Solutionnaire du chapitre 14

1. On trouve l'énergie libérée à partir des masses avec

$$Q = \left(m_{avant} - m_{après}\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u}$$

a) On a

$$\begin{aligned} Q &= \left(m_{avant} - m_{après}\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(\left(m_C + m_{He}\right) - \left(m_O\right)\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(\left(12,000\ 000u + 4,002\ 603u\right) - \left(15,994\ 915u\right)\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(0,007\ 688u\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= 7,16 MeV \end{aligned}$$

b) On a

$$\begin{aligned} Q &= \left(m_{avant} - m_{après}\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(\left(m_C + m_{He}\right) - \left(m_O\right)\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(\left(15,994\ 915u + 4,002\ 603u\right) - \left(19,992\ 440u\right)\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(0,005\ 078u\right) \cdot 931,5 \tfrac{MeV}{u} \\ &= 4,73 MeV \end{aligned}$$

2. La luminosité sera

$$\begin{aligned} L &= \sigma 4\pi R^2 T^4 \\ &= 5,67\times 10^{-8} \tfrac{W}{m^2 K^4} \cdot 4\pi \cdot \left(55 \cdot 6,955\times 10^8 m\right)^2 \cdot \left(3700K\right)^4 \\ &= 1,954\times 10^{29} W \\ &= 510 L_\odot \end{aligned}$$

3. Le rayon est

$$\begin{aligned}R &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1M_{\odot}}{M}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{M}{1,44M_{\odot}}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1M_{\odot}}{0,6M_{\odot}}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{0,6M_{\odot}}{1,44M_{\odot}}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{0,6}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{0,6}{1,44}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot 1,1856 \cdot 0,8299 \\ &= 0,0124R_{\odot}\end{aligned}$$

4. a) On trouve la luminosité avec

$$R = 33,3R_{\odot} \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_{\odot}}} \cdot \left(\frac{1000K}{T}\right)^{2}$$

On a déjà la température, mais il nous manque le rayon. Ce rayon est

$$\begin{aligned}R &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1M_{\odot}}{M}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{M}{1,44M_{\odot}}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1M_{\odot}}{0,8M_{\odot}}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{0,8M_{\odot}}{1,44M_{\odot}}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{0,8}} \cdot \sqrt{1-\left(\frac{0,8}{1,44}\right)^{4/3}} \\ &= 0,0126R_{\odot} \cdot 1,0772 \cdot 0,7371 \\ &= 0,01R_{\odot}\end{aligned}$$

La luminosité est donc

$$R = 33,3R_\odot \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1000K}{T}\right)^2$$

$$0,01R_\odot = 33,3R_\odot \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1000K}{30\,000K}\right)^2$$

$$2,872\times10^{-4} = \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1}{30}\right)^2$$

$$0,270 = \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}}$$

$$L = 0,073L_\odot$$

b) La grandeur du champ gravitationnel est

$$\begin{aligned} g &= \frac{GM}{R^2} \\ &= \frac{6,674\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot 0,8\cdot 1,9885\times10^{30}kg}{\left(0,01\cdot 6,597\times10^{8}m\right)^2} \\ &= 2,44\times10^{6}\,\frac{N}{kg} \end{aligned}$$

c) La hauteur caractéristique de l’atmosphère est

$$\begin{aligned} H &= \frac{RT}{\mu g} \\ &= \frac{8,31\frac{J}{molK}\cdot 30\,000K}{0,001\frac{kg}{mol}\cdot 2,44\times10^{6}\,\frac{N}{kg}} \\ &= 102m \end{aligned}$$

5. a) L’énergie est

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2}\cdot 4\cdot 1,9885\times10^{30}kg\cdot\left(5\times10^{6}\,\frac{m}{s}\right)^2 \\ &= 9,94\times10^{43}J \end{aligned}$$

b) Le pourcentage est

$$\frac{9{,}9425\times10^{43}\,J}{10^{46}\,J}\cdot100\%=0{,}994\%$$

c) La quantité de mouvement des couches est

$$\begin{aligned}p&=mv\\&=4\cdot1{,}9885\times10^{30}\,kg\cdot5\times10^{6}\,\tfrac{m}{s}\\&=3{,}977\times10^{37}\,\tfrac{kgm}{s}\end{aligned}$$

