

Expériences actives dans un plasma cosmique : le projet AMPTE

par M. Roth

Résumé

Pour la première fois, des expériences seront réalisées à très haute altitude, qui tantôt modifieront localement le plasma ambiant, tantôt introduiront au sein de celui-ci des éléments traceurs qui permettront de suivre son évolution. Le projet AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers) englobe toutes ces expériences, réalisées à partir de trois satellites dont un procédera à des lâchers de nuages de baryum et de lithium à l'intérieur et à l'extérieur de la magnétosphère terrestre. Un des aspects les plus spectaculaires de cette mission sera sans conteste la création d'une « comète artificielle » à partir d'un lâcher de baryum, à 112.800 km d'altitude, en janvier 1985.

Un projet très ambitieux

Le 16 août 1984, une fusée américaine Delta a mis en orbite, depuis le centre spatial Kennedy, trois satellites scientifiques appartenant à trois pays différents : Etats-Unis, Grande-Bretagne et Allemagne de l'Ouest. Avec ce triple lancement, débute une nouvelle exploration des plasmas de l'espace entourant notre planète, caractérisée cette fois par des expériences actives au sein même de ces plasmas. Le projet scientifique sous-tendant ces expériences est en effet baptisé : « Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers Program » (AMPTE Program). Il a pour objet principal l'étude de l'accès des particules du vent solaire dans la magnétosphère terrestre et des mécanismes de transport et d'accélération des particules chargées des ceintures de Van Allen. En outre, les processus d'interaction entre plasmas d'origine différente seront également étudiés.

Pour atteindre ces objectifs, des nuages de baryum et de lithium seront lâchés à 112.800 km d'altitude, à différents endroits de l'espace, préalablement sélectionnés. Après photoionisation, ces nuages dériveront avec le plasma ambiant. En particulier, la détection ultérieure des ions Li^+ à une altitude inférieure à 51.000 km permettra alors

ABSTRACT

The AMPTE mission (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers) from the USA, West-Germany and the United Kingdom will give the opportunity to inject lithium and barium gases into the weak magnetic fields of the solar wind and of the magnetospheric tail at a height of 112,800 km. The slowly ionizing lithium particles will behave as individual ions which are picked up by the ambient plasma flow. These tracer elements will be detected and monitored both in situ and deep within the Earth's magnetosphere. The main objective of the resulting measurements is to provide information on the access of solar wind ions to the magnetosphere and on the convective-diffusive transport and energization of magnetospheric particles. A single massive release of barium in the dawn magnetosheath (i.e., at 6 hr. local time) in January 1985 will create an "artificial comet" in the flowing solar wind within which studies of interaction mechanisms with the ambient plasma will be made. The AMPTE program consists of three spacecraft that have been launched on August 16, 1984.

de déduire des informations concernant le cheminement et le chauffage du plasma magnétosphérique. Pour réaliser ce projet très ambitieux, trois satellites ont donc été mis en orbite elliptique autour de la Terre. Le premier, baptisé « Ion Release Module » (IRM), est ouest-allemand et pèse 690 kg. L'inclinaison orbitale, l'apogée et la période de ce satellite sont respectivement de $28^{\circ}5$, 18,7 rayons terrestres et 43,8 heures. C'est ce satellite qui réalisera les lâchers de lithium et de baryum. En effet, outre divers instruments de mesure, IRM est également équipé de huit réservoirs remplis de lithium et huit autres remplis de baryum. Le poids total des réservoirs contenant le lithium est de 52 kg, contre 108 kg pour ceux contenant le baryum. Le satellite « United Kingdom » (UKS), pesant 70 kg, possède exactement les mêmes caractéristiques orbitales qu'IRM. Ce satellite britannique suit donc le satellite ouest-

allemand sur son orbite, à une distance contrôlable de quelques centaines de kilomètres. IRM et UKS sont équipés d'instruments de mesure identiques. L'emploi de ces satellites couplés doit permettre une meilleure résolution spatiale des phénomènes de propagation des nuages de gaz artificiellement injectés dans le plasma ambiant. Enfin, un troisième satellite, de conception américaine, baptisé « Charge Composition Explorer » (CCE), est placé en orbite basse, d'apogée égale à 9 rayons terrestres. Sa période orbitale est de 16 heures et son inclinaison voisine de 0° . Son poids atteint 220 kg. C'est lui qui procédera à la détection et à l'analyse des ions Li^+ et Ba^+ dès que ceux-ci auront été capturés par les ceintures de Van Allen (dont l'intensité est maximale dans le plan équatorial, dictant par là le choix particulier de l'inclinaison orbitale de CCE).

