



ASTROPHYSIQUE

Modélisation de l'évolution stellaire

MONIJA SIVARAJAH



Table des matières

1	Introduction	3
2	La théorie - évolution stellaire	4
2.1	L'effondrement gravitationnel du nuage moléculaire	4
2.2	Formation d'une proto-étoile	4
2.3	Phase T Tauri (accrétion de matière)	4
2.4	Réactions nucléaires et séquence principale	5
2.5	Pour une étoile de faible masse	5
2.5.1	Géante rouge	5
2.5.2	Nébuleuse planétaire et naine blanche	6
2.5.3	Naine noire	7
2.6	Pour une étoile de grande masse	7
2.6.1	Supergéantes rouges	7
2.6.2	Supernova	7
2.6.3	Étoile à neutron ou trou noir	8
2.7	Résumé de l'évolution stellaire	9
3	La théorie supplémentaire	10
3.1	La magnitude apparente	10
3.2	Le flux lumineux	10
3.3	La magnitude absolue	10
3.4	Méthode de la parallaxe	11
3.5	Le système photométrique UBV	12
3.6	Calcul de la température effective d'une étoile à partir de l'indice B-V	12
3.7	Le type spectral	13
4	Modélisation en Python	14
4.1	Modélisation numérique du diagramme HR	14
4.2	Modélisation numérique de la carte de densité du diagramme HR . .	19
4.3	Analyse du diagramme HR et de la carte de densité	20
5	Conclusion	24
6	Références	25

1 Introduction

L'étude de l'évolution stellaire est fondamentale pour comprendre les processus physiques qui régissent la vie des étoiles, depuis leur formation jusqu'à leur mort. Dans ce projet, nous cherchons à modéliser les différentes étapes de l'évolution stellaire en utilisant des outils théoriques et numériques. La première partie de ce document est consacrée à la théorie de l'évolution stellaire. Ensuite, nous explorerons les trajectoires évolutives des étoiles de faible et de grande masse. La deuxième partie abordera des notions supplémentaires qui seront utiles à la compréhension du programme Python. Enfin, nous mettrons en œuvre une modélisation en Python du diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) pour visualiser et analyser ces processus évolutifs.

“The history of astronomy is a history of receding horizons.”
Edwin P. Hubble,
Realm of the Nebulae, 1936.

2 La théorie - évolution stellaire

2.1 L'effondrement gravitationnel du nuage moléculaire

Un mélange de gaz, de poussières et de rayons cosmiques se trouvent entre les étoiles, c'est le milieu interstellaire. La densité dans ce milieu peut augmenter jusqu'à atteindre une densité suffisante permettant aux atomes de se rassembler. Ces derniers forment alors des molécules qu'on nomme "nuage moléculaire". Au sein de ce nuage, deux forces existent :

- une force d'auto-gravitation qui tend à contracter le nuage ;
- une force de pression thermique qui entraîne son explosion.

Au début, le nuage est à l'équilibre, il respecte alors le théorème de Viriel ($2E_c + E_p = 0$).

Avec :

- E_c : énergie cinétique due à l'agitation thermique
- E_p : énergie potentielle de gravitation

En raison de perturbations intérieures ou extérieures, l'équilibre est rompu : c'est le début de l'effondrement. Dans ce cas, nous avons $2E_c < -E_p$. Ce processus d'effondrement du nuage moléculaire s'effectue en deux phases :

- Phase isotherme : La densité augmente et le nuage se fragmente en émettant un rayonnement infra-rouge.
- Phase adiabatique : La densité continue à augmenter fortement, les blocs sont de plus en plus petits et atteignent donc une densité suffisante pour devenir opaque et arrêter le rayonnement.

2.2 Formation d'une proto-étoile

Les blocs étant très petits, l'effondrement du nuage prend fin et chaque bloc devient une proto-étoile. En effet, la formation de la proto-étoile a lieu au centre de la région d'effondrement.

2.3 Phase T Tauri (accrétion de matière)

Parallèlement au processus d'effondrement, par accrétion de matière, il y a création d'un disque en rotation autour de la proto-étoile, d'où le nom "disque d'accrétion". Suite à cela, un jet bipolaire (jet de matière, notamment de gaz) est produit : c'est ce qu'on appelle la phase "T Tauri". Par ailleurs, ce disque est le lieu de formation potentielle de planètes et d'autres objets célestes.

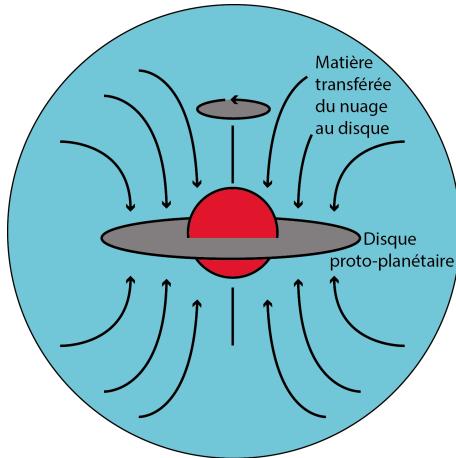


FIGURE 1 – Schéma de l'accrétion de l'enveloppe gazeuse vers le disque et la proto-étoile
[Source]

2.4 Réactions nucléaires et séquence principale

Au sein de la proto-étoile, la température continue d'augmenter et lorsqu'elle atteint environ 10^7 Kelvin (K), les réactions nucléaires commencent. La proto-étoile devient alors une étoile et débute son processus de réactions nucléaires par un cycle proton-proton. Durant ce premier cycle, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau d'hélium. L'étoile entre dans la séquence principale, où elle passe la majeure partie de sa vie.

