

Les étoiles massives

- Des rappels sur la lumière
- Des rappels sur l'astrophysique des étoiles
- La classe des étoiles massives
- Les étoiles Wolf-Rayet

WR 22 et nébuleuse Carina à 7.500 al.

Observatoire La Silla, champ de 72 x 72 al. Image créée à partir d'images prises avec des filtres rouge, bleu et vert. 28-07-2010.

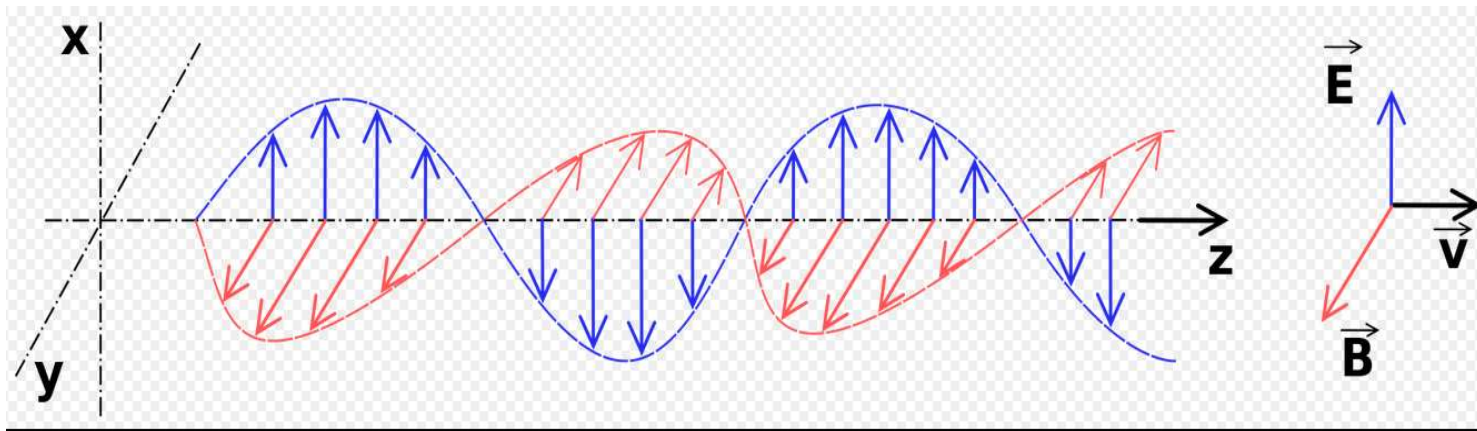
JFP, décembre 2019-février 2020

L'objectif des trois conférences données entre décembre 2019 et février 2020 était de présenter les étoiles massives et plus particulièrement les étoiles Wolf-Rayet. Ce cycle de conférences a commencé par un rappel de notions sur la lumière et sur les étoiles en général. Le présent document est un résumé de ces conférences.

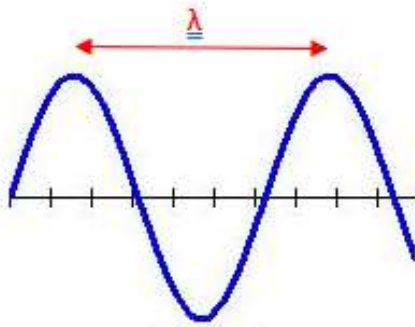
Généralités (lumière et photons)

La lumière

- Une onde électromagnétique,
- Une particule sans masse se déplaçant à une vitesse de $299.792 \text{ km s}^{-1}$



- Cette particule, outre sa vitesse, a une énergie (E), une longueur d'onde (λ) et une fréquence (ν). La loi de Planck relie ces différentes grandeurs : $E = h \nu$ et $\nu = c/\lambda$.



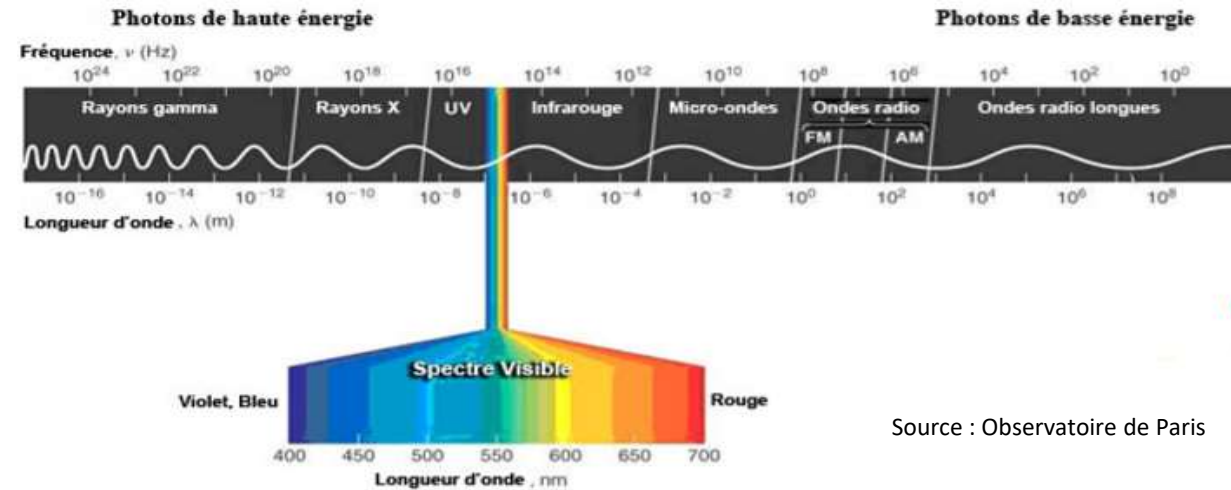
La période P (en seconde) est le temps écoulé pour effectuer une distance de λ . Donc, $c = \lambda/P$.

La fréquence ν , en Hertz, est l'inverse de la période. Donc, $c = \lambda \nu$.

