

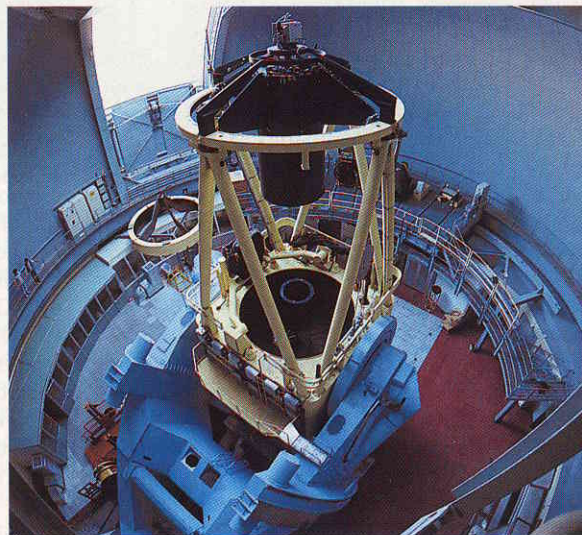
LES ÉTOILES SUPERMASSIVES N'EXISTENT PLUS

Cela ne gênait pas jusqu'ici les astrophysiciens d'invoquer des étoiles de mille masses solaires. Pourtant, ces derniers mois, toutes les candidates au titre de "super étoile" ont disparu les unes après les autres, résolues en amas stellaires par la nouvelle génération de télescopes. Comment concilier théorie et observations ?

par Mohammad HEYDARI-MALAYERI
astronome à l'observatoire de Paris

LES "supermassives" craindraient-elles les observations à haute résolution spatiale ? C'est, semble-t-il, le déroutant constat qui ressort des recherches menées ces dernières années. Chaque fois qu'ont été déployés des moyens observationnels de plus en plus performants, ces fameuses étoiles se sont réduites comme une peau de chagrin, et ce qui apparaissait auparavant comme un énorme astre unique a été brisé en deux, trois, quatre, voire une multitude de composantes. Parmi les derniers épisodes en date : le résultat obtenu récemment⁽¹⁾ à l'observatoire de Paris sur l'une des étoiles du Grand Nuage de Magellan grâce à la technique d'avant-garde qu'est l'optique adaptative⁽²⁾. Cet astre, Sk - 66° 41 (l'étoile n° 41 dans la tranche de déclinaison - 66° du catalogue de Sanduleak), était auparavant considéré comme l'un des plus massifs existants — un monstre de plus de 120 masses solaires rayonnant comme trois millions de soleils. Il a été résolu en au moins douze composantes dont la plus brillante affiche à grand-peine quelque 50 masses solaires. Ce résultat ne porte pas seulement un nouveau coup à

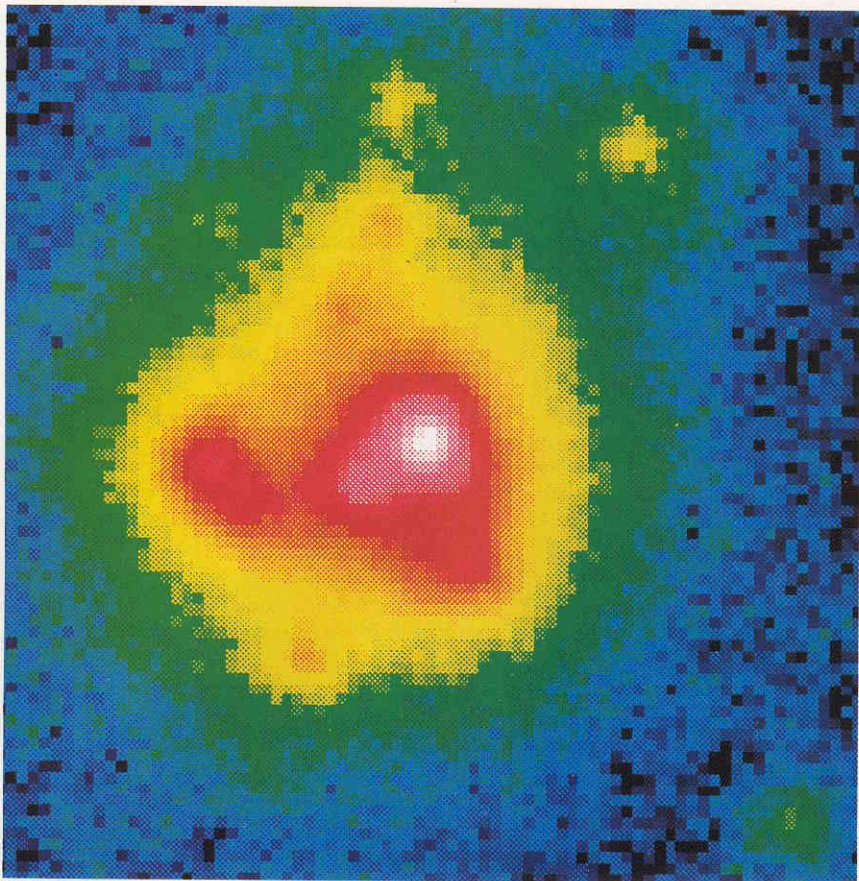
l'hypothèse même de l'existence de ces monstres stellaires qui, dans le bestiaire des curiosités célestes, auraient peu à envier aux trous noirs. Il a aussi des répercussions importantes sur les théories de formation et d'évolution stellaires, censées être bien maîtrisées mais qui butent néanmoins sur un paramètre clé : la masse maximale que peut atteindre une étoile, objet de débat théorique depuis de nombreuses années.



