



**PHILIPPE JAMET**

**Ayant fonctionné de novembre 1995 à mai 1998, le satellite européen ISO a révolutionné l'astronomie en infrarouge. En effet, le satellite européen a malmené nos modèles aussi bien en ce qui concerne la naissance et la mort des étoiles, les disques protoplanétaires que l'origine de l'eau cosmique. Il a également amélioré de façon considérable notre connaissance des galaxies lointaines et notre compréhension du phénomène de « fond diffus infrarouge ». Cet article, sans vouloir être exhaustif, tente de dresser un bilan.**

# ISO bouleverse nos connaissances en astrophysique

**D**écouverte en 1975, en infrarouge, dans la constellation de la Licorne, la formation dite du « Rectangle Rouge » apparaît au premier abord comme une « nébuleuse planétaire » classique, c'est-à-dire une coquille de gaz et de poussières en expansion au cœur de laquelle se situe une étoile responsable d'un flux continu de transfert de matières vers l'espace. La coquille entoure en général une étoile « géante rouge », stade par lequel passent, au cours de leur évolution, les étoiles de type solaire. Par la suite, celle-ci se contracte en « naine blanche », petite étoile à la matière dégénérée, dont la taille ne dépasse pas celle d'une planète tellurique.

Dans le cas du Rectangle Rouge, la situation est un peu plus complexe car, ici, nous avons affaire à un système binaire comprenant une étoile AGB, dénommée HD 44179, autour de laquelle orbite certainement une petite étoile, non détectable en lumière visible, et qui joue un rôle en ce qui concerne la répartition dans l'espace de la matière éjectée par l'étoile centrale. Les étoiles AGB (Asymptotic Giant Branch), particulièrement étudiées par le satellite IRAS (230 sources observées) et le satellite européen ISO (Infrared Satellite Observatory), se caractérisent par une expansion d'enveloppes très

étendues dénommées en langage astrophysique « CSE ». Ces dernières sont des enveloppes de poussières circumstellaires souvent très riches en carbone et extrêmement froides, ce qui semble être la résultante d'un processus d'éjection de matière à la fois continu et très ancien.

De nombreux astrophysiciens, comme Roger Ferlet à l'Institut d'astrophysique de Paris, attendaient beaucoup d'ISO et en particulier pour tout ce qui concerne les étoiles AGB. Le moins que l'on puisse dire, c'est qu'ils n'ont pas été déçus ! En effet, le spectromètre SWS d'ISO a découvert à l'intérieur de notre fameux Rectangle Rouge un anneau de matière correspondant à la formation de protoplanètes !

Aussi étonnant que cela puisse paraître, il faut dorénavant nous habituer à l'idée selon laquelle des planètes peuvent se former non seulement autour d'étoiles jeunes, mais aussi autour de vieilles étoiles mourantes, dans des zones où des quantités importantes de matière, éjectées par celles-ci, favorisent de nouveaux processus d'accrétion. Cette éventualité n'avait pas du tout été prévue par les modèles théoriques et il en est de même d'ailleurs pour les planètes détectées autour de pulsars comme PSR 1257. Ceux-ci sont des étoiles à neutrons en contraction et en vive rotation sur

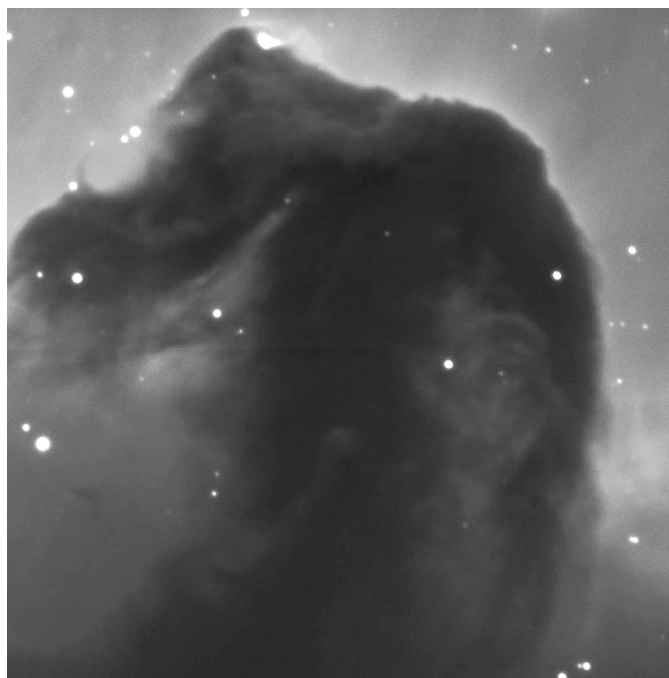
elles-mêmes, généralement issues d'étoiles de grande taille en fin de vie et ayant explosé en supernovae.

Le cas du Rectangle Rouge est un bon exemple des nombreuses découvertes effectuées par ISO. Celles-ci s'accompagnent parfois de la remise en cause de modèles que l'on croyait durs comme du roc... Comme le déclare Roger-Maurice Bonnet, directeur des programmes scientifiques de l'Esa : « *ISO a révolutionné l'astronomie en infrarouge. Il nous a fourni de précieux renseignements sur certaines zones froides et invisibles de l'Univers et sur les origines de l'eau et d'autres matières premières sans lesquelles nous n'existerions pas.* »

## Des découvertes tous azimuts

Faire un bilan exhaustif des découvertes d'ISO est un exercice difficile à cause de la masse de données qui ont déjà fait l'objet de plusieurs numéros spéciaux de revues comme *Astronomy and Astrophysics*, *Nature* ou *Astrophysical Journal Letters*. Ces données ont également assuré du travail pour plusieurs années à la communauté scientifique internationale, en attendant le lancement en 2001 du satellite infrarouge américain SIRTF, et plus encore, celui du satellite infrarouge et submillimétrique européen First en 2007. Ce dernier, sur lequel reposent des attentes considérables des astrophysiciens, sera lancé par une fusée Ariane 5 en même temps que le satellite de cosmologie Planck. Placé, comme Planck, sur une orbite stable à 1,5 million de kilomètres de la Terre, First sera équipé d'un miroir de 3,5 m d'ouverture et devra fournir des informations à ses instruments additifs pendant six ans, soit plus du double qu'ISO.