2.5 Pour une étoile de faible masse

2.5.1 Géante rouge

Lorsque la majorité de l'hydrogène dans le cœur est convertie en hélium, la réaction de fusion ralentit et finalement s'arrête. La gravité prend donc le dessus et le noyau de l'étoile commence à se contracter sous son propre poids. Cette contraction entraîne l'augmentation de la température dans le noyau et donc les réactions de fusion (hydrogène en hélium) dans la coquille s'accélèrent. Ce qui entraîne à son tour, une expansion des couches externes de l'étoile. En ce sens, l'étoile quitte la séquence principale et se transforme en géante rouge si sa masse est faible et inférieure à 7 masses solaires ($M_* < 7M_\odot$). La température continue d'augmenter de sorte à démarrer la fusion de l'hélium en carbone via la réaction triple alpha.

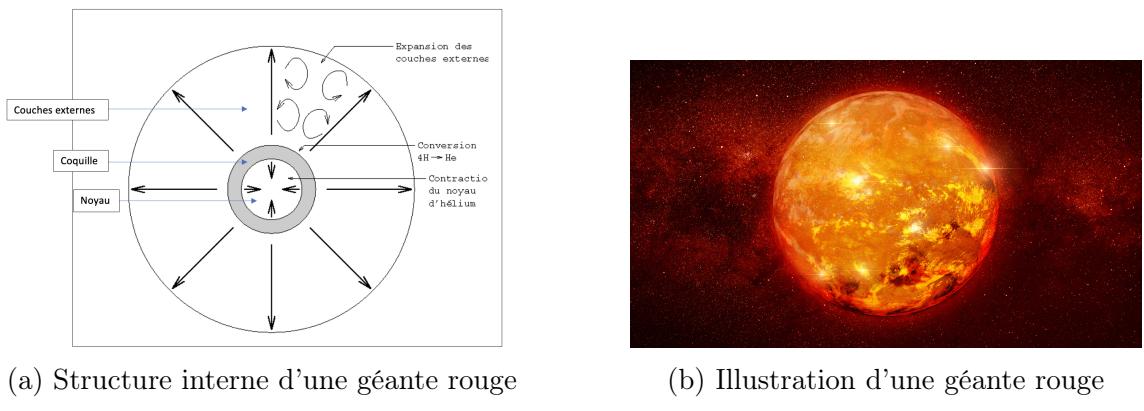


FIGURE 2 – Géante rouge

2.5.2 Nébuleuse planétaire et naine blanche

Pendant la phase de géante rouge, les couches externes de l'étoile s'étendent loin de son noyau. Lorsque la géante rouge a suffisamment brûlé ses réserves d'hydrogène et d'hélium dans son noyau, ses couches externes sont propulsées dans l'espace sous forme d'enveloppe gazeuse (de coquille). C'est ce phénomène qui constitue la phase de nébuleuse planétaire. D'autre part, le noyau s'effondre et devient une naine blanche où les réactions nucléaires n'existent plus.

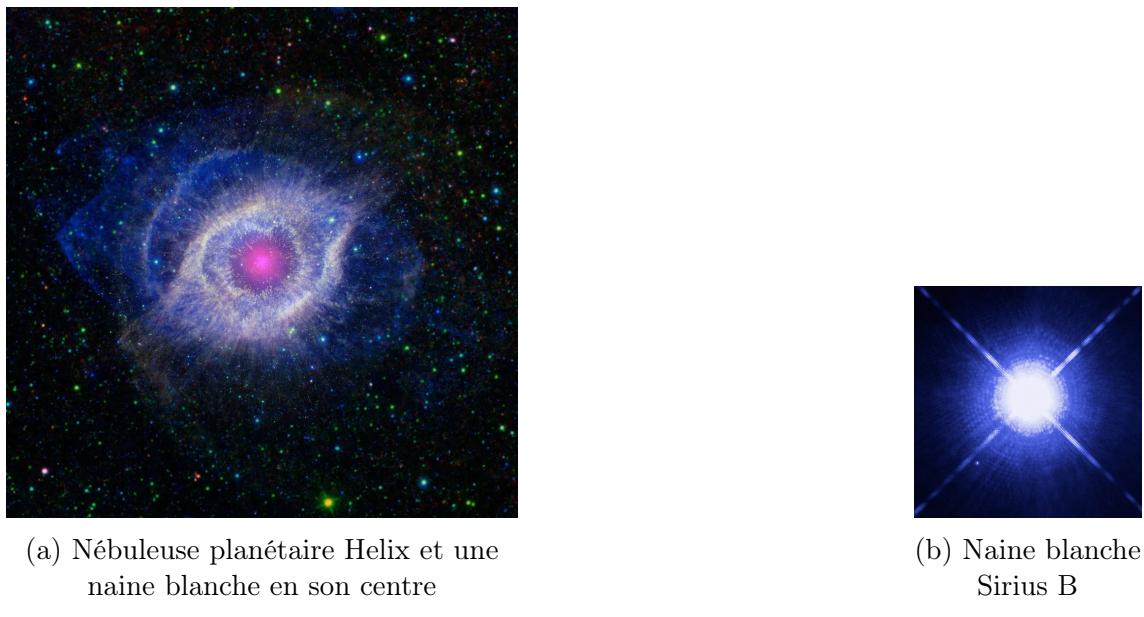


FIGURE 3 – Nébuleuse planétaire et naine blanche

2.5.3 Naine noire

Une naine blanche qui s'est suffisamment refroidie et qui n'émet plus de lumière, peut devenir hypothétiquement une naine noire. Ce mystère reste encore à être percé...

2.6 Pour une étoile de grande masse

2.6.1 Supergéantes rouges

De manière analogue à l'évolution d'une étoile de masse faible, une étoile de masse supérieure à 7 masses solaires ($M_* > 7M_\odot$) devient une supergéante rouge. Contrairement au noyau d'une étoile de faible masse, le noyau d'une supergéante rouge est capable de maintenir une grande température. Ce qui permet donc la continuité des réactions nucléaires : on débute par la fusion de l'hydrogène pour finir par celle du fer. Le noyau possède alors une structure en "oignon".