À l'observatoire de La Silla, le télescope optique et infrarouge de 3,60 m est équipé du système d'optique adaptative Come On Plus.

Les étoiles massives et leurs congénères (la taxonomie stellaire a pour habitude de considérer qu'une étoile est *massive* lorsque sa masse dépasse environ quinze fois celle du Soleil, *très massive* au-delà d'environ 50 masses solaires et *super-massive* au-delà de quelque 100 masses solaires) jouent un rôle déterminant en astrophysique, et ce malgré leur rareté puisqu'on estime par exemple que seulement une étoile sur un milliard aurait une masse supérieure à 60 masses solaires. Ce sont elles qui, tels de gigantesques chaudrons cosmiques, fabriquent l'essentiel des éléments lourds dans l'Univers et qui, à travers leur explosion en supernovae de type II, déterminent l'évolution chimique des galaxies. Elles encore qui, par leur flux ultraviolet et l'intense vent de particules qu'elles libèrent, influencent le milieu environnant en y engendrant par exemple des nébuleuses ionisées sous forme d'immenses bulles interstellaires. Toutes ces particularités essentielles tiennent à la masse importante des étoiles en question. Elles en dépendent même étroitement, d'où l'enjeu que représente pour les modèles d'évolution stellaire la détermination précise de l'échelle des masses.

L'Anglais sir Arthur Eddington, l'un des pères fondateurs de l'astrophysique, comprit le premier qu'une étoile résultait de l'équilibre entre deux forces : la gravité, qui cherche à l'écraser, et la pression du gaz très chaud dont elle est constituée, qui tend à la disperser. Mais c'est le Belge Paul Ledoux qui, en 1941, découvrit que ces mêmes étoiles devenaient instables au-delà d'une certaine masse critique, par suite de mécanismes de plus en plus incontrôlables. Leur enveloppe se met ainsi à vibrer lorsque la production d'énergie en leur cœur l'emporte sur l'amortissement, principalement dû à l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur, à travers les différentes couches stellaires. Ce qui signifie que la masse critique dépend sensiblement de la loi d'opacité de la matière stellaire, c'est-à-dire de la propension qu'a celle-ci à retenir l'énergie. Dans le cas idéal où l'opacité ne dépend que de l'absorption des photons par les électrons des atomes d'hydrogène et d'hélium, et où l'enveloppe ne connaît pas de fluctuations importantes de vitesse, la masse critique d'une étoile de composition chimique analogue à celle du Soleil s'élève déjà à 60 masses solaires. Cette valeur classique, calculée par Schwarzschild et Härm en 1959 et



M. Heydari-Malayeri, J.-L. Beuzit/ESO

Situé dans le Grand Nuage de Magellan, l'astre 5k-66° 41 était considéré naguère comme l'une des plus grosses étoiles connues. Mais une équipe française de l'observatoire de Paris a découvert que l'astre était en fait un amas d'étoiles massives "normales". L'observation a eu lieu à La Silla, avec le système d'optique adaptative infrarouge Come On Plus installé sur le télescope de 3,60 m. Résolution de l'image, obtenue à 2,25 microns (ci-dessus) : 0,25". Ci-contre, la résolution de l'image est encore améliorée au moyen d'une méthode mathématique dite de déconvolution ; elle atteint alors 0,11". À cette longueur d'onde, le télescope spatial Hubble ne peut faire mieux.