La lumière

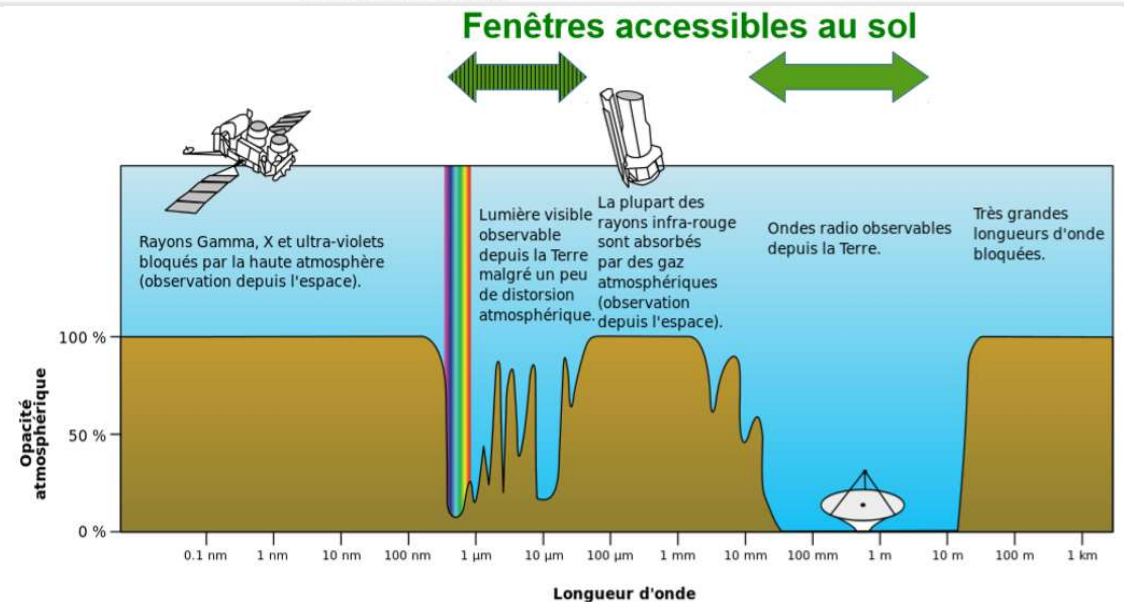
Généralités

- Une grande variété de photons, en fonction des longueurs d'onde.



Source : Observatoire de Paris

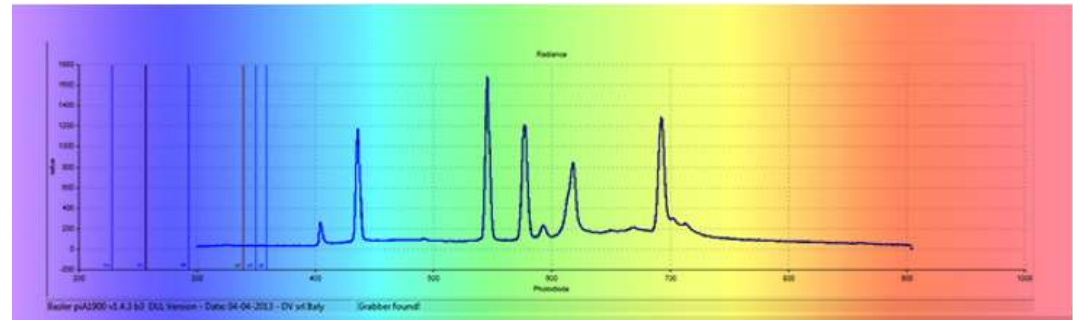
- Seuls des photons de certaines longueurs d'onde arrivent au sol terrestre, d'où l'utilisation de télescopes spatiaux.



La lumière

Les spectres

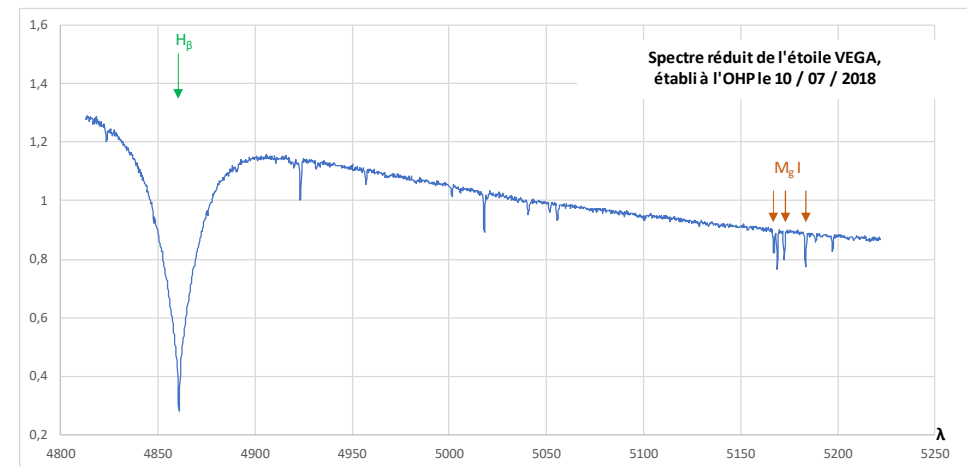
- Une décomposition de la lumière : quantité de lumière en fonction des longueurs d'onde.



- Des spectres d'étoiles présentant un flux continu d'émission et des raies d'absorption ou d'émission (présence de gaz dans l'atmosphère).

