

Encadrants : Sylvie Vauclair - Morgan Deal

Le destin des systèmes planétaires

August 9, 2024



Résumé

A la fin de la vie de la majorité des étoiles, une naine blanche se forme et autour d'elle on peut parfois observer un disque de débris, reste de son ancien système planétaire. La matière du disque tombe sur la naine blanche, ce qu'on appelle accrétion. Cette matière accrétée tombe ensuite vers l'intérieur de l'étoile en raison de phénomènes de triage gravitationnel, associé à d'autres effets de convection et diffusion.

Quelles sont les caractéristiques et les détails du processus d'accrétion sur les naines blanches? Notre objectif était d'étudier la vie des étoiles en se concentrant particulièrement sur la phase naine blanche, à l'aide du code d'évolution stellaire MESA, afin de mieux comprendre les résultats des scientifiques en ce qui concerne la composition chimique de leurs enveloppes durant cette phase.

Nous avons commencé par nous documenter sur notre sujet via des articles tels que Harrison et al. (2021) ou encore Wachlin et al. (2022), ce qui nous a permis de mieux comprendre notre sujet et ainsi d'interpréter les résultats que nous allions observer via le code MESA.

Nous avons tracé l'évolution d'étoiles de 1 et 1.2 masses solaires, depuis la pré-séquence principale jusqu'au stade naine blanche, dans le diagramme HR. Nous avons aussi étudié les différents paramètres de l'étoile au cours de son évolution tels que son rayon, sa masse, son âge ou encore sa composition chimique.

Nous avons ensuite étudié la structure interne d'une naine blanche, sa composition chimique, la stratification interne et ce qui se passe si elle subit de l'accrétion ainsi que de la diffusion. Ce travail est une étape dans la compréhension de la fin des systèmes planétaires.

Mots clés

Evolution stellaire - Code MESA - Diagramme HR- Naines blanches - Disques de débris - Accrétion - Diffusion

Table des matières

1	Introduction	3
2	Méthodologie	4
2.1	Lecture et analyse d'articles	4
2.2	Le code d'évolution stellaire MESA	4
3	Résultats	5
3.1	Tracé complet d'évolution stellaire dans le diagramme HR	5
3.2	Modèles de naines blanches et structure interne	6
3.3	Test d'accrétion de matière lourde (hélium)	8
4	Conclusion	9
	Bibliographie	10

1 Introduction

On observe qu'environ 97% des étoiles terminent leur existence sous forme de naines blanches. Certaines d'entre elles possèdent un disque de débris, reste d'un ancien système planétaire. Ceci est confirmé par trois observations différentes :

- Un excès d'infrarouge qui marque la présence de disque de débris autour d'elles. En effet, lorsque les éléments du disque sont excités par la lumière ultraviolette de la naine blanche, ils émettent un rayonnement infrarouge. Ce disque est composé de matériaux tels que des silicates et du carbone, probablement formés par l'érosion de corps célestes tels que des astéroïdes. La présence de disques de débris autour des naines blanches est extrêmement rare (environ 1%). Elle pourrait être un indice important pour comprendre l'histoire évolutive de ces objets et de leurs systèmes planétaires.

- Les naines blanches ont une gravité très élevée (10^4 gravité solaire), ce qui implique un triage gravitationnel fort. Les éléments lourds tombent en fonction de leur poids, ce qui conduit à une stratification chimique interne. Elles ont un cœur d'éléments lourds, majoritairement composé de carbone et d'oxygène, au-dessus duquel se trouve une couche d'hélium, et éventuellement au-dessus une couche d'hydrogène. Elles peuvent être classées par catégories. Les DAs ont une couche d'hydrogène en surface alors que les DBs n'en ont pas : elles ont seulement une couche d'hélium. On devrait alors observer une abondance d'éléments lourds nulle dans les couches externes de toutes ces naines blanches, or dans 25% des cas observés cette abondance est non nulle. Cela signifie qu'un autre phénomène est à prendre en compte : l'accrétion de matière sur la naine blanche à partir d'un disque de débris. On rajoute souvent un Z à la fin de leurs nom (DAZ, DBZ) qui signifie la présence de raies métalliques, on appelle cela des naines blanches polluées (Harrison et al. 2021).

