

# ISO va révolutionner l'astronomie en infrarouge



*Lancé en 1983, le satellite infrarouge IRAS avait bouleversé nos connaissances en mettant notamment en évidence, autour d'étoiles proches, des disques de poussières qui pourraient être protoplanétaires. Plus de douze ans après, le satellite européen ISO, équipé de détecteurs encore plus performants et opérant sur une plage infrarouge plus large, pourrait bien nous révéler l'existence d'objets « froids » et « sombres »...*

Philippe Jamet

**R**eportons-nous une quinzaine d'années en arrière : la bataille fait rage au sein de l'Agence spatiale européenne en ce qui concerne le choix définitif de ce qui est appelé à l'époque le « futur grand satellite scientifique européen ». Si les idées ne manquent pas au sein de la Division des programmes scientifiques de l'ESA, l'augmentation considérable du poids financier de l'utilisation des technologies spatiales au service de la recherche astronomique implique parfois des choix douloureux : le budget ne bénéficiant pas d'un accroissement considérable d'une année sur l'autre, toutes les demandes ne peuvent, hélas, être satisfaites !

Ce n'est qu'après de sévères tests de sélection quant à son intérêt scientifique que le programme ISO (Infrared Satellite Observatory) fut adopté par le Conseil de l'Agence et ce, au détriment d'autres projets (Magellan, Kepler, X-80, Disco et Polo) ayant pourtant également d'incontestables justifications scientifiques. Curieusement, le programme de développement du satellite ISO fut lancé quelques mois seulement après qu'ait été mis en orbite, à partir de la base américaine de Vandenberg (25 janvier 1983), un autre satellite infrarouge dénommé IRAS (Infrared Astronomical Satellite). Ce dernier était le résultat d'une coopération internationale entre la NASA, les Anglais du SERC (Rutherford Appleton Laboratory) et les Néerlandais de l'Institut de recherche spatiale NIRV qui disposaient sur ce satellite d'un spectromètre et de deux photomètres.

## D'IRAS à ISO : un bond fantastique

L'évolution des programmes d'astrophysique spatiale, et ce sur toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique, se caractérise par une succession de satellites technologiquement toujours plus performants et bardés de capteurs dont toutes les composantes, à chaque stade, constituent une forme de césure par rapport à la génération précédente. En fonction des nouvelles connais-

ances acquises ainsi, on peut mettre en œuvre de nouveaux objectifs de recherche et de détection. Le passage d'IRAS à ISO est un exemple tout à fait caractéristique de ce type de processus. Il existe toutefois une continuité du fait de l'objet même d'étude et que les données obtenues et les systèmes cartographiques réalisés à partir du satellite international de 1983 constituent une des bases essentielles sur lesquelles ont été établis les objectifs de recherche du satellite européen. Comme le souligne Roger Ferlet, chercheur à l'Institut d'Astrophysique de Paris et spécialiste, entre autres, de la recherche des disques protoplanétaires :

*« Nous travaillons toujours avec les données d'IRAS et nous attendons avec impatience l'étape des premières investigations d'ISO qui devrait être opérationnel fin novembre, début décembre ».*

Cette fébrilité, doublée d'un enthousiasme rafraîchissant et tonique, on la retrouve également à Saclay, au Service d'Astrophysique, dont l'assistante, Catherine Césarsky, fut une des principales inspiratrices d'ISO. Notre satellite embarque une caméra extraordinaire, dénommée ISOCAM, fonctionnant sur deux modes opératoires, précisément conçue dans ce laboratoire. Mêmes sentiments et mêmes motivations au MPI (Institut d'Astronomie Max Planck) d'Heidelberg où l'équipe du professeur Lemke fut responsable du photopolarimètre embarqué ISOPHOT, même climat d'espoirs et d'appréhensions chez les équipes du Laboratoire de recherche spatiale de Groningen et du Queen Mary College de Londres, responsables respectivement des deux spectromètres « courtes longueurs d'onde » (SWS) et « grandes longueurs d'onde » (LWS), et dont certains chercheurs ont été par le passé également investigateurs sur IRAS. On retrouve d'ailleurs les mêmes attentes et la même tension chez les ingénieurs d'Aérospatiale (maître d'œuvre du projet) et des treize principales sociétés aérospatiales européennes impliquées dans la construction d'ISO.

Chacun, en effet, peut revendiquer avec fierté une part de légitimité pour sa participation à ce grand pro-

gramme scientifique européen et, d'une façon générale, les attentes scientifiques sont énormes. Si IRAS pouvait être considéré comme une sorte de « vasistas » entrouvert sur l'univers infrarouge, ISO ferait alors penser à une véritable « baie » dont les montants, équipés de tentacules palpeurs invisibles et rétractiles, plongent pratiquement au cœur même de l'objet de recherche et d'observation, et parfois à des dizaines de milliers, voire de millions, d'années-lumière de notre Terre ! Contrairement aux apparences, l'univers n'obéit pas seulement aux lois d'une forme d'architecture plus ou moins organisée, révélée par les grands télescopes dans le rayonnement visible, ni seulement à la violence des phénomènes éruptifs catastrophiques, révélés sur les plages « Gamma », « X » et « UV » du spectre électromagnétique.

En astronomie infrarouge, l'augmentation du diamètre du télescope au-delà d'une certaine ouverture n'est plus le facteur fondamental, comme le prouve la comparaison entre les deux structures de base refroidies (miroir primaire) alimentant en images les autres instruments installés sur les deux satellites : 60 cm dans les deux cas ! Ici, les problèmes essentiels consistent avant tout à augmenter la sensibilité des détecteurs (pour mettre en évidence des objets de petite taille faiblement émetteurs ou très lointains) et à élargir la capacité de ceux-ci à l'ensemble du spectre infrarouge. Ce spectre est très vaste puisqu'il part d'environ 300 microns (où il est en interface avec les ondes millimétriques) pour les ondes les plus longues, pour terminer à 0,8 microns (à la limite de la composante la plus rouge du rayonnement visible). Sur ce plan, ISO constitue déjà un bond par rapport à IRAS grâce à la révolution technique effectuée dans ce domaine depuis une dizaine d'années. Les détecteurs infrarouges d'IRAS (environ une mosaïque de soixante), placés dans le plan focal du télescope, sont plus que largement dépassés en gain de sensibilité par ceux d'ISO. De ce point de vue, les scientifiques de l'ESA ont eu l'habileté de ne pas figer définitivement le concept dès sa mise en œuvre, afin de pouvoir bénéficier des acquis technologiques en

cours, d'où un gain de sensibilité estimé d'un facteur de 1000 par rapport au satellite international de la génération précédente. Le système de détection d'ISO est aux couples thermoélectriques, aux photocathodes et plaques photo-infrarouge des années 60 ce que l'actuel TGV est aux locomotives à vapeur d'avant-guerre...