Source : Observatoire de Paris

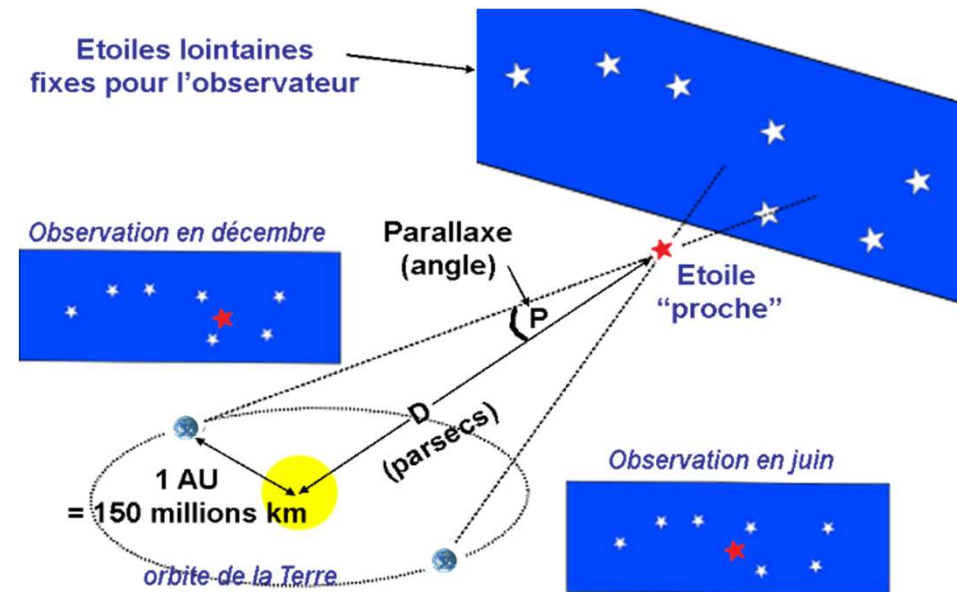
HD172167 - VEGA



La mesure des distances

- Mesure à l'aide d'un rayon laser se réfléchissant sur un miroir (cas pour mesurer la distance Terre-Lune).
- Mesure par application de la méthode de la parallaxe (pour les étoiles proches).
- Utilisation de « chandelles » cosmiques (Céphéïdes, Supernovas, ...) et la relation $m_v - M_v = 5 \log D - 5$ pour des amas, des étoiles éloignées ou des galaxies proches.
- Pour des galaxies éloignées, utilisation de la loi de Hubble-Lemaître : $v = H_0 D$ où v est la vitesse d'éloignement et H_0 la constante de Hubble (environ $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$).

La lumière



Source : Wikipédia

Les étoiles

Définir une étoile

Boule de gaz, a priori, sphérique, pouvant être aplatie aux pôles.

En rotation, avec des vitesses différentes à l'équateur et aux pôles.

Cette boule de gaz est en équilibre hydrostatique car les effets contraires de la gravité et de la pression thermique.

Les caractéristiques à connaître

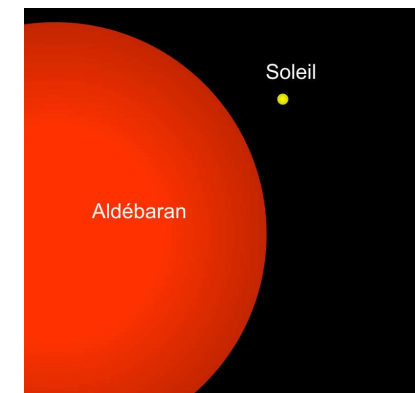
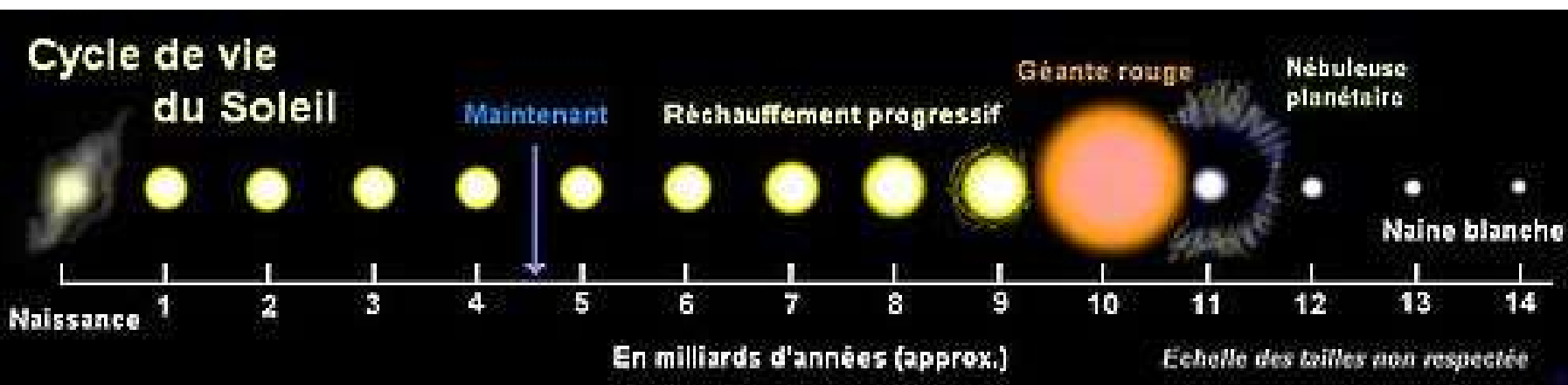
- L'information nous vient par l'analyse de la lumière.
- Les principales caractéristiques physiques d'une étoile sont sa luminosité, sa masse, sa température de surface, sa gravité et sa composition chimique.
- L'étoile est composée à l'origine d'Hydrogène, d'Hélium et de métaux plus lourds (qq %).

Les étoiles

La vie des étoiles :

- Après sa formation, la vie des étoiles est stable au cours de 90 % de leur durée totale. Cette période est appelée séquence principale.
- L'étoile brûle l'hydrogène situé dans son cœur, qui fusionne pour former de l'hélium.
- Lorsque tout l'hydrogène est consommé, la séquence principale s'achève. Le cœur est constitué d'hélium qui peut, pour les plus massives, fusionner pour donner du carbone ou de l'oxygène.
- Une étoile de taille de celle du Soleil devient une géante rouge après la séquence principale, ce qui correspond à une dilatation et un refroidissement.

Plus sa masse initiale est importante et plus elle sera énergétique et aura une lumière bleue ou ultra-violette.