- Enfin très récemment l'analyse d'observations en rayons X autour d'une naine blanche a confirmé l'accrétion de matière sur cette dernière. Les rayons X viennent de l'énergie cinétique libérée lorsque des particules extérieures entrent en collision avec les particules de l'atmosphère des naines blanches ce qui provoque un échauffement. Cunningham et al. (2022) ont obtenu un taux d'accrétion à partir des observations en rayons X proche (mais pas identique) aux taux trouvés à partir de l'analyse des abondances, ce qui confirme donc l'accrétion.

L'étude des naines blanches entourées de disques de débris est importante pour comprendre la fin des systèmes planétaires. Notre stage s'inscrit dans ce contexte. Nous nous sommes focalisés sur les modèles de structure interne de ces étoiles et leur composition chimique pour essayer de comprendre ce qui change lorsqu'elles accrètent de la matière planétaire. Après avoir lu des articles sur le sujet (section 2.1), nous avons appris à utiliser le code d'évolution stellaire MESA pour calculer l'évolution d'étoiles de type solaire jusqu'au stade naine blanche (section 2.2). Nous avons pu tracer le diagramme HR correspondant et retrouver les divers stades d'évolution (section 3.1). Nous nous sommes ensuite focalisés sur les modèles de naines blanches, en étudiant leur structure interne et leur composition chimique, et en introduisant le triage gravitationnel des éléments (section 3.2). Nous avons enfin essayé de modéliser l'accrétion de matière sur une naine blanche avec les moyens proposés par MESA. Nous avons considéré une matière accrétée riche en hélium, l'ajout d'éléments plus lourds aurait demandé une durée de stage plus longue. Nous avons tracé les variations de la composition chimique interne et du poids moléculaire moyen, pour détecter les inversions pouvant conduire à de la convection thermohaline (section 3.3). Nous donnons les conclusions de ce travail en section 4.

2 Méthodologie

2.1 Lecture et analyse d'articles

Afin de mieux comprendre notre sujet nous avons commencé par nous documenter. Nous avons lu beaucoup d'articles mais deux d'entre eux ont principalement retenu notre attention : celui de Harrison et al., publié en 2021 et celui de Wachlin et al. publié en 2022. Dans l'article de Harrison et al. (2021), les chercheurs ont fait des statistiques sur les abondances chimiques des matériaux accrétés par les naines blanches (obtenues à partir des raies spectrales) et ils ont essayé de remonter ainsi jusqu'aux paramètres de formation du système planétaire initial. Ces recherches sont d'un grand intérêt car elles nous permettent d'accéder aux compositions chimiques des exoplanètes de l'ancien système, ce qui permet une meilleure compréhension de leur évolution géologique et de leur potentiel habitable.

Dans l'article de Wachlin et al. (2022), les chercheurs ont étudié en détail la manière dont les éléments lourds accrétés sont mélangés et diffusés vers le centre de l'étoile. Les éléments sont d'abord mélangés dans l'atmosphère et dans l'enveloppe convective (déterminée grâce au critère de Schwarzschild). Ils tombent ensuite par triage gravitationnel. Etant donné que l'échelle de temps de diffusion des éléments lourds accrétés à travers les couches externes de la naine blanche est beaucoup plus courte que l'échelle de temps évolutif, la présence d'éléments lourds dans la photosphère implique que le processus d'accrétion est en cours.