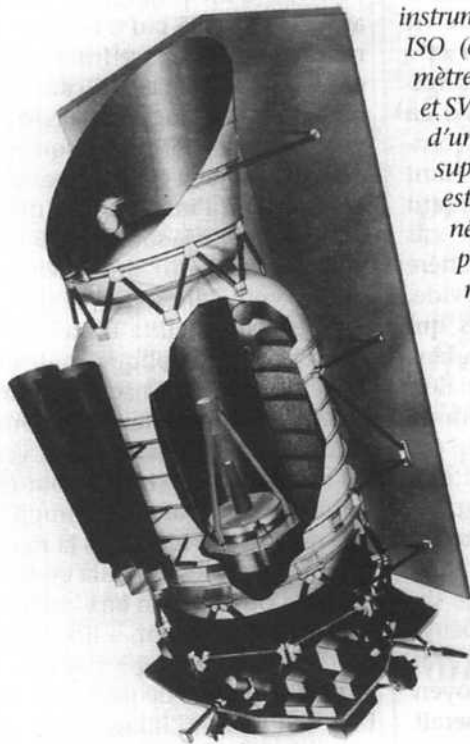
Les capacités de détection supérieures d'ISO expliquent en partie l'augmentation de la charge utile scientifique et du poids total de l'ensemble (2400 kg de masse au lancement contre 1050 kg à IRAS). Elles lui permettront d'explorer la réalité de nombreux objets astrophysiques émettant en infrarouge sur une *large bande* se situant de 2,5 à 200 microns. De son côté, le satellite américano-anglo-néerlandais ne pouvait opérer que sur les bandes infrarouges aux alentours de 10, 25, 60 et 100 microns. Même si IRAS a considérablement amélioré nos connaissances dans ce domaine — plus de 250.000 sources célestes infrarouges ont été répertoriées ! — il a souvent eu l'occasion de montrer ses *limites* dans

certains types d'études requises par les astrophysiciens effectuant des recherches sur l'évolution stellaire et galactique. Il existe, par exemple, des galaxies dont certaines caractéristiques constituent des « anomalies » par rapport aux galaxies répertoriées du même type et pour lesquelles IRAS a mené un programme d'investigation prometteur. C'est le cas notamment de la galaxie Markarian 52 (NGC 4385) qui, comme ses consœurs du même type, rayonne très fortement dans l'ultraviolet et au sein de laquelle ont été observés de nombreux phénomènes d'explosion stellaire ainsi que de violents « starburst » (flambée massive d'étoiles) dans les domaines UV et optique. Avant l'observation de cette galaxie par IRAS, personne ne soupçonnait l'importance des nuages de poussières et de gaz qui y étaient cachés, même si des phénomènes d'ionisation des gaz y avaient été relevés à cause de la présence d'étoiles relativement massives de type spectral O et B rayonnant massivement en ultraviolet, d'où un « excès d'UV » détecté dans cette galaxie. Or, surprise révélée par IRAS, Markarian 52 rayonne de façon inattendue

(et non détectable à partir de la Terre), et *encore plus qu'en UV sur le spectre infrarouge « lointain »*, mais sur une gamme de longueur d'onde (12 microns) à la limite des possibilités du satellite international dont les performances décroissaient lorsqu'on s'écartait trop des 10 microns dans cette zone de l'infrarouge.

Les astrophysiciens interprètent ces données comme la preuve de l'excitation, par les étoiles O et B de la galaxie en question, d'immenses nuages de poussières d'une taille peu ordinaire pour lesquels deux types de composants ont été enregistrés avec des températures respectives de 35°K et 150°K. Le problème vient du fait que les possibilités d'IRAS n'ont pas permis pour l'instant d'identifier avec certitude ce que sont ces composants... d'où l'intérêt d'ISO dont trois des instruments (la caméra ISOCAM, le photopolarimètre ISOPHOT, le spectromètre à courtes longueurs d'onde SWS, opérant respectivement sur les plages infrarouges 3/17 microns, 3/200 microns et 3/45 microns) pourront être pointés sur Markarian 52. Il suffit de consulter la banque de données « IRAS-Data Base » pour trouver des centaines de cas d'objets et phénomènes controversés à propos desquels les résultats obtenus par ISO seront très attendus.

Un autre avantage offert par ISO par rapport à IRAS vient de l'orbite choisie qui permettra au satellite européen de disposer d'un plus grand temps d'observation et ce sans que ses mesures soient faussées par le rayonnement infrarouge propre des poussières (invisibles optiquement) qui pullulent dans l'environnement terrestre. Ce phénomène avait affecté IRAS (dont nombre de mesures avaient dû subir de rigoureux calculs de correction), à cause de son orbite circulaire héliosynchrone à 900 km parcourue quatorze fois en vingt-quatre heures, ce qui pourtant offrait de réelles possibilités de scruter pratiquement toute la voûte céleste. En ce qui concerne ISO, le problème de la perturbation par des particules circumterrestres n'influera que sur une part très courte de son parcours, puisque les scientifiques de l'ESA ont choisi une orbite de 70.000/1000 km par-



*Le secret du bon fonctionnement des instruments scientifiques embarqués par ISO (caméra ISOCAM, photopolarimètre ISOPHOT, spectromètres LWS et SWS) tient avant tout à la présence d'un cryostat contenant de l'hélium superfluide à -217°C. Ce réfrigérant est indispensable pour réduire à néant le rayonnement infrarouge propre au télescope et à ses instruments, afin de ne pas fausser les mesures, effectuées sur ce type de longueur d'onde, des objets observés..*

courue en vingt-quatre heures, alors qu'au départ était prévue une orbite 39.000/1000 km décrite en douze heures. Ainsi, il sera possible d'allonger le temps consacré aux observations astronomiques car, plus encore pour un satellite infrarouge que pour tout autre type de satellite astronomique, le temps d'observation est compté par la *durée de vie* du satellite, laquelle est relativement *réduite* à cause de la nécessité de refroidir en permanence les instruments (qui émettent eux aussi naturellement un rayonnement infrarouge) afin de ne pas parasiter et noyer un rayonnement infrarouge naturel que seuls des capteurs à très haute sensibilité peuvent « sortir » !

Le fait qu'ISO puisse opérer pendant dix-huit mois — IRAS fonctionna effectivement pendant douze mois — s'explique seulement par la présence d'un système réfrigérant de plus grande taille nécessaire au traitement d'une charge utile scientifique plus importante. Le secret de cette « durée de vie » tient à l'hélium superfluide à  $-271^{\circ}\text{C}$ , lequel, circulant dans une enceinte fermée, tend (grâce à ses propriétés de viscosité et de qualités dites de « mouillage ») à se déposer en films ultra-minces sur les surfaces qu'il rencontre. Pour des satellites infrarouge comme IRAS et ISO, à partir du moment où les instruments scientifiques sont en situation de parfaite étanchéité, l'avantage de placer ceux-ci dans le plan focal du télescope et au sein d'un cryostat où circule l'hélium est double :

- l'hélium superfluide réduit quasiment à néant, en maintenant les parois internes du cryostat à  $10^{\circ}\text{K}$ , le rayonnement infrarouge propre de ses instruments, ce qui évite de perturber les mesures des objets infrarouges observés ;

- la présence de l'hélium et les basses températures ambiantes ne perturbent en rien le fonctionnement des instruments qui disposent d'une électronique spécialement conçue pour fonctionner dans ces conditions.