Le secret de la réussite d'ISO et du bon fonctionnement de ses instruments (caméra Isocam, photopolarimètre Isophot, spectromètres SWS et LWS) tenait avant tout à la présence d'un cryostat emportant 2 100 litres d'hélium superfluide à  $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ , température qui n'est pas très éloignée du zéro absolu. Ce réfrigérant était indispensable pour réduire à néant le rayonnement



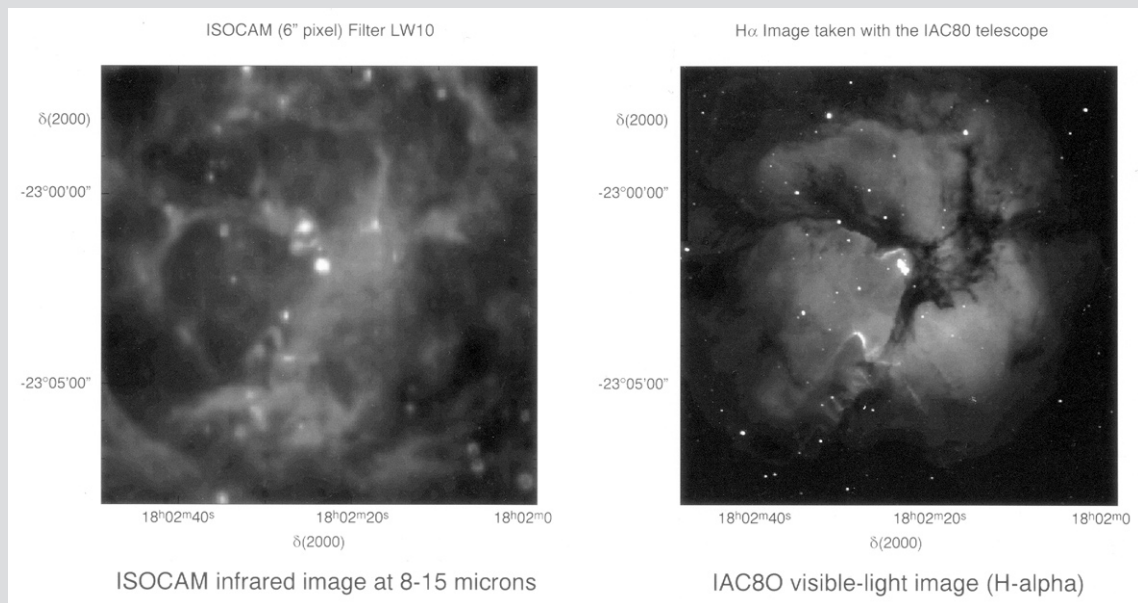
**La fameuse nébuleuse Tête de Cheval. Au départ, le programme d'ISO ne la prévoyait pas comme site d'étude.**

infrarouge propre au télescope et à ses instruments, en refroidissant ceux-ci à très basse température. En prolongeant la durée de vie du satellite à vingt-huit mois contre dix-huit prévus (de novembre 1995 à mai 1998), ISO a pu effectuer 26 000 observations contre 16 000 prévues au départ. Les deux facteurs imprévus qui expliquent cette durée de vie d'ISO plus longue sont les suivants :

- lorsque le satellite était en cours d'intégration avec son lanceur sur son pas de tir à Kourou, et alors qu'il commençait déjà à consommer des réserves d'hélium, les responsables européens décidèrent de refaire le plein avant lancement ;
- la consommation d'hélium superfluide dans l'espace, assurant la basse température des instruments, s'est révélée inférieure de 30 %.

Ces deux facteurs ont bien sûr eu des conséquences plutôt heureuses sur les programmes d'observation. On a pu ainsi rectifier un choix un peu incompréhensible : celui de ne pas avoir, dès le départ, sélectionné comme site d'étude par ISO les célèbres amas de poussières et d'étoiles d'Orion, et notamment leurs célèbres composantes IC434 (« Tête de Cheval ») et NGC 2024 situées à 1 500 années-lumière de notre système solaire, malgré la masse et la richesse des poussières de ces nébuleuses ainsi que leur taux élevé de formation d'étoiles. En octobre 1997, une sensationnelle

découverte concernant précisément cet endroit nous faisait oublier cette « négligence » du départ. Lors d'un article paru en avril 1998 dans la revue *Astrophysical Journal Letters*, les astrophysiciens M. Harwit, D. Neufeld, G. Melnick et M. Kaufman, « chercheurs invités » sur ISO, annonçaient avoir mis en évidence, dans un nuage d'Orion, l'existence d'une *concentration énorme de vapeur d'eau* d'un facteur vingt fois plus important que tout ce qui avait été détecté auparavant ! Selon les auteurs de l'article, rejoignant en cela l'opinion de l'astrophysicien français Jacques Crovisier qui estime que ce phénomène s'effectuerait sous certains paramètres physiques à  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cette formation de vapeur d'eau serait essentiellement due à des *ondes de choc* créées par des étoiles en formation. Celles-ci, en expulsant des jets de gaz et des poussières à grande vitesse, propageraient des atomes d'oxygène (créés au sein de ces étoiles par fusion thermonucléaire) vers les nuages de poussières et de gaz qui les entourent, d'où des phénomènes de collision et de rencontre de cet oxygène avec l'hydrogène moléculaire de ces nuages. L'eau ainsi formée coexisterait à la fois sous forme de glace et de vapeur. Selon Harwit, les ondes de choc en question contribuent aussi bien à la formation des étoiles qu'elles en résultent et, selon son collègue Neufeld, le nuage détecté dans Orion produirait cha-



**La nébuleuse Trifide NGC 6514, un lieu de naissance pour étoiles avec vue en infrarouge et en visible. Etudiée par Isocam sur la plage 8-15  $\mu$ , la nébuleuse Trifide est un conglomérat d'hydrogène ionisé et de poussières : celles-ci divisent la nébuleuse en trois parties. En infrarouge, on y détecte de jeunes étoiles en formation au sein de leurs nuages de poussières et de molécules.**

que jour une quantité de molécules d'eau équivalente à soixante fois celle contenue dans l'ensemble des océans terrestres ! Toujours selon le même astrophysicien, la plus grande partie de l'eau présente dans le système solaire pourrait également avoir été produite par un tel phénomène d'ondes de choc. Outre la Terre, on sait depuis longtemps que l'eau existe sous forme de glace au niveau des pôles de Mars (où elle partage cet honneur avec de la glace carbonique dite « carboglace »), sur certains satellites de Jupiter comme Europa et dans les comètes. Il est intéressant de noter que ce mécanisme de formation de vapeur d'eau dans l'espace avait été prévu par Michael Kaufman, un des auteurs de l'article d'*Astrophysical Journal Letters* et aujourd'hui chercheur au centre Ames de la Nasa, lors de sa thèse de doctorat.