De plus, les chercheurs ont montré que l'accumulation d'éléments lourds dans la zone convective peut, dans certains cas conduire à une instabilité particulière la convection thermohaline. Cette instabilité se produit lorsqu'un gradient de poids moléculaire est instable, dans un milieu où le gradient de température est stable. Elle peut conduire à une diffusion des éléments vers le centre de l'étoile encore plus rapide que le triage gravitationnel. Ils ont montré que la convection thermohaline est plus performante dans les naines blanches de type DA que dans celles de type DB. Cette différence est principalement due à la différence de poids moléculaire entre l'hélium et l'hydrogène, ce qui conduit à des gradients de μ plus forts dans les DA. De plus, les DBs ont des zones convectives plus profondes que les DAs, ce qui rend la convection thermohaline moins efficace. La température effective de l'étoile et la profondeur de la zone de transition H/He sont également des facteurs importants qui peuvent influencer l'efficacité de la convection thermohaline dans les DAs.

Afin de mieux comprendre les résultats et l'interprétation des caractéristiques d'absorption observées dans l'atmosphère de naines blanches, il nous faut un bon modèle de structure interne et externe de ces astres. Nous aborderons ce point dans la partie suivante.

2.2 Le code d'évolution stellaire MESA

Pour modéliser l'évolution des étoiles nous avons utilisé le code MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) code en open source, continuellement développé et amélioré par la communauté des chercheurs en astrophysique, mais principalement créé par une équipe de chercheurs du Centre de physique computationnelle et d'astrophysique de l'Université de Californie à Santa Barbara. Ce code permet de simuler l'évolution d'une étoile à partir des équations de la physique stellaire. Il prend en compte des paramètres tels que la composition chimique, la convection, la diffusion, la perte de masse, les interactions binaires et d'autres effets physiques pour décrire de manière réaliste l'évolution d'une étoile en modélisant chaque étape de la vie d'une étoile : la formation stellaire, l'évolution des étoiles massives, la production d'éléments lourds, les supernovae, les naines blanches et les étoiles à neutrons. En sortie ce code nous renvoie les propriétés des étoiles dans des tables, telles que leur masse, leur rayon

et leur température en surface au cours du temps ou en fonction de leur profondeur.

Avant tout, nous avons dû télécharger sur nos ordinateurs portables une machine virtuelle nous permettant de faire tourner le code MESA sous Linux. Nous avons rencontré quelques problèmes concernant cette partie, en effet le stockage demandé pour l'installation de la machine virtuelle MESA étant volumineux, certains de nos ordinateurs personnels n'arrivaient pas à la faire fonctionner. Nous avons néanmoins réussi à l'installer sur deux postes, dont un qui a pu faire tourner le programme principal. Une fois ce problème résolu nous avons commencé par simuler l'évolution d'une étoile d'une masse solaire depuis la pré-séquence principale jusqu'au stade de naine blanche. Avec les données obtenues nous avons pu tracer les différentes courbes retraçant la vie de l'étoile en utilisant un code Python, à partir des tables obtenues grâce au programme MESA. Afin d'observer les différences provenant d'un changement de masse initiale nous avons essayé de modéliser des systèmes de 0.8 Masse solaire à 1.2 masse solaire, cependant le programme n'a abouti que pour le cas de 1 et 1.2 masse solaire.

Notre objectif final avec le programme MESA était de pouvoir modéliser une naine blanche en incluant les phénomènes physiques liés à la présence d'un disque d'accrétion. Par la suite nous avons lancé un modèle de naine blanche qui accrete certains éléments comme l'hydrogène et l'hélium 4. Nous avons alors pu tracer son poids moléculaire moyen en fonction de son rayon et observer cette accrétion au niveau de la surface. Bien que nous ayons consacré du temps à comprendre le code, nous n'avons malheureusement pas été en mesure d'ajouter des éléments plus lourds dans la matière accrétée en raison de la complexité de cette tâche.

3 Résultats

3.1 Tracé complet d'évolution stellaire dans le diagramme HR

Les naines blanches sont des objets célestes fascinants, qui se forment lorsque les étoiles comme notre Soleil épuisent leur combustible et entament la dernière phase de leur vie. Comment les étoiles arrivent-elles à ce stade de vie ? Pour suivre l'évolution d'une étoile nous allons nous appuyer sur le diagramme Hertzsprung Russell (Figure 1) d'une étoile semblable à notre Soleil.

