



- 1) : LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris-Cité, 5 place Jules Janssen, 92195, Meudon, France
2) : Institut Polytechnique des Sciences Avancées IPSA, 63 boulevard de Brandebourg, F-94200 Ivry-sur-Seine, France
3) : IMCCE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Lille, 77 av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France

1. Les grandes inconnues des supergéantes rouges

Les supergéantes rouges sont l'état évolué des étoiles massives ($M_{\text{init}} \geq 8 M_{\odot}$). Naines bleues sur la séquence principale, ces étoiles enflent pour atteindre un volume correspondant à un milliard de fois celui du Soleil, pour seulement une vingtaine de fois leur masse en moyenne. Dans cet état qui ne dure que quelques centaines de milliers d'années, l'étoile perd continuellement de sa matière par son vent stellaire (une perte de masse 7 fois plus dense que le vent solaire). Cette perte de masse varie de 10^{-7} à $10^{-4} M_{\odot}/\text{an}$. Elle contribue à l'enrichissement chimique du milieu interstellaire (les fameuses « poussières d'étoiles »), mais décide aussi du destin de l'étoile. En effet, c'est elle qui va déterminer la masse finale de l'étoile (et donc si elle deviendra une étoile à neutrons ou un trou noir). C'est également le taux de perte de masse, avec le taux de rotation de l'étoile, qui déterminera si elle effectuera une « boucle vers le bleu » : une excursion vers la partie chaude du diagramme Hertzsprung-Russell.

Or, l'origine de la perte de masse demeure inconnue. Les supergéantes rouges ont un champ magnétique faible (quelques gauss), et ne connaissent ni éruption, ni pulsation radiale de grande échelle.

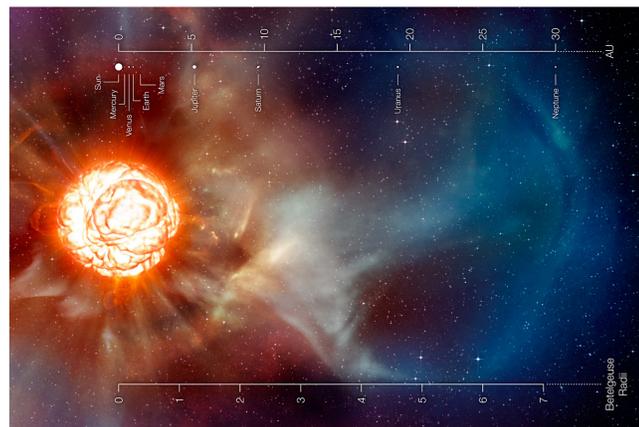


Figure 1 : Vue d'artiste d'une supergéante rouge à l'échelle du système solaire. La photosphère correspond à l'orbite du Jupiter. Au-delà se déploie la perte de masse.

2. Bételgeuse, une supergéante rouge proche

Bételgeuse est sans conteste la plus célèbre et la plus étudiée des supergéantes rouges. Sa place préminente dans la constellation d'Orion la rend très facile à repérer. Sa couleur orangée est immanquable et répond très bien au bleu de Rigel. De plus, sa grande taille ($R \sim 1000 R_{\odot}$) combinée à sa proximité ($d = 222$ pc ou 724 années-lumière, Harper et al. 2017) lui confèrent un grand diamètre apparent d'environ 42 mas (millisecondes d'arc, mesuré par interférométrie optique au VLTI, en infrarouge proche, voir par exemple Montargès et al. 2021).

En raison de cette importante taille apparente, Bételgeuse est le laboratoire idéal pour mieux comprendre la perte de masse des supergéantes rouges. En effet, pour cette étoile, il est possible de résoudre spatialement l'environnement de gaz et de poussières grâce aux grands télescopes, et même sa photosphère avec l'instrument VLT/SPHERE et le VLTI (Montargès et al. 2021).

Figure 2 : L'environnement de Bételgeuse et les différents moyens d'observation qui permettent d'obtenir des données résolues spatialement de la photosphère jusqu'à l'interface avec le milieu interstellaire.

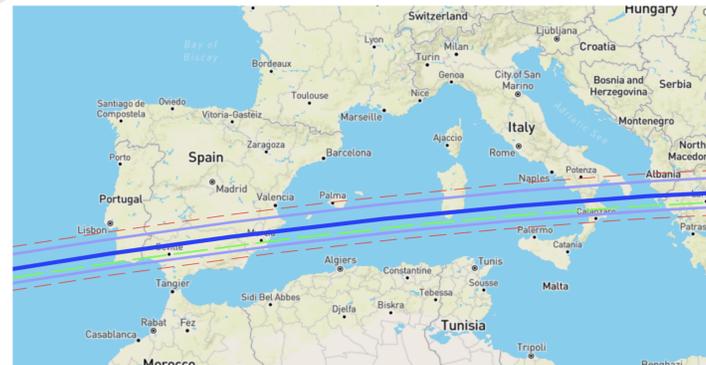
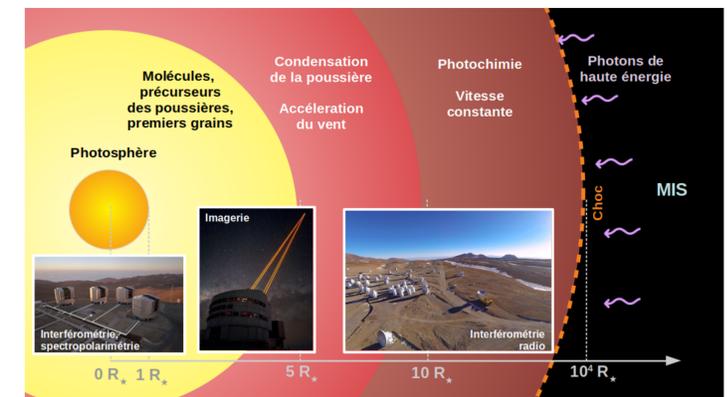
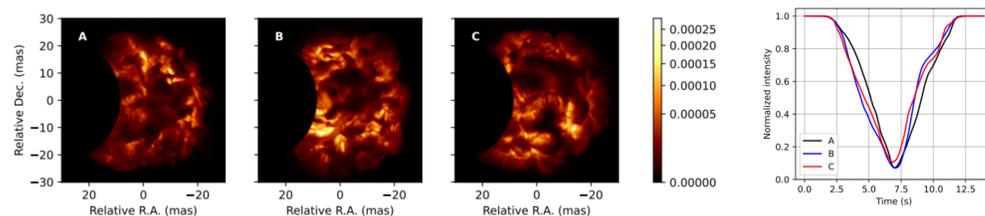