L'avantage de l'orbite choisie pour ISO par rapport à IRAS n'est plus à prouver mais cette orbite apporte

également comme contrainte le fait que le satellite européen est beaucoup plus exposé au Soleil qu'IRAS qui effectuait chaque jour une précession quotidienne de  $1^{\circ}$  de son plan orbital pour être protégé en permanence du rayonnement solaire : en conséquence, ISO, pour éviter une augmentation de la température de ses instruments, est protégé du Soleil par une sorte de cache en forme de dièdre. Toutefois, les caractéristiques de ce type de recherches impliquant des contraintes architecturales similaires, IRAS et ISO se ressemblent comme deux frères chevaliers du ciel.

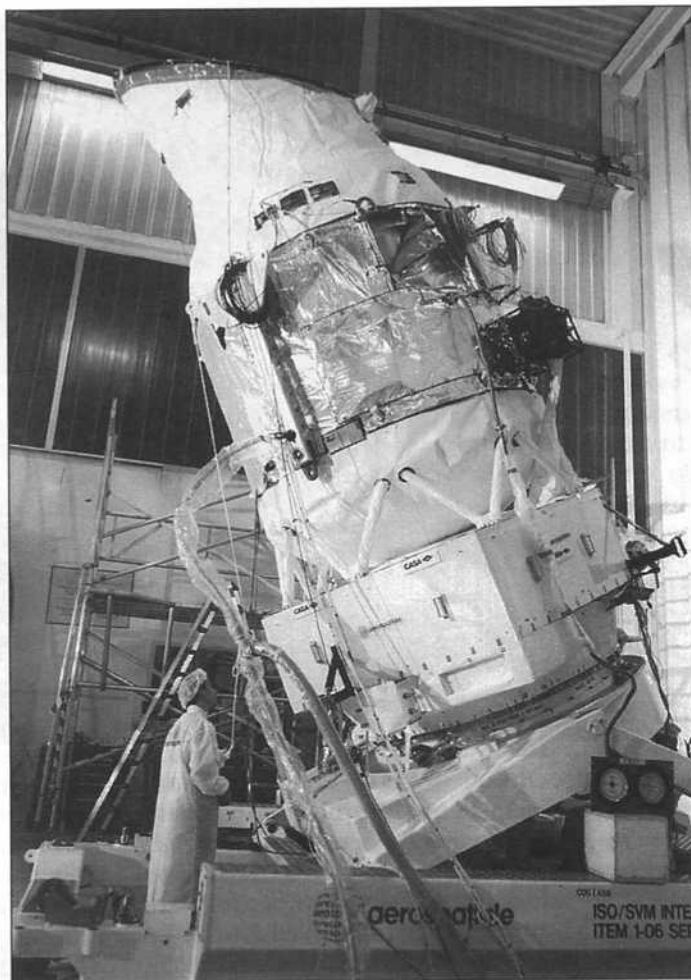
Le coût de mise en œuvre d'un satellite infrarouge placé sur orbite terrestre — ISO a coûté un peu plus de 1,3 milliards de francs à l'ESA — se révèle proportionnellement plus élevé, à poids de charge utile égale, qu'un satellite opérant sur d'autres longueurs d'onde ou un satellite d'astrométrie. Dans ce coût, il faut bien sûr tenir compte de l'intégration sur le satellite de l'enceinte cryostat contenant l'hélium superfluide destiné à maintenir les instruments à la température la plus basse possible et, aussi, des systèmes mis en place pour *ralentir* l'évaporation inévitable de celui-ci : c'est ce phénomène incontournable qui limite la durée de vie du satellite en rendant, au fur et à mesure de la dissipation du réfrigérant, les instruments de moins en moins opératoires. De ce fait, la construction d'un système permettant d'effectuer des recherches pendant dix-huit mois, comme c'est le cas d'ISO, relève de prouesses en matière de cryotechnie et de maîtrise du vide. D'où l'appel à des spécialistes qui n'opèrent pas habituellement dans le domaine des techniques spatiales. Il n'est pas question, en effet, comme on peut le faire pour une sonde cométaire (cas de Giotto), ou un satellite de télécommunications expérimental (cas d'Olympus), de mettre un satellite infrarouge en « veilleuse » pour le remettre en marche six mois plus tard car une telle pause correspond à autant de temps d'évaporation de l'hélium. Le seul moyen pour contourner ce problème, serait d'installer des télescopes infrarouges sur la face cachée de la Lune et d'alimenter en permanence leur cryostat

en le branchant sur un circuit de distribution d'hélium superfluide pour leur garantir une durée d'utilisation pratiquement indéfinie, interrompue seulement de temps à autre par des nécessités de maintenance ou de réparation. On y pense beaucoup, notamment à la NASA, et une solution pour rentabiliser l'opération consisterait, par exemple, à brancher une batterie de télescopes infrarouges de troisième génération sur un circuit réfrigérant alimentant également une installation de traitement d'aciers austénitiques (hyperrésistants et peu corrodables), qui pourraient être utilisés comme architecture de base de grandes stations spatiales ou pour la construction, en orbite lunaire, de grands vaisseaux à propulsion nucléaire pour des missions martiennes ou d'extraction des ressources des astéroïdes. Il serait alors possible de financer des activités scientifiques d'une *toute autre envergure* sur une base économique liée à l'extension massive des activités de l'*homme* hors de sa biosphère ! Jacques Blamont n'y a certainement pas pensé !

Normalement, au cours des prochaines années, ISO aurait dû rencontrer un concurrent sérieux avec l'arrivée d'un prodigieux télescope américain de 85 cm d'ouverture dénommé SIRT (Space Infrared Telescope Facility) mais, à cause de la réduction du budget de la NASA prévu de façon continue jusqu'en l'an 2000, le projet a été « repoussé dans le temps » à l'image de ce qui s'est déjà passé pour la sonde CRAF prévue pour analyser « in situ » des échantillons cométaires. De ce fait, ISO reste le seul satellite infrarouge disponible, ce qui explique que le Comité des programmes scientifiques de l'ESA ait été littéralement submergé de demandes d'observations venues du monde entier. L'ESA, tout en réservant aux laboratoires impliqués-ISO de ses pays membres la majorité des programmes majeurs et 40% du temps d'observation aux chercheurs du Vieux Continent, a libéralement octroyé 60% du temps d'observation à des chercheurs de pays non membres de l'ESA. A l'image de ce qui se passe dans le domaine de la radioastronomie, et notamment de la radioastronomie millimétrique, il exis-

te une grande solidarité entre les spécialistes mondiaux de l'astronomie infrarouge et, d'ailleurs, il faut reconnaître qu'Américains, Anglais et Néerlandais ont mis aussi, sans restriction, les données obtenues par IRAS à la disposition de la communauté scientifique internationale.