À mesure que les couches passent dans le milieu interstellaire, elles accumulent de la masse. Pour que la vitesse diminue à 10 km/s, il faut que la masse totale soit de

$$\begin{aligned}p'&=p\\m'v'&=3{,}977\times10^{37}\,\tfrac{kgm}{s}\\m'\cdot10^{4}\,\tfrac{m}{s}&=3{,}977\times10^{37}\,\tfrac{kgm}{s}\\m'&=3{,}977\times10^{33}\,kg\end{aligned}$$

Ce qui est près de 2000 masses solaires. Cette masse est la masse totale, c'est-à-dire la masse des couches additionnée à celle du milieu interstellaire qui a été ramassée par les couches. Pour trouver la masse du milieu interstellaire qui a été ramassée par les couches, il faut soustraire la masse des couches.

$$\begin{aligned}m_{\text{interstallaire}}&=3{,}977\times10^{33}\,kg-4\cdot1{,}9885\times10^{30}\,kg\\&=3{,}969\times10^{33}\,kg\end{aligned}$$

Pour avoir autant de masse, le volume de milieu interstellaire est

$$\begin{aligned}\rho&=\frac{M}{vol}\\2\times10^{-19}\,\tfrac{kg}{m^3}&=\frac{3{,}969\times10^{33}\,kg}{Vol}\\Vol&=1{,}98\times10^{52}\,m^3\end{aligned}$$

Comme les couches éjectées balaient une sphère, on doit trouver le rayon d'une sphère qui a ce volume.

$$\begin{aligned}\tfrac{4}{3}\pi R^3&=1{,}98\times10^{52}\,m^3\\R&=1{,}67\times10^{17}\,m\end{aligned}$$

Cette distance est 17,7 al.

6. a) Le rayon est

$$\begin{aligned} R &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4M_\odot}{M}} \\ &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4M_\odot}{2M_\odot}} \\ &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4}{2}} \\ &= 9,8km \end{aligned}$$

b) La densité est

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{M}{volume} \\ &= \frac{4\times 10^{30}kg}{\frac{4}{3}\pi\left(9800m\right)^3} \\ &= 10^{18}\,\tfrac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

c) La vitesse de libération est

$$\begin{aligned} v_{lib} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}} \\ &= \sqrt{\frac{2\cdot 6,674\times 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot 4\times 10^{30}kg}{9800m}} \\ &= 2,3\times 10^{8}\,\tfrac{m}{s} \end{aligned}$$

C'est quand même près de 80% de la vitesse de la lumière !

7. a) On trouve la luminosité avec

$$R = 33,3R_\odot \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1000K}{T}\right)^2$$

On a déjà la température, mais il nous manque le rayon. Ce rayon est

$$\begin{aligned} R &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4M_\odot}{M}} \\ &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4M_\odot}{2,5M_\odot}} \\ &= 11km \cdot \sqrt[3]{\frac{1,4}{2,5}} \\ &= 9,067km \end{aligned}$$

La luminosité est donc

$$\begin{aligned} R &= 33,3R_\odot \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1000K}{T}\right)^2 \\ 9067m &= 33,3R_\odot \cdot \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1000K}{1\,000\,000K}\right)^2 \\ 3,914\times10^{-7} &= \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \cdot \left(\frac{1}{1000}\right)^2 \\ 0,3914 &= \sqrt{\frac{L}{1L_\odot}} \\ L &= 0,157L_\odot \end{aligned}$$

b) La grandeur du champ gravitationnel est

$$\begin{aligned} g &= \frac{GM}{R^2} \\ &= \frac{6,674\times10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 2,5 \cdot 1,9885\times10^{30} kg}{(9067m)^2} \\ &= 4,036\times10^{12} \tfrac{N}{kg} \end{aligned}$$

c) La hauteur caractéristique de l'atmosphère est

$$\begin{aligned} H &= \frac{RT}{\mu g} \\ &= \frac{8,31 \frac{J}{molK} \cdot 1\,000\,000K}{0,001 \frac{kg}{mol} \cdot 4,036\times10^{12} \frac{N}{kg}} \\ &= 0,00206m \\ &= 2,06mm \end{aligned}$$