Cette vapeur d'eau, également détectée ailleurs par d'autres équipes ayant travaillé sur ISO, jouerait un rôle *inattendu en ce qui concerne la naissance des étoiles*. Celles-ci se forment par l'effondrement gravitationnel d'un nuage de molécules et de poussières en contraction et en passant par le stade de proto-étoiles. Lorsqu'une étoile est en train de se former, la chaleur des

parties centrales du nuage est telle qu'elle devient un handicap : c'est là qu'intervient le rôle de la vapeur d'eau, laquelle, en rayonnant intensément dans l'infrarouge, contribue à refroidir le gaz de la nébuleuse protostellaire et permet ainsi de faciliter la formation de l'étoile en *éliminant la chaleur en excès*. Cette découverte, effectuée principalement avec le spectromètre LWS par l'équipe de l'astrophysicien néerlandais Ewine Van Dishoek, est l'une des plus marquantes faites en physique stellaire au cours de ces dernières années.

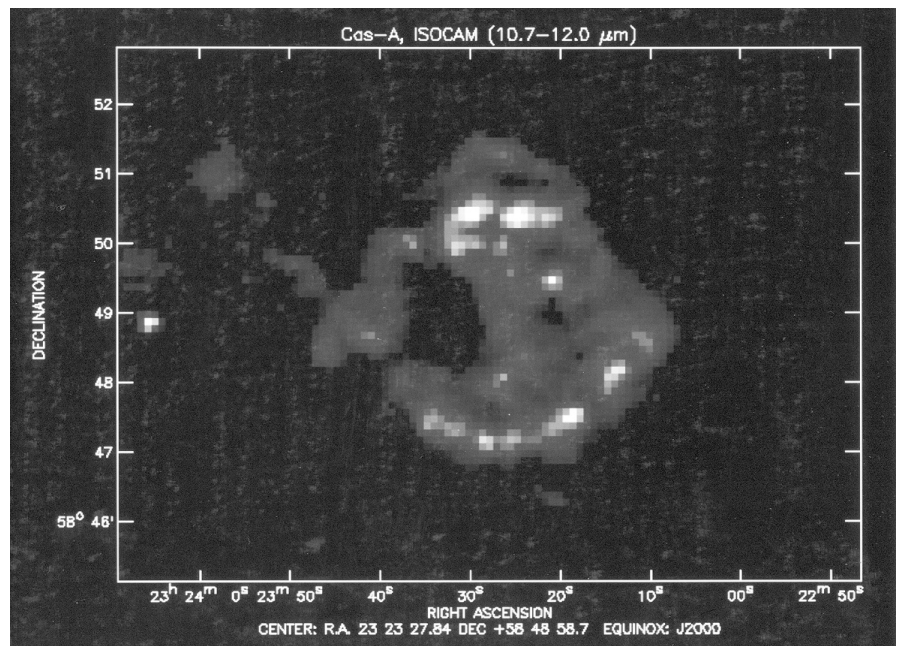
Les découvertes d'Harwit, Neufeld et Van Dishoek, utilisant ISO, ne révèlent pas des phénomènes isolés et l'*omniprésence de l'eau* semble être confirmée par les résultats obtenus. Certaines observations, effectuées cette fois-ci avec le spectromètre à ondes courtes SWS, ont montré que l'eau était présente non seulement à proximité d'étoiles jeunes et de proto-étoiles (cas de l'objet GL 2591 et de celui situé au cœur du nuage NGC 7538) mais également autour d'étoiles en fin de vie, et cela, dans ce dernier cas, grâce à des phénomènes d'écoulement précédant les ondes de choc. ISO a aussi trouvé de l'eau (sous forme de glace) dans les nuages de poussières interstellaires où elle participe à la

formation de composés plus complexes, et sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Jupiter. Cette planète, étudiée par ISO sur les longueurs d'onde de 2,2 microns ( $\mu$ ), 3,3  $\mu$ , 7,7  $\mu$ , et 11,6  $\mu$ , apparaît totalement différente en infrarouge de son image visible. Un des résultats qui donne le plus d'espoirs aux planétologues vient de la découverte par ISO, en décembre 1997, avec le spectromètre SWS opérant sur les longueurs d'onde de 39  $\mu$  et 44  $\mu$ , de quantités importantes de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Titan, le plus gros satellite de Saturne, en plus du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone. Titan est souvent comparé, du fait des composés complexes qui ont été détectés dans son atmosphère, à une « Terre primitive » en dépit de sa température très basse estimée à  $-178$  °C, ce qui constituerait en principe un obstacle à la vie. En 2004, la sonde européenne Huygens détachée de son module porteur Cassini se posera sur Titan et nous permettra peut-être de lever certains de ses mystères. Pour élaborer des hypothèses hardies concernant ce qui peut se passer à sa surface, on ne peut manquer de se référer aux travaux effectués en Union soviétique dans les années 1983-1984

par l'équipe de Vitali Goldanskii. Ceux-ci ont montré la possibilité de la formation de molécules très complexes, *a priori* « interdites » par les conditions régnant dans les nuages moléculaires, par le biais d'un effet physique dit « effet tunnel ». Goldanskii, qui reste très prudent sur les théories encore plus osées de Fred Hoyle et Wickramasinghe, envisage toutefois la possibilité que la vie ait pu apparaître et évoluer dans des environnements très froids.

ISO, bien évidemment, n'était pas équipé pour pouvoir répondre à de telles questions mais ses découvertes contribuent à conforter l'idée selon laquelle *la vie ne serait pas un phénomène exceptionnel* dans l'Univers : l'eau et les ingrédients nécessaires y existent à foison ! Il nous manque certes l'essentiel : les connaissances pour expliquer le passage de l'inanimé au vivant.