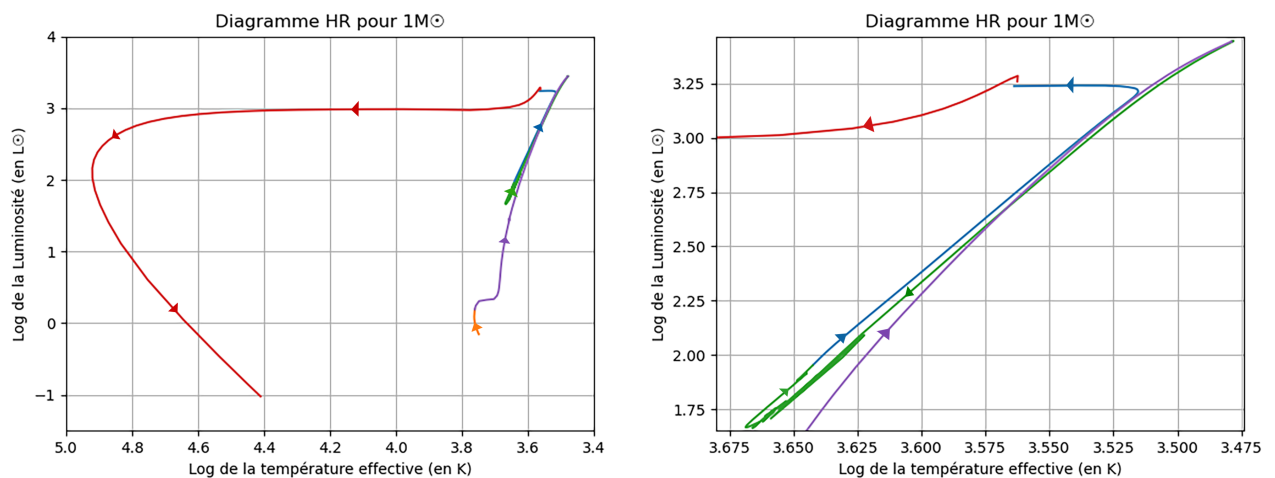


Figure 1: Luminosité d'une étoile d'1 M_{\odot} par rapport au log de sa température effective avec zoom sur la partie froide

Suite à l'effondrement d'un nuage interstellaire une protoétoile se forme au centre de ce nuage. La densité de cette protoétoile augmente jusqu'à atteindre le stade dit d'étoile de la séquence principale qui se caractérise par le commencement de la fusion nucléaire de l'hydrogène dans son coeur (phase jaune). Quand une étoile a épuisé tout l'hydrogène présent dans son coeur elle entre en phase de sous-géante (première partie de la courbe violette). Des réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène commencent alors dans son enveloppe, ces réactions enrichissent son coeur en hélium et augmentent la pression sur celui-ci. Pour une étoile de $1 M_{\odot}$ le coeur devient dégénéré, cela provoque une augmentation de la température et de la luminosité de l'enveloppe environnante ce qui amène à la phase de géante rouge (partie ascendante de la courbe violette).

On parle de phase de géante rouge car l'étoile s'expand à cause de l'énergie provenant des réactions dans son enveloppe. L'étoile refroidit en surface avec une luminosité qui ne varie que légèrement. L'hélium produit par les réactions dans l'enveloppe provoque une augmentation de la température du coeur, ce qui entraîne une augmentation du nombre de réactions nucléaires dans l'enveloppe et de la luminosité de l'étoile alors que la température de l'astre baisse faiblement (partie ascendante de la courbe violette). Pour les étoiles avec un coeur dégénéré il y a une limite à l'augmentation de la taille et de la luminosité. Le début de la fusion nucléaire de l'hélium dans le coeur produit alors ce que l'on appelle le flash de l'hélium (extrémité de la partie en violet).

