

Lesquelles ?

On peut imaginer qu'une dilatation ou une contraction de l'astre influe sur son activité et sa brillance. Mes mesures ont montré que Bételgeuse n'avait pas sensiblement changé de taille.

Un nuage de poussière passant devant la ligne de visée aurait aussi pu expliquer le phénomène observé. Un nuage interstellaire est peu probable, mais un nuage circumstellaire, c'est-à-dire un nuage qui évolue en orbite autour de Bételgeuse, est un bon candidat. L'étoile, qui expulse beaucoup de poussière, est entourée d'un grand nombre de ces nuages (voir l'image ci-contre). Cependant, si le responsable était un tel amas de gaz et de poussière, la tache obscure devrait se déplacer à la surface des images et masquer progressivement différentes régions. Or ce n'est pas le cas.

Quelles sont les autres explications possibles ?

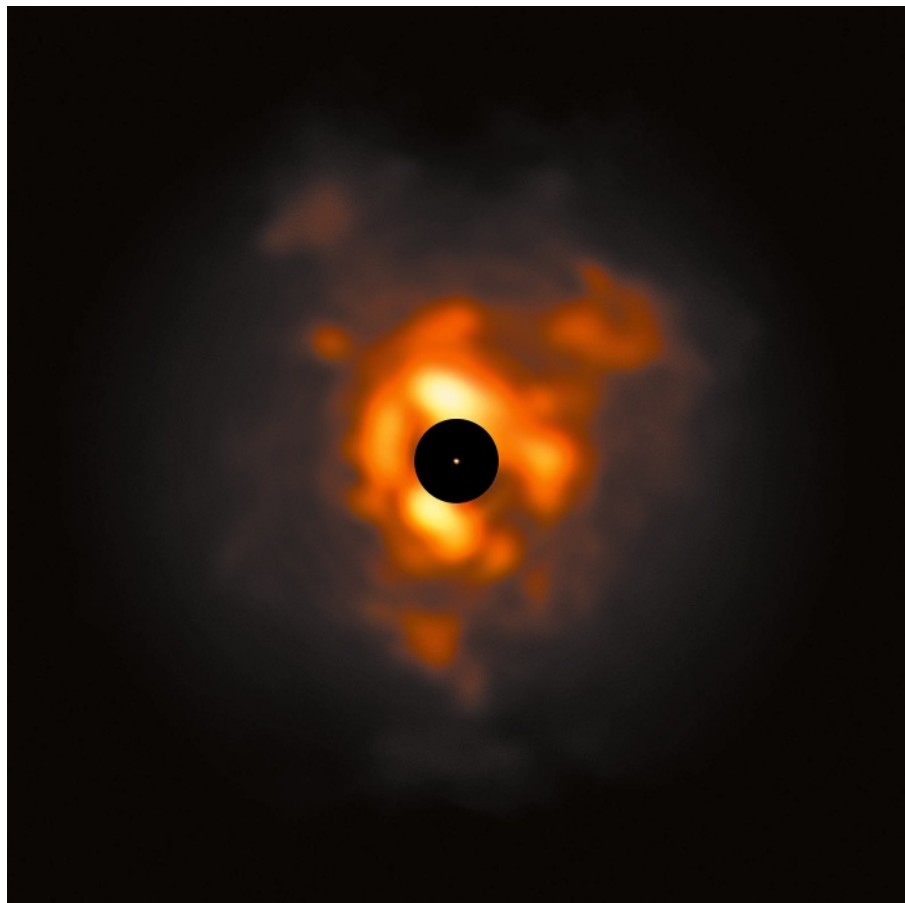
L'assombrissement d'une cellule de convection de Bételgeuse pourrait expliquer cette baisse de luminosité. Sur cette étoile, les cellules de convection sont très grandes, avec des tailles de l'ordre de 60% du rayon de l'étoile. Ces dimensions sont contrôlées par l'intensité de la gravité à la surface. Dans une étoile où cette force est plus importante, le gaz retombe plus vite. Ainsi, dans le cas du Soleil, les cellules de convection sont petites, de l'ordre de 1 000 kilomètres de largeur.