Parmi les connaissances acquises grâce à ISO, et nous permettant entre autres de spéculer positivement sur l'existence désormais certaine de milliers de disques protoplanétaires et planétaires autour d'autres étoiles, nous n'avons que l'embarras du choix. On trouve en effet dans l'espace des matériaux et des phénomènes correspondant à ce qui existe dans le système solaire : on a trouvé, par exemple et avec le photomètre Isophot, d'importantes quantités de glace carbonique et de glace de méthane venant en importance juste après la glace d'eau dans la nébuleuse planétaire NGC 6302. Ces types de glaces, connues au niveau des parties externes de notre système solaire, sont habituellement dites « exotiques ». Autre découverte faite par ISO, avec le spectromètre SWS, celle de cristaux d'olivine riches en magnésium sur les longueurs d'onde de 20  $\mu$ , 24  $\mu$  et 34  $\mu$  autour de jeunes étoiles comme HD 100546 située près de la Croix du Sud à 500 années-lumière de notre système solaire. Fait intéressant à signaler, cette jeune étoile semble être le siège de bombardements intenses de comètes et d'astéroïdes et il en est de même d'autres étoiles comme Bêta Pictoris (phénomène découvert par le satellite IRAS), HR-10 et HD 169296. Tout ceci rappelle beaucoup la situation qui prévalait dans notre système solaire lorsqu'il n'était âgé que de 300 à 400 millions d'années. Selon l'astrophysicien bel-



**Située à 11 000 années-lumière de notre système solaire, cette nébuleuse Cassiopee A (étudiée sur la plage 11-12  $\mu$ ) est le résultat de l'explosion d'une étoile massive en supernova. Ces supernovae fabriquent en leur sein les éléments les plus lourds de l'Univers (comme l'or et l'uranium) et les rejettent dans l'espace. Quelques centaines de millions d'années plus tard, ces éléments sont récupérés lors de la formation de nouvelles étoiles. Pierre-Olivier Lagage (CEA) souligne toutefois la nécessité de refroidissement des éléments éjectés avant qu'ils contribuent à un nouvel apport de poussières interstellaires.**

ge Christoffel Waelken, c'est à partir d'un nuage cométaire de ce type que se serait créé le Soleil et son cortège de planètes, même si, dans la réalité, la situation prédominant lors de la naissance de celui-ci était plus complexe comme semble le montrer la composition isotopique de certaines météorites. Plusieurs ancêtres stellaires distincts ont contribué, par un apport de matières et par des ondes de choc, à enrichir et à accélérer l'effondrement sur lui-même, par gravitation, du nuage de poussières et de molécules auquel nous devons notre existence. Les éléments lourds ont été probablement produits par des supernovae proches et ont été expulsés dans la nébuleuse primitive qui constituait ce qui deviendra notre étoile et ses planètes. Ultérieurement, et dans sa course sans fin et sinusoïdale par rapport au plan galactique, notre Soleil se serait éloigné des géniteurs des débris qu'il aurait récupéré : ceci explique pourquoi l'étoile la plus proche de nous se trouve déjà à 4 années-lumière.

ISO, utilisant la caméra française

Isocam, a également découvert des composés aromatiques polycycliques (HAP) dans deux nébuleuses de la région d'Orion dénommées NGC 2068 et NGC 2071. Cette découverte ne doit pas nous étonner car l'existence de ces composés complexes est connue au sein de nuages interstellaires depuis le début des années 90.

Plus étonnante nous apparaît la détection, par l'équipe espagnole de Pedro Garcia-Lario utilisant les spectromètres SWS et LWS, d'un mystérieux composé carboné autour d'une douzaine d'étoiles : l'émission mise en évidence ressemble à s'y tromper à une émission du même type détectée autour de l'étoile Iras 16594 4656, étoile très froide et riche en carbone. Parmi les hypothèses retenues sur ce mystérieux composé figure en bonne place le diamant. Certains travaux, effectués en « astrophysique de laboratoire » à l'IAS d'Orsay par l'équipe de Louis D'Hendecourt sur des échantillons de météorites contenant précisément de minuscules diamants, semblent

donner corps à cette hypothèse : les spectres sont identiques !

Autour de jeunes et de vieilles étoiles, ISO a aussi découvert des silicates, de l'oxyde de silicium (dont on sait qu'il joue un rôle dans le processus de formation des planètes), des composés carbonés (« *ressemblant à de la suie* », selon l'Esa, et qui apparaissent également dans le spectre de certaines comètes), et encore de l'olivine (détectée en émission sur 33  $\mu$ ) dans des nuages de poussières entourant de vieilles étoiles en phase terminale. Une forme particulière d'olivine, dénommée « forstérite cristalline », apparaît en émission (sur 11,3  $\mu$ , 16,5  $\mu$ , 19,8  $\mu$ , 24  $\mu$ , 27,6  $\mu$ , et 33,9  $\mu$ ) aussi bien dans le spectre de certaines comètes, comme Hale-Bopp, que dans le spectre des poussières entourant certaines étoiles comme HD 100546. Comme le déclare Jacques Crovisier : « *ISO détecte les mêmes matières dans la comète Hale-Bopp que dans les nuages entourant les étoiles.* » L'objet d'étude des comètes est d'une extrême importance car celles-ci sont, à juste titre, considérées comme des « témoins fossiles » des premiers âges du système solaire et qui n'ont pas participé au processus d'accrétion qui devait donner naissance aux planètes. Ce fut une grande chance pour ISO d'être en état de fonctionnement lorsque cette grosse comète Hale-Bopp (noyau de 40 km) se rapprocha du Soleil à son périhélie en avril 1997, même si le satellite a plus consolidé que révolutionné notre savoir en la matière. Outre Hale-Bopp, ISO a également observé les comètes Schwassmann-Wachmann-1, Chiron, Kopf, Iras-1 et Wirtanen que visera l'Esa avec sa sonde Rosetta. Très impliqué sur les observations ISO, l'astrophysicien néerlandais Thijs de Graauw a souligné toutefois un fait étonnant qui ne doit laisser planer aucun doute quant à nos origines : Hale-Bopp, comète extrêmement poussiéreuse, semble être constituée de *matériaux similaires* à ceux que l'on rencontre dans les disques de poussières de certaines étoiles. Une autre conclusion considère également que le phénomène cométaire, déjà mis en évidence autour de plusieurs étoiles, doit être la *règle* plutôt que l'exception. L'astrophysicien allemand Lemke, investigateur principal sur Isophot,

a souligné que les spectres de différentes glaces cométaires observées sur Hale-Bopp, s'évaporant les unes après les autres au fur et à mesure que la comète s'approchait du Soleil, avaient des signatures différentes entre elles mais globalement totalement identiques à certaines que l'on trouve dans les disques de poussières et de molécules situées autour de nombreuses étoiles.