Pour un coeur dégénéré suite au flash de l'hélium, l'énergie produite par ces réactions est absorbée par le plasma environnant, la température de l'étoile augmente alors mais sa luminosité reste la même, c'est pour cela que nous observons une branche horizontale (courbe verte). A la fin des réactions nucléaires de l'hélium au coeur de l'étoile, il reste un coeur de carbone et d'oxygène ou il ne se déroulera plus de fusion nucléaire (chute de luminosité) cependant dans l'enveloppe il y a encore des réactions de fusion nucléaire avec de l'hydrogène. L'hélium produit s'accumule en couche dans l'enveloppe et relance la fusion nucléaire de manière périodique, on parle alors d'impulsion thermique. Ce phénomène provoque une augmentation de la luminosité de l'étoile que nous pouvons voir en bleu.

Une fois l'hélium entièrement consommé, la fusion nucléaire ne contrebalance plus la force de gravité mais la masse de l'étoile n'étant pas suffisamment importante, la fusion nucléaire d'éléments plus lourds ne se déclenche pas. L'enveloppe externe de l'étoile échappe complètement à l'attraction gravitationnelle de cette dernière et se disperse alors dans l'espace environnant. Après l'expulsion de ses couches externes, le noyau stellaire restant (chaud et dense) continue de se contracter sous l'effet de la gravité. Il finira par se stabiliser en tant que naine blanche (courbe rouge).

3.2 Modèles de naines blanches et structure interne

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente la naine blanche est le noyau stellaire chaud et dense restant à la suite de l'évolution stellaire. Cette densité élevée implique une gravité de surface plus intense. C'est ce que nous avons tracé sur la Figure 2. Comme nous pouvons l'observer en stade de naine blanche la gravité de surface est environ 10000 fois la gravité de surface de l'étoile lorsqu'elle était sur la séquence principale. Nous pouvons également noter la baisse de gravité de surface caractéristique du passage en géante rouge où l'étoile voit son rayon augmenter mais sa gravité de surface baisser.

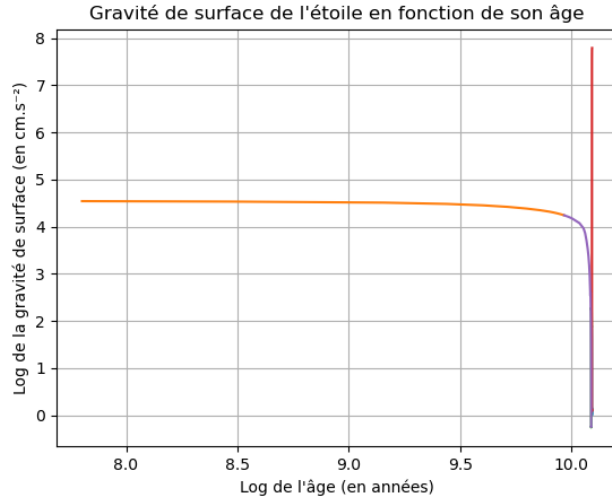


Figure 2: Log de la gravité de surface en fonction du log de son âge pour une étoile d' $1 M_{\odot}$

Nous avons calculé des modèles de naines blanches pour des étoiles qui avaient sur la séquence principale $1 M_{\odot}$ et $1.2 M_{\odot}$. Pour montrer la ségrégation interne des éléments chimiques dans ces étoiles, nous avons tracé pour la phase naine blanche le pourcentage d'abondance de certains de ces éléments en fonction du rayon normalisé (Figure 3). Nous observons que l'hydrogène est concentré à la surface, l'hélium au-dessous, tandis que les éléments plus lourds (comme le carbone et l'oxygène) s'accumulent dans les couches internes de la naine blanche, là où se trouvait le cœur de l'étoile lors de sa phase géante rouge. La composition de la naine blanche provenant d'une étoile de $1 M_{\odot}$ est indiquée en traits pleins, celle de $1.2 M_{\odot}$ en pointillés. On observe une différence entre les deux, due au fait que l'évolution interne a été différente dans les deux étoiles dans les phases évolutives précédentes. Il y a plus de carbone que d'hélium pour une étoile de $1.2 M_{\odot}$ qu'une étoile de $1 M_{\odot}$. Ceci s'explique par le fait qu'une étoile plus massive arrive à créer plus d'éléments lourds qu'une étoile de masse plus faible. Cette différence d'abondance va se ressentir jusqu'à la phase naine blanche.