à laquelle les astronomes se sont tenus pendant longtemps, semble aujourd'hui bien modeste en regard des chiffres qui ont été avancés au fur et à mesure que les modèles stellaires s'affinaient.

Pour preuve : que l'on s'avise de faire dépendre la loi d'opacité de la température et de la densité, et la masse critique passe à environ 90 masses solaires. En outre, on sait aujourd'hui que celle-ci est fonction de la composition chimique et qu'elle décroît lorsque l'abondance en éléments lourds diminue. Récemment, les opacités ont été recalculées en tenant compte de la contribution de raies d'absorption dues à des éléments plus lourds que l'hélium, comme le sodium et le calcium. Cela a fait grimper la masse critique de près de 45 %. L'instabilité de Ledoux survient dans ce cas au-delà de 120 à 150 masses solaires pour une étoile de composition solaire, et au-delà de 90 masses solaires pour celles

situées dans les milieux pauvres en métaux que sont les zones extérieures de la Galaxie ou les Nuages de Magellan. Une limite théorique qui peut être encore repoussée si l'on prend en compte des

fluctuations importantes de la vitesse dans les couches stellaires externes, ce qui induit un amortissement plus efficace. La masse critique "autorisée" s'envole alors littéralement, pour dépasser les deux cents masses solaires. Mais la surenchère ne s'arrête pas là. Car si toutes ces considérations concernaient les étoiles déjà arrivées à maturité, le processus de formation peut lui aussi imposer une limite supérieure à la masse stellaire.

Tout commence avec l'effondrement sur eux-mêmes de grands nuages de gaz et de poussières interstellaires, produisant des noyaux liés par des forces hydrostatiques. Chaque noyau grossit petit à petit par accréation, en accumulant la matière issue de l'enveloppe de gaz et de poussières. Lorsqu'il est suffisamment massif, l'hydrogène commence à brûler tandis que l'accréation se poursuit. La jeune étoile devient très lumineuse et les grains de poussière qui tombent en chute libre sur elle sont, au-delà d'une certaine distance, vaporisés par l'échauffement dû à son rayonnement ultraviolet et visible. Il se forme autour de l'astre une sorte de "cocon" de poussière. Les grains les plus à l'intérieur de celui-ci absorbent la radiation de l'étoile et la réémettent en infrarouge. Dans bien des cas, le cocon est opaque à cette nouvelle



M. Heydari-Malayeri, J.-L. Beuzit/ESO

radiation et il apparaît alors un gradient de pression radiative qui va ralentir l'accrétion elle-même. Si les grains (comme le graphite ou les silicates) n'ont pas une température de sublimation élevée, ils seront au bout du compte détruits par le rayonnement de l'étoile. La pression de radiation ne pourra plus contrecarrer la chute, qui se poursuivra sans qu'il ait donc de limitation sur la masse de l'étoile. En revanche, si les grains supportent bien les températures élevées, ils continueront à rayonner jusqu'à stopper l'accrétion, ce qui imposera une limite à la masse de l'étoile. L'astrophysicien anglais F. Kahn fut en 1974 le premier à faire ces calculs et à proposer la valeur de 40 masses solaires. Mais la température maximale de 1 750 K que, selon lui, les grains de graphite du cocon pouvaient supporter a été depuis revue à la baisse, ce qui a conduit à gonfler la masse critique jusqu'à 1 000 masses solaires.