Curieusement ISO, pourtant mieux équipé en la matière, a détecté moins de nouvelles comètes que le satellite solaire Soho « arrimé » au Point de Lagrange L-1. En effet, ce dernier a détecté plus de cent comètes, dont certaines étaient sur des trajectoires de collision avec le Soleil, et les a étudiées avec son conographe Lasco. Les comètes ont joué probablement un rôle dans l'apparition de la vie sur Terre en apportant des matériaux organiques et, selon l'astrophysicien belge Armand Delsemme, 95 % des eaux de nos océans terrestres auraient été apportés par ces comètes. Le schéma de formation d'eau par ondes de choc dans la nébuleuse primitive, captation et conservation de celle-ci par les comètes, puis transmission aux planètes lors d'impacts, apparaît renforcé à la lueur des résultats d'ISO.

## De la réalité des systèmes protoplanétaires et planétaires

La mission ISO, qui a détecté un certain nombre de disques de poussières autour de certaines étoiles et effectué de nombreuses observations sur des disques déjà détectés par IRAS (cas des étoiles Fomalhaut, Epsilon Eridani, Vega et des « Vega Light »), nous a aussi apporté un grand nombre d'informations sur le cycle de mort et de naissance des étoiles. Ces dernières apparaissent bien sûr au sein de nuages moléculaires et de poussières, mais une part des éléments qui vont les constituer ont déjà été produits par une génération d'étoiles antérieures. Dans l'Univers, tout se crée mais rien ne se perd...

La mort d'une étoile entraîne la dispersion, à travers l'espace inters-

tellaire, de matériaux chimiquement enrichis qui, en se concentrant à nouveau, entrent en contact avec d'autres nuages de poussières et de molécules interstellaires. La coalescence de ces matériaux et les ondes de choc qui les accompagnent jouent sur les forces de gravitation, l'effet de taille et de masse de ces nuages compensant l'effet de densité. En effet, dans ceux-ci, la densité d'atomes et de molécules est très inférieure à ce que l'on rencontre dans une atmosphère planétaire mais ces nuages sont énormes et gigantesques : ils peuvent s'étendre sur des distances allant de 200 à 300 années-lumière ! Tout ceci contribue à donner naissance à de nouvelles étoiles et disques de poussières, à des comètes et à des planétésimaux dont certains évolueront vers la formation de protoplanètes puis de planètes selon le processus d'accrétion. Il n'est pas exagéré de dire que l'analyse de la composition chimique des gaz et des poussières évoluant au voisinage d'étoiles de formation ancienne ou nouvelle et dans le sillage des comètes, et dont les éléments ont été recensés au moyen de leur signature dans l'infrarouge, constitue la *contribution majeure* d'ISO.

ISO a montré que les disques de poussières autour des étoiles jeunes de masse égale ou supérieure à celle du Soleil étaient courants mais, selon l'astrophysicien néerlandais Harm Habing, cette situation ne constitue pas une règle absolue. D'autre part, de nombreux YSO (Young Stellar Objects), dont deux des grands spécialistes sont le Français Jean-Pierre Maillard et le Canadien George Mitchell, ont été découverts grâce à leur signature infrarouge. Ces objets, dont la taille dépasse les 5 masses solaires, sont situés au cœur de nuages épais et sombres qui bloquent la plus grande partie de leur rayonnement visible. Celui-ci se situe parfois au-delà des limites d'un instrument comme le télescope spatial Hubble d'où l'intérêt des recherches en infrarouge. ISO a permis la mise en évidence de plusieurs dizaines de ces objets, ceux-ci s'ajoutant à ceux découverts par IRAS. Grâce à la caméra Isocam, d'autres étoiles du même type et de types différents ont été découvertes au sein de la fameuse nébuleuse « Tête de Cheval » et au sein de deux

nébuleuses qui lui sont proches (NGC 2023 et NGC 2024). L'observation donne des résultats très différents des clichés spectaculaires pris en visible car, en infrarouge, la Tête de Cheval semble « s'effacer » par rapport aux nébuleuses de gaz et de poussières situées derrière elle. Là encore ISO, observant ces jeunes étoiles, a montré que la quasi-totalité d'entre elles étaient entourées d'un disque de poussières et de débris, ce qui est la condition indispensable à la formation de planètes. Depuis 1995, date de la découverte d'une grosse planète gazeuse autour de 51 Pegasus par les astrophysiciens Mayor et Queloz, les mises en évidence de l'existence de planètes de type Jupiter autour d'étoiles proches se sont multipliées. Citons parmi les lieux de découvertes, par le biais de méthodes « indirectes », une étoile très ordinaire de la Constellation du Cancer, l'étoile 70 Virginis, 47 Ursis Majoris (par les astrophysiciens Marcy et Butler), la planète TMR-1C découverte orbitant autour d'un système binaire par Susan Tereby, l'étoile Upsilon située à 43 années-lumière de notre système solaire, l'étoile Rho Coronae Borealis et, ce

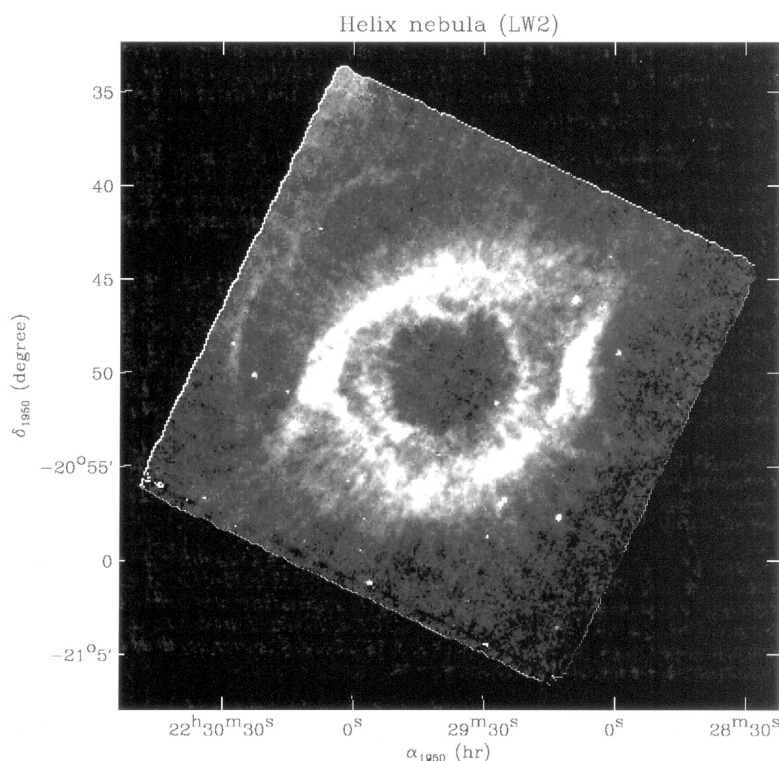
qui est plus étonnant, un certain nombre de pulsars. Tout récemment, et de façon très spectaculaire, est venue s'ajouter à la liste des exoplanètes une planète géante gazeuse dont l'ombre a été photographiée, en déplacement sur le disque de l'étoile HD 209458, par les astrophysiciens américains Greg Henry et Geoffrey Marcy.