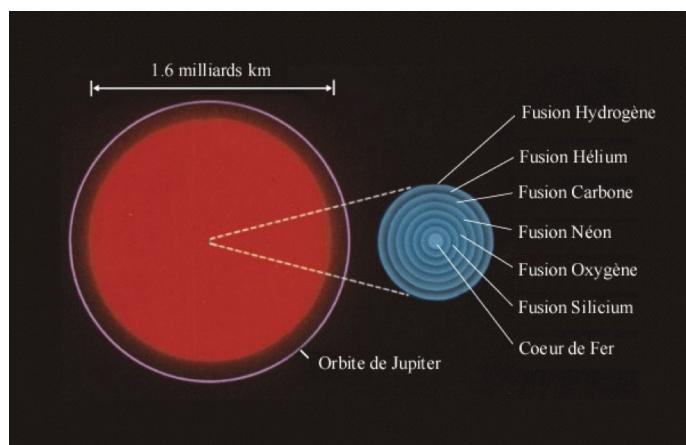


FIGURE 4 – Structure d'une étoile de grande masse à la fin des réactions nucléaires
[Source]

2.6.2 Supernova

Le fer étant l'élément le plus stable, on ne peut plus produire de l'énergie par fusion nucléaire, ce qui entraîne la fin des réactions nucléaires dans le noyau. Le cœur de fer s'effondre rapidement (et donc aussi l'étoile) et explode en supernova. Cette explosion laisse derrière elle un nuage de gaz et de poussière interstellaire qui pourrait être le lieu de naissance de nouvelles étoiles.



FIGURE 5 – Supernovae
[Source]

2.6.3 Étoile à neutron ou trou noir

Après sa mort, le noyau de l'étoile est toujours présent et si sa masse est entre 1.4 et 3.2 fois la masse solaire ($1.4M_{\odot} < M_{coeur} < 3.2M_{\odot}$), alors le noyau s'effondre pour devenir une étoile à neutrons.

Par ailleurs, $1.4M_{\odot}$ correspond à la masse de Chandrashekhar.



FIGURE 6 – Étoile à neutrons
[Source]

Si la masse du noyau est supérieure à 3.2 fois la masse solaire ($M_{coeur} > 3.2M_{\odot}$), alors le noyau s'effondre pour devenir un trou noir.

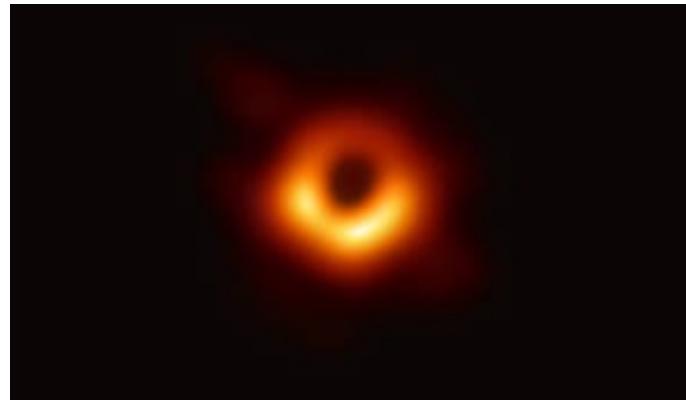


FIGURE 7 – Trou noir
[Source]

2.7 Résumé de l'évolution stellaire

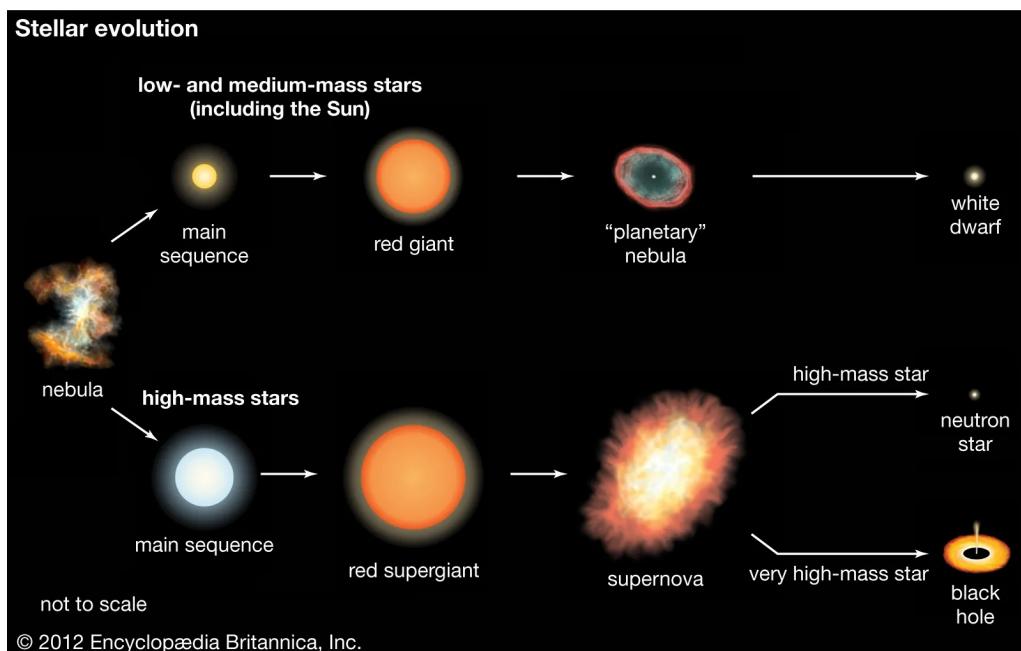


FIGURE 8 – Évolution stellaire
[Source]

3 La théorie supplémentaire

3.1 La magnitude apparente

La magnitude apparente est une mesure de la luminosité d'un objet céleste tel qu'il est observé depuis la Terre. Plus précisément, elle quantifie la lumière que nous recevons d'une étoile ou d'un autre corps céleste. S'exprimant sur une échelle logarithmique, la magnitude apparente est faible lorsque l'étoile est brillante [voir formule (1)].