La formation d'une « comète artificielle »

La projection équatoriale des orbites des trois satellites du projet AMPTE, dans un référentiel fixe par rapport à l'axe Terre-Soleil, est illustrée à la figure 1. On voit notamment que les orbites des satellites IRM et UKS vont précéder de $29^{\circ}9$ par mois. Ainsi, vers l'équinoxe d'automne, l'apogée de l'orbite du satellite IRM se trouvera dans le vent solaire, dans la direction du Soleil (comme l'indique la figure 1, vers septembre-octobre 1984, le temps local du satellite IRM, à son apogée, est voisin de 12 heures). C'est à cette période que ce satellite lâchera ses deux premiers nuages de lithium (sur la figure 1 : grands disques pointillés, à 12 heures). Quatre mois plus tard, en janvier 1985, le temps local d'IRM, à son apogée, sera proche de 6 heures et le satellite évoluera dans la magnétogaine, région de transition située entre la magnétopause (limite de la magnétosphère terrestre) et l'onde de choc (créée en amont de la magnétosphère par l'écoulement supersonique du vent solaire). Un réservoir de baryum sera alors lâché pour former une « comète

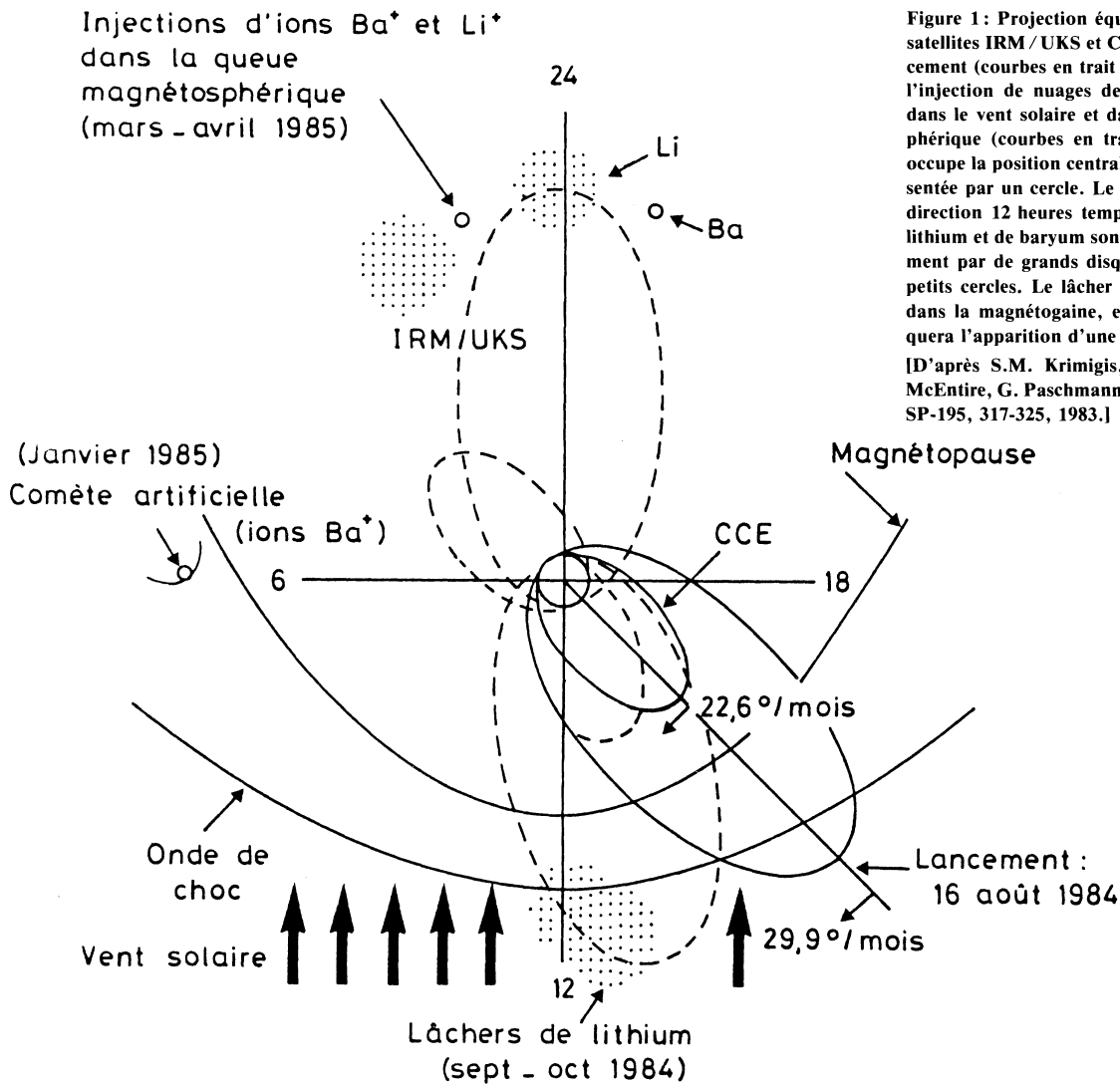


Figure 1: Projection équatoriale de l'orbite des satellites IRM/UKS et CCE, au moment du lancement (courbes en trait plein) et au moment de l'injection de nuages de lithium et de baryum dans le vent solaire et dans la queue magnétosphérique (courbes en trait pointillé). La Terre occupe la position centrale du dessin et est représentée par un cercle. Le Soleil se trouve dans la direction 12 heures temps local. Les lâchers de lithium et de baryum sont représentés respectivement par de grands disques pointillés et par de petits cercles. Le lâcher d'un nuage de baryum dans la magnétogaine, en janvier 1985, provoquera l'apparition d'une « comète artificielle ».

[D'après S.M. Krimigis, G. Haerendel, R.W. McEntire, G. Paschmann and D.A. Bryant, ESA SP-195, 317-325, 1983.]

artificielle» (*) dont la magnitude visuelle maximale devrait être de +2,4.