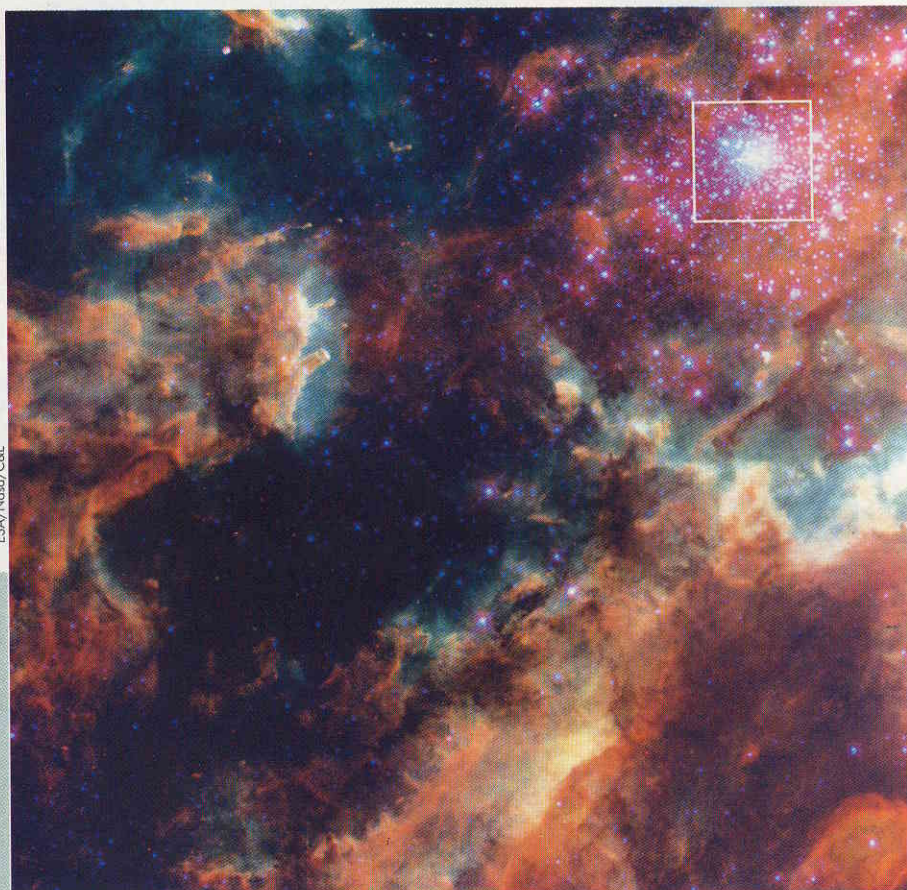
La situation est donc loin d'être claire sur le plan théorique, et ce d'autant qu'il existe une foule d'autres facteurs à considérer — fragmentation et coalescence des nuages moléculaires, champs magnétiques, turbulence, pour ne citer que ceux-là — et dont nous ne savons presque rien. Une seule chose semble sûre aujourd'hui : les étoiles ne se forment pas par simple effondrement d'un nuage de gaz plus ou moins uniforme.

Dans ces conditions, il est très important d'avoir des observations qui puissent restreindre le cadre flou des théories et c'est à cette fin qu'une étude systématique des candidats supermassifs des Nuages de

Magellan a démarré en 1988 à l'Observatoire européen austral (ESO) et à l'observatoire de Paris. La distance des Nuages de Magellan est en effet bien connue, ce qui facilite l'estimation des luminosités, et, de plus, leur faible contenu en poussières doit en principe favoriser la formation d'étoiles très massives. L'analyse des images à haute résolution (restaurées à 0,3-0,5 seconde d'arc) obtenues grâce aux télescopes de l'ESO a livré un verdict quasiment sans appel : la plupart des étoiles que l'on croyait supermassives sont en réalité des amas très compacts d'étoiles massives de type spectral O au début de leur vie. Jusqu'à une trentaine d'étoiles apparaissent là où l'on ne pensait voir qu'un seul astre très lumineux. On réalise

à présent que la luminosité de ces étoiles avait été surestimée dans le passé, d'où la trop grande masse déduite.

Autre candidat, autre constat d'échec pour des raisons légèrement différentes, avec l'étoile n°1 de NGC 346, cette grande association OB qui est également la nébuleuse gazeuse la plus importante du Petit Nuage de Magellan. On a longtemps soupçonné l'étoile en question d'être la plus massive du Petit Nuage, avec une masse initiale de 130 masses solaires et une masse actuelle de 110 masses solaires — la différence étant due à la considérable perte de masse que subissent, sous forme de vent stellaire, les étoiles durant leur courte vie. Or il a été montré en 1992 que non seulement il s'agissait en fait d'un système mul-