8. Selon la conservation du moment cinétique, on a

$$\frac{R^2}{T} = \frac{R'^2}{T'}$$

$$\frac{\left(6,371\times10^6 m\right)^2}{86\,400 s} = \frac{\left(0,015 m\right)^2}{T'}$$

$$T' = 4,79\times10^{-13} s$$

9. Le rapport des luminosités est

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0,4(m_2 - m_1)}$$

Si l'étoile est 10 000 fois plus lumineuse, alors on a $I_2 = 10\,000\, I_1$. On a donc

$$\frac{1}{10\,000} = 10^{0,4\cdot(m_2 - m_1)}$$

$$10^{-4} = 10^{0,4\cdot(m_2 - m_1)}$$

$$-4 = 0,4\cdot\left(m_2 - m_1\right)$$

$$-10 = m_2 - m_1$$

$$m_2 = m_1 - 10$$

Cela signifie que la magnitude baisse de 10.

10. La quantité d'hydrogène est

$$M_H = \frac{10^{38} J}{6,4\times10^{14} \frac{J}{kg}}$$

$$= 1,5\times10^{23} kg$$

Cela représente 2,6 % de la masse de la Terre.

11. Puisque la sphère de matière est passée d'un rayon nul à un rayon de 8'' d'arc en 8 ans, ω est 1''/an. En radian par seconde, ω est

$$\begin{aligned}\omega &= 1''/\,an\\ &= \left(\frac{1}{3600}\right)\frac{°}{an}\cdot\frac{\pi rad}{180°}\cdot\frac{1an}{365,25\cdot 24\cdot 60\cdot 60s}\\ &= 1,536\times 10^{-14}\,\tfrac{rad}{s}\end{aligned}$$

La distance est donc de

$$\begin{aligned}D &= \frac{v}{\omega_{(rad/s)}}\\ &= \frac{1700\times 10^{3}\,\frac{m}{s}}{1,536\times 10^{-13}\,\frac{rad}{s}}\\ &= 1,107\times 10^{19}\,m\\ &= 1170al\end{aligned}$$

12. Sachant que la magnitude absolue de la supernova est de -19,6, on trouve la distance avec

$$\begin{aligned}M &= m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)\\ -19,6 &= 8,9 + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)\\ D &= 16,3Mal\end{aligned}$$

13. La limite de visibilité étant d'une magnitude de 6, on trouve la distance maximale avec

$$\begin{aligned}M &= m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)\\ -19,6 &= 6 + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)\\ D &= 4,3Mal\end{aligned}$$

14. a) L'énergie gravitationnelle est

$$\begin{aligned} U &= -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R} \\ &= -\frac{3}{5}\cdot\frac{6,674\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot\left(2\times10^{30}\,kg\right)^2}{5,5\times10^{6}\,m} \\ &= -2,9\times10^{43}\,J \end{aligned}$$

b) L'énergie libérée par une réaction

$$14\,{}^{12}_{6}C \to 3\,{}^{56}_{26}Fe + 6e^{+}$$

est

$$\begin{aligned} Q &= \left(m_{avant} - m_{après}\right)\cdot 931,5\,\tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(14\cdot12u - 3\cdot55,9349375u\right)\cdot 931,5\,\tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(168u - 167,8048125u\right)\cdot 931,5\,\tfrac{MeV}{u} \\ &= \left(0,1951875u\right)\cdot 931,5\,\tfrac{MeV}{u} \\ &= 181,82\,MeV \end{aligned}$$

Pour trouver le nombre de réaction, trouvons le nombre d'atome de carbone 12. Ce nombre est

$$N_C = \frac{2\times10^{30}\,kg}{0,012\,\frac{g}{mol}}\cdot 6,02\times10^{23}\,\tfrac{atomes}{mol} = 1,00\times10^{56}$$

Comme il faut 14 atomes de carbone pour faire 1 réaction, le nombre de réaction est

$$N = \frac{N_C}{14} = \frac{1,00\times10^{56}}{14} = 7,17\times10^{54}$$

Puisque chaque réaction donne 181,82 MeV, on a

$$\begin{aligned} E &= 7,17\times10^{54}\cdot 181,82\,MeV \\ &= 7,17\times10^{54}\cdot 181,82\,MeV\cdot 1,602\times10^{-13}\,\tfrac{J}{MeV} \\ &= 2,09\times10^{44}\,J \end{aligned}$$

c) La somme des deux énergies

$$\begin{aligned} E &= U_g + Q \\ &= -2,9\times10^{43} J + 2,09\times10^{44} J \\ &= 1,8\times10^{44} J \end{aligned}$$

Comme la réponse est positive, il y a assez d'énergie pour disperser l'étoile.