Pourquoi cet engouement pour la plage infrarouge du spectre électromagnétique ? A cela une raison essentielle : tous les astres (galaxies, étoiles, planètes, comètes, astéroïdes, nuages de molécules et de poussières interstellaires) rayonnent dans l'infrarouge à divers degrés mais, ce domaine de longueurs d'onde étant particulièrement riche, certains processus importants qui caractérisent l'univers émettent *principalement* ou même parfois *uniquement* dans cet infrarouge ! On pense particulièrement à ces milliards d'étoiles naines, dont la masse de départ n'a pas été suffisamment importante pour démarrer un processus de nucléosynthèse, et qui sont dites « naines brunes ». Ces petites étoiles ratées constituent probablement une partie de la fameuse « matière noire » de l'univers. Il n'est d'ailleurs pas impensable que d'autres composantes de cette matière noire, cachée parfois au cœur même des galaxies, et qui n'ont que peu d'interactions avec la matière ordinaire, émettent sur des parties du spectre infrarouge détectables seulement à partir de l'espace. Cette hypothèse a été émise pour la première fois en 1984 par l'astrophysicien néerlandais Valentijn à la suite d'observations galactiques effectuées par IRAS sur des échantillons significatifs de galaxies spirales. Ces observations intriguent les spécialistes car le rayonnement infrarouge « lointain » détecté ne correspond pas du tout aux modèles plus ou moins reconnus de répartition des diverses composantes du spectre électromagnétique pour

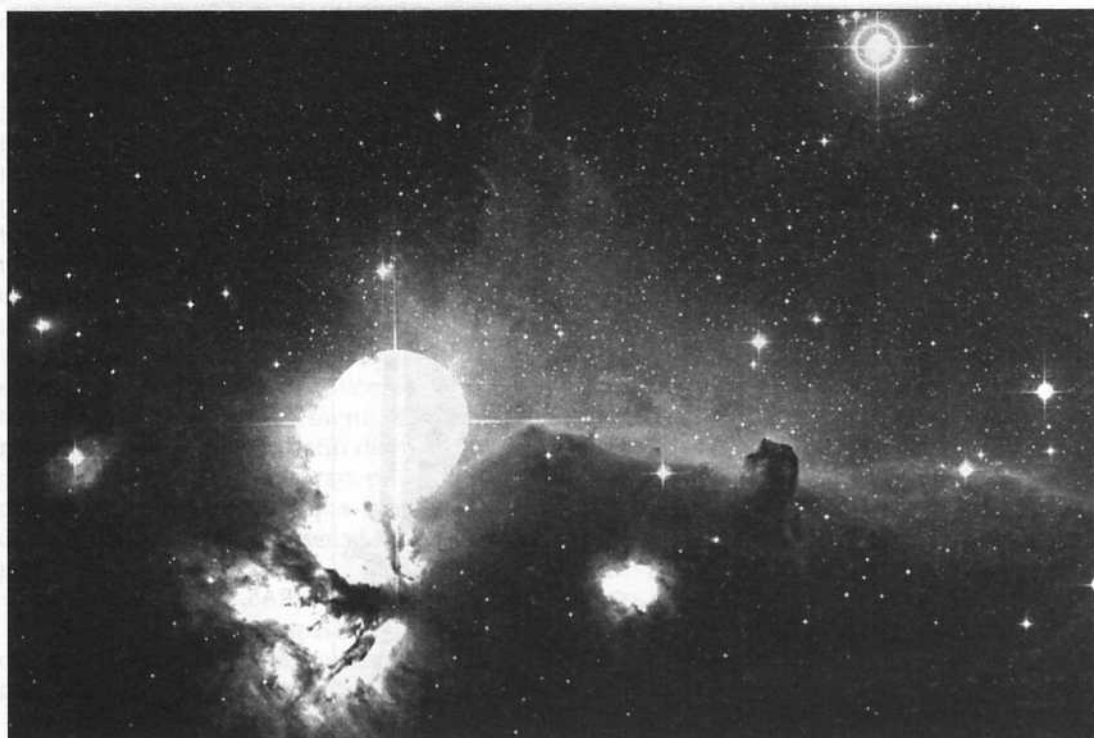


***Prouesse en matière de technologie ayant intégré tous les progrès en matière de détection ultrasensible effectués depuis dix ans, ISO a subi de sévères tests de validation, en environnement spatial simulé, chez son maître-d'œuvre, Aérospatiale.***

ce type de galaxie. En effet, ce rayonnement infrarouge semble *disproportionné* ! D'ordinaire, ce rayonnement est dû à l'existence, au sein de ces galaxies, d'immenses nuages de poussières et de molécules excités par le rayonnement UV des étoiles avoisinantes lequel, en traversant ces nuages, est partiellement réémis vers l'espace sous forme infrarouge après avoir perdu une grande partie de son énergie en étant absorbé par ces poussières. Or, dans les cas étudiés par IRAS, la quantité d'UV mesurée provenant de ces galaxies semble à elle seule tout à fait *insuffisante* pour provoquer un niveau d'excitation de ces poussières correspondant à la quantité d'infrarouge détecté. D'où l'intérêt, pour les astrophysiciens, de pouvoir étudier de tels objets galactiques sur un spectre infrarouge élargi, comme le permettra ISO

et les justifications scientifiques sont tout aussi grandes pour tout ce qui est « froid », « sombre » et « solide ». Le rayonnement infrarouge constitue souvent de fait la trace et la signature spécifique d'un certain nombre de processus qui n'émettent que faiblement sur d'autres variantes du spectre électromagnétique : on pense aux noyaux cométaires lointains du système solaire, aux astéroïdes, à la première phase de la naissance d'objets protostellaires au sein de nuages de poussières denses, aux phénomènes de disques de poussières circumstellaires (révélées par IRAS) dont certains pourraient évoluer vers des systèmes planétaires à partir de planétésimaux et cométésimaux et, d'une façon générale, à tous les systèmes inorganisés qui semblent pulluler autour d'étoiles jeunes, comme, par exemple, les T-Tauri.