Nous devons aussi mentionner l'intérêt qu'il faut porter aux travaux de l'équipe néerlandaise d'Harm Habing (université de Leyden) qui a utilisé ISO pour observer un échantillon de population stellaire constitué de quatre-vingt-quatre étoiles plus ou moins jeunes mais plus jeunes que le Soleil : le moins que l'on puisse dire est que les résultats sont étonnants et encourageants ! En effet, l'équipe néerlandaise a trouvé des disques de poussières autour des quinze étoiles les plus jeunes de l'échantillon. Pour ce qui concerne l'échantillon des soixante-neuf étoiles plus âgées que les précédentes, le disque n'apparaît pas, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y a rien autour... La comparaison avec notre système solaire est tentante et si, dans ce cas, le disque de poussières n'apparaît pas

pour ces soixante-neuf étoiles ayant dépassé l'âge de plusieurs centaines de millions d'années, c'est peut-être parce que leur disque d'origine s'est transformé en planétésimaux et en cométésimaux participant au processus d'accrétion. Harm Habing, rejoint en cela par l'astrophysicien américain Jack Lissauer auteur d'une théorie similaire pour Bêta Pictoris, pense que, pour cet échantillon d'étoiles, *le disque planétaire est déjà formé !*

Pour les quinze autres étoiles plus jeunes, leur situation correspondrait à ce qui s'est passé pour le jeune système solaire à âge comparable, à savoir une période intense de bombardements cométaires et d'astéroïdes caractéristique d'une époque dite de « nettoyage ». Pour le système solaire, la preuve d'un tel processus nous est donnée par l'analyse des roches et l'étude des cratères lunaires. Le calcul de l'âge des roches lunaires ramenées lors du programme Apollo montre que ces phénomènes se sont déroulés alors que le Soleil était âgé de 300 à 400 millions d'années... ce qui correspond à l'âge moyen des quinze étoiles à disques de poussières de

ISOCAM: 7 microns



**La nébuleuse Helix Nebula est l'un des objets les plus spectaculaires de notre galaxie. Grâce à la caméra Isocam (7  $\mu$ ), l'image infrarouge a permis d'observer au cœur de la nébuleuse une étoile de type naine blanche entourée de gaz et d'une petite quantité de grains de poussières. L'astrophysicien Pierre Cox (IAS Orsay) pense que la majeure partie de ces grains ont été détruits par le rayonnement ultraviolet intense qui a été émis dans le passé par l'étoile, avant de devenir une naine blanche.**

l'échantillon de Habing !

D'autres objets protostellaires, et pas encore protoplanétaires, sont entourés d'enveloppes de poussières tellement froides (environ  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) qu'ils sont presque indétectables dans les longueurs d'onde infrarouge courtes ou moyennes. C'est le cas, par exemple, de plusieurs objets (comme la proto-étoile L 1689B) qui ont été observés en ondes radio submillimétriques par l'équipe de Derek Ward-Thompson, de l'observatoire d'Edimbourg, et par le photomètre Isophot opérant sur la plage infrarouge de  $2,5\text{ }\mu\text{m}$  à  $20\text{ }\mu\text{m}$ . ISO, malgré sa technologie supérieure à IRAS et sa grande sensibilité, ne pouvait opérer au-delà de  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Toutefois, certaines recherches qui lui étaient interdites, sur les objets « ultrafroids », ne le seront pas pour First : celui-ci pourra détecter plus facilement des objets comme L 1689B en infrarouge lointain, grâce à ses systèmes révolutionnaires d'imagerie et de spectroscopie, et en submillimétrique grâce à son récepteur hétérodyne multifréquences.

## ISO et la macroastronomie

Le satellite européen ne s'est pas contenté de bouleverser nos idées sur la naissance et la mort des étoiles, les disques protoplanétaires ou l'origine de l'eau cosmique : il a considérablement amélioré notre connaissance des galaxies lointaines et notre compréhension du phénomène de « fond diffus infrarouge » qui, comme c'est le cas du « fond diffus de rayonnement X », semble baigner tout l'Univers. Sur le plan galactique ISO, par exemple, nous a apporté une meilleure connaissance des galaxies dites « à faible brillance de surface » et des collisions galactiques. Celles-ci créent des vents cosmiques d'une puissance exceptionnelle et notre propre galaxie, d'après des travaux récents, serait d'ailleurs elle-même issue de plusieurs collisions de galaxies plus petites. En infrarouge apparaissent particulièrement, à cause de leur éclat inhabituel, les zones d'intersection des collisions qui se caractérisent par des phénomènes massifs de création de nouvelles

étoiles dites « flambées stellaires ». ISO a, entre autres, étudié la célèbre galaxie poussiéreuse Centaurus A (NGC 5128), située à une distance de 15 millions d'années-lumière de notre système solaire, et qui est la résultante d'un phénomène d'interpénétration entre une galaxie elliptique et une galaxie irrégulière discoïde. Aussi étudiées par ISO, les galaxies des Antennes (NGC 4038 et NGC 4039) situées à 48 millions d'années-lumière semblent tout aussi curieuses. Leur collision a créé ce que l'astrophysicienne Jacqueline Mitton dénomme des « serpents d'étoiles recourbés ». Ceux-ci ont une longueur de 100 000 années-lumière, soit la taille de notre galaxie vue dans sa plus grande longueur !