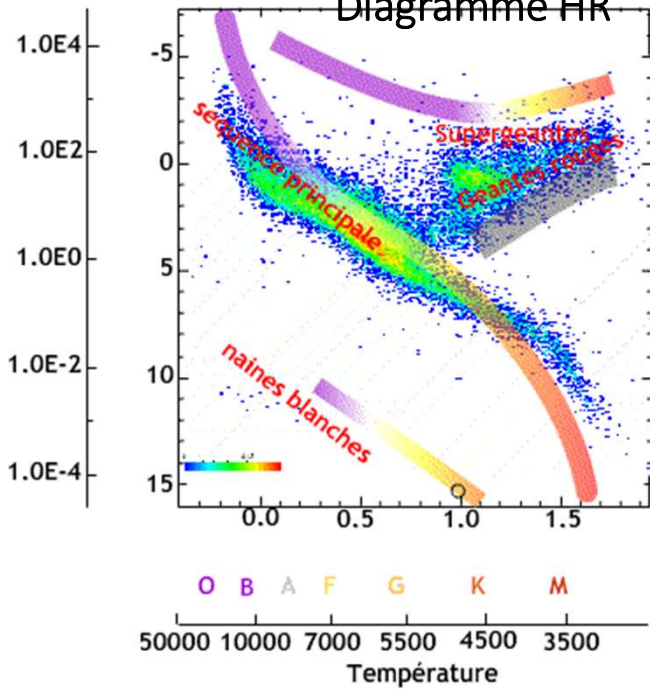
Les étoiles

Les différents types d'étoiles

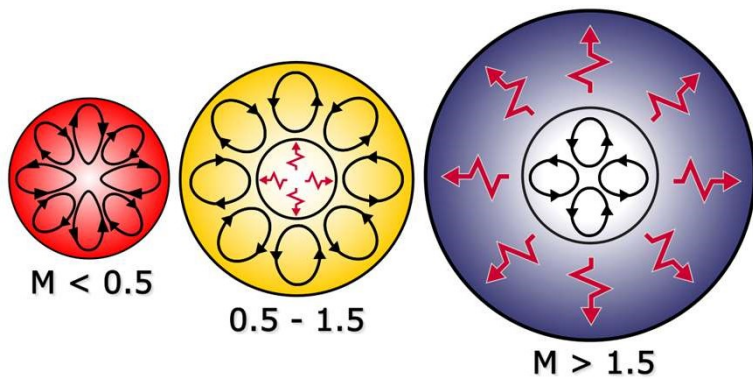
Les différents types d'étoiles sont donc :

- Sur la MS : les naines jaunes et rouges, de masse inférieure à $0,5 M_{\odot}$
- Sur la MS : les étoiles intermédiaires, de masse comprise entre $0,5$ et $7 M_{\odot}$,
- Sur la MS : les étoiles massives, de masse supérieure à $7 M_{\odot}$.
- Hors MS : les géantes rouges, les supergéantes bleues, jaunes et rouges, les WR et LBV.
- Hors MS et dégénérées : les naines blanches.
- Hors diagramme HR : les naines brunes, les étoiles à neutrons, les trous noirs.

Diagramme HR



Source : Observatoire de Paris



Source : Observatoire de Paris

Les étoiles massives

Définition des étoiles massives :

- **De quelle masse s'agit-il ?**

En fin de vie, une étoile peut perdre une partie de sa masse. Dans d'autres cas (binaires), une étoile peut grossir en accaparant et fusionnant la masse d'un compagnon. Il existe donc une masse initiale et une masse observée.

En général, on considère la masse initiale pour définir les étoiles massives, et non la masse déduite des observations.

- Il peut y avoir plusieurs critères de seuils pour une étoile massive. **Le principal est le seuil** à partir duquel une étoile finira sa vie en étoile à neutron ou en trou noir. Ce seuil est à **une masse initiale de $8 M_{\odot}$** ou 8 masses solaires.

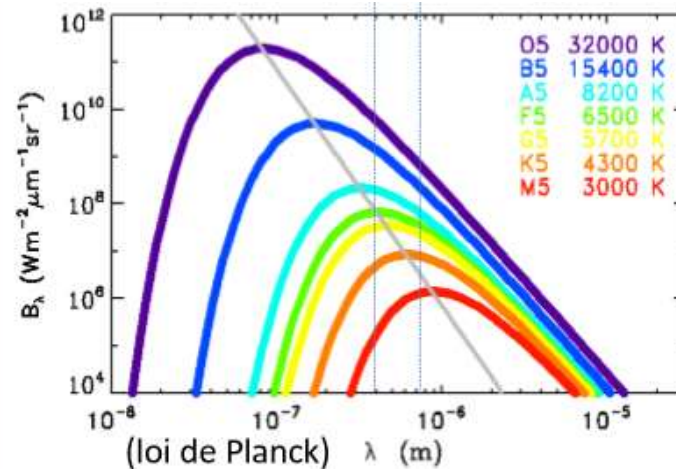
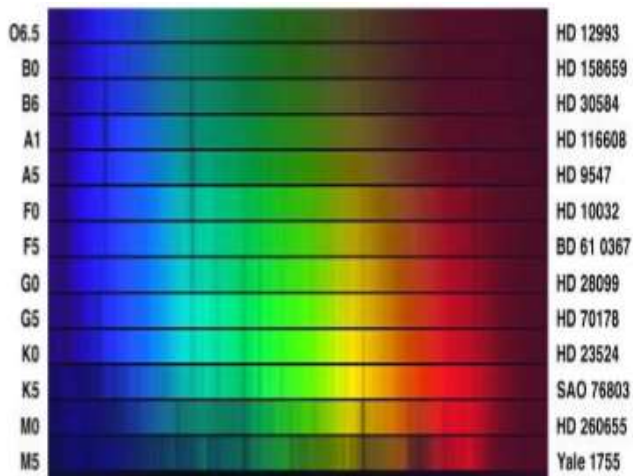
$M_{\text{étoile}} < 0,07 M_{\text{soleil}}$	Pas de fusion d'hydrogène ... Naine brune	
$0,07 M_{\text{soleil}} < M_{\text{étoile}} < 0,5 M_{\text{soleil}}$	Fusion de l'hydrogène	Naine blanche d'hélium
$0,5 M_{\text{soleil}} < M_{\text{étoile}} < 7 M_{\text{soleil}}$	Fusion de l'hydrogène et de l'hélium	Naine blanche de carbone ou d'oxygène
$M_{\text{étoile}} > 8 M_{\text{soleil}}$	Fusion de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone, de l'oxygène, ...	Etoile à neutron ou trou noir

Les étoiles massives

Les caractéristiques communes

Les types spectraux des étoiles massives sont O et B. Les étoiles O émettent principalement dans l'ultra-violet, et les étoiles B dans le bleu. Rigel est de type spectral B8Ia. C'est une supergéante de masse $17 M_{\odot}$, de température de 10.000 K et de rayon $79 R_{\odot}$.