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F}{F_0} \right) \quad (1)$$

Avec :

- m : magnitude apparente
- F : flux lumineux observé (en $W.m^{-2}$)
- F_0 : flux de référence (en $W.m^{-2}$)

3.2 Le flux lumineux

Le flux est la mesure de la quantité d'énergie (E) par unité de surface (S) et de temps (t), on l'exprime à l'aide de la formule suivante :

$$F = \frac{E}{S \cdot t} \quad (2)$$

Soit L la luminosité intrinsèque d'un objet céleste qui mesure l'énergie total qu'il émet par unité de temps :

$$L = \frac{E}{t} \quad (3)$$

On peut alors donner une autre expression du flux lumineux :

$$F = \frac{L}{S} \quad (4)$$

3.3 La magnitude absolue

La magnitude absolue est une mesure de la luminosité intrinsèque d'un objet céleste. Il s'agit de la magnitude apparente qu'aurait cet objet s'il se trouve à la distance de 10 parsecs (pc) de l'observateur. On donne ci-dessous son expression :

$$M = m - 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10pc} \right) \quad (5)$$

Avec :

- d : distance entre l'objet céleste et l'observateur

[Pour information : $1\text{ pc} \approx 3.086 \times 10^{16}\text{ m}$]

3.4 Méthode de la parallaxe

La méthode de la parallaxe est une technique de triangulation qui permet de mesurer les distances aux étoiles proches. Elle repose sur l'observation du déplacement apparent d'une étoile par rapport aux étoiles plus éloignées lorsque la Terre se déplace sur son orbite autour du Soleil.

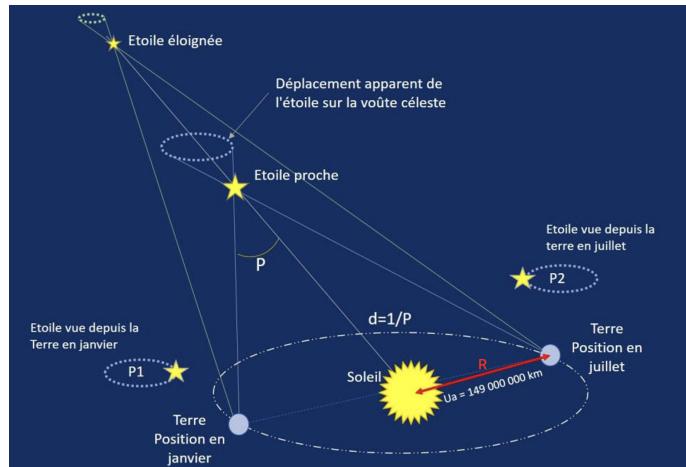


FIGURE 9 – Évolution stellaire

Pour déterminer la distance à une certaine étoile proche, les astronomes l'observent à deux moments de l'année. Connaissant les propriétés optiques de l'instrument de mesure, on peut trouver l'angle formé par les deux lignes de vue vers l'étoile depuis ces deux positions. Il s'agit de l'angle de parallaxe p exprimé en secondes d'arc (arcsec). En utilisant une simple propriété trigonométrique, on trouve que la distance Soleil-étoile proche est :

$$\tan(p) = \frac{R}{d} \quad (6)$$

Avec l'approximation des petits angles qui stipule que $\tan p \sim p$, on a donc :

$$d = \frac{R}{p} \quad (7)$$

Or, la Terre se situe à environ une unité astronomique du Soleil ($R = 1 \text{ UA}$).

Ce qui nous donne l'expression finale de la distance Soleil-étoile proche :

$$d = \frac{1}{p} \quad (8)$$

[Pour information : $1 \text{ UA} \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ et $1 \text{ arcsec} \approx 4.8 \times 10^{-6} \text{ rad}$]

3.5 Le système photométrique UBV

Également appelé système de Johnson, le système photométrique UBV permet de quantifier la luminosité des étoiles dans trois bandes de longueurs d'onde spécifiques : U (ultraviolet), B (bleu) et V (visible). Ce système permet alors de classer les étoiles selon leurs couleurs.

Dans le système UBV, les magnitudes sont mesurées dans chacune des trois bandes. Les différences de magnitudes permettent d'en déduire les indices de couleur :

- Indice de couleur (B-V) : $B - V = m_B - m_V$
- Indice de couleur (U-B) : $U - V = m_U - m_V$

Avec :

- m_U : magnitude apparente dans la bande U
- m_B : magnitude apparente dans la bande B
- m_V : magnitude apparente dans la bande V

Nous utiliserons par la suite les indices B-V pour le calcul de la température de chaque étoile. Plus une étoile est chaude, plus cet indice sera faible et inversement.

3.6 Calcul de la température effective d'une étoile à partir de l'indice B-V

En considérant l'approximation stipulant que les étoiles sont des corps noirs, nous pouvons calculer la température effective de chacune d'elles en utilisant la formule de F. J. BALLESTEROS :

$$T = 4600 \left(\frac{1}{0.92(B - V) + 1.7} + \frac{1}{0.92(B - V) + 0.62} \right) \quad (9)$$

3.7 Le type spectral

Selon la classification de Harvard, les étoiles sont classées en plusieurs catégories en fonction de leur température et leurs caractéristiques spectrales. Cette classification divise les étoiles en plusieurs classes principales, allant de O à M, en passant par B, A, F, G et K.