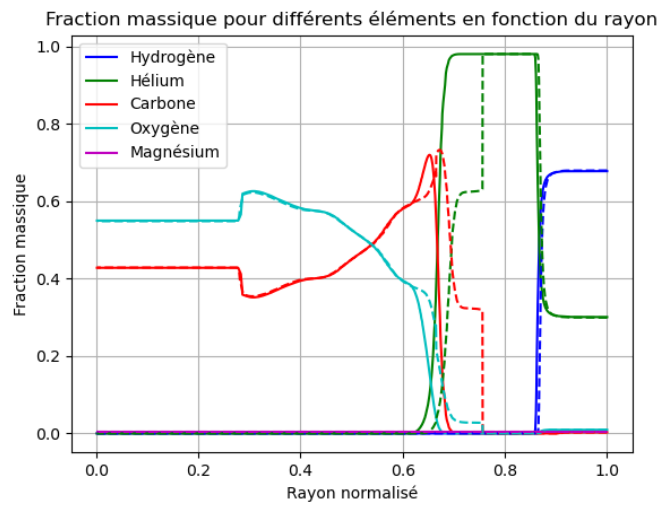


Figure 3: Fraction massique pour $1 M_{\odot}$ (traits plein) et pour $1.2 M_{\odot}$ (pointillés) en fonction du rayon normalisé

3.3 Test d'accrétion de matière lourde (hélium)

Les naines blanches qui possèdent un disque de débris, reste de l'ancien système planétaire, subissent de l'accrétion de matière lourde à la surface, ce qui modifie la composition chimique telle que nous l'avons montrée dans la section précédente.

Des chercheurs (Xu et al 2017) ont analysé les abondances des éléments accrétés et constaté que la plupart des naines blanches présentent principalement du magnésium (Mg), du fer (Fe), du silicium (Si) et de l'oxygène (O). On retrouve ces éléments dans les planètes telluriques de notre système solaire, avec des rapports d'abondances semblables, ce qui peut suggérer une composition commune des exoplanètes rocheuses dans notre galaxie, et confirme l'idée que les disques de débris proviennent bien de systèmes planétaires initiaux comme le système solaire (Jura & Young 2014, Bonsor & Madhusudhan 2018).

Le code MESA, dans la configuration que nous avons utilisé, ne permettait pas de simuler l'accrétion de tous ces éléments. Nous avons donc, pour une première étape, simulé l'accrétion de matière contenant de l'hydrogène et de l'hélium 4. Notre but était d'étudier la variation de composition chimique et les gradients de poids moléculaire moyen, susceptibles d'induire de la convection thermohaline. En effet, la matière accrétée tombe au cours du temps vers l'intérieur de la naine blanche, par diffusion atomique, mais aussi, dans certains cas, par mélange dû à la convection thermohaline induite par un gradient de μ instable.

Nous avons obtenu les poids moléculaires moyens en fonction du rayon normalisé pour deux valeurs de masse accrétée sans diffusion (Figure 4) et avec diffusion (Figure 5):