Les caractéristiques communes portent sur les fusions au cœur des étoiles, leurs structures,



Class	Temperature	Apparent color
O	$\geq 30,000$ K	blue
B	10,000–30,000 K	blue white
A	7,500–10,000 K	white to blue white
F	6,000–7,500 K	white
G	5,200–6,000 K	yellowish white
K	3,700–5,200 K	yellow orange
M	$\leq 3,700$ K	orange red

Les étoiles massives

Les différents types d'étoiles massives

Le 1^{er} type correspond donc aux étoiles de types spectraux B et O, sur la séquence principale, et de masses initiales supérieures à $8 M_{\odot}$. Elles brûlent encore de l'hydrogène dans leur cœur. Deux sous-types sont à distinguer :

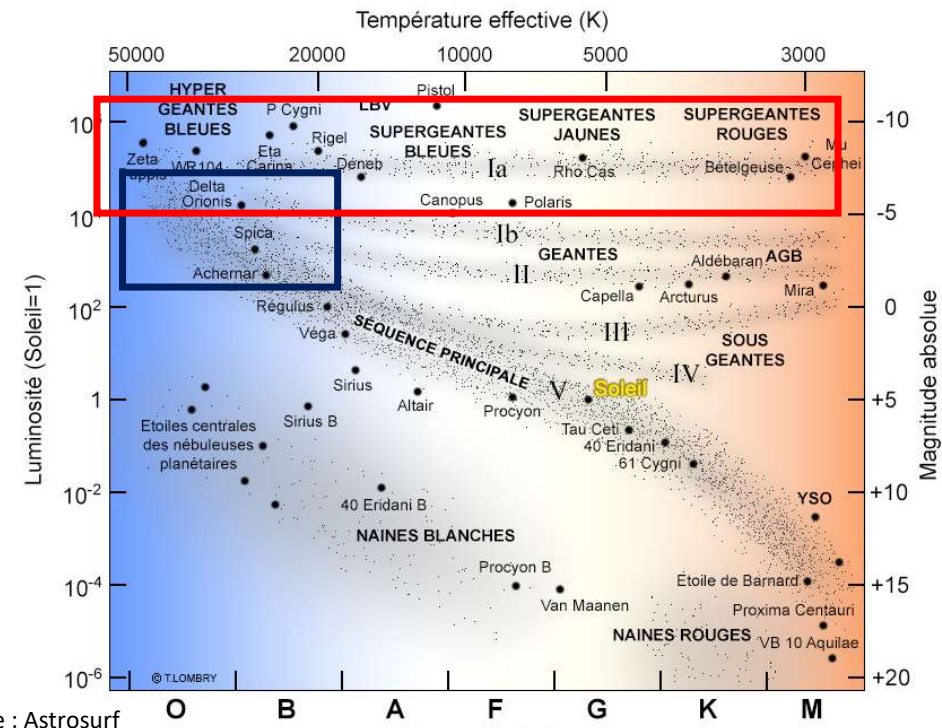
- Les étoiles de masse initiale comprise entre 8 et $15 M_{\odot}$. Ce sont des étoiles de type spectral B.
- Les étoiles de masse initiale comprise entre 15 et $25 M_{\odot}$. Ce sont plutôt des étoiles de type spectral O.
- Les étoiles de masse initiale comprise $> 25 M_{\odot}$. Ce sont des étoiles de type spectral O.

Il existe d'autres types (qui ne sont plus sur la séquence principale) :

- des supergéantes rouges,
- des supergéantes jaunes,
- des étoiles WR,
- et des étoiles LBV.

Des géantes rouges ne sont pas, malgré leur taille :

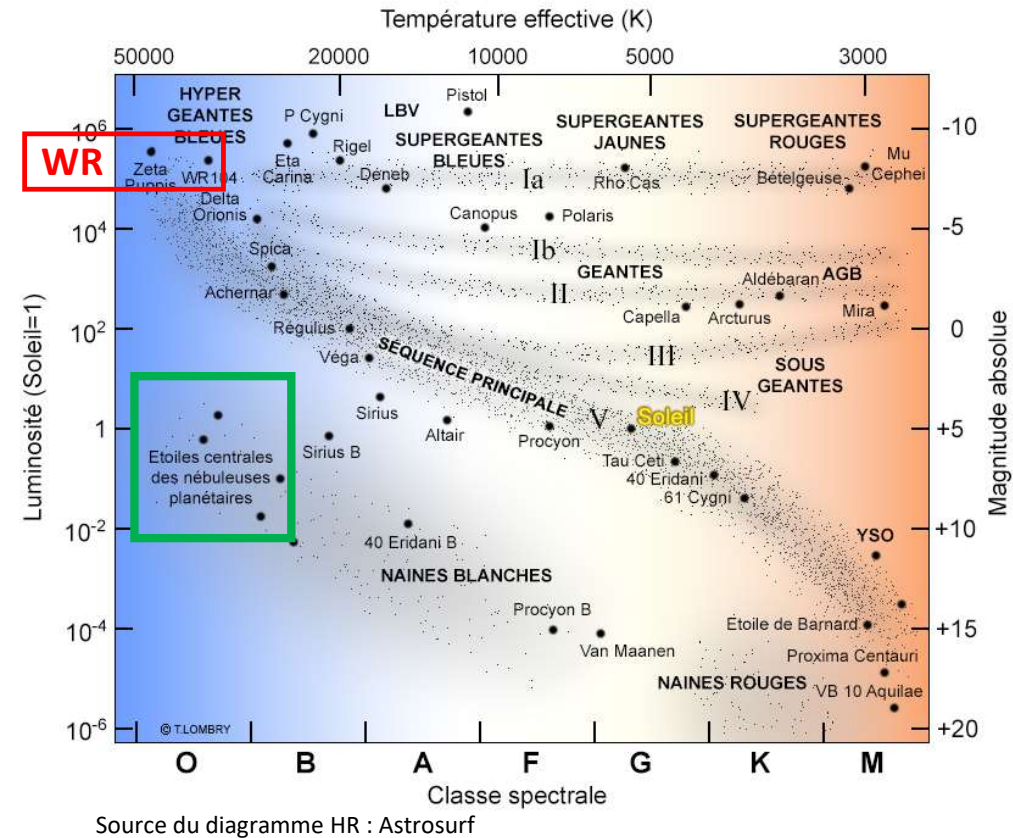
- Aldébaran a une masse de $1,13 M_{\odot}$, mais c'est une géante rouge,
- Le Soleil deviendra une géante rouge mais ne sera jamais une étoile massive.



Source : Astrosurf

Le phénomène Wolf-Rayet

Les étoiles Wolf-Rayet



Le phénomène Wolf-Rayet se définit comme un phénomène astrophysique de plasma chaud, se déplaçant rapidement et se développant normalement autour d'une étoile chaude.

Des raies d'émissions importantes d'Hélium (He), d'Azote (N), de Carbone (C), et d'Oxygène (O), et des objets très chauds (10^4 K).

