

Pourquoi Bételgeuse est-elle une étoile si médiatique ?

Dans le ciel, Bételgeuse ne passe pas inaperçue. Elle appartient à la constellation d'Orion que l'on reconnaît inmanquablement grâce à sa ceinture, composée de trois étoiles alignées. De part et d'autre de cette dernière, on trouve deux étoiles très brillantes, une bleue, Rigel, et une rouge, Bételgeuse.

Bételgeuse est, après Antarès, la deuxième supergéante rouge la plus proche du Soleil. Comme Antarès se situe plus près du centre galactique, elle est cernée de nombreuses autres étoiles. Elle est donc un peu plus difficile à repérer. Bételgeuse, plus isolée, se détache parfaitement dans le ciel nocturne. Elle brille dans l'infrarouge aussi intensément que Vénus dans le visible. Les astronomes, professionnels et amateurs, ont ainsi une affection particulière pour cette étoile. Alors, quand il lui arrive un événement extraordinaire comme une chute importante de sa luminosité, cela attire nécessairement l'attention.

On parle d'une étoile proche, mais à quelle distance se trouve-t-elle exactement ?

De façon étonnante, on connaît assez mal cette distance. Quand une étoile est proche, on utilise la technique de la parallaxe. Pour comprendre le principe de cette mesure, tendez un bras devant vous avec le pouce dressé. Regardez-le avec l'œil gauche, puis avec l'œil droit. Le doigt semble bouger par rapport à l'arrière-plan fixe. Avec la mesure de ce « déplacement », ou parallaxe, et un peu de trigonométrie, il est possible de calculer la distance entre vos yeux et le pouce. Avec les étoiles, on utilise la même approche, les deux yeux étant remplacés par votre télescope sur Terre, ou en orbite, à six mois d'intervalle, donc à deux positions opposées lors de la révolution de la planète autour du Soleil. Cette technique fonctionne pour les étoiles les plus proches, car plus elles sont lointaines, plus la parallaxe est faible et difficile à évaluer.

Pour Bételgeuse, cette méthode devrait donner de bons résultats, *a priori*. Il n'en est rien... Pour une raison étonnante : la parallaxe est inférieure au diamètre de l'étoile ! La plupart des astres sont juste des points, même quand on les observe avec des instruments puissants. Bételgeuse est si grosse (son diamètre est équivalent à 1000 fois celui du Soleil) et si proche qu'on ne peut pas la considérer comme un point. Par ailleurs, sa surface est soumise à d'importantes fluctuations et il est difficile de définir son centre. Par conséquent, l'incertitude est grande dans le calcul de sa parallaxe.

Le satellite *Hipparcos*, dédié à des mesures de parallaxes, a permis d'obtenir une distance d'environ 520 années-lumière, avec une incertitude de 73 années-lumière. Malgré sa

précision plus élevée, le successeur d'*Hipparcos*, *Gaia*, ne peut malheureusement pas mesurer la parallaxe de Bételgeuse... car cette dernière est trop brillante pour la caméra du satellite ! En 2018, Graham Harper, de l'université du Colorado, et ses collègues ont réalisé une mesure de parallaxe avec des radiotélescopes. Ils ont obtenu une distance de 724 années-lumière. C'est la valeur que j'utilise en général. Plus récemment, en 2020, Meridith Joyce, de l'université australienne de Canberra, et ses collègues ont proposé une méthode originale. Ils ont utilisé des modèles d'hydrodynamique stellaire pour évaluer de façon indépendante cette distance à 548 années-lumière, mais les incertitudes restent importantes.

Quand on travaille avec cette étoile, il faut garder en tête ce problème de la mesure de la distance. Ces incertitudes se propagent à toutes les autres grandeurs que l'on voudrait déterminer : la luminosité, la température, etc.

Si Bételgeuse n'est pas un point, est-il possible d'avoir une image de sa surface ?

