véhicule de lancement de la constellation. Il a été constaté que le risque de collisions pour la constellation est faible à court terme. C'est la désintégration d'un satellite de la constellation induite par une collision qui met le plus gravement en danger le système. Pour ce qui est de l'évaluation du risque encouru par la SSI, le risque de fragmentation d'un étage supérieur d'une fusée porteuse ou d'un engin spatial sur une orbite voisine a été envisagé. Dans les hypothèses considérées, les probabilités d'impact à court terme du fait de la rencontre entre la SSI et le nuage de débris de fragmentation se sont révélées être supérieures de quatre ordres de grandeur aux risques imputables à la population de débris

de fond. Les résultats de ces études ont été signalés dans un journal scientifique réputé, ainsi qu'à l'occasion de grandes conférences internationales^{6,7}.

D. Protection des engins spatiaux contre les débris

La protection des engins spatiaux contre les impacts de débris à hypervitesse est un domaine de recherche dans lequel le Royaume-Uni est particulièrement actif.

1. Essais d'impact en hypervitesse

Un consortium associant Matra Marconi Space (MMS), DERA, Kent, et Fluid Gravity Engineering approche du terme d'un contrat de deux ans conclu avec l'ESA pour étudier des solutions financièrement rationnelles de blindage contre les débris pour les engins spatiaux non habités. En raison des contraintes de conception de ce type d'engins, en matière de coût comme de masse, le nombre des solutions disponibles pour le blindage est étroitement limité. Le consortium a proposé un nouvel ensemble de solutions de blindage qui amélioreraient la survivabilité des engins futurs, notamment le remplacement de la structure classique en nid d'abeille d'aluminium, qui caractérise de nombreux engins, par une double couche, et l'ajout de couches supplémentaires de tissus béta multistrates d'isolation thermique pour recouvrir la structure du satellite. Des prototypes de blindage ont été fabriqués et soumis à toute une gamme d'impacts à hypervitesse au moyen du LGG. Les résultats de ces essais ont permis de dériver des équations de limite balistique pour chacun des nouveaux types de blindage. Ces équations permettent de calculer la résistance des blindages sur un satellite. Au cours de la période restante, une analyse coûts-risques sera effectuée pour quantifier la rentabilité des solutions de blindage. Enfin, des directives seront établies à l'intention des concepteurs de systèmes spatiaux quant au choix le plus approprié du blindage et à son positionnement pour un type d'engin donné.

2. Modélisation de la survivabilité

La DERA a poursuivi l'élaboration d'un logiciel novateur de modélisation appelé SHIELD. L'objet de SHIELD est d'identifier la stratégie optimale de protection contre les débris pour une mission satellitaire donnée. Il procède en utilisant un algorithme génétique qui compulse et évalue plusieurs milliers de possibilités concurrentes de configuration du matériel dans une représentation géométrique en trois dimensions du corps du satellite, et en envisageant parallèlement plusieurs choix de blindage et de localisation de celui-ci sur le satellite. Ce processus d'évaluation utilise une nouvelle formule de mesure de la survivabilité afin de déterminer rapidement l'efficacité de chacune des solutions. L'une des adjonctions à la méthode de calcul est le calcul, par la méthode de Monte Carlo, de la distribution des débris pénétrant le corps du satellite après impact, qui a été dérivé des données sur les flux directionnels de débris générés par le modèle IDES de la DERA. La matrice de calcul est construite de telle manière qu'elle puisse révéler si les organes critiques sont suffisamment bien protégés par le matériel voisin, et si les avantages d'un blindage supplémentaire justifient l'excédent de masse et de coût. De cette manière, le modèle permet de déterminer quelle est la meilleure solution pour assurer au matériel critique la protection maximale. Il est envisagé que ce modèle puisse, à terme, devenir un outil additionnel d'ingénierie à mettre en œuvre dans les toutes premières phases de la conception de satellites, tant qu'il est encore possible de modifier la conception fondamentale. La version 0.1 de SHIELD vient d'être achevée, et elle est maintenant prête à être validée. Les travaux correspondants ont été publiés en tant que contribution sollicitée

lors d'une récente conférence spatiale, ainsi que dans un journal britannique sur la défense^{8,9}.