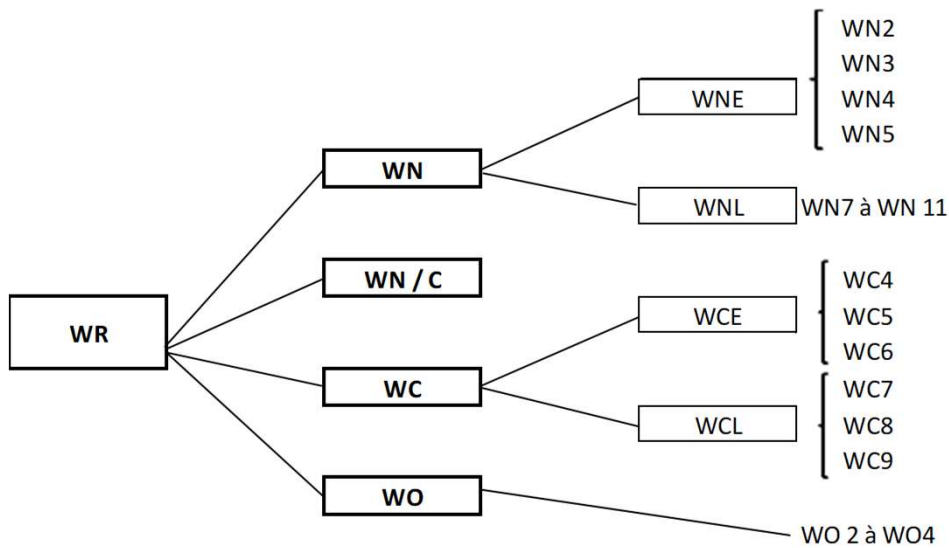
Il est partagé par différents types d'objets :

- Des étoiles WR classiques,
- Des étoiles très massives ($M > 100 M_{\odot}$),
- Des LBV,
- Des étoiles centrales de nébuleuses planétaires,
- Des supernovae.

Les étoiles Wolf-Rayet

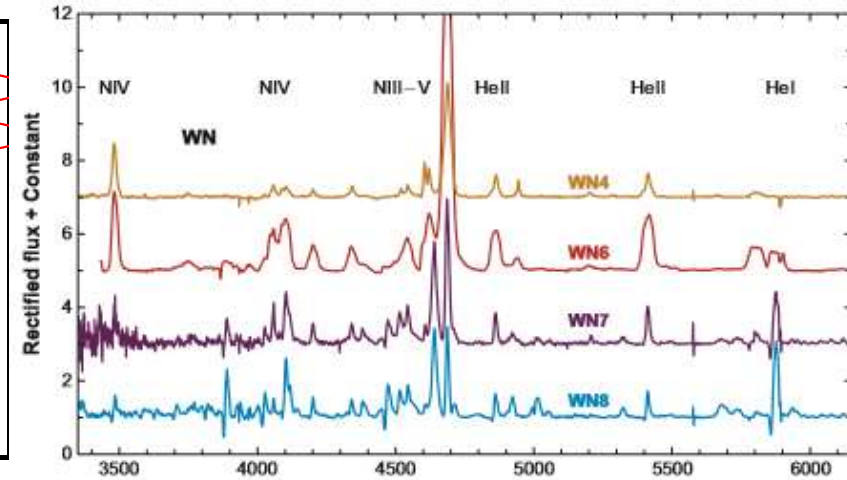
Le classement des étoiles WR

- Par types de raies,
- Par niveaux d'ionisation.



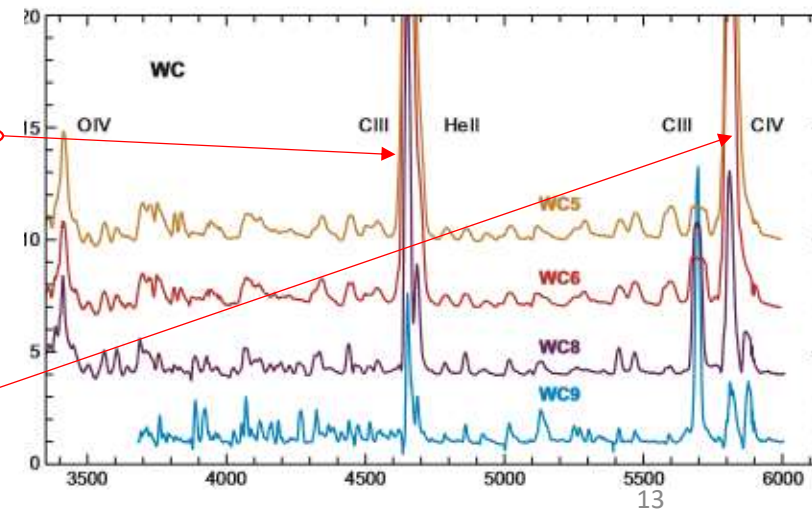
Principales raies pour WN :

N V	4603-19
N III	4634-41
He II	4686
Hβ + He II	4860
He I	4921
N V	4940
N III	5314
He II	5411
C IV	5808
He I	5875



Principales raies pour WC :