Sur le plan des études galactiques, l'intérêt des études infrarouge passées (notamment la fameuse émission sur 60 microns qui a permis à



*Nebuleuse « Tête de Cheval » et NGC 2024.*

*ISO braquera, dans le cadre de programmes spécifiquement élaborés, ses capteurs ultrasensibles vers des nuages moléculaires et de poussières de ce type qui sont de véritables pépinières d'étoiles jeunes ou en cours de formation.*

IRAS de détecter des galaxies inconnues) laisse entrevoir des perspectives prometteuses avec la découverte de galaxies lointaines, pratiquement seulement détectables dans ce type de longueur d'onde, et qui pourraient être des structures en cours de formation. Certains astrophysiciens, comme Roger Ferlet et Alfred Vidal-Madjar, n'excluent d'ailleurs pas que des galaxies soient toujours en train de se former, ce qui serait lourd d'implications cosmologiques... Bien sûr, tout cela ne peut être étudié qu'avec des capacités spatiales de haut niveau même si, du fait d'une faible réduction de l'absorption moléculaire par l'atmosphère terrestre ( $H_2O$ , CO et radical OH), il est possible d'élargir les possibilités en infrarouge « proche », avec des observatoires placés en haute altitude et dans le cadre de microclimats particulièrement secs (cas de l'Observatoire de Mauna Kea à Hawaii) ou bien encore d'utiliser des ballons et aérostats (cas du CNES à partir de ses bases d'Aire sur Adour et de Gap). D'autres méthodes utilisées comme des avions porteurs de télescopes infrarouges et volant à haute altitude ou des fusées-sondes (ne pouvant opérer que quelques minutes) ont déjà permis par le passé quelques résultats intéressants. Cependant, depuis douze ans, l'astronomie infrarouge spatiale vit une ré-

volution qui, par les informations qu'elle nous a fournies, a eu d'importantes conséquences sur les capacités de quelques observatoires terrestres idéalement positionnés sur les plans géographique et atmosphérique. En effet, les données obtenues par IRAS, sur quatre bandes de l'infrarouge « lointain », ont entraîné d'importants programmes de recherche visant à les mettre en correspondance avec des sources en infrarouge « proche » détectables dans des observatoires comme l'ESO et le CFH. Des résultats remarquables ont ainsi été obtenus au télescope de 3,6 m du centre de recherches Canada-France-Hawaii, grâce à l'adjonction de l'instrument FTS (Fourier Transform Spectrograph), pour ce qui concerne l'émission d'étoiles naines, de géantes et de supergéantes. Dans pratiquement tous les domaines de l'infrarouge proche, les données spatiales obtenues en infrarouge lointain ont débouché sur des programmes permettant l'élaboration de catalogues utilisés aujourd'hui dans le monde entier. Citons le cas du programme américain 2Mass Survey et du programme français Denis, démarré début 1993, et qui vise (sur trois ans) à un relevé du ciel austral d'un certain nombre de sources infrarouges révélatrices de phénomènes comme la structure et l'évolution galactiques,

les étoiles en formation, les naines brunes et les stades pré-terminaux de l'évolution stellaire, détectables dans trois bandes spectrales (I à 0,8 microns, J à 1,25 microns, K à 2,2 microns).

C'est dans le domaine de l'étude des galaxies que les découvertes effectuées par IRAS ont peut-être eu le plus de conséquences sur l'orientation des méthodes d'investigation et, sur ce point, le domaine infrarouge est une sorte de clé pour l'observation de tout ce qui est lointain et plus difficile à appréhender sur d'autres longueurs d'onde du spectre. On peut constater ce fait aussi bien au niveau des régions centrales de notre Galaxie (difficiles à observer en lumière visible à cause de phénomènes d'absorption et d'extinction sélective de la lumière dus aux poussières interstellaires) que des galaxies lointaines qui sont maintenant observables en infrarouge jusqu'à un décalage spectral de  $z=0,4$  !

Grâce aux données infrarouge obtenues aussi bien dans l'espace que sur quelques sites terrestres particuliers, et en les reliant aux données recueillies en ultraviolet et en visible sur les étoiles galactiques et extragalactiques, les chercheurs français Brigitte Rocca-Volmerange et Bruno

Guiderdoni ont pu ainsi publier un atlas galactique, en 1988, qui fait autorité. Tout ceci, indirectement, grâce à IRAS qui n'opérait pourtant que sur quatre plages de l'infrarouge lointain mais a sorti définitivement l'astronomie infrarouge du stade semi-artisanal où la confinait sa pratique sans accès à l'espace circumterrestre ! Or, rappelons qu'ISO, dès le début du mois de décembre prochain, va pouvoir opérer sur une gamme étendue de 2,5 à 200 microns...

## Les espoirs placés sur ISO

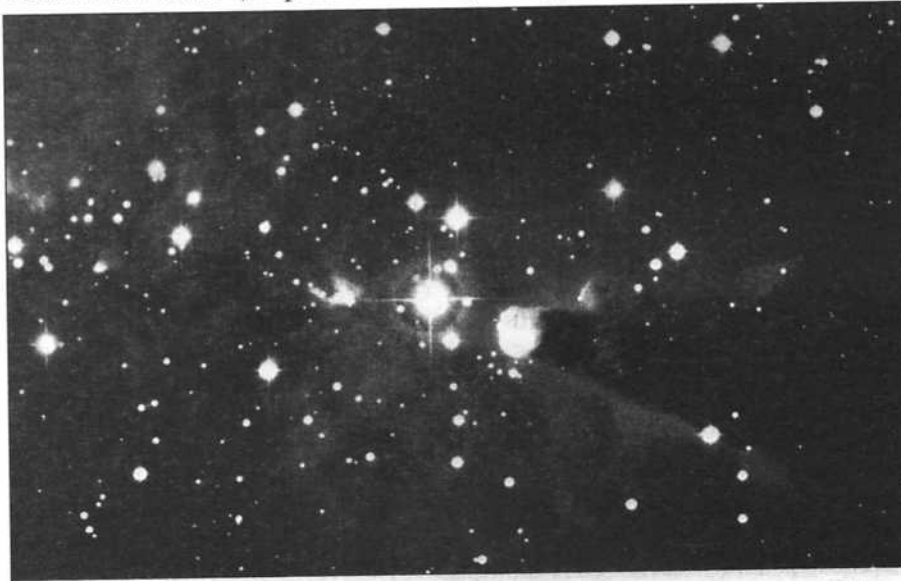
ISO devrait nous fournir les premières données au plus tard trois semaines avant le prochain Noël et les astrophysiciens ne pouvaient espérer un meilleur cadeau ! Moins spectaculaire dans son principe que le célèbre télescope spatial Hubble, le télescope européen pourrait fort bien entraîner des bouleversements aussi lourds d'implications...