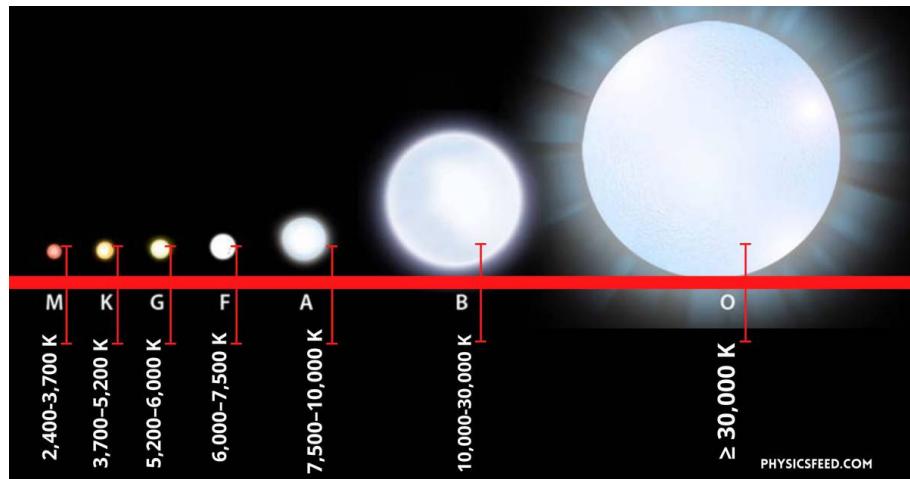


FIGURE 10 – Les types spectraux
Source

Chaque classe est ensuite subdivisée en dix sous-classes, numérotées de 0 à 9 (0 pour une étoile très chaude et 9 pour une étoile très froide) pour fournir une résolution plus fine de la température stellaire. Par exemple, le Soleil est une étoile de type G2.

4 Modélisation en Python

Grâce aux travaux individuels de Hertzsprung et Russell au 20ème siècle, le diagramme de Hertzsprung-Russell a vu le jour. Ce diagramme, d'une grande importance en astrophysique, permet de comprendre l'évolution stellaire. On cherche à réaliser un diagramme HR avec les informations suivantes :

- Axe de abscisses : température (en Kelvin), indice de couleur B-V, type spectral
- Axe des données : magnitude absolue (sans unité)

4.1 Modélisation numérique du diagramme HR

Les données permettant la modélisation du diagramme HR (en Python) proviennent du satellite Hipparcos et sont disponibles sur Kaggle.

Procédons désormais à l'explication de la méthode aboutissant au tracé du diagramme HR.

- **Importation des modules :**

On commence par importer les modules nécessaires.

```
# - - - - -
# Importer les modules
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np
```

- **Chargement des données :**

On charge ensuite les données (sous format CSV) du satellite Hipparcos et on les stocke dans un DataFrame Pandas.

```
# - - - - -
# Charger les données du fichier CSV
data = pd.read_csv('hipparcos_data.csv')
```

- **Filtrage des colonnes nécessaires :**

Plusieurs paramètres sont disponibles dans les données mais nous avons besoin que de certaines :

- HIP : Identifiant unique attribué à chaque étoile ;
- Vmag : Magnitude apparente dans la bande V (sans unité) ;
- Plx : Parallaxe de l'étoile (en mas) ;
- B-V : Indice de couleur ;
- SpType : Type spectral.

```
# -----#
# Filtrer les colonnes nécessaires
data = data[['HIP', 'Vmag', 'Plx', 'B-V', 'SpType']]
```

On donne ci-dessous quelques lignes du DataFrame où on l'a récupéré les paramètres précédents :

	HIP	Vmag	Plx	B-V	SpType
0	1	9.10	3.54	0.482	F5
1	2	9.27	21.90	0.999	K3V
2	3	6.61	2.81	-0.019	B9
3	4	8.06	7.75	0.370	F0V
4	5	8.55	2.87	0.902	G8III

- **Traitement des valeurs manquantes :**

Certaines valeurs de type spectral sont manquantes dans la colonne correspondante, pour éviter tout problème on les remplace par une chaîne de caractère vide.

```
# -----#
# Remplacer les valeurs NaN dans la colonne 'SpType' par une chaîne vide
data['SpType'].fillna('', inplace=True)
```

- **Filtrage des étoiles avec une parallaxe strictement positive :**

D'après l'expression [8], une parallaxe nulle ou négative impliquerait d'avoir une distance qui n'est pas cohérente physiquement, il faut donc seulement sélectionner les parallaxes strictement positives.

```
# -----#
# Filtrer les étoiles avec une parallaxe positive et significative
data = data[data['Plx'] > 0]
```

- **Calcul de la distance entre chaque étoile et le Soleil :**

Les données que nous avons à disposition comportent des valeurs de parallaxe en mas (milliarcsecondes). Il faut alors les convertir en as (arcsecondes) afin de pouvoir calculer la distance en parsec (pc) à l'aide de l'expression [8].

```
# -----#
# Calcul de la distance (en pc)
data['Distance'] = 1/data['Plx'] * 1000 # convertir la distance en pc (convertir la parallaxe (mas) en as)
```

- **Calcul de la magnitude absolue :**

Maintenant que nous avons les distances, nous pouvons calculer la magnitude absolue de chaque étoile en utilisant l'expression [5].

```
# -----#
# Calcul de la magnitude absolue
data['AbsoluteMag'] = data['Vmag'] - 5 * np.log10(data['Distance'] / 10)
```

- **Calcul de la température effective des étoiles :**

La formule de F.J. BALLESTEROS étant valable que pour une unique étoile, on effectue une fonction Python afin de calculer la température effective de toutes les étoiles du catalogue Hipparcos.

```
# -----#
# Fonction pour calculer la température effective des étoiles
def bv_to_temp(bv):
    return 4600 * ((1 / (0.92 * bv + 1.7)) + (1 / (0.92 * bv + 0.62)))
```

- **Ajout des températures aux données :**

Après avoir calculé les températures des étoiles, il ne reste plus qu'à les ajouter dans le DataFrame *data*.

```
# -----#
# Ajouter la température aux données
data['Temperature'] = bv_to_temp(data['B-V'])
```

- **Enregistrement du DataFrame dans un fichier CSV :**

En supplément, on peut aussi enregistrer le DataFrame modifié dans un fichier CSV.

```
# -----#
# Enregistrer le DataFrame dans un fichier CSV
data.to_csv('data.csv', index=False)
```

- **Définition des étiquettes de température et de type spectral :**

Avant de tracer le graphe nous devons définir les étiquettes de température (ce que nous allons placer sur l'axe), du type spectral ainsi que la position des étiquettes des types spectraux.

```
# -----#
# Définir les étiquettes de température et les types spectraux
temp_values = [50000, 30000, 10000, 7000, 5500, 4500, 3500] # Étiquettes des températures
spectral_types_positions = [-0.25, -0.1, 0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 1.7] # Pour la position des étiquettes du type spectral
spectral_types = ['O', 'B', 'A', 'F', 'G', 'K', 'M'] # Étiquettes du type spectral
```