Figure 3 : Simulation de l'occultation de Bételgeuse par Leona. Les 3 images de gauche montrent des simulations 3D radiatives hydrodynamiques de la surface convective d'une supergéante rouge (partiellement occultée par un corps sphérique). Les courbes de droite correspondent à la courbe de lumière pour chaque simulation. On constate que le profil change en fonction du motif convectif de surface. L'éclipse ne sera sans doute pas totale.

3. L'occultation de Bételgeuse par 319 Leona le 12 décembre 2023 : la synergie VLT/VLTI et astronomes amateurs



Le 12 décembre 2023, Bételgeuse sera occultée par l'astéroïde 319 Leona le long d'une très fine bande qui passera au Nord de la Méditerranée (voir figure centrale). Cette occultation sera exceptionnelle : Leona et Bételgeuse auront quasiment la même taille apparente (~ 50 mas en visible). Le phénomène ressemblera plus à une éclipse (annulaire) qu'à une occultation standard.

Pendant l'entrée et la sortie de Leona du disque de Bételgeuse (qui ne dureront que quelques secondes), il sera possible d'obtenir des informations sur la distribution des cellules convectives à la surface de l'étoile. A quoi bon vu qu'on peut obtenir une image de la surface de l'étoile par interférométrie au VLTI ? Le VLTI n'observe qu'en infrarouge (entre 1 et 13 μm). L'obtention de courbes de lumière en lumière visible (idéalement bandes R, V et B, ou même en filtre étroit), permettra de comparer la distribution de lumière à la surface de l'étoile avec une observation infrarouge. Ce résultat sera inédit puisqu'il n'y a pas d'interféromètre en lumière visible permettant de réaliser une telle observation.

À noter, pour que l'expérience fonctionne, il sera impératif de déterminer la forme de Leona, et pour cela d'observer aussi avec soin les occultations d'autres étoiles par Leona : le 13 septembre, le 29 octobre, les 30 et 31 décembre 2023.

Il faudra donc obtenir des observations photométriques avec des temps de pose de quelques dizaines de millisecondes. Bételgeuse étant proche de la magnitude 0, cela semble réalisable, mais il n'est pas possible de prévoir exactement quelle sera la luminosité de Bételgeuse au cœur de l'occultation. De plus il faudra assurer une coordination des observateurs pour se répartir les observations suivant différents filtres.

Pour aller plus loin, il sera aussi intéressant d'obtenir de la spectrométrie en visible pour voir si la largeur des raies atomiques change au cours de l'occultation, ce qui révélerait la distribution de vitesse des cellules convectives à la surface de l'étoile.

4. Les observations dont nous avons besoin

Les observations proposées ont pour but de déterminer les caractéristiques du motif convectif à la surface de l'étoile. La courbes de lumière en visible permettront de comparer la distribution de lumière en surface en visible et en infrarouge, et ainsi de voir si les meilleurs modèles numériques reproduisent bien la convection. La spectroscopie permettra de caractériser le champ de vitesse turbulente de la convection qui est censée contribuer au déclenchement de la perte de masse des supergéantes rouges.

La référence GPS des time-box habituelles sera suffisante.

- Pendant l'occultation :
 - Photométrie : courbes de lumières en filtres R, V, et B et H α avec des temps de pose < 100 ms (le cas échéant, du sans filtre conviendra également)
 - Spectroscopie : minimum 10 000, idéalement $R > 40 000$; placer la fente sur le long de l'axe horaire et obtenir une seule exposition durant tout le long de l'occultation, suivi horaire arrêté (on obtiendra alors un seul spectre le long de la fente, pour lequel on devrait voir la largeur des raies changer)
- Avant et après l'occultation :
 - Participer aux observations des autres occultations par Leona pour en déterminer la forme (le 13 septembre, le 29 octobre, les 30 et 31 décembre 2023)

Bibliographie

- Harper et al. 2017, *The Astronomical Journal*, 154, 11, ADS : 2017AJ...154...11H, arXiv 1706.06020
- Montargès et al. 2021, *Nature*, 594, 365, SharedIt : <https://rdcu.be/ddgZi>, arXiv 2201.10551
- L'occultation de Bételgeuse par Leona sur LuckyStar : <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/occ.php?p=124370>

Remerciements



This project received funding under the Framework Program for Research and Innovation "Horizon 2020" under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No. 945298.