Parmi les premières expériences devant se dérouler, figurent bien sûr les observations de comètes dans le cadre de notre système solaire : rappelons qu'IRAS, pourtant bien moins armé qu'ISO, avait découvert plusieurs dizaines de comètes (comme « Iras-Araki-Alcock ») et permis d'in-

téressantes observations sur des astéroïdes et sur un objet que l'on peut considérer comme « intermédiaire », comme l'objet Kowal (découvert en 1977), dénommé depuis Chiron. Cet objet (dont les caractéristiques revêtent à la fois celles des comètes et celles des astéroïdes) possède un noyau évalué à plusieurs centaines de kilomètres, spécificité que semblent partager plusieurs objets « transneptuniens » observés aux Etats-Unis par des équipes comme celle de Dale Cruikshank. Il est bien évident qu'ISO sera braqué en direction du fameux « Anneau de Kuiper », de même que vers la comète géante Hale-Bopp découverte à la fin du mois de juillet. Du fait que le satellite européen est équipé pour détecter de très faibles émissions en infrarouge lointain, on peut espérer la découverte de *plusieurs centaines* de noyaux cométaires faiblement actifs et de nombreux « objets intermédiaires » subissant un dégazage peu marqué que seules quelques plages de l'infrarouge peuvent révéler à longue distance. Il nous semble probable que la classification des objets cométaires va être bouleversée et il n'est pas exclu non plus de découvrir des objets inattendus, situés à la périphérie du système solaire, un peu avant le Nuage de Oort (50.000 U.A.), qui pourraient revêtir à la fois l'aspect d'une naine brune et d'une planète géante gazeuse. Cette hypothèse osée

repose sur le fait, qu'à sa création, notre disque protoplanétaire intégrait probablement de nombreuses hétérogénéités locales massives fort éloignées de la zone des plus lointaines planètes géantes gazeuses (Uranus et Neptune). La masse de ces objets, encore théoriques, aurait été bien insuffisante pour les faire évoluer vers le stade de naine brune, mais aurait toutefois été suffisamment conséquente pour capter, par gravitation, un certain nombre de comètes et d'objets intermédiaires. Ceux-ci, en entrant en collision avec les mystérieux objets en question, n'auraient pas été complètement disloqués et auraient contribué à constituer pour ceux-ci un noyau solide et glacé entouré d'une très faible atmosphère due à un phénomène de dégazage permanent créé par des forces de gravitation brisant plus ou moins régulièrement des molécules de méthane et d'ammoniac gelé. Régulièrement, ces objets captent gravitationnellement des comètes, venues de l'anneau de Oort, dont l'impact permettrait de relancer, selon des phases extrêmement irrégulières, un type de processus inattendu. Si un tel phénomène pourrait éventuellement, au moment où il se produit, se traduire très faiblement en UV ou en visible, il faut compter sur une chance inouïe (ou un système d'observation permanent) pour le détecter. Par contre, l'émission naturelle en infrarouge lointain de tels objets reste décelable par les systèmes de détection d'ISO... ici dans le rôle de « révélateur du froid obscur ».

Mais c'est surtout dans les domaines des astronomies stellaire, interstellaire, galactique et extra-galactique que le satellite européen devrait entraîner le plus de bouleversements. Il est intéressant de noter que, pour tenir compte des découvertes qui pourraient être réalisées dans le laps de temps allant de la mise en œuvre du programme ISO à la mise en orbite du satellite, les responsables de l'ESA ont eu l'habileté de concevoir l'organisation des programmes d'observation en attribuant, à chaque institution scientifique impliquée, à la fois un temps garanti et un temps à la carte. Ceci explique pourquoi certains programmes d'observation qui



Site de nuages denses de type « Dark Cloud Complexes », NGC2264 est une région particulièrement riche en formation d'étoiles pour lesquelles les études en infrarouge constituent un progrès indispensable.

seront effectués sur le satellite infrarouge n'ont été présentés qu'il y a un an, notamment pour toute la partie concernant l'observation et la détection de disques de poussières circumstellaires et la formation de systèmes planétaires. En juillet 1994, un Colloque consacré à ce sujet avait d'ailleurs été organisé à Paris par l'Institut d'Astrophysique avec la participation de chercheurs prestigieux comme les Français Ferlet, Vidal-Madjar, Anne-Marie Lagrange-Henri, Hervé Beust, Eric Pantin, les Américains Diana Backman, Hal Levison, Jack Lissauer, Ben Zuckerman, Paul Feldman, les Russes Artymovicz et Gor'Kavyi, les Allemands Zinnecker et Wuchterl.

Dans le domaine de la physique des étoiles, l'observation infrarouge se révèle parfois décisive pour interpréter celles effectuées sur d'autres plages du spectre électromagnétique en offrant la possibilité de recalibrer les mesures concernant la distribution de l'énergie stellaire, laquelle subit sur plusieurs types de longueur d'onde, à cause des poussières interstellaires, de nombreux phénomènes d'écran et « d'absorption sélective » qui faussent les résultats. Pour les astrophysiciens, la recherche de spectres infrarouges stellaires de très haute qualité est indispensable mais, à partir d'observatoires terrestres, ceux-ci n'ont pu être obtenus que dans l'infrarouge proche (par exemple, sur les bandes de 1,2/1,428 à 2,5 microns) par des chercheurs comme Johnson et Mendez (travaux effectués sur des étoiles de type A0 à M7), Kleinmann et Hall (en 1986, en bande K sur des étoiles de catégorie F8 à M7), Terndrup (en 1991, sur des géantes rouges, parallèlement à des études de radioastronomie portant sur des masers stellaires se produisant dans l'atmosphère étendue de ces étoiles) ou Merrill, grand spécialiste de l'étude en infrarouge des étoiles froides. Ce dernier a constitué un utile catalogue des grandes étoiles de notre galaxie émettant sur le spectre infrarouge de 2 à 14 microns. Il est bien évident que tous ces objets seront observés sur une plage infrarouge plus large par ISO, qui s'intéressera également à un certain nombre d'étoiles parfaitement identifiées d'autres ga-

laxies. En recalibrant ces mesures avec d'autres données obtenues, par exemple en UV, il est alors possible, de façon indirecte, d'élaborer des modèles de distribution de l'énergie galactique. Seront particulièrement visés, cette fois au niveau de notre galaxie, un certain nombre de groupements d'étoiles géantes rouges du centre galactique, déjà étudiées par IRAS, et qui semblent constituer, on ne sait pourquoi, une structure propre dont la plupart des éléments semblent reliés les uns aux autres par des processus dynamiques. Une des hypothèses avancées serait que ces géantes rouges constitueraient la trace d'une collision passée fort ancienne entre notre galaxie et une petite galaxie satellite. Elles se seraient formées selon un processus d'accrétion de petites étoiles ayant des similitudes avec celui concernant les « blue stragglers » repérées dans certains amas par le télescope spatial Hubble. L'aspect « géantes rouges » de ces étoiles ne serait dû qu'au fait que le processus les ayant engendré aurait été contemporain des premières étapes de la formation de notre galaxie : on peut le situer à environ dix milliards d'années en arrière, puisque c'est le temps admis d'évolution vers ce stade stellaire pour des étoiles de type solaire ayant pratiquement achevé leurs étapes de nucléosynthèse.

Toutefois, selon Roger Ferlet de l'IAP, une des grandes attentes sur ISO, dans le domaine de la physique stellaire, concerne une catégorie d'étoiles spécifiques dénommées AGB (Asymptotic Giant Branch) dont les observations par IRAS (plus de deux cent trente sources détectées) ont révélé qu'elles étaient entourées par des enveloppes extrêmement étendues de CSE's (enveloppes de poussières circumstellaires) très riches en carbone et *extrêmement froides*, ce qui semble être la résultante d'un processus massif d'éjection de matière, à la fois continu et très ancien. Ces poussières émettent uniquement sur quelques plages de l'infrarouge lointain et ce type d'étoile « inclassable » pose un énorme problème aux théoriciens car elles revêtent à la fois les caractéristiques des géantes rouges et des « monstres » dits de Wolf-Rayet qui éjectent des quantités anormales de

matière à chaque seconde et dont le processus de nucléosynthèse peut pratiquement être observé à nu !