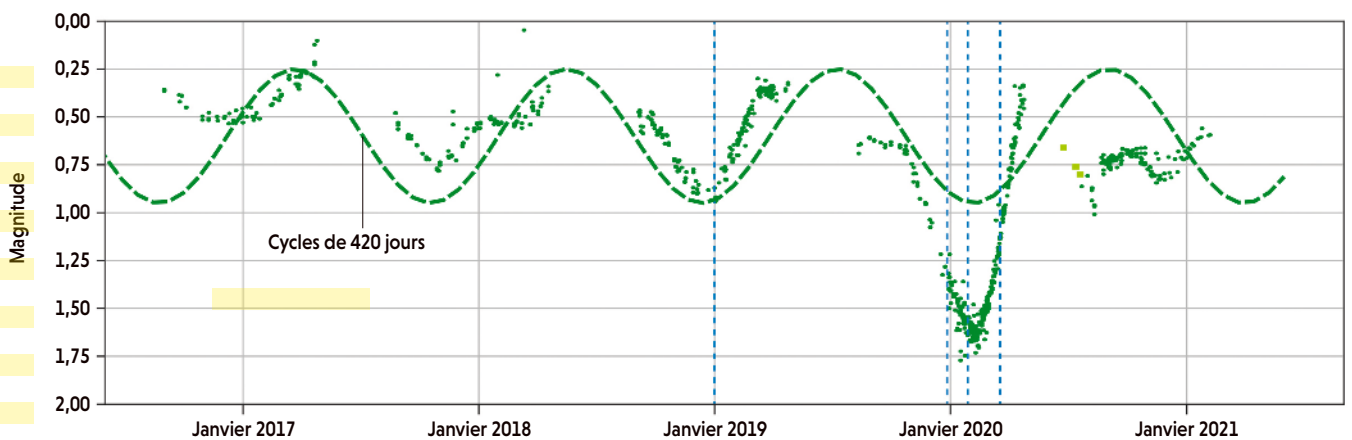
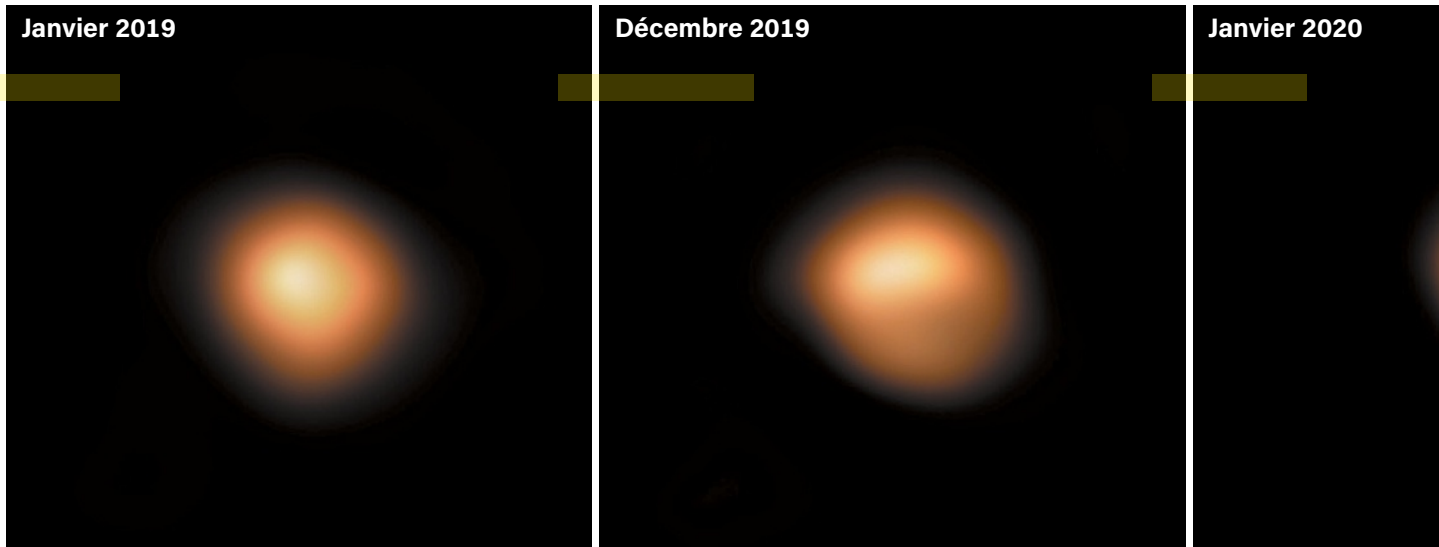
Bételgeuse nous offre effectivement cette chance quasi unique : nous pouvons obtenir une image de sa surface grâce aux techniques d'interférométrie des plus grands télescopes, tels le *VLT* (*Very Large Telescope*) et *Alma* (*Atacama Large Millimeter Array*). Cette étoile est donc un laboratoire idéal pour étudier les supergéantes rouges.

Que sont ces supergéantes rouges ?

Dans cinq milliards d'années, lorsque le Soleil épuiera son carburant, la fusion de l'hydrogène ne sera pas suffisante pour maintenir l'équilibre de l'étoile, qui commencera à se contracter sur elle-même. De nouvelles réactions de fusion s'enclencheront et conduiront à voir le rayon de l'astre enfler jusqu'à environ l'orbite de la Terre. Le Soleil sera alors une géante rouge.