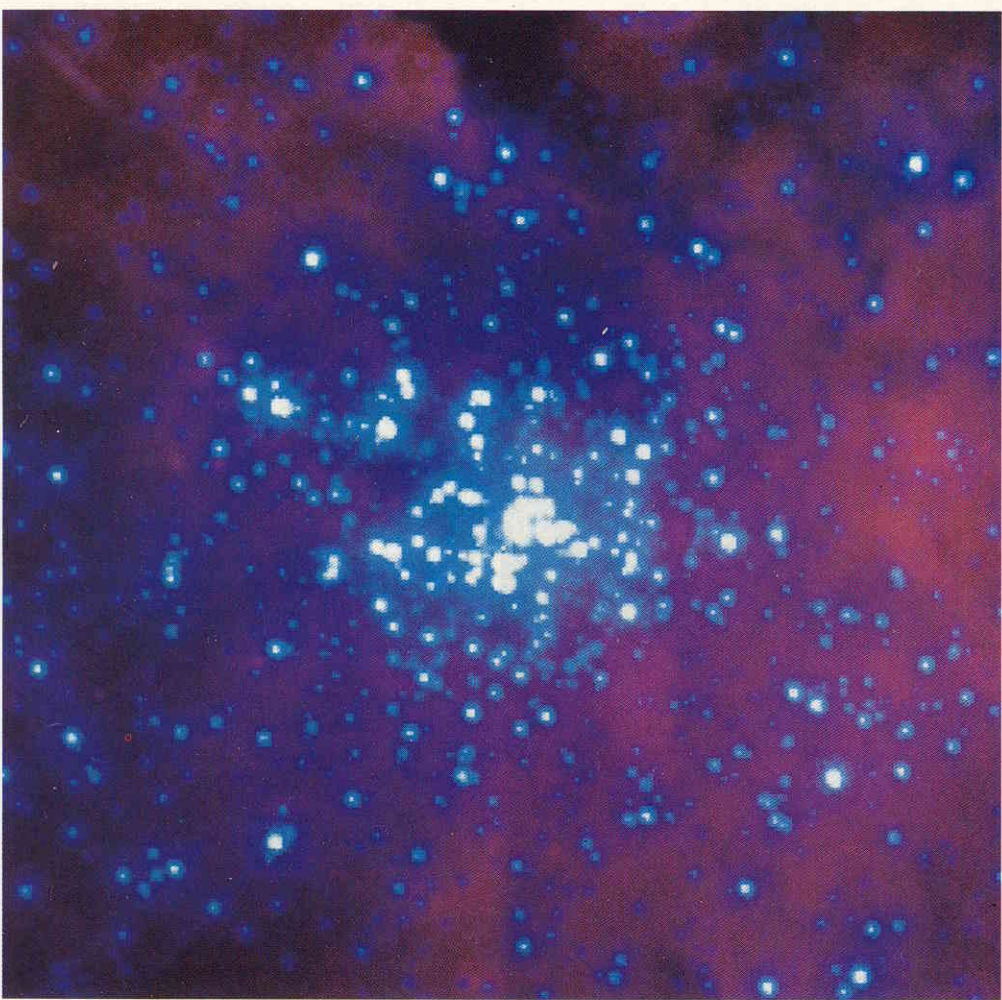
R 136a : les étoiles cachées de la Tarentule

NICHÉ AU CŒUR de la nébuleuse de la Tarentule, dans le Grand Nuage de Magellan, l'astre R 136a faisait rêver les astronomes. Il s'agissait, croyaient-ils, d'une étoile trois mille fois plus massive que le Soleil. Ce fut d'abord, voici quelques années, la technique de l'interférométrie des tavelures qui réussit à résoudre l'astre en une petite dizaine de composantes. Puis, début 1994, le télescope spatial a testé sa nouvelle vue sur la nébuleuse de la Tarentule et révéla pour la première fois les extraordinaires draperies gazeuses qui sont chauffées et illuminées par l'objet R 136a (photo ci-contre). Dans la foulée, Hubble a montré que celui-ci était en réalité un amas serré d'étoiles massives. Grâce au spectrographe installé au foyer du télescope spatial, quelques-unes d'entre elles sont mieux connues : R 136a5, par exemple, très près du centre de la photo du haut, est une belle étoile supergéante bleue âgée de moins de trois millions d'années. Cinquante fois plus massive que le Soleil, elle brille près de quatre-vingt mille fois plus que notre petite étoile. Son diamètre avoisinerait 25 millions de kilomètres.

tiple de trois étoiles, mais que la luminosité totale avait auparavant été surestimée à cause d'une correction trop élevée d'extinction par les poussières interstellaires. Résultat : les deux masses limites de ce monstre dégingolent respectivement à environ 85 et 60 masses solaires.

Où ce déficit s'arrêtera-t-il, à l'heure où des preuves observationnelles d'une autre nature viennent témoigner contre l'existence des étoiles supermassives ? La photométrie détaillée de plusieurs asso-

INTES 150V500
MAKSUTOV



ESA/NASA/C&E

ciations OB des Nuages de Magellan, effectuée à partir d'images CCD, n'a par exemple révélé aucune étoile de masse initiale supérieure à 85 masses solaires. De même, on note dans la galaxie M 31 une absence d'étoiles dépassant les 60 masses solaires.