En 2018, avec des collègues, nous avons mesuré par spectropolarimétrie que la vitesse d'élévation du gaz par convection sur Bételgeuse est d'environ 22 kilomètres par seconde. Mais une bulle de gaz très chaude pourrait arriver un peu plus vite et s'élever légèrement plus haut que d'habitude par rapport à la surface. Le gaz se refroidirait alors davantage. Or, en se refroidissant, la cellule convective devient plus sombre. On aurait donc une grande région de luminosité plus faible à la surface de l'étoile. Ce scénario est compatible avec le fait que la baisse de luminosité de Bételgeuse soit survenue 424 jours après le précédent minimum. Une pulsation de l'étoile a probablement émis une bulle de gaz très chaud vers la surface.

Le dernier scénario s'appuie sur la même idée que le précédent. Le gaz très chaud est arrivé si vite à la surface qu'il se serait libéré de l'attraction de l'étoile. Il aurait formé un nuage qui se serait éloigné de l'astre. En se refroidissant au-dessous de 2 000 kelvins, une partie du gaz se serait condensée en poussière opaque, occultant une fraction de la surface de l'étoile.

Comment départager ces deux scénarios ?

C'est assez difficile. Il faut faire une modélisation précise du phénomène afin de rendre compte de toutes les mesures dont nous



Prise grâce à l'instrument *Visir* du VLT, cette image montre le rayonnement infrarouge thermique émis par la poussière qui entoure Bételgeuse (le disque noir occulte l'étoile et sa proche périphérie trop brillante ; l'image de l'astre obtenue avec *Sphere* a été rajoutée au centre, à la même échelle). L'étoile expulse en effet de grandes quantités de matière dans son environnement.

disposons. La situation était assez confuse, plusieurs équipes ont publié des conclusions contradictoires. Pour certains chercheurs, les données s'expliquaient sans la présence de poussière. Pour d'autres, c'était le contraire. Pour avoir une réponse définitive, j'avais dans l'idée de demander du temps d'observation sur le radiotélescope *Alma*, qui avait prévu d'opérer dans sa configuration étendue en juin-juillet 2020.

Ce radiotélescope est constitué de 66 antennes d'un diamètre compris entre 7 et 12 mètres. Elles fonctionnent de concert en faisant interférer leurs signaux. Grâce à cette technique, on simule l'équivalent d'un télescope géant.

Un avantage d'*Alma* est que les antennes sont mobiles. On peut alors les installer dans une configuration très resserrée, ou au contraire très étendue où les antennes sont écartées de 16 kilomètres. Dans cette dernière configuration, une bonne résolution de la surface de Bételgeuse est atteignable.

Le radiotélescope *Alma* est très sensible à la présence de gaz. Si l'origine du phénomène était un nuage de poussière et de gaz qui s'éloignait de Bételgeuse quasiment selon notre ligne de visée, nous devrions pouvoir mesurer avec *Alma* l'effet Doppler de ce mouvement. Le spectre de la lumière émise par le gaz serait décalé vers le bleu, le nuage se déplaçant vers

nous. Malheureusement, la pandémie de Covid-19 a déjoué mes plans.

Que s'est-il passé ?

Pour protéger les équipes et lutter contre la propagation du virus, la plupart des grands observatoires dans le monde ont fermé. Le VLT a cessé ses opérations le 24 mars 2020. Par chance, j'ai eu du temps d'observation juste trois jours avant la fermeture. En revanche, *Alma* a fermé le 19 mars et je n'ai pas pu réaliser la mesure que j'espérais.

Cette décision était évidemment la bonne. Mais pour Bételgeuse, le temps était compté. Si le phénomène était dû à un nuage de poussière, celui-ci allait finir par sortir de la ligne de visée et, en grossissant, il allait se diluer et devenir quasi invisible pour nos instruments. Il me restait donc à travailler sur la modélisation du nuage.

En quoi consiste-t-elle ?