(*) Il ne s'agit pas ici à proprement parler de comètes artificielles comme celles que l'on envisage de lâcher dans l'espace afin de mieux comprendre la physico-chimie des comètes; ces conglomerats de glace devraient libérer, sous l'action du rayonnement solaire, les molécules gazeuses observées habituellement dans les comètes (CN, C₂, C₃, OH,...). Dans l'expérience AMPTE, la formation d'une cavité diamagnétique dans le vent solaire, à partir d'un nuage de baryum ionisé, constitue un mécanisme analogue à celui qui détermine l'interaction des gaz ionisés d'une comète avec un plasma cosmique. On assiste donc ici à une expérience de simulation d'une telle interaction. C'est dans ce sens que l'on doit comprendre le terme de « comète artificielle » utilisé dans le texte. Cette expérience AMPTE devrait faire progresser notre compréhension des mécanismes physiques liés à l'interaction des comètes avec leur milieu ambiant.

Le prochain lancement de plusieurs sondes spatiales en direction de la comète P/Halley qu'elles atteindront au début de 1986, devrait aussi conduire à une connaissance plus complète de la physique des comètes.

Données sur les 3 satellites

| | CCE | IRM | UKS |
|-------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Apogée | 9,0 R _⊙ | 18,7 R _⊙ | 18,7 R _⊙ |
| Période | 16,0 hrs | 43,8 hrs | 43,8 hrs |
| Inclinaison | < 5° | 28,5° | 28,5° |
| Masse | 220 kg | 690 kg | 70 kg |
| Lâchers | | 7 | |

Cette « comète artificielle » pourra donc être observée aisément à partir du sol, dans certaines régions du globe, principalement en Californie. Une estimation théorique prévoit que le diamètre de la « tête cométaire » sera proche de 150 km, ce qui correspond à une largeur angulaire un peu inférieure à 0,1°. Enfin, vers mars-avril 1985, les deux satellites couplés IRM et UKS navigueront de concert dans la queue magnétosphérique (dans la direction opposée au Soleil, vers 24 h de temps local) où d'autres lâchers de baryum (petits cercles sur la figure 1) et de lithium (grands disques pointillés sur la figure 1) sont prévus.