Un monstre qui, là encore, s'est réduit comme une peau de chagrin

Une chose est sûre : les partisans des étoiles supermassives voient leurs candidates s'évanouir les unes après les autres. Ils viennent même de perdre leur favorite, R 136a, l'objet central de la nébuleuse de la Tarentule (30 Doradus), la nébuleuse gazeuse géante du Grand Nuage. Au début des années 80, beaucoup d'astronomes pensaient qu'il s'agissait là d'une seule et unique étoile d'environ... 3 000 masses solaires, qui aurait donc dépassé — et de loin — les estimations théoriques les plus folles. Las : les observations à très haute résolution fondées sur la technique d'interférométrie des tavelures ont, il y a quelques années, résolu cette étoile en pas

moins de huit composantes entassées dans un espace de 0,7" d'arc de diamètre, la composante principale, R 136a1, ayant une masse limite de 250 masses solaires. Et voilà quelques mois, le télescope spatial Hubble a réussi la prouesse de résoudre cette même étoile R 136a1, en révélant la présence d'une nouvelle composante située à 0,08" d'arc d'elle ! Révisées à la baisse, les masses actuelle et initiale de la composante principale oscillent à présent entre 30 et 80 masses solaires pour l'une, et entre 60 et 120 masses solaires pour l'autre. Le monstre s'est, là encore, réduit comme une peau de chagrin, surtout que rien ne prouve que l'on en ait détecté toutes les composantes. La valeur de 0,08" d'arc correspond en effet à une distance de 4 000 unités astronomiques (quatre mille fois le rayon de l'orbite terrestre), alors que la séparation typique des binaires massives dans notre galaxie est de l'ordre de 0,1 unité astronomique.

Il semble donc que la nature produise beaucoup moins d'étoiles très massives que ce que l'on croyait jusqu'à présent. Cette découverte impose des contraintes nouvelles aux modèles de formation et d'évolution stellaires, aussi bien pour la fragmentation et la coalescence des nuages moléculaires, que pour l'effondrement protostellaire ou le rôle des poussières. Ces nouvelles contraintes de masse suppo-

sent par ailleurs de modifier certains détails spécifiques de la structure interne des étoiles, comme la taille présumée de la zone convective ou les processus de mélange de gaz à l'œuvre au sein de ces astres. En outre, certains modèles s'appuyaient jusqu'à présent pour évaluer la masse d'une étoile sur le taux de perte de masse, mesuré grâce à des raies UV engendrées dans l'atmosphère stellaire. Leurs estimations s'avèrent au vu des observations récentes beaucoup trop élevées, et les théoriciens pourraient avoir là encore à remettre leur ouvrage sur le métier. Dernière conséquence et non des moindres : les étoiles supermassives, et donc superlumineuses, ont été très souvent utilisées comme indicateurs de distances cosmiques, pour jaloner l'Univers jusqu'à quelque 30 millions d'années-lumière. Qu'elles ne soient pas aussi simples qu'on l'ait cru fait planer un doute sur les estimations de distance fournies jusqu'ici et,

partant, sur l'évaluation de la constante de Hubble (voir dossier dans ce numéro).

Enfin, si la nature s'avère finalement avare de monstres, elle devient du même coup plus généreuse en étoiles de masse comprise entre 20 et 50 masses solaires ! Les observations récentes signent ainsi le grand retour des massives sur le devant de la scène, ce qui a également d'importantes répercussions sur les théories de formation stellaire. En filigrane, c'est même toute une nouvelle "sociologie" des étoiles massives qui semble se profiler : le fait que les supermassives se décomposent en amas compacts montre que les massives se forment préférentiellement en groupes. Des études théoriques récentes renforcent d'ailleurs cette idée. Le meilleur moyen d'expliquer l'origine des étoiles dites "OB en cavale" — des étoiles éjectées par des binaires et animées de vitesses très élevées — est ainsi de supposer que les étoiles O se forment de préférence par petits groupes de binaires pouvant compter jusqu'à trente systèmes, la dynamique du groupe les projetant ensuite dans le milieu interstellaire. Qui sait même si les étoiles massives ne se forment pas *que* collectivement ? Étranges créatures qui, tout au moins dans leur jeunesse, craindraient la solitude... ■

(1) M. Heydari-Malayeri et J.-L. Beuzit, *Astronomy and Astrophysics*, 287, L17-L20 (1994).
(2) Voir *Ciel et Espace* n° 296, novembre 1994.