3. Modélisation hydrocode

La conception de blindages amortisseurs améliorés en matériaux nouveaux tels le Nextel et le Kevlar est essentielle pour réduire au minimum les risques d'impact pour les missions spatiales futures de longue durée, en particulier celles qui nécessitent une présence humaine. Il est par conséquent essentiel de caractériser la réaction de ces nouveaux matériaux aux impacts à hypervitesse afin d'assurer une conception optimale des blindages. Il est donc nécessaire de mettre au point des logiciels de simulation à hydrocode pour s'assurer des performances des blindages aux vitesses caractéristiques des impacts de débris en orbite (supérieures à 10 km/s). Les hydrocodes utilisent donc des modèles de matériaux soumis à de fortes pressions et à de fortes contraintes. Des modèles de matériaux ont déjà été développés pour l'aluminium, métal largement utilisé pour les engins spatiaux, mais pas pour le Nextel ni pour le Kevlar. Une société britannique, Century Dynamics, sous contrat avec l'ESA, élabore des modèles matériaux dans ce but. La qualité des modèles dérivés a été démontrée en comparant les simulations hydrocodes à des tests d'impact. Un document décrivant l'état des recherches a été présenté à un colloque international important, et a par la suite été sélectionné pour le Prix des meilleures communications scientifiques¹⁰.

Century Dynamics a par ailleurs investi un effort important dans l'amélioration de son propre logiciel hydrocode, appelé Autodyn. Des travaux de longue haleine de recherche-développement sur une technique hydrodynamique appliquée aux particules lisses (SPH) se poursuivent grâce à une combinaison d'investissements internes et de financements du Ministère de la défense britannique et de la DERA. On notera en particulier que la capacité de représentation SPH en trois dimensions est maintenant intégrée dans Autodyn, et validée. Le logiciel Autodyn est désormais de notoriété mondiale, et l'ESA comme la NASA acquièrent des licences en vue de son installation sur grands systèmes informatiques au cours de l'année.

Notes

- ¹ J. A. M. McDonnell *et al.*, "Aerogel position-sensitive impact sensor: capabilities for in-situ collection and sample return", pré-publication.
- ² G. A. Graham *et al.*, "Hypervelocity impacts in low Earth orbit: cosmic dust versus space debris", *Advances in Space Research*, vol. 23, n° 1 (1999), p. 95 à 100.
- ³ G. A. Graham *et al.*, "Natural and simulated hypervelocity impacts into solar cells", à paraître dans *International Journal of Impact Engineering*.
- ⁴ L. Wang et J. P. W. Stark, "Direct simulation of space debris evolution", *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 36, n° 1 (janvier-février 1999).
- ⁵ C. R. McInnes, "A simple analytical model of the long term evolution of nanosatellite constellations", à paraître dans *Journal of Guidance, Control and Dynamics*.
- ⁶ G. G. Swinerd, S. P. Barrows et R. Crowther, "Short-term debris risk to large satellite constellations", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 22, n° 2 (1999), p. 291 à 295.
- ⁷ G. G. Swinerd, S. P. Barrows et P. H. Stokes, "Short-term debris risk to the International Space Station arising from a spacecraft fragmentation", présenté lors du *49^{ème} Congrès international d'astronautique*, tenu à Melbourne (Australie), 28 septembre-2 octobre 1998, paper n° IAA-98-IAA.6.4.04.
- ⁸ P. H. Stokes *et al.*, "Novel modelling solutions for debris risk reduction", *Advances in Space Research*, vol. 23, n° 1 (1999), p. 231 à 341.
- ⁹ P. H. Stokes *et al.*, "Protecting satellites against orbital debris", *Journal of Defence Science*, vol. 4, n° 2 (1999), p. 121 à 131.

- ¹⁰ C. J. Hayhurst *et al.*, “Development of material models for Nextel and Kevlar-epoxy for high pressures and strain rates”, communication présentée au *Hypervelocity Impact Symposium*, Huntsville, Alabama (États-Unis), en novembre 1998, paper n° 1044.