Pour ce qui concerne les galaxies lointaines qui nous envoient l'image qu'elles présentaient il y a huit ou dix milliards d'années, et donc l'image de galaxies jeunes, ISO a découvert que leur taux de formation d'étoiles était trois fois supérieur à ce qui était prévu par la théorie et qu'elles étaient extrêmement poussiéreuses. ISO, utilisant la caméra Isocam, a pu observer des galaxies lointaines et faiblement lumineuses en effectuant des sondages profonds par les trous Nord et Sud de notre galaxie. Ceci a permis des observations de qualité sans être trop gêné par le phénomène d'extinction sélective de la lumière dû à des nuages de poussières qui créent problème aux astrophysiciens et aux modèles cosmologiques lorsque l'on regarde notre galaxie par la tranche.

Les équipes de Catherine Cesarsky (responsable principal Isocam) et de M.R. Robinson ont effectué un long travail de routine en superposant images ISO et images Hubble, ce qui leur a permis de découvrir des structures galactiques très éloignées ayant l'image de galaxies jeunes à la fois spirales et elliptiques. Le fait que ces structures soient faiblement lumineuses, sur les ondes infrarouges courtes et moyennes, offre bien sûr des opportunités pour une observation de celles-ci par First à partir de 2007. Tout aussi importantes nous paraissent les découvertes effectuées, avec Isophot, par l'équipe de J.L. Puget, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, sur vingt-quatre galaxies éloignées dont les populations de ce type, caractérisées par des flux intenses

de formation d'étoiles, pourraient expliquer une part du fond diffus de rayonnement infrarouge. Selon J.-L. Puget, « ces objets ne constituent que la partie visible de l'iceberg et la contribution la plus importante à ce fond diffus provient de sources encore plus faibles et plus éloignées que nous n'avons pas encore découvert ». Les astrophysiciens considèrent que ces sources lointaines voient une grande partie de leurs émissions converties en ondes submillimétriques, ce qui explique leurs grosses attentes sur First.

Équipé comme il l'était, ISO devait naturellement effectuer des études à caractère cosmologique même si les futurs satellites First et surtout Planck seront beaucoup mieux équipés que lui pour le faire. Le spectromètre SWS, avec les équipes de Chris Wright (Australie) et Ewine Van Dishoek (Pays-Bas), a effectué des mesures d'abondance de deutérium qui est habituellement considéré comme un élément constitutif primordial des premiers âges de l'Univers. Conclusion des astrophysiciens : la masse de ce deutérium (auquel il faudrait sans doute ajouter toute la matière visible et la matière noire...) ne suffit pas pour déclencher à l'avenir ce que les astrophysiciens appellent « Big Crunch », c'est-à-dire l'effondrement de l'Univers sur lui-même.

En attendant l'arrivée de First, les astrophysiciens devront se contenter de travailler sur les données ISO et aussi sur celles apportées par SIRTIF (Space Infrared Telescope Facility) qui devrait être lancé fin 2001 par une fusée Delta. Ce télescope américain, qui aura un miroir de  $85\text{ cm}$  et opérera sur la bande  $3\text{ }\mu\text{m}$  à  $180\text{ }\mu\text{m}$ , a vu sans cesse sa conception et ses performances remises en question de même que la date de son lancement. Il n'est pas sûr qu'il fasse beaucoup mieux qu'ISO malgré son miroir plus grand et une intégration d'innovations technologiques plus récentes que pour le satellite européen. Le temps d'observation qu'il permettra devrait être, en partie, offert à la communauté astrophysique internationale et notamment européenne : cela constituerait un juste retour des choses car l'Esa, lors du programme ISO, avait accordé 60 % du temps d'utilisation du satellite à des équipes de pays non membres de l'Esa. ■

# First : encore plus fort qu'ISO !

PHILIPPE JAMET

**Opérant en infrarouge et en submillimétrique, First, sur lequel travaille actuellement l'Agence spatiale européenne, sera lancé en 2007 en même temps que le satellite de cosmologie Planck. First, sur lequel reposent des attentes considérables des astrophysiciens, sera placé, comme Planck, sur une orbite stable à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Il sera équipé d'un miroir de 3,5 m d'ouverture et devra fournir des informations à ses instruments additifs pendant six ans, soit plus du double qu'ISO.**

**P**révu pour être lancé en 2007 par une fusée Ariane 5, en même temps que le satellite de cosmologie Planck, First (« Far Infrared and Submillimeter Telescope »), la nouvelle merveille technologique européenne, recoupe en grande partie certains domaines de recherche qui étaient aussi ceux d'ISO, avec toutefois deux différences fondamentales :

- à cause de ses capacités étendues en infrarouge lointain et en submillimétrique, First, qui opérera sur 85  $\mu$  à 900  $\mu$ , peut étudier les mêmes objets sur des plages de longueurs d'onde inaccessibles à ISO, lequel était limité aux bandes allant de 2,5  $\mu$  à 200  $\mu$  ;

- certains de ses objectifs sont plus « cosmologiques » puisque First s'intéressera plus particulièrement aux galaxies les plus éloignées, au-delà de l'Univers visible, et dont une grande partie du rayonnement a été convertie en ondes submillimétriques. Ces galaxies nous renvoient d'elles-mêmes les images qui les caractérisaient il y a plus de dix milliards d'années : elles se révèlent extrêmement riches en poussières et possèdent un fort taux de formation d'étoiles. ISO a découvert que celui-ci était trois fois supérieur à ce qui était prévu par les modèles.

La supériorité de First par rapport à ISO s'affirmera dans deux domaines : l'étude des nuages de molécules et de poussières interstellaires et celle des proto-étoiles. Une des découvertes les plus surprenantes de l'astrophysique moderne, grâce à l'astronomie infrarouge et à la radioastronomie, a été l'incroyable richesse et l'inattendue complexité de la chimie cosmique : les processus qui caractérisent celle-ci se déroulent en grande partie dans des nuages ultrafroids qui ne pouvaient

être étudiés que partiellement par ISO. En effet, dans ces nuages où la température moyenne est extrêmement basse (-250 à -260 °C), les atomes et les molécules émettent fortement mais surtout sur des longueurs d'onde de plusieurs centaines de microns allant bien au-delà des 200  $\mu$  qui constituaient déjà une limite pour ISO. La composition structurale de ces nuages peut toutefois évoluer rapidement, et émettre sur des ondes infrarouges plus « dures » et plus accessibles, lorsque se forment en leur sein des « hétérogénéités » et que les poussières vont se trouver dans un milieu progressivement plus chaud pouvant être de type protostellaire.