Les observations de ces objets par IRAS ont permis de mettre en évidence leur émission extrême en infrarouge (qui ne serait pas due uniquement aux disques de poussières denses et froides qui les entourent) ainsi que des jets violents d'hélium entrant en interaction avec ces poussières. Pour ce type d'observation, ISO s'appuiera bien évidemment sur les données IRAS, qui ont été compilées dans deux catalogues spécifiques, le PSC et le LRS Atlas, et sur toutes les études effectuées à partir de ces données, aussi bien en infrarouge qu'en millimétrique, par des chercheurs comme les Français Omont et Menessier ou les Américains Johnson, Morris et Zuckerman. Plusieurs questions, auxquelles ISO apportera peut-être des réponses, intriguent notamment les spécialistes : à quel niveau se situe l'influence des vibrations thermiques induites par les « flashes » d'hélium venus de leurs parties périphériques sur les enveloppes circumstellaires de ces étoiles ? Est-il possible d'élaborer un modèle standard des quantités éjectées ou bien existe-t-il des variantes dues à différents processus internes à l'étoile ? Comment peut-on définir le stade intermédiaire (post AGB) entre les étoiles AGB et le phénomène bien connu de « nébuleuse planétaire » qui entoure parfois les plus anciennes de ces étoiles et dont le phénomène d'ionisation des gaz apparaît parfaitement en UV ? Dans certains cas, peut-on penser que ces étoiles puissent évoluer, à cause d'un phénomène de dilatation prenant le pas sur les forces gravitationnelles, vers le stade de super géante froide ? Quelle peut être la part de l'écoulement de matière des AGB à l'enrichissement du milieu interstellaire ?

Tout aussi passionnantes sont les investigations que fera ISO sur les sites de formation de jeunes étoiles qui sont souvent reliés à deux types de nuages de gaz et de poussières interstellaires : les nuages moléculaires géants (de type Orion) et les nuages sombres (« Dark Cloud Complexes ») qui ont été particulièrement observés en infrarouge, au moyen du

spectromètre FTS du télescope Canada-France-Hawaii, par le Français Jean-Pierre Maillard et le Canadien George Mitchell. Ces deux astrophysiciens, impliqués sur ISO, s'intéressent particulièrement à l'étude infrarouge d'objets stellaires de grande taille formés au sein de ces nuages et dénommés YSO (Young Stellar Object). Certains de ceux-ci, détectés notamment sur IRAS (S140 IRS-1, W3IRS5, NGC7538IRS9, NGC 7538IRS1), sont relativement *massifs* (parfois plus de 5 masses solaires) et se caractérisent par une forme importante d'écoulement de matière (révélée en IR), dont les effets physiques dynamiques actifs semblent avoir des conséquences sur la modification de certaines composantes locales des nuages au sein desquels ils se sont formés. Cet écoulement contribuerait, en quelque sorte, à enrichir en poussières et en molécules complexes les formations protostellaires avoisinantes dont un pourcentage non négligeable (estimé entre 35 et 38%) pourrait ensuite donner naissance à des étoiles entourées de disques protoplanétaires : preuve supplémentaire qu'il ne faut pas considérer ces phénomènes comme des processus isolés et qu'il faut intégrer dans leurs modèles des paramètres environnementaux lointains.

De tels gros objets pourraient-ils eux aussi donner naissance à des cortèges mixtes où orbiteraient à la fois des « naines brunes », des planètes géantes gazeuses et de grosses planètes telluriques ? Certains, à Saclay et à l'IAP, ne sont pas loin de le penser, mais, comme le soulignent Roger et Alfred Vidal-Madjar : « *Sortir leur rayonnement infrarouge propre des émissions stellaires reste encore loin des possibilités d'ISO et il faudra attendre la mise en œuvre du télescope infrarouge et millimétrique européen FIRST pour espérer des résultats* ».

Lors de la mission d'IRAS, de grandes quantités « d'excès d'infrarouge » avaient été observées autour de nombreuses étoiles et que certaines de ces observations ont abouti à la mise en évidence de disques de poussières autour de celles-ci, comme par exemple « Fomalhaut », « Epsilon Eridani » ou « Vega », dont l'utilisation du



*Galaxie « Centaurus A. Les études en infrarouge sont indispensables pour la cartographie et la mise en évidence de la structure des galaxies. Dans certains cas le rayonnement infrarouge reste le seul moyen de détecter des galaxies éloignées.*

nom a été étendue à toute une catégorie d'étoiles visiblement entourées par une certaine forme de matière et dénommées pour la circonstance « Vega Light ». C'est pour ce type d'étoile qu'ont été mis en place certains des programmes d'observation les plus passionnants d'ISO, qui balayera à la fois tous les disques répertoriés par IRAS (et étudiés ensuite par des observatoires) et consacra une part importante de son temps à la recherche d'autres disques.

Bien évidemment, l'étoile Bêta Pictoris (située à 53 années-lumière de la Terre) mobilisera une grande part des études du fait qu'en même temps que ce que l'on croyait être un disque protoplanétaire, on y a détecté un phénomène de bombardement cométaire intense qui présente des analogies avec la situation qui prévalait dans le système solaire quelques centaines de millions d'années après sa formation, à partir de planétésimaux et de cométésimaux. Bêta Pictoris revêt un intérêt considérable car, si les disques détectés autour de jeunes étoiles sont particulièrement nombreux, et si le fameux excès d'infrarouge peut être interprété comme la possibilité de l'existence de systèmes planétaires parfaitement formés, cette étoile semblait à ce jour être la seule autour de laquelle ait été détecté une véritable structure organisée. Toutefois, l'idée que l'on se faisait de son disque protoplanétaire semble depuis plusieurs mois avoir considérablement évolué. En effet, en 1994

et 1995, des études précises de photométrie effectuées par des spécialistes de l'Observatoire de Genève, une équipe de l'IAP (Ferlet, Beust, Anne-Marie Lagrange-Henri, Vidal-Madjar) et des chercheurs américains ont montré que, dans le cas de Bêta Pictoris, il ne s'agirait plus du tout d'un processus d'accrétion planétaire en cours mais d'un système planétaire *déjà formé* ! Comme le souligne le chercheur américain Jack Lissauer : « *Les planètes sont probablement déjà là, mais nous ne les voyons pas* ».