Suivant un schéma similaire, les supergéantes rouges sont le destin d'étoiles beaucoup plus massives que le Soleil, des géantes bleues (de 10 à 40 masses solaires). Ces dernières consomment très vite leur hydrogène et ont une durée de vie très courte, de l'ordre de 10 à 100 millions d'années. Elles deviennent alors des supergéantes rouges. Puis, quand ces astres épuisent à leur tour leur carburant, ils explosent en supernovæ (voir l'article pages 24 à 33). Leur cœur s'effondre et forme une étoile à neutrons ou un trou noir, selon la masse finale de la supergéante rouge.

Or les supergéantes rouges perdent beaucoup de matière au cours de leur vie sous la forme d'un important vent stellaire. Bételgeuse expulse chaque année l'équivalent de 10^{-6} masse solaire, mais on estime qu'elle contient encore 98% de la masse de la géante bleue dont elle est issue. Par exemple, VY Canis Majoris perd en



Grâce à l'instrument *Sphere* du VLT, Miguel Montargès a photographié la surface de Bételgeuse avant et durant la baisse de luminosité, en janvier et décembre 2019, puis en janvier et mars 2020. La tache en bas à droite est probablement un nuage de poussière émis par l'étoile dans la ligne de visée. En janvier 2020, l'étoile semble complètement voilée. Le suivi de la luminosité de l'étoile sur plusieurs années (*graphique*) montre que les variations respectaient un cycle d'environ 420 jours. Après la grande baisse de 2019-2020, l'évolution est beaucoup moins régulière.

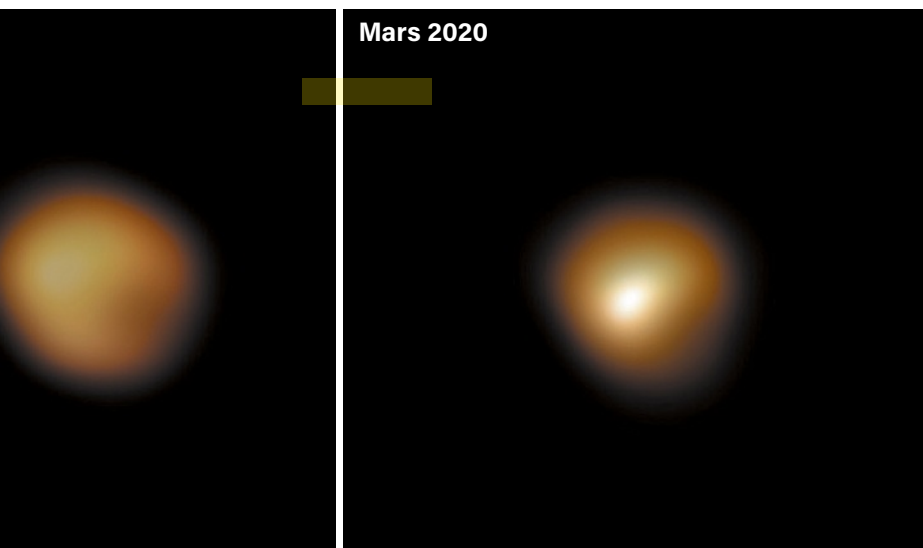
moyenne 6×10^{-4} masse solaire par an et aurait déjà cédé 30% de sa masse initiale.

Dans cette famille d'étoiles, la perte de masse est le moteur essentiel de leur destin. Elle influe sur les caractéristiques de la supernova et sur la formation finale d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons. Cependant, nous comprenons très mal les mécanismes en jeu et comment ces étoiles peuvent se défaire de jusqu'à 60% de leur masse avant d'exploser. Une fois que le gaz s'est échappé de la surface et a commencé à se condenser en poussières, on sait expliquer comment la pression de radiation le pousse et contribue au vent stellaire. Mais comment la matière quitte-t-elle la surface ? Plusieurs phénomènes interviennent dont il reste à préciser le rôle. Le gaz chauffé en profondeur remonte en surface où il se refroidit, puis s'enfonce de nouveau vers l'intérieur de l'astre. Sur Bételgeuse, ces mouvements de convection sont importants et pourraient mener à une perte de matière. En outre, la gravité au niveau de la surface est assez faible.

Encore plus étonnant, on sait depuis les années 1960 que certaines supergéantes rouges

peuvent subir une « cure de jeunesse » et revenir au stade de géante bleue. Ce retour en arrière est probablement lié à la composition chimique du cœur de l'étoile et se déclenche quand l'astre a expulsé une certaine quantité de matière. La géante bleue peut ensuite reprendre une évolution normale et devenir une supergéante rouge et exploser en supernova. Mais elle peut aussi exploser au stade de géante bleue ou dans un stade intermédiaire de supergéante jaune.