C II	4267
C III	4326
C III, C IV	4650
He II	4686
He I	5411
C IV	5471
O V	5590
C III	5696
C IV	5808
He I	5876

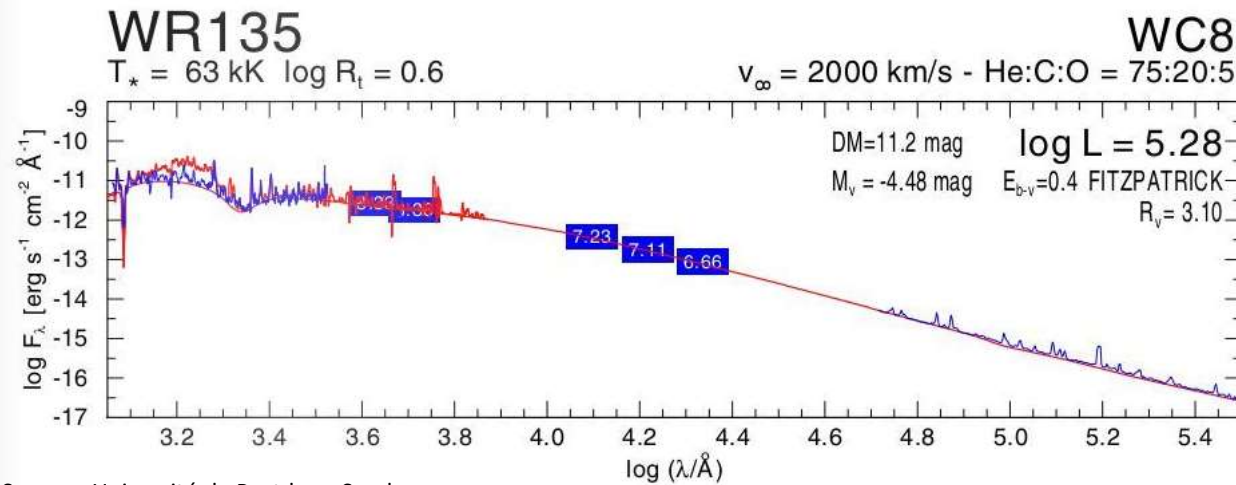


Source : Crowther

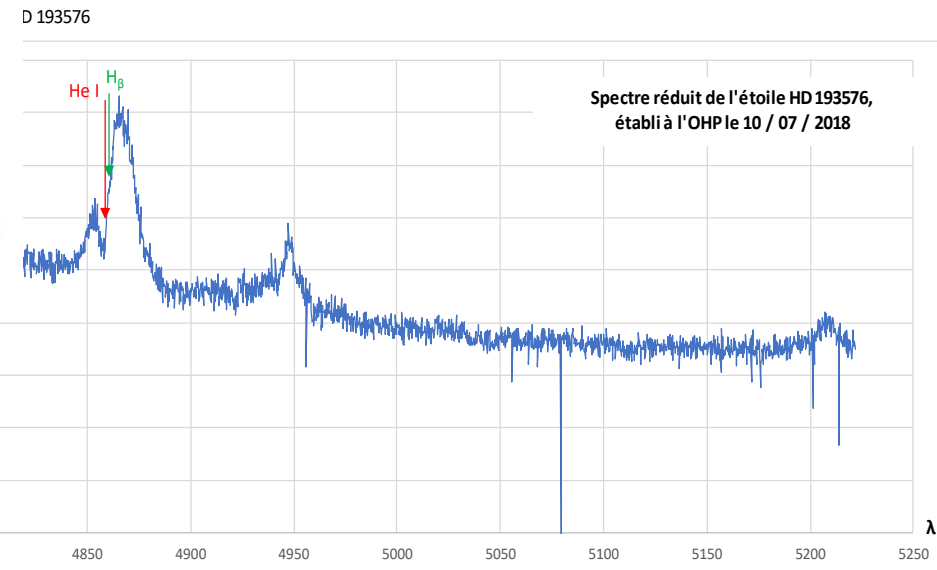
Les étoiles Wolf-Rayet

Les spectres des étoiles WR

Spectres continus auxquels se superposent des raies en émission.



Source : Université de Postdam -Sander

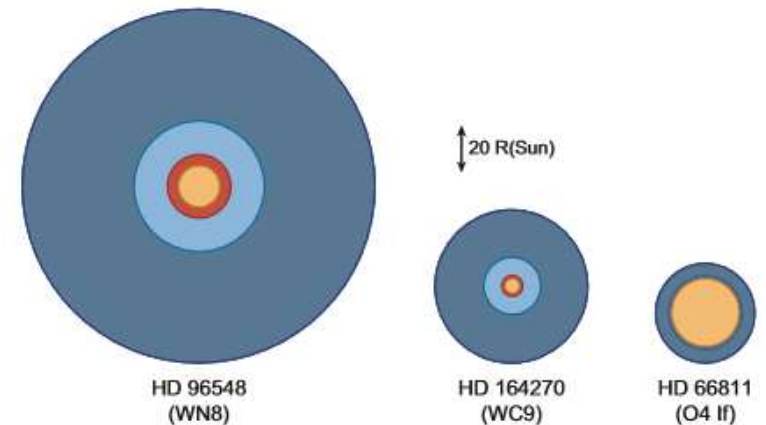


Les étoiles Wolf-Rayet

Les caractéristiques physiques

Les modèles d'atmosphère stellaire permettent alors de déterminer la structure de l'atmosphère des étoiles massives et en particulier :

- Le rayon de la photosphère (limite entre les parties orangé et rouge),
- La région où se forment les raies d'émission liés aux vents stellaires (bleu foncé),
- La partie où le vent stellaire est plus dense (bleu clair).

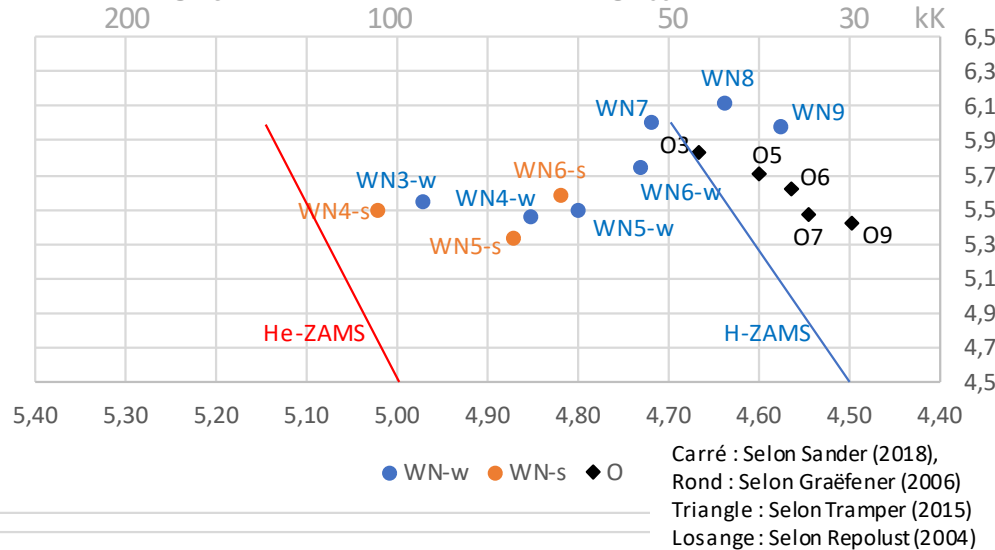


Ces modèles montrent :