Le choix des éléments artificiellement injectés est déterminé par les objectifs de l'expérience

Chaque lâcher de gaz effectué par IRM produira environ 2×10^{25} atomes de Li ou 7×10^{24} atomes de Ba. Le largage des réservoirs de Ba/Li à partir du satellite est commandé par des opérations au sol. Dix minutes après ce largage, le baryum (ou le lithium) est vaporisé à partir d'une réaction de combustion avec l'oxyde de cuivre. Un réservoir de baryum, par exemple, contient en effet, outre des éclats de baryum, une fine poudre de CuO intimement mélangée au métal. Lorsque ce mélange est brusquement comprimé par l'action de charges explosives, la réaction de combustion peut s'amorcer $[(1+n) Ba + CuO \rightarrow BaO + Cu + n Ba(vapeur)]$. La chaleur dégagée par la réaction $Ba + CuO \rightarrow BaO + Cu$ est suffisante pour vaporiser l'excès de baryum ($n Ba$) et porter la vapeur à 2000°C. Le temps de réaction est très court, et en tout cas inférieur au temps

d'expulsion des atomes de Ba, qui est de l'ordre de 0,1 s. Ces atomes neutres de Ba s'échappent du réservoir avec une vitesse d'expansion voisine de 1 km/s (4,5 km/s pour les atomes de lithium).

Le *lithium* est employé essentiellement comme élément « traceur ». En effet, le milieu ambiant est peu perturbé par les effets diamagnétiques produits par les ions de lithium car cet élément chimique possède une constante de temps d'ionisation de l'ordre d'une heure. Ainsi, les atomes neutres de lithium peuvent occuper un volume important (de l'ordre de cinq rayons terrestres de diamètre) avant d'être ionisés, limitant ainsi la formation d'une cavité diamagnétique susceptible de modifier le champ magnétique local. De plus, comme la présence d'ions Li^+ est très rare dans la magnétosphère terrestre, on peut détecter facilement ces ions parmi les autres constituants d'origine naturelle. Après photoionisation par le rayonnement solaire ultraviolet, les particules de lithium vont se comporter individuellement. Dès qu'un ion est formé, il subit immédiatement l'influence des champs électrique et magnétique locaux. L'effet conjugué de ces deux champs est de lui imprimer un mouvement de dérive dont la composante transversale (par rapport au champ magnétique) est identique à celle de l'écoulement du plasma ambiant. Les ions Li^+ , formés dans le vent solaire lors des lâchers de septembre-octobre 1984, dériveront donc avec ce dernier. On estime que l'intensité des ions Li^+ au niveau de l'orbite du satellite CCE devrait être, par seconde, de 30 particules par cm^2 et par stéradian. Ce flux très faible impose donc une sensibilité et une résolution exceptionnelles aux instruments de mesure placés à bord de CCE.

Par contre, le *baryum* est utilisé pour l'étude de l'interaction entre deux types de plasma : d'une part, le plasma froid et dense injecté artificiellement, et d'autre part, le plasma ambiant, très dilué mais plus chaud. Dans ce cas, l'objectif de l'expérience est de réaliser une « comète artificielle » par la formation d'une cavité diamagnétique. C'est pourquoi, l'élément chimique qui sera injecté artificiellement doit posséder une constante de temps d'ionisation relativement courte. L'élément le plus approprié pour ce type d'expérience est bien le baryum dont la constante de temps d'ionisation est de l'ordre de 28 secondes. De plus, les atomes et les ions de baryum possèdent plusieurs raies d'émission dans le visible, ce qui n'est pas le cas du lithium. C'est pour-

quoi, il est possible de voir un nuage de baryum à l'œil nu, du moins lorsque le Soleil est juste en-dessous de l'horizon. Ainsi, dans le cas de la « comète artificielle » de janvier 1985, le nuage de baryum pourrait être visible, à partir du sol, pendant environ dix minutes avec une intensité initiale de 700 kR ($1 \text{ kr} = 10^3 \text{ Rayleigh}$, soit l'équivalent de 10^9 photons émis par seconde à l'intérieur d'une colonne de section égale à 1 cm^2 , centrée sur la direction d'observation). En fait, les ions Ba^+ finissent par diffuser au travers de la cavité diamagnétique et leur densité diminue, l'émission lumineuse s'affaiblit progressivement. Peu avant son extinction, la longueur apparente de la « queue cométaire » serait voisine de 10° .