15. La puissance est

$$\begin{aligned} P &= \frac{32G^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^5} \\ &= \frac{32\cdot\left(6,674\times10^{-11} \tfrac{Nm^2}{kg^2}\right)^4 \cdot \left(2\times10^{30} kg\right)^2 \cdot \left(6\times10^{24} kg\right)^2 \cdot \left(2\times10^{30} kg + 6\times10^{24} kg\right)}{5\cdot\left(3\times10^8 \tfrac{m}{s}\right)^5 \cdot \left(1,5\times10^{11} m\right)^5} \\ &= 198W \end{aligned}$$

b) Le temps est

$$\begin{aligned} t &= \frac{5c^5 r^4}{256G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)} \\ &= \frac{5\cdot\left(3\times10^8 \tfrac{m}{s}\right)^5 \cdot \left(1,5\times10^{11} m\right)^4}{256\cdot\left(6,674\times10^{-11} \tfrac{Nm^2}{kg^2}\right)^3 \cdot 2\times10^{30} kg \cdot 6\times10^{24} kg \cdot \left(2\times10^{30} kg + 6\times10^{24} kg\right)} \\ &= 3,37\times10^{30} s \\ &= 1,07\times10^{23} a \end{aligned}$$

16. a) On trouve la distance avec la troisième loi de Kepler

$$\begin{aligned} T^2 &= \frac{4\pi^2 r^3}{GM_{tot}} \\ (36\,000s)^2 &= \frac{4\pi^2 r^3}{6,674\times10^{-11} \tfrac{Nm^2}{kg^2} \cdot 10\times10^{30} kg} \\ r &= 2,798\times10^9 m \end{aligned}$$

b) La puissance est

$$
\begin{aligned}
P &= \frac{32G^4 m_1^2 m_2^2 \left(m_1+m_2\right)}{5c^5 r^5} \\
&= \frac{32\cdot\left(6,674\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\right)^4\cdot\left(4\times10^{30}\,kg\right)^2\cdot\left(6\times10^{30}\,kg\right)^2\cdot10\times10^{30}\,kg}{5\cdot\left(3\times10^8\,\frac{m}{s}\right)^5\cdot\left(2,798\times10^9\,m\right)^5} \\
&= 1,754\times10^{24}\,W
\end{aligned}
$$

b) Le temps est

$$
\begin{aligned}
t &= \frac{5c^5 r^4}{256G^3 m_1 m_2\left(m_1+m_2\right)} \\
&= \frac{5\cdot\left(3\times10^8\,\frac{m}{s}\right)^5\cdot\left(2,798\times10^9\,m\right)^4}{256\cdot\left(6,674\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\right)^3\cdot4\times10^{30}\,kg\cdot6\times10^{30}\,kg\cdot10\times10^{30}\,kg} \\
&= 4,08\times10^{16}\,s \\
&= 1,29\times10^{9}\,ans
\end{aligned}
$$

17. Le rayon de Schwarzschild est

$$
\begin{aligned}
R_S &= \frac{2GM}{c^2} \\
&= \frac{2\cdot6,674\times10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot5,98\times10^{24}\,kg}{\left(3\times10^8\,\frac{m}{s}\right)^2} \\
&= 8,87mm
\end{aligned}
$$

18. Le rayon de Schwarzschild est

$$
\begin{aligned}
R_S &= 2,953\,\tfrac{km}{M_\odot}\cdot M \\
&= 2,953\,\tfrac{km}{M_\odot}\cdot1M_\odot \\
&= 2,953km
\end{aligned}
$$

Le rapport des temps est donc

$$\begin{aligned}\Delta t_{espace} &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{R_S}{r}}} \\ &= \frac{1an}{\sqrt{1-\frac{2,953km}{8km}}} \\ &= 1,259an\end{aligned}$$

19. Le rayon de Schwarzschild est

$$\begin{aligned}R_S &= 2,953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot M \\ &= 2,953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot 1M_\odot \\ &= 2,953km\end{aligned}$$