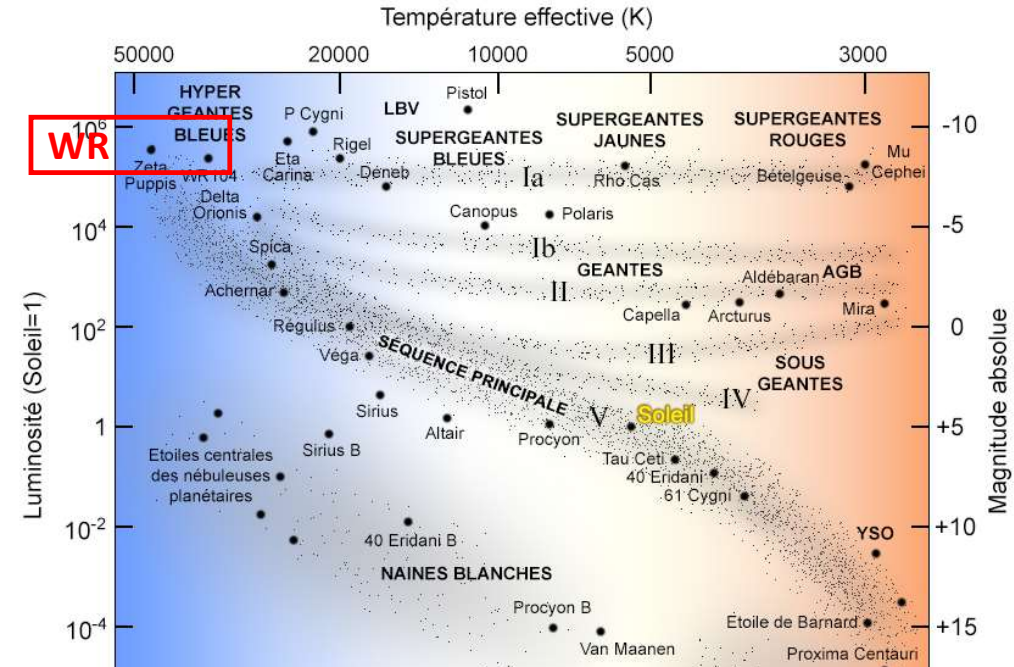
- L'importance de la région où se forment les vents stellaires
- La différence de structure entre une étoile O (ici HD 66811) et une étoile WR (HD 96548 ou HD 164270).

Source : Crowther

Diagramme HR : Etoiles WN et WNh par sous types, Log T_{eff} en abscisse (inversé) et Log L_{sol} en ordonnée



Les étoiles Wolf-Rayet



Source : Astrosurf

Les vents stellaires et les taux de pertes de masse :

- Le phénomène d'absorption de rayonnement par des raies métalliques produit un transfert de quantité de mouvement des photons vers l'extérieur et entraîne une accélération à des vitesses supérieures à la vitesse de libération. Les vents stellaires des étoiles très chaudes sont donc conduits par les pressions de radiation.
- Les taux de perte de masse : entre $10^{-5.6}$ et $10^{-4.0} M_{\text{sol}} / \text{an}$ pour les WN et entre $10^{-5.0}$ et $10^{-4.1} M_{\text{sol}} / \text{an}$ pour les WC.

	Etoiles O	Etoiles WR		
		WN	WC	WO
Luminosité log (L/L ₀)	5.6	5.7	5.5	5.5
Températures effectives, en 10 ³ K	35	60	70	175
Masses, en M ₀	> 25	10-83	6-31	
Taux de perte de masse, M ₀ / an	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ^{-4.6}	10 ⁻⁵
Vitesse des vents, en km s ⁻¹	2300	1500	2100	5000
Rayons (en R ₀), avec $L=4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4$	17.3	6.6	3.9	0.6

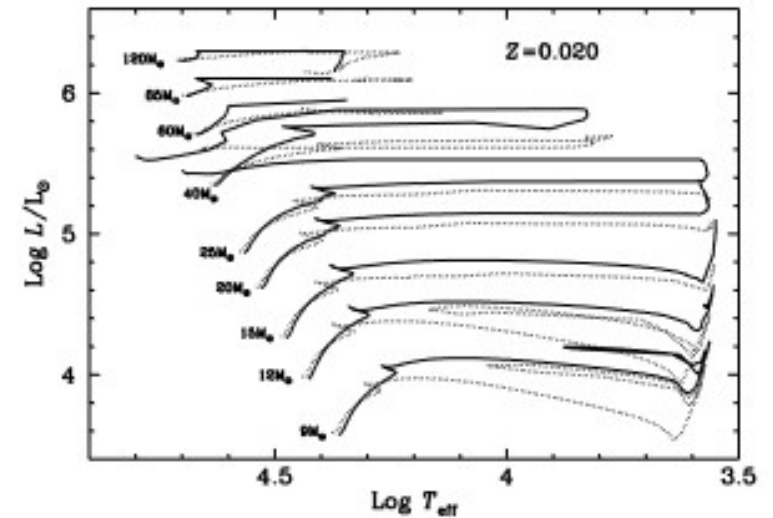
Sources : Crowther (2007), Repolust (2004) pour les étoiles O sur la base d'un échantillon de 23 étoiles, Graëfener (2006) pour les étoiles WN (49 étoiles) et Sander (2018) pour les étoiles WC (39 étoiles). A considérer comme des ordres de grandeur.

Les étoiles Wolf-Rayet

Les évolutions

Le passage de la séquence principale à l'état d'étoile WR :

- Schéma général proposé par Conti : O → LBV (RSG) → WN → WC → SN Ib,c → BH ... qui peut se distinguer en 3 schémas en fonction des masses initiales et de la métallicité
- Les étapes : étoiles O, RSG, BSG, LBV, WN, WC, WO,
- Des modèles d'évolution stellaires pour des étoiles uniques ou binaires qui intègrent la masse initiale, la métallicité, la rotation, ...



Source : Maeder et Meynet

La fin de vie des étoiles très massives :

- Les Supernovas de type II, Ib, Ic, et leurs liens avec les RSG, les WN et les WO.
- Les résidus de type étoiles à neutrons et trous noirs.

Raies observées	Types de supernovae	Types d'étoiles
Hydrogène	SN II	RSG
Pas d'Hydrogène mais Hélium	SN Ib	WN
Pas d'Hydrogène ni Hélium	SN Ic	WO