Les supergéantes rouges sont un maillon important dans l'évolution cosmique globale. Ces étoiles produisent beaucoup d'éléments lourds comme l'oxygène, le silicium, etc., qu'elles expulsent avec le vent stellaire ou lors de la supernova. Ces gaz, en se refroidissant, se condensent et forment de la poussière (tels des silicates et des alumines), la fameuse « poussière d'étoiles » dont nous sommes tous constitués. Les volumes de poussière engendrés sont gigantesques ; VY Canis Majoris en a tellement relâché qu'elle se cache derrière un épais cocon opaque. Bételgeuse présente un environnement encore transparent qui permet d'observer sa surface.



Quand avez-vous commencé à travailler sur les supergéantes rouges ?

Mon sujet de thèse, sous la direction de Pierre Kervella, au Lesia, à Meudon, était déjà focalisé sur Bételgeuse. Je continue d'étudier les supergéantes rouges. C'est d'ailleurs pour comprendre les mécanismes de perte de masse de ces astres que j'étais pendant le Nouvel An 2018-2019 au VLT, pour prendre des clichés de Bételgeuse. J'ai utilisé l'instrument *Gravity* pour observer les cellules de convection à la surface de l'étoile et l'instrument *Sphere* pour explorer la poussière émise dans l'environnement stellaire proche. Grâce à son optique adaptative, *Sphere* a une résolution angulaire supérieure au télescope spatial *Hubble*, ce qui permet d'étudier finement la distribution de la poussière. Le principe de l'optique adaptative repose sur un miroir qui se déforme en temps réel et corrige les perturbations induites par les turbulences de l'atmosphère. À cette époque, Bételgeuse semblait se comporter normalement.

Que s'est-il passé ensuite ?

En novembre 2019, des astronomes ont commencé à noter que la luminosité de Bételgeuse diminuait vite et était plus basse que prévu. Je n'étais pas trop surpris. L'étoile a une luminosité variable, qui suit des cycles assez réguliers de 400 et 2000 jours. Pour moi, nous étions sur une baisse du cycle court modulée par celle du cycle long : la conjonction des deux cycles pouvait très certainement expliquer une atténuation plus importante que lors des baisses précédentes.

Quelle est l'origine de ces cycles ?

Bételgeuse est une étoile variable semi-régulière marquée par un comportement périodique parfois interrompu par des irrégularités.

Sa luminosité oscille suivant un cycle de 400 jours environ. L'origine de ces cycles n'est pas complètement comprise. Les explications avancées sont liées à la durée de vie des cellules de convection et de possibles pulsations du cœur de l'étoile. Mais les spécialistes ne s'accordent pas sur la façon dont ces phénomènes agissent et se traduisent par des cycles. Nous sommes vraiment loin de bien appréhender ces supergéantes rouges !

Cette baisse de luminosité Bételgeuse était-elle néanmoins particulière ?

En janvier 2020, la luminosité de l'étoile a diminué d'un facteur 2,5 par rapport à sa valeur moyenne. Cette baisse était un record, du jamais vu. Et cela se voyait à l'œil nu. Comparée à Rigel, dans la constellation d'Orion, Bételgeuse semblait très faible.

En 2009, lors d'une précédente baisse de luminosité assez marquée, un collègue astronome avait été interviewé et avait mentionné que la fin de l'étoile était « proche »... Aux échelles astrophysiques, cela signifie qu'elle n'allait pas exploser avant 10000 ans ! Je pense que le message avait été mal compris et certains médias ont tiré qu'une supernova était imminente. La baisse de fin 2019-2020 a probablement relancé cette confusion.

D'une certaine façon, je rejoins cet enthousiasme. Il n'y a pas eu de supernova dans la Voie lactée depuis 400 ans, depuis qu'on a des instruments d'une grande précision pour les étudier. Une telle explosion serait un événement historique pour les astrophysiciens. Malheureusement, Bételgeuse n'explosera pas demain.

Quelle a été votre réaction face à cette fausse idée de supernova ?

Constatant l'enthousiasme des médias et du grand public pour cette histoire, j'ai proposé de faire une nouvelle observation de Bételgeuse au VLT. Mon intention était de montrer qu'il ne se passait rien d'anormal, en dehors des fameux cycles de l'étoile responsables d'un assombrissement de sa surface. La meilleure solution était donc de prendre un cliché à haute résolution angulaire de l'astre. Ma demande d'observation a été acceptée et réalisée le 27 décembre 2020. Et j'ai été surpris par le résultat !

Que montrait l'image ?

Dans le domaine visible, la partie en bas à droite de l'étoile était presque dix fois plus sombre que le reste de la surface (voir les photos ci-dessus). Il se passait donc quelque chose d'exceptionnel, contrairement à ce que je pensais. La publication de cette image a encouragé de nombreux chercheurs à se pencher sur les différentes explications possibles pour comprendre ce phénomène. Sur les quatre pistes principales, deux ont été écartées assez vite.