Cette bouleversante découverte ne pouvait pas rester sans conséquences sur le programme d'observation d'ISO, lequel va sonder sur les faibles émissions infrarouge « lointaines » l'environnement d'un certain nombre d'étoiles répertoriées, dont l'âge correspondrait à peu près à celui de Bêta Pictoris, soit quelques centaines de millions d'années. Pour les observateurs terrestres, cette étoile présente l'avantage de nous présenter son disque, désormais avec certitude planétaire, sous un angle extrêmement favorable, mais il existe de nombreuses étoiles du même type, ou situées sur d'autres séquences de l'évolution stellaire, dont la configuration d'observation d'un disque potentiel, moins favorable pour des questions d'angle de visée à partir de la Terre, pourrait être rendue possible par ISO à cause de la capacité du satellite de l'ESA à « sortir » de très faibles émissions en infrarouge lointain. On pense notamment à l'étoile Alpha PSA

dont certains observateurs ont déjà signalé à diverses reprises d'étranges variations de luminosité qui ne semblent pas dues à des phénomènes plus ou moins réguliers attendant à la physique stellaire de l'objet en question, mais à des passages réguliers de « matière » devant l'étoile ! Sur ce point, ISO représente encore là un progrès par rapport à IRAS, car ses capacités infrarouges permettent même de différencier les compositions apparentes des disques circumstellaires de celles des poussières interstellaires et peuvent mettre en évidence la rupture se produisant au niveau de cette composition lorsqu'un disque protoplanétaire apparaît. Dans le passé, les capacités infrarouges d'IRAS (limitées à quatre bandes de ce spectre) avaient induit en erreur les astrophysiciens en entraînant une confusion d'interprétation entre un disque de poussières et de gaz situé autour de l'étoile 68 Ophiuchus et ce qui fut considéré à tort comme un disque protoplanétaire : il fallut cinq ans de mesures précises pour éliminer, dans ce cas, l'hypothèse du disque...

ISO, dans le même ordre de recherches, permettra-t-il d'apporter des réponses au mystère que constituent les T-Tauri, ces étoiles très jeunes dont la genèse est associée à des nuages moléculaires denses et qui sont entourées de nébuleuses brillantes circumstellaires, mais dont les caractéristiques de « variables irrégulières » semblent liées à des champs magnétiques intenses ? L'hypothèse de l'existence de ces champs magnétiques, engendrés par des mécanismes divers, a été émise par des chercheurs comme Worden et Appenzeller. Il semble bien que pour la majorité d'entre elles (RY Lupi, ScRA, R Waur) la variation strictement périodique de leur courbe de lumière soit due à des phénomènes internes. Mais, pour certaines d'entre elles (cas de DF Tauri) les études infrarouges semblent révéler une *interaction* entre leur champ magnétique et un disque d'accrétion de poussières, situé près de l'étoile, et qui épouserait les lignes de force de ce champ magnétique. Selon certains chercheurs, de tels disques ne représenteraient que la partie la plus interne d'un disque protoplané-

taire étendu, dont la détection, même en infrarouge, ne sera pas facile. En effet, l'excès d'infrarouge (détecté également en UV) des parties internes de ces disques est dû à une intense agitation thermique (d'où la possibilité de le détecter en infrarouge proche) et il n'est pas impossible que ce rayonnement « noie » en quelque sorte celui (beaucoup moins énergétique) des parties externes où pourraient se constituer des protoplanètes. Sacré défi pour ISO !

Toutefois, après avoir littéralement disséqué sur de vastes plages infrarouges les mystères du système solaire, des étoiles et du centre de la galaxie (géantes rouges en nombre étonnant), le satellite européen n'en n'aura pas encore fini avec sa tâche de titan. Il étendra ses palpeurs en direction des autres galaxies, et pas seulement des intrigantes « galaxies de Markarian » dont nous avons déjà parlé. Pour ce type d'observations, les études infrarouges ne sont plus à chaque fois le complément indispensable des recherches effectuées sur d'autres longueurs d'onde, mais parfois le seul moyen « démultiplicateur » pour rendre visibles des objets très lointains comme l'a montré IRAS avec sa détection, sur 60 microns, de galaxies incroyablement éloignées et inobservables sur les autres composantes du spectre électromagnétique. La conjugaison de l'avènement de nouveaux types de détecteurs ultrasensibles et de leur utilisation dans l'espace, vient en renfort du fait que ce type d'observations est déjà par nature favorisé par la texture très particulière de l'univers. En effet, la traversée des nuages de poussières interstellaires par le rayonnement n'est pas autant altérée en infrarouge que sur les autres longueurs d'onde par le phénomène d'extinction sélective habituel. De ce fait, la cartographie des émissions infrarouges permet d'améliorer les catalogues galactiques obtenus en lumière visible et de tenter d'élaborer des modèles en ce qui concerne l'évolution des galaxies et leur taux de formation de nouvelles étoiles. Dans ce dernier domaine, on peut espérer beaucoup des possibilités d'ISO, du fait qu'IRAS, pourtant plus limité, avait multiplié d'un facteur considérable les décou-

vertes sur les « flambées d'étoiles » effectuées auparavant par des pionniers comme Searle, Sargent et Bagnuolo (1973) ou bien encore Butcher et Oemler (1978). Outre les galaxies lointaines, que l'on peut seulement étudier en infrarouge, ISO se penchera particulièrement sur certaines galaxies naines, dénommées BCD (Blue Compact Dwarf Galaxies), et pour lesquelles deux facteurs, en apparence contradictoires, ont été mis en évidence : une population anormalement élevée de géantes rouges très anciennes et un niveau de création de jeunes étoiles inexplicable autrement que par l'existence d'une quantité anormale de nuages et de poussières.

A quelques semaines de la mise en orbite d'ISO, personne ne peut encore faire de pronostics quant aux conséquences sur les modèles de l'avalanche de données attendues. Le satellite européen pourrait tout aussi bien répondre à de nombreuses questions jusque-là sans réponse que lever, sans apporter de certitudes, le voile des volutes brumeuses où se tapissent certains des mystères les plus intrigants de l'Univers. Car, caché au fond des bras galactiques, des rivages encore mal connus des profondeurs de notre Galaxie, des nuages de poussières, des enveloppes circumstellaires... voire des systèmes planétaires, « l'objet infrarouge » représente en lui-même un des plus grands défis qu'il soit proposé à nos capacités de détection. La perception de son existence ne suffit en rien à l'élaboration d'un modèle totalement cohérent soulevant le voile mystérieux de sa nature, et les tentatives d'explication arrachées par l'Homme à sa discrétion laissent le scientifique à la fois ravi et décontenancé. A la manière d'un détective pénétrant toujours plus profondément au sein des coulisses d'un théâtre d'ombres, en faisant appel à d'étranges gadgets pour voir qui tire les ficelles, l'astrophysique spatiale infrarouge est, de par son objet, condamnée à une course incessante vers la sophistication. Sans crier gare, ISO, dont les découvertes pourraient bien avoir des conséquences inespérées, vient de nous faire rentrer dans l'astronomie du XXI<sup>ème</sup> siècle ! ■