- **Ajout d'un fond noir :**

Pour une meilleure visualisation, nous ajoutons un fond noir uniforme.

```
# -----#
# Définir un fond noir uniforme
plt.style.use('dark_background')
```

- **Tracer le diagramme HR :**

On commence par tracer le graphe avec l'axe des abscisses du haut pour la température, l'axe des abscisses du bas pour les indices de couleur B-V, et l'axe des ordonnées pour la magnitude absolue.

```
# -----
# Tracer le diagramme HR
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 8))

sc = ax1.scatter(data['B-V'], data['AbsoluteMag'], s=0.4, c=data['Temperature'], cmap='plasma')
cb = plt.colorbar(sc, label='Température (K)')
ax1.invert_yaxis() # Inverser l'axe des magnitudes pour correspondre à la convention HR
ax1.set_xlabel('Couleur (B-V)')
ax1.set_ylabel('Magnitude Absolue')
ax1.set_xlim(-0.5, 2.0)
ax1.set_title('Diagramme de Hertzsprung-Russell')
```

Ci-dessus, $c=\text{data}['Temperature']$ permet de colorer les points en fonction des valeurs de température des étoiles.

- **Ajout de l'axe supérieur pour la température :**

On ajoute un nouvel axe des abscisses (pour la température) en prenant soin de définir les mêmes limites que pour l'axe des abscisses précédent.

```
# -----
# Ajouter l'axe supérieur pour la température
ax2 = ax1.twiny() # Création d'un nouvel axe 'ax2' qui partage le même axe des ordonnées avec 'ax1'
ax2.set_xlim(ax1.get_xlim()) # Assurer que les limites de l'axe des abscisses de ax2 correspondent à celles de ax1 pour un alignement correct
ax2.set_xticks([-0.5, -0.25, 0.0, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5]) # Pour la position des étiquettes de température
ax2.set_xticklabels(temp_values) # Définir les étiquettes des graduations sur l'axe des abscisses de ax2 avec les valeurs de température
ax2.set_xlabel('Température (K)')
```

- **Ajout de l'axe inférieur pour le type spectral :**

De plus, on ajoute un autre axe des abscisses mais cette fois-ci pour le type spectral.

```
# -----
# Ajouter un deuxième axe pour les types spectraux
ax3 = ax1.twiny()
ax3.set_xticks(spectral_types_positions)
ax3.set_xlabel('Type Spectral') # Placer les graduations de l'axe des abscisses de ax3 en bas du graphique
ax3.xaxis.set_ticks_position('bottom') # Positionner l'étiquette de l'axe des abscisses de ax3 en bas du graphique
ax3.xaxis.set_label_position('bottom')
ax3.spines['bottom'].set_position(('outward', 36)) # Ajustement de la position vers le bas
ax3.set_xlim(ax1.get_xlim())
```

- **Ajustement des données de la séquence principale, des géantes rouges, des supergéantes et des naines blanches :**

On souhaite maintenant tracer des courbes pour ajuster les données. On effectue cela séparément pour chaque catégorie : séquence principale, géantes rouges, supergéantes et naines blanches.

```
# -----#
# Courbe ajustée de la séquence principale
def plot_sequence_principale(ax):
    bv_seq_princ = np.linspace(-0.2, 1.7, 100) # Générer des valeurs de B-V couvrant la séquence principale
    abs_mag_seq_princ = 4.95 * bv_seq_princ**3 - 12.07 * bv_seq_princ**2 + 13.91 * bv_seq_princ - 0 # Calculer la magnitude absolue correspondante pour chaque valeur de BV
    ax.plot(bv_seq_princ, abs_mag_seq_princ, color='yellow', linestyle='--', linewidth=2, label='Séquence Principale') # Tracer la séquence principale sur le graphique

plot_sequence_principale(ax1)

# -----#
# Courbe ajustée de la branche des géantes rouges
def plot_geantes(ax):
    bv_geantes = np.linspace(0.15, 1.7, 100)
    abs_mag_geantes = -2.1 * bv_geantes**2.2 + 2.9 * bv_geantes + 0.5
    ax.plot(bv_geantes, abs_mag_geantes, color='red', linestyle='--', linewidth=2, label='Géantes')

plot_geantes(ax1)

# -----#
# Courbe ajustée de la branche des supergéantes
def plot_supergéantes(ax):
    bv_superg = np.linspace(-0.2, 1.7, 100)
    abs_mag_superg = - 6 * np.exp(-bv_superg) - 1.2 * bv_superg**2 - 1
    ax.plot(bv_superg, abs_mag_superg, color='orange', linestyle='--', linewidth=2, label='Supergéantes')

plot_supergéantes(ax1)

# -----#
# Courbe ajustée de la branche des naines blanches
def plot_naines_blanche(ax):
    bv_naine_blanche = np.linspace(-0.2, 1.0, 100)
    abs_mag_naine_blanche = -2.1 * (bv_naine_blanche + 0.5)**2 + 5.9 * (bv_naine_blanche + 0.5) + 9
    ax.plot(bv_naine_blanche, abs_mag_naine_blanche, color='cyan', linestyle='--', linewidth=2, label='Naines Blanches')

plot_naines_blanche(ax1)
```

- **Ajout de la légende :**

Pour finir, on ajoute la légende en haut à gauche du graphe.

```
# -----#
# Afficher la légende en haut à gauche
ax1.legend(loc='upper left')
plt.show()
```