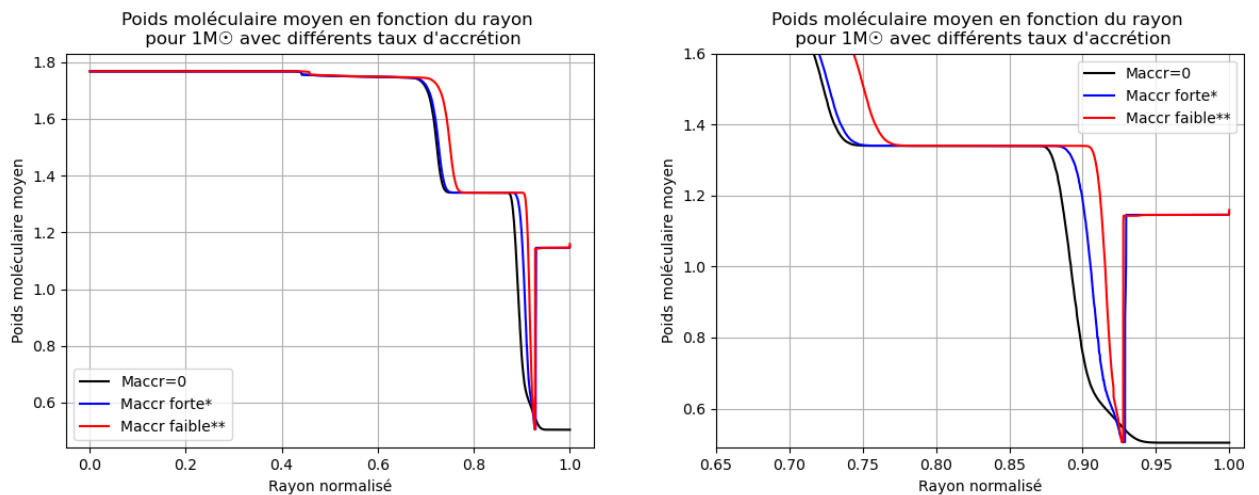


Figure 4: Poids moléculaire moyen pour différents taux d'accrétion en fonction du rayon normalisé pour une étoile d' $1 M_{\odot}$ avec zoom sur la partie de droite

*Maccr forte = Masse accrétée forte: $5.10^{-9} M_{\odot}$ par an.

**Maccr faible = Masse accrétée faible: $5.10^{-11} M_{\odot}$ par an.

La fraction massique de l'hydrogène est de 0.1 et celle de l'hélium 0.9

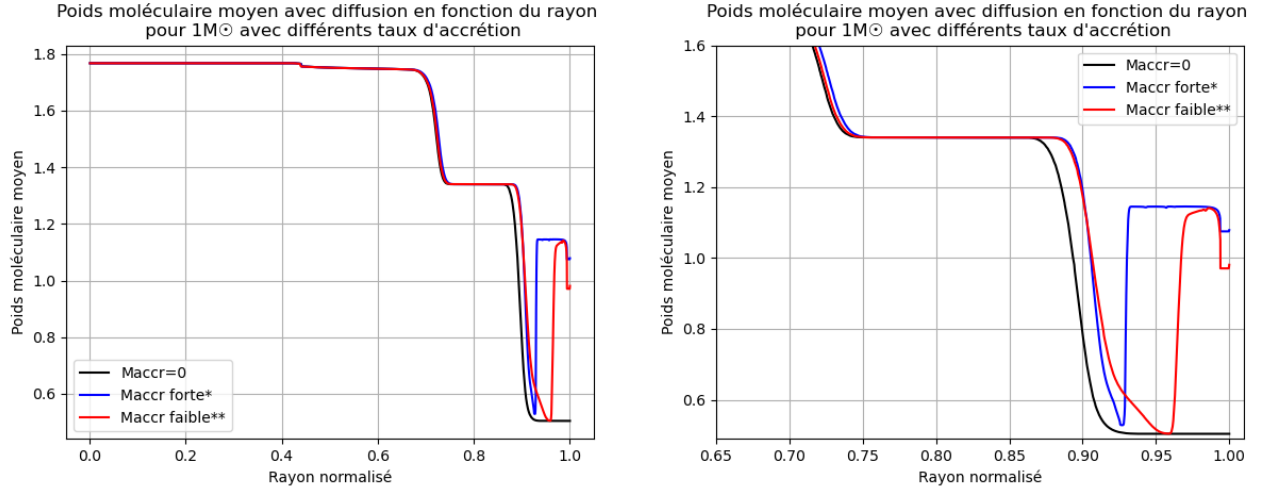


Figure 5: Poids moléculaire moyen pour différents taux d'accrétion avec diffusion en fonction du rayon normalisé pour une étoile d' $1 M_{\odot}$ avec zoom sur la partie de droite

*Maccr forte = Masse accrétée forte: $5 \cdot 10^{-9} M_{\odot}$ par an.