Le rapport des longueurs est donc

$$\begin{aligned}\Delta L_{espace} &= \Delta L\sqrt{1-\frac{R_S}{r}} \\ 50m &= \Delta L\cdot\sqrt{1-\frac{2,953km}{8km}} \\ \Delta L &= 62,95m\end{aligned}$$

20. L'angle de déviation est

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{4GM}{bc^2} \\ &= \frac{4\cdot 6,674\times 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot\left(2,19\cdot 1,9885\times 10^{30}\,kg\right)}{\left(1,73\cdot 6,955\times 10^{8}\,m\right)\cdot\left(3\times 10^{8}\,\frac{m}{s}\right)^2} \\ &= 1,07\times 10^{-5}\,rad \\ &= 2,21''\end{aligned}$$

21. Le rayon de Schwarzschild est

$$\begin{aligned} R_S &= 2{,}953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot M \\ &= 2{,}953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot 1M_\odot \\ &= 2{,}953km \end{aligned}$$

Le changement de longueur d'onde est donc

$$\begin{aligned} \lambda_{espace} &= \frac{\lambda}{\sqrt{1-\frac{R_S}{r}}} \\ &= \frac{450nm}{\sqrt{1-\frac{2{,}953km}{8km}}} \\ &= 567nm \end{aligned}$$

22. Le rayon de Schwarzschild est

$$\begin{aligned} R_S &= 2{,}953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot M \\ &= 2{,}953\tfrac{km}{M_\odot}\cdot 2M_\odot \\ &= 5{,}906km \end{aligned}$$

Le changement de longueur d'onde est donc

$$\begin{aligned} \lambda_{espace} &= \frac{\lambda}{\sqrt{1-\frac{R_S}{r}}} \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1-\frac{5{,}906km}{13km}}} \\ &= 1{,}354\cdot\lambda \end{aligned}$$

Le décalage est donc

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda'}{\lambda} \\ &= \frac{1{,}354\lambda}{\lambda} \\ &= 1{,}354 \end{aligned}$$

23. La distance minimale d'approche est

$$\begin{aligned} r_{déchire} &= 320km \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)} \\ &= 320km \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{20M_{\odot}}{1M_{\odot}}\right)} \\ &= 869km \end{aligned}$$

Comme le rayon de Schwarzschild est de

$$\begin{aligned} R_S &= 2,953km \cdot \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right) \\ &= 2,953km \cdot 20 \\ &= 59,06km \end{aligned}$$

La distance minimale d'approche est de 14,7 fois le rayon de Schwarzschild.

24. Ici on veut que

$$r_{déchire} < R_S$$

Cela donne

$$320km \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)} < 2,953km \cdot \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)$$

Si on isole *M*, on arrive à

$$\begin{aligned} 108 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)} &< \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right) \\ 108^3 \cdot \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right) &< \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)^3 \\ 108^3 &< \left(\frac{M}{1M_{\odot}}\right)^2 \\ 1128M_{\odot} &< M \end{aligned}$$

La masse minimale est donc de 1128 masses solaires.

25. La séquence principale se termine à une magnitude de 20. Déterminons premièrement à quelle magnitude absolue cela correspond

$$\begin{aligned} M &= m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ &= 20 + 5\log\left(\frac{32,62al}{33\,900al}\right) \\ &= 4,92 \end{aligned}$$

La luminosité de l'étoile qui vient juste de mourir est donc

$$\begin{aligned} M &= 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{L}\right) \\ 4,92 &= 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{L}\right) \\ L &= 0,851L_\odot \end{aligned}$$

La masse de cette étoile est donc

$$\begin{aligned} L &= 1L_\odot \cdot \left(\frac{M}{1M_\odot}\right)^{3,8} \\ 0,851L_\odot &= 1L_\odot \cdot \left(\frac{M}{1M_\odot}\right)^{3,8} \\ M &= 0,958M_\odot \end{aligned}$$

La durée de vie de cette étoile est donc

$$\begin{aligned} t_{vie} &= 10,9Ga \cdot \left(\frac{1M_\odot}{M}\right)^{2,8} \\ &= 10,9Ga \cdot \left(\frac{1M_\odot}{0,958M_\odot}\right)^{2,8} \\ &= 12,3Ga \end{aligned}$$

L'amas a donc environ 12,3 milliards d'années.