4.2 Modélisation numérique de la carte de densité du diagramme HR

Afin de visualiser la concentration relative des points de données dans une certaine région de l'espace graphique (c'est-à-dire la densité des étoiles), nous réalisons une carte de densité du diagramme HR. Donnons ci-dessous le programme Python permettant cela :

```
# Définir la taille de la figure
plt.figure(figsize=(10, 8))

# Créer une carte de densité 2D avec les données 'B-V' et 'AbsoluteMag'
sns.kdeplot(
    x=data['B-V'],           # Axe x correspondant à la colonne 'B-V' des données
    y=data['AbsoluteMag'],   # Axe y correspondant à la colonne 'AbsoluteMag' des données
    cmap="plasma",           # Utiliser la palette de couleurs 'plasma' pour la densité
    fill=True,                # Remplir les contours de la densité pour une meilleure visualisation
    cbar=True                 # Ajouter une barre de couleur pour indiquer l'échelle de densité
)

# Inverser l'axe y pour que les valeurs plus élevées soient en bas, comme dans un diagramme H-R typique
plt.gca().invert_yaxis()

# Ajouter un label à l'axe x
plt.xlabel('Couleur (B-V)')

# Ajouter un label à l'axe y
plt.ylabel('Magnitude Absolue')

# Ajouter un titre à la figure
plt.title('Carte de densité 2D du diagramme H-R')

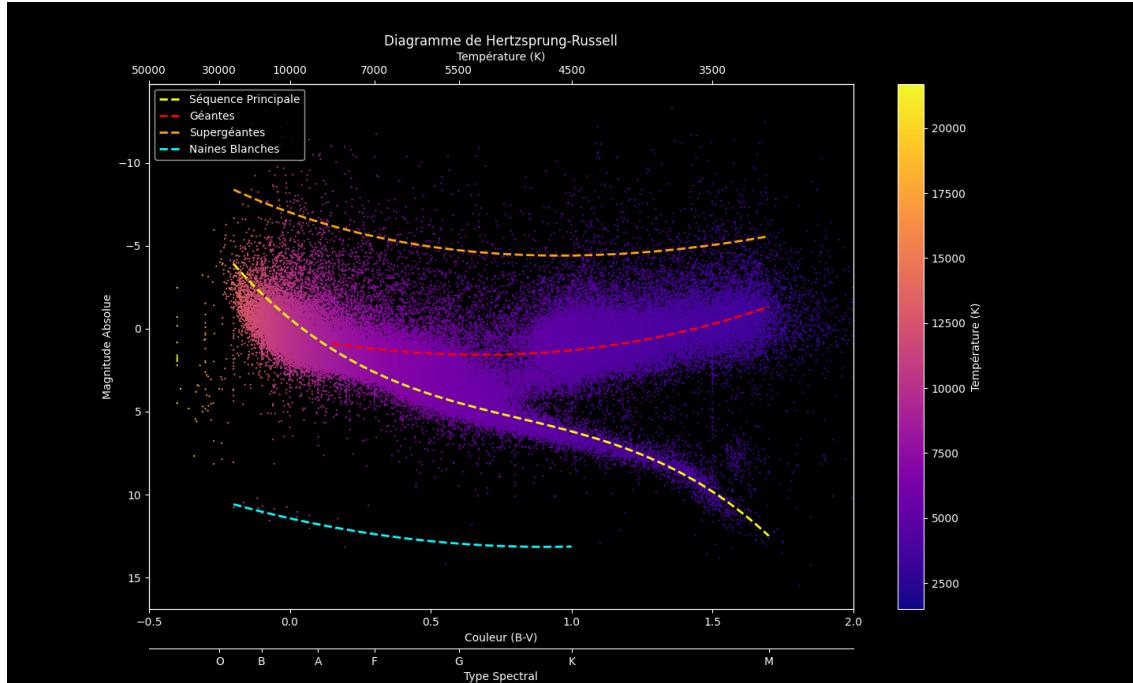
# Ajouter une limite à l'axe des abscisses
plt.xlim(-0.5, 2)

# Afficher la figure
plt.show()
```

Nous avons utilisé le module Python **seaborn** afin de modéliser automatiquement cette carte de densité. Ce module utilise la méthode KDE (Kernel Density Estimation) qui permet d'estimer et visualiser la densité de probabilité de données multidimensionnelles sans faire d'hypothèses strictes sur leur distribution. De plus, nous avons pris soin d'ajouter une échelle de couleur pour une meilleure visualisation de la densité.

4.3 Analyse du diagramme HR et de la carte de densité

Nous obtenons alors le diagramme HR ci-dessous :



La séquence principale

La séquence principale correspond à la diagonale allant du coin inférieur-droite au coin supérieur-gauche. Une étoile commence son aventure sur la séquence principale où elle passe 90 % de sa vie, ce qui explique la grande concentration de points (d'étoiles) dans cette région.

- **Relation température-masse :**

Les étoiles situées dans le coin inférieur-droite ont une température faible ($\sim 2500 \text{ K}$ à $\sim 3000 \text{ K}$) et une couleur (B-V) élevée (> 1.3), tandis que celles dans le coin supérieur-gauche ont une température élevée ($> 10,000 \text{ K}$) et une couleur (B-V) faible (< 0). En d'autres termes, les étoiles positionnées dans le coin inférieur-droite du diagramme HR sont typiquement de faible masse, tandis que celles situées dans le coin supérieur-gauche sont de masse élevée. Par conséquent, il existe une relation entre la masse d'une étoile et sa température : plus une étoile est massive, plus elle est chaude.

- **Relation masse-luminosité :**

Il existe également une relation entre la masse d'une étoile et sa luminosité.

Cette relation est exprimée par :

$$L \propto M^3 \quad (10)$$

D'après cette relation, la luminosité d'une étoile augmente de manière significative avec sa masse. Ainsi, les étoiles plus massives sont beaucoup plus lumineuses que les étoiles moins massives. En montant dans la séquence principale du diagramme HR, où les étoiles plus massives se trouvent généralement dans les régions supérieures, nous observons effectivement une augmentation de la luminosité des étoiles. Cela est cohérent avec l'expression [5] qui indique qu'une étoile très lumineuse possède une magnitude absolue faible.