Pour ce qui concerne les proto-étoiles, qui sont situées dans un environnement très froid dans les premiers stades de leur formation, First sera bien plus adapté à leur étude qu'ISO car les nuages qui les entourent bloquent le rayonnement visible et ne laissent passer que les ondes radio et les émissions dans l'infrarouge lointain. First observera bien évidemment des objets comme la proto-étoile L1689B (détectée par le photomètre Isophot à la limite de ses possibilités) et des objets de plus grande taille (plus de 5 masses solaires) comme GL2591 ou W3IRS-5. Ces deux dernières sont des « YSO », caractérisés en général par un fort écoulement de matière souvent bipolaire, et dont le grand spécialiste est l'astrophysicien français Jean-Pierre Maillard. Tous ces objets sont entourés de poussières à température tellement basse (-260 °C) qu'ils sont presque indétectables dans les longueurs d'ondes infrarouges courtes et moyennes auxquelles pouvait accéder ISO. First devrait renforcer nos connaissances sur les modèles de formation protostellaire



pour lesquels ISO a déjà déblayé le terrain. Le satellite européen dans l'infrarouge a en effet découvert, à la surprise générale, que les proto-étoiles n'étaient pas toutes automatiquement en rotation sur elles-mêmes et que le modèle de l'effondrement sur eux-mêmes de nuages protostellaires, par contraction gravitationnelle, pouvait comporter plusieurs variantes.

Un des objectifs de First consistera également à traquer l'eau depuis l'étape de sa formation par ondes de choc autour des étoiles ou dans le milieu interstellaire jusqu'à son intégration, sous forme de glace, dans des nuages très froids qui rayonnent de façon intense sur la bande de longueur du submillimétrique. La glace d'eau est en effet l'un des constituants des poussières interstellaires et possède la capacité de s'assembler avec celles-ci en grains durs et solides qui contiennent aussi des éléments chimiques lourds formés par nucléosynthèse à l'intérieur d'étoiles comme les supernovae. Ces éléments, au nombre de six, sont l'oxygène, le carbone, l'azote, le magnésium, le silicium et le fer. Des travaux de simulation des conditions dans lesquelles se forment, évoluent et émettent ces grains ont été réalisés à l'université de Leyden par des chercheurs comme Mayo Greenberg, Allamandola et Baas.

First a également pour objet de vérifier la théorie de l'astrophysicien Armand Delsemme selon laquelle 95 % de l'eau contenue dans les océans et les fleuves terrestres serait d'origine cométaire. Pour ce faire, et en complément des missions cométaires de l'Esa Giotto et Rosetta, First effectuera des études moléculaires sur les émissions de glace d'eau venue des comètes en approche ou en trajectoire de collision avec le Soleil. Sur son orbite stable, à 1,5 million de kilomètres de la Terre, First sera en effet en position idéale pour observer ces comètes et pourra utiliser certaines données étonnantes fournies par le satellite d'observation du Soleil Soho.

Au niveau du système solaire, les comètes ne seront pas les seules à être visées par First puisque la planète Mars figure aussi parmi ses objectifs : le satellite européen étudiera les minces traces de vapeur d'eau de l'atmosphère martienne afin de tenter d'élaborer un modèle météo.



**First sera lancé en même temps que le satellite Planck en 2007. La supériorité de First par rapport à ISO s'affirmera dans deux domaines : l'étude des nuages de molécules et de poussières interstellaires et celle des proto-étoiles.**

L'étude de quelques curiosités astrophysiques par First pourrait entraîner certains bouleversements, notamment en cosmologie. Nous pensons, par exemple, à la possibilité de détection de nuages d'hydrogène intergalactiques comme celui découvert en 1989, en émission radio à 21 cm, par les astrophysiciens américains Haynes et Giovanelli. Il s'agit peut-être, selon certains spécialistes, de protogalaxies.

Une autre curiosité, qui nous intéresse particulièrement, pourrait venir de la détection, dans l'espace intergalactique, d'hydrogène gazeux aux alentours de 15 K, d'hélium liquide aux alentours de 2 K et d'hydrogène solide à fort taux d'orthohydrogène aux alentours de 1 K. Cette thèse intéressante, qui pourrait répondre à certaines interrogations comme la « masse manquante », a été développée par Didier Cornuet ingénieur au CERN et qui a notamment collaboré avec Mario Cosentino, auteur de la théorie cosmologique de la RMM. Celle-ci apparaît en effet tout à fait compatible avec les hypothèses de Cornuet.

L'instrumentation de First est à la mesure des hautes ambitions des concepteurs de ce satellite. First, comme ISO, a bénéficié de la stratégie habile de l'Esa consistant à ne pas trop figer le concept dès le début afin de pouvoir bénéficier des derniers acquis technologiques. Le premier instrument, dénommé HIFI-MFH, est un récepteur hété-

rodyne qui opérera sur les bandes allant de 270 à 600 microns et pourra enregistrer des spectres à haute résolution d'objets astronomiques dans des milliers de fréquences simultanément. Le deuxième instrument, PACS, à la fois caméra infrarouge et spectromètre, travaillera sur les bandes de 85  $\mu$  à 300  $\mu$ . Le troisième instrument, SPIRE, qui opérera de 200 à 900 microns, comprend un spectromètre et une caméra française (construite par le Service d'astrophysique du CEA) faisant appel à la technique des minibolomètres imaginée par le Laboratoire d'électronique de technologie et d'instrumentation (LETI) de Grenoble. Un bolomètre est une sorte de thermomètre ultrasensible composé d'une plaque de détection captant le rayonnement infrarouge. L'énergie de celui-ci, lorsqu'elle heurte la plaque, se transforme en chaleur et l'augmentation de celle-ci, même faible du fait que les ondes étudiées par First sont relativement longues et donc à fréquence et à énergie peu élevées, est suffisante pour modifier la résistance des matériaux utilisés comme microbolomètres : c'est cette variation qui permet la saisie et la mesure de la quantité d'énergie reçue. Tout comme pour ISO, les instruments de First sont maintenus à basse température par de l'hélium superfluide à  $-271$  °C. Selon les spécialistes, jamais des instruments d'un tel niveau n'ont été embarqués sur un satellite. ■