Outre la détermination de la densité, de la composition et de la température du plasma, les différents instruments scientifiques placés à bord des satellites IRM et UKS permettront aussi la mesure de l'intensité et de l'orientation du champ magnétique, ainsi que la résolution spectrale des ondes émises par le plasma. Toutes ces données recueillies « in situ » seront alors utilisées pour étudier l'interaction du nuage de baryum avec le milieu ambiant.

L'analyse des données en temps réel déterminera les moments les plus propices des lâchers

La chronologie des lâchers illustrée à la figure 1 n'est qu'approximative. La date précise des lâchers de gaz sera conditionnée par les informations recueillies « in situ » par le satellite IRM. Par exemple, l'orientation du champ magnétique interplanétaire est un paramètre qui joue un rôle important dans l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre et il sera dès lors intéressant de pouvoir procéder à une série de lâchers correspondant chacun à une valeur déterminée de ce paramètre. Afin de pouvoir suivre de façon continue l'évolution de tels paramètres, la transmission des données recueillies par les satellites AMPTE se fera donc en temps réel, au moins durant les quelques jours qui précéderont et qui suivront la date d'un lâcher de gaz. Ces données, recueillies au sol, seront réduites et analysées très rapidement, en moins d'une heure, de sorte que les expérimentateurs (52 scientifiques de quatre pays différents : USA, Allemagne de l'Ouest, Grande-Bretagne et Suisse) pourront prendre une décision rapide concernant l'éventualité d'un lâcher supplémentaire. De

plus, les données transmises par le satellite ISEE 3 (**), en orbite dans le vent solaire, en amont de la Terre, seront également très utiles pour la reconnaissance des conditions les plus favorables aux lâchers (par exemple, un changement d'orientation du champ magnétique interplanétaire). En effet, le délai entre le passage d'une perturbation du vent solaire au niveau d'ISEE 3 et son arrivée au voisinage de l'orbite d'IRM est d'au moins une heure. Ce délai doit fournir un temps de réflexion suffisant permettant de prendre une décision concernant un éventuel lâcher.

Un test important pour les modèles théoriques

Le programme AMPTE réalisera pour la première fois des expériences actives dans un plasma cosmique, à très haute altitude. Il fera ainsi progresser notre connaissance des plasmas de l'espace et contribuera à élargir notre compréhension des processus fondamentaux régissant l'interaction entre plasmas de nature différente. Il servira aussi de test aux modèles théoriques existants, utilisés pour décrire certains des mécanismes physiques qui seront étudiés au cours de cette mission. Nul doute que ces modèles devront être plus ou moins révisés à la lumière des résultats expérimentaux et que d'autres modèles verront le jour pour tenter d'expliquer de nouveaux processus, imprévisibles à ce jour, mais que révèle invariablement toute expérience spatiale d'une envergure comparable à celle du projet AMPTE. ■

(**) Le satellite ISEE 3 (International Sun-Earth Explorer), lancé le 12 août 1978, fut d'abord placé en orbite de halo autour d'un des points de Lagrange, situé à 235 rayons terrestres de la Terre, sur l'axe Terre-Soleil, là où les forces d'attraction de la Terre, de la Lune et du Soleil s'équilibrent. De cette position, il était le complément idéal des satellites ISEE 1 et ISEE 2 (Ciel et Terre, 95, n° 1, 39-43, 1979) qu'il informait des perturbations du vent solaire, en amont de la Terre. Le 23 mai 1982, les Américains manœuvrèrent ce satellite qui quitta ainsi sa position de veilleur pour être transféré dans la queue magnétosphérique où il effectua une série d'orbites compliquées qui l'amènèrent, le 22 décembre 1983, à environ 100 km de la surface lunaire. Par réaction de gravitation avec la Lune, ISEE 3 s'arracha alors du champ de pesanteur terrestre pour se placer sur une orbite solaire de rendez-vous avec la comète P/Giacobini-Zinner, qu'il devrait rencontrer le 11 septembre 1985. ISEE 3 sera alors rebaptisé ICE (International Cometary Explorer).