- **Durée de vie :**

Une étoile très massive a une durée de vie plus courte, décrite par la relation :

$$t_{vie} \propto \frac{1}{M^2} \quad (11)$$

Géantes rouges et supergéantes

Lorsque les étoiles quittent la séquence principale, elles deviennent soit des géantes rouges, soit des supergéantes, en fonction de leur masse.

- **Géantes rouges :**

La branche des géantes rouges est caractérisée par la courbe rouge dans le diagramme HR. Cette région correspond à une concentration d'étoiles significative, bien que moins dense que sur la séquence principale. Lorsqu'elles quittent la séquence principale, les étoiles gagnent en masse et évoluent vers une phase de géantes rouges (ou supergéantes), se déplaçant ainsi vers la droite du diagramme HR. Ce déplacement vers la droite reflète une diminution de leur température effective (entre ~ 3000 et $4000 K$, si l'on prend en compte que la partie droite avec la majorité d'étoiles). Malgré cette baisse de température, les géantes rouges présentent une luminosité élevée, comme en témoigne la diminution de leur magnitude absolue (entre ~ -5 et 5).

- **Supergéantes :**

Les supergéantes sont des étoiles encore plus massives que les géantes rouges, ce qui les rend beaucoup plus lumineuses. C'est pourquoi elles occupent une position supérieure sur le diagramme HR, indiquant une luminosité extrêmement élevée par rapport aux étoiles moins massives et moins lumineuses situées sur la séquence principale ou sur la branche des géantes rouges.

Géantes jaunes

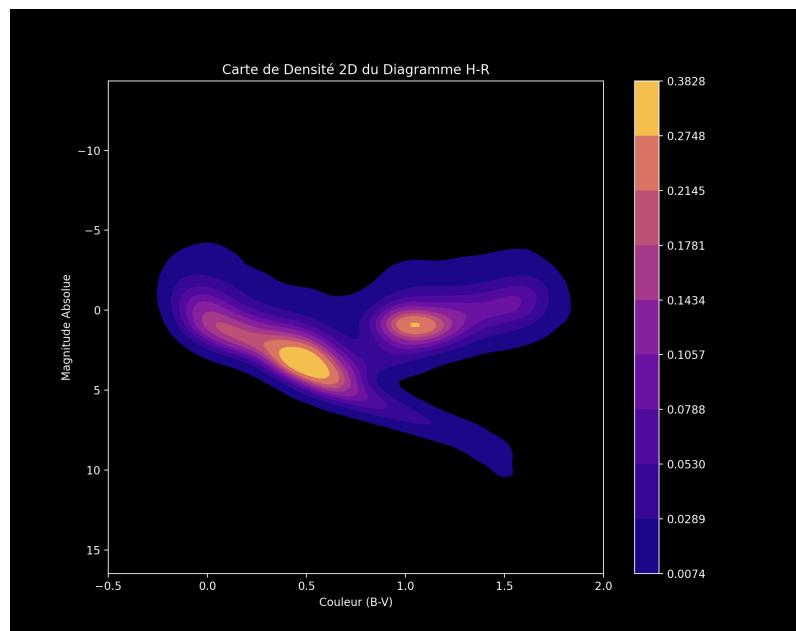
Lorsqu'une étoile quitte la séquence principale, elle traverse généralement une phase de géante jaune avant de devenir une supergéante. Ou encore, vers la fin de la fusion de l'hélium en carbone, une géante rouge peut également passer par cette phase de géante jaune. Cette phase intermédiaire est courte dans l'évolution stellaire. La présence de cette phase brève de géante jaune explique le "trou" observable dans le diagramme HR entre la séquence principale et la branche des géantes rouges. Ces étoiles ont des températures intermédiaires (entre $\sim 4600 K$ à $5100 K$) et des couleurs (B-V) entre (entre ~ 0.7 et 1.0). Elles ont une luminosité modérée avec une magnitude absolue entre ~ 0 et -5 .

Naines blanches

Les naines blanches se trouvent dans la partie inférieure du diagramme HR, caractérisées par leurs magnitudes absolues élevées (entre ~ 10 et 15), ce qui indique qu'elles sont peu lumineuses. Malgré cela, elles possèdent une température de surface élevée ($> 10000 K$). Au fil du temps, ces étoiles refroidissent progressivement, ce qui se traduit par un déplacement vers la droite de ces étoiles sur le diagramme HR.

Carte de densité

Cherchons désormais à approfondir notre analyse à l'aide de la carte de densité du diagramme HR.



Nous avons constaté sur le diagramme HR une concentration élevée d'étoiles le long de la séquence principale, ce qui est clairement reflété par une zone de densité élevée en jaune sur cette carte. De plus, malgré une densité moindre par rapport à la séquence principale, la branche des géantes présente également une concentration notable d'étoiles sur le diagramme HR, confirmée par une zone distincte sur la carte de densité.

5 Conclusion

Ce projet a permis de clarifier les mécanismes qui régissent l'évolution stellaire et d'illustrer ces phénomènes par des modèles théoriques et des simulations numériques. Grâce à la modélisation du diagramme HR, nous avons pu visualiser les différentes phases de la vie des étoiles et comprendre les transitions entre ces phases. Ainsi, l'étude de l'évolution stellaire demeure un domaine de recherche fascinant et crucial pour notre compréhension de l'univers.



6 Références

- https://www.kaggle.com/datasets/konivat/hipparcos-star-catalog/data*
https://hipparcos-tools.cosmos.esa.int/pstex/sect2_01.pdf
https://fr.wikipedia.org/wiki/volution_stellaire
https://media4.obspm.fr/public/ressourceslu/pages_planetologie-formation/formation-disque-accretion.html
http://www.astrosurf.com/quasar95/exposes/Diagramme_HR.pdf
http://omsj.info/index.php/activites/chroniques/120-trouver-la-temperature-d-une-etoile-par-son-spectre
https://en.wikipedia.org/wiki/Color_index
https://arxiv.org/pdf/1201.1809
https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/750/2/97/pdf