**Maccr faible = Masse accrétée faible: $5 \cdot 10^{-11} M_{\odot}$ par an.

La fraction massique de l'hydrogène est de 0.1 et celle de l'hélium 0.9

La présence d'un poids moléculaire moyen en surface met en évidence le phénomène d'accrétion de la naine blanche sur les deux figures. On remarque sur la figure 4 que plus l'accrétion est faible plus on s'éloigne de la courbe sans accrétion ce qui peut paraître paradoxal. Après l'accrétion en surface nous voyons une diminution suivie d'une augmentation du poids moléculaire moyen, témoignant de la présence d'une couche d'hélium vers 0.87 Rayon pour le cas sans accrétion et sans diffusion mais cette couche arrive à un rayon plus élevé pour le cas avec accretion et le cas avec accrétion et diffusion. Cette augmentation du rayon de la couche d'hélium peut s'expliquer par une accrétion d'hélium qui va venir augmenter cette couche. Nous pouvons remarquer que le gradient de poids moléculaire moyen est atténuée sur la figure prenant en compte le phénomène de diffusion (Figure 5). On constate également que lorsqu'il y a de l'accrétion dans les modèles, le gradient de μ instable est présent, ce qui suggère que la convection thermohaline est susceptible de se produire dans ces conditions.

4 Conclusion

Au cours de ce projet de recherche, nous avons appris à lire et analyser des articles, à utiliser le code d'évolution stellaire MESA pour suivre l'évolution des étoiles depuis la pré-séquence principale jusqu'au stade naine blanche. Nous avons tracé des courbes, en particulier les traces évolutives des étoiles dans le diagramme HR, en utilisant Python. Nous avons calculé des modèles de naines blanches et étudié leur composition chimique interne. Nous avons commencé à tester les changements internes induits par de l'accrétion de matière lourde.

La prochaine étape aurait été de changer la composition de la matière accrétée pour se rapprocher d'un modèle plus proche de la réalité en mettant par exemple des éléments présents sur Terre. Cependant, après de nombreuses tentatives, l'ajout d'éléments lourds n'a pas fonctionné. Afin de pouvoir quand même modéliser un phénomène d'accrétion, nous avons choisi de modéliser une accretion d'un mélange riche en hélium et pauvre en hydrogène par la naine blanche, tout en rajoutant une option de diffusion sur le programme MESA.

Nous avons ainsi pu tracer les variations du gradient de poids moléculaire moyen, très important pour calculer par la suite les effets de la convection thermohaline. En effet, les abondances atmosphériques des naines blanches dépendent à la fois du taux d'accrétion, de la diffusion atomique et de la convection thermohaline due aux inversions de poids moléculaire moyen. Notre travail est une étape dans le cadre général de l'étude de la fin des systèmes planétaires.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Sylvie Vauclair et Morgan Deal pour leur précieuse contribution à la réalisation de ce rapport. Leurs conseils avisés, leur bienveillance et leur soutien constant ont grandement facilité la réalisation de ce projet.

Bibliographie

- Harrison, J. H. D. et al. 2021, MNRAS 504, 2853-2867
- Wachlin, F. C. et al. 2022, A&A 660,A30
- Xu S. et al.2017, ApJ, 836, L7
- Cunningham T. et al. 2022, Nature 602-2019, 1-2,28
- Jura, M. & Young, E. D. 2014, Annu.Rev.Earth Planet. Sci., 42, 45
- Bonsor A.& Madhusudhan N. 2018, MNRAS, 479,3814