Il s'agit d'une simulation du transfert radiatif de la poussière. Le nuage est chauffé par le rayonnement de l'étoile, et diffuse alors la lumière vers la Terre. En modélisant l'astre et le nuage, on reconstruit l'image qu'on aurait en les observant depuis la Terre et on compare aux données. La difficulté vient du nombre de paramètres : la position du nuage, sa taille, sa composition, la taille des grains de poussière, etc. J'ai ainsi évalué des milliers de scénarios, chacun prenant une heure de temps de calcul dans le centre informatique de mon laboratoire de l'époque, l'institut d'astronomie de la KU Leuven, en Belgique. J'ai aussi simulé le cas d'une tache froide localisée à la surface de l'étoile, sans poussière, comme le suggérerait l'étude de Thavisha Dharmawardena, de l'institut Max-Planck d'astronomie, à Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues. Mais le nuage de poussière semble mieux rendre compte des observations.

Le nuage, sphérique, aurait un rayon compris entre 675 et 900 millions de kilomètres (soit à peu près le rayon de Bételgeuse), une masse de poussière de l'ordre de $3 \text{ à } 13 \times 10^{-10}$ masse solaire et 200 fois plus de gaz. L'énigme de Bételgeuse est ainsi probablement résolue. Mais dans l'espoir de confirmer ce scénario, de nouvelles observations sont en cours (et d'autres, en préparation) pour voir s'il est encore possible d'apercevoir la trace de ce nuage de poussière. Mais sa non-détection ne permettra pas pour autant de disqualifier cette explication.

Que nous apprend cet épisode exceptionnel sur les supergéantes rouges ?

C'était un événement incroyable pour comprendre la perte de masse de ces étoiles. Nous savons qu'elles évacuent de la matière en continu grâce au vent stellaire. Et nous nous doutions qu'elles pouvaient aussi expulser de

façon épisodique de grandes quantités de gaz et de poussière, comme cela serait le cas ici. Le nuage de la modélisation représente entre 35% et 128% de la perte moyenne annuelle de Bételgeuse. Dans mon programme d'observation de janvier 2019, un de mes objectifs était justement de voir des expulsions radiales de nuages de poussière. D'en avoir eu une quasiment dans la ligne de visée est un événement inespéré. Quelles étaient les chances d'assister à un tel phénomène ?



Un nuage de poussière expulsé par l'astre aurait occulté une fraction de sa surface

La courbe de luminosité de Bételgeuse signalerait-elle une prochaine surprise ?

Après la grande baisse de 2019-2020, la luminosité est remontée très vite et a atteint un maximum beaucoup plus tôt que ne le prévoit le cycle de 400 jours. Attendu pour octobre-novembre, le maximum s'est produit en juillet ! Il était donc important de continuer d'examiner Bételgeuse. Problème : quand le Soleil se retrouve sur la ligne de visée en juin et juillet, nous ne pouvons plus voir Bételgeuse.

Pour pallier cette interruption dans le suivi, des collègues ont tenté d'utiliser le rover martien *Curiosity*, mais cela n'a pas fonctionné. Andrea Dupree, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, a utilisé l'un des satellites *Stereo*. Ceux-ci étudient les interactions Soleil-Terre avec l'un situé en avance et l'autre en retard sur l'orbite terrestre. Ils offrent ainsi un point de vue différent pour observer Bételgeuse. Les mesures de luminosité de Bételgeuse obtenues par *Stereo* ont montré un nouveau décrochage rapide. Quand le suivi a repris depuis les instruments sur Terre, la courbe de luminosité était assez erratique, même si l'on a l'impression qu'un retour à la normale se profile (voir la figure page 36). Il est encore trop tôt pour interpréter ce comportement. Est-il lié à la grande baisse qui a précédé ? Mes collègues et moi y travaillons déjà !

**PROPOS RECUEILLIS
PAR SEAN BAILLY**

BIBLIOGRAPHIE

M. Montargès et al., **A dusty veil shading Betelgeuse during its great dimming**, *Nature*, en ligne le 17 juin 2021.

A. Dupree et al., **Spatially resolved ultraviolet spectroscopy of the great dimming of Betelgeuse**, *The Astrophysical Journal*, vol. 899, article 68, 2020.

T. E. Dharmawardena et al., **Betelgeuse fainter in the submillimeter too : an analysis of JCMT and APEX monitoring during the recent optical minimum**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 897, article L9, 2020.

G. M. Harper et al., **An updated 2017 astrometric solution for Betelgeuse**, *The Astronomical Journal*, vol. 154, article 11, 2017.