

Formation des pièges à poussières auto-induits autours de planètes et de lignes de gel dans les disques protoplanétaires

Alexia Hocine

M1 Physique à l'UCBL1

Tuteur du Stage :

Arnaud Vericel (CRAL)

Avril-Juin 2019

Résumé

À la genèse d'un système stellaire peut se former rapidement une planète qui influencera l'évolution plus lente de la poussière et du gaz dans le disque protoplanétaire. Le travail que je vais vous présenter ici cherche à déterminer les conséquences d'un tel scénario sur la formation de concentrations radiales de poussières sous forme d'anneaux fins. L'objectif est d'investiguer les effets et la possibilité que ce genre de mécanismes puisse expliquer certaines observations astronomiques récentes. Pour cela nous allons utiliser des outils numériques, comme le programme **LYONSPH** afin de modéliser l'évolution du gaz et de la poussière dans un disque protoplanétaire, puis le programme **splash** pour traiter ces données.

1 Introduction

J'ai effectué ce travail au CRAL, le Centre de Recherche d'Astrophysique de Lyon, qui est une unité mixte de Recherche (UCBL1, ENS, CNRS). Ses activités se divisent en 3 secteurs : la Mécanique, qui développe des instruments pour les grands télescopes ; l'équipe GALPAC qui étudie les galaxies, et l'équipe HARISSA qui s'intéresse à la formation planétaire et l'imagerie à haute résolution.

C'est dans cette dernière équipe que je me suis intégrée et que j'ai travaillé sur l'évolution des disques protoplanétaires, sous la tutelle de Arnaud Vericel.

L'un des projets de l'équipe HARISSA est de simuler numériquement la formation des planètes en partant d'un disque protoplanétaire constitué de gaz et de poussières de 10 μm .

Dans un premier temps, passer de grains de poussières de l'ordre du micromètre au millimètre se fait assez facilement avec les forces de contact. Dans un deuxième temps et grâce à l'auto-gravité, la formation de planétésimaux à partir de rochers de quelques mètres est aussi relativement simple. Les difficultés portent sur le régime intermédiaire, entre le millimètre et le mètre typiquement (Vericel, 2017). En effet, dans ce régime de tailles, la poussière perd du moment angulaire à cause de sa friction avec le gaz et dérive rapidement vers l'étoile puis se faire accréter c'est ce qu'on appelle la barrière de dérive radiale (Weidenschilling, 1977). De plus, à cette taille, les grains ne coagulent plus mais se cassent lorsqu'ils se rencontrent, ce qui les empêche de grossir. Il s'agit de la barrière de fragmentation (Blum and Wurm, 2008).

Pour surmonter ces barrières, la poussière a besoin de se regrouper dans des maximums de pression, qui peuvent

être créés par de nombreux mécanismes, dont la présence d'une ou plusieurs planètes (Gonzalez et al., 2015). Mais en 2017, (Gonzalez et al., 2017) a démontré que l'évolution de la poussière pouvait naturellement former un maximum de pression grâce à sa rétroaction sur le gaz. (Vericel, 2017) montra également que l'évolution de ses pièges à poussières étaient altérées par les fronts de condensations, appelées lignes de gel, dans les disques. En particulier, un des effets principaux d'une ligne de gel est qu'elle emprisonne la poussière et l'empêche de migrer vers l'intérieur du système et de se faire accréter. La poussière peut donc croître jusqu'au mètre, en surmontant les barrières de fragmentation et de dérive radiale.

Cependant cette méthode demande du temps (quelques centaines de milliers d'années) et n'explique pas la formation de planètes très tôt dans l'âge du disque comme il l'a été inféré récemment.

Sans répondre à cette question, mon travail a été d'étudier le comportement de la poussière lorsque une planète s'est formée rapidement dans un disque protoplanétaire.

2 Méthode

Afin de répondre à cette question, il est compliqué de se tourner uniquement vers les observations de disques puisque ce processus a lieu sur des millions d'années et que les caractéristiques de ces autres systèmes stellaires sont approximatives et incomplètes. D'autre part, il est toujours difficile de repérer les planètes peu massives, comme la Terre, dans des systèmes à plusieurs centaines d'année lumière de distance.

C'est pourquoi, nous avons effectué des simulations numériques, ce qui nous permet de ne pas avoir à attendre et d'être libre de choisir nos paramètres.

Ainsi comme nous ne cherchons pas à étudier l'influence de l'étoile, nous l'avons considérée comme un puit de potentiel fixe et central, de masse toujours égale à celle du Soleil. D'une simulation à l'autre, nous modifions unique-

ment la masse de la planète M_p , son demi-grand-axe a , son excentricité e et la distance r_{snow} d’une ligne de gel.

De plus, nous souhaitons que l’influence de la ligne de gel soit la même dans toutes les simulations. Comme nous représentons les lignes de gel par une différence de vitesse de fragmentation V_{frag} , nous fixons $V_{\text{fragin}} = 5 \text{ m.s}^{-1}$ et $V_{\text{fragout}} = 15 \text{ m.s}^{-1}$ pour toutes les simulations, ce qui représente un blocage plutôt efficace de la poussière à la ligne de gel.

2.1 LYONSPH

Ces simulations ont été effectuées avec un programme qui utilise la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), c’est-à-dire que l’on considère le disque par des particules (de gaz ou de poussières) représentatives (Price, 2012, e.g.).

Ce code LYONSPH est un programme interne au CRAL, développé depuis 15 ans par plusieurs générations de chercheurs et doctorants au fur et à mesure des projets. Son objectif est de simuler la dynamique du gaz et de la poussière dans un disque protoplanétaire.

Chacune de ces simulations demande beaucoup de puissance de calcul, et surtout de temps, c’est pourquoi elles sont effectuées par le supercalculateur de l’IPNL. En effet, ces simulations ont nécessité en moyenne 2 à 3 semaines d’exécution, et ce stage étant assez court, mon tuteur en avait déjà effectué 13 avant mon arrivée, ce qui m’a permis de commencer le traitement rapidement après un bref apprentissage de **splash**.

Plus concrètement, ces simulations commencent de façon analogue, avec leur Soleil au centre du système de coordonnées, et une répartition de 200 000 grains de poussières et 600 000 de gaz. La planète n’est introduite que plus tard, au bout de 120.500 ans, pour des raisons de stabilité et d’optimisation numériques. Ce n’est qu’à partir de l’insertion de la planète que je commence mon étude.

2.2 Le programme splash

Les fichiers de sorties des simulations SPH sont des données brutes au format **.txt** qui correspondent à l’état du système à un pas de temps donné. Dans chaque fichier, chaque colonne correspond à une variable (positions, taille, masse volumique, type de particules) et chaque ligne correspond à une particule. Pour passer de ces fichiers bruts à des images humainement représentatives de la situation, j’ai utilisé un outil libre développé par Daniel Price de l’Université Monash en Australie et qui s’appelle **splash**.

Dans un premier temps, ce programme m’a permis de réaliser des films illustrant l’évolution du système. D’abord suivant une représentation dans le plan $(0, x, y)$. (Figure 3), puis l’évolution de la taille de la poussière en fonction de leur distance à l’étoile. Dans certains cas une vision selon Φ en fonction de la distance à l’étoile a aussi été utile. Ceci nous a permis de constater, qualitativement, certains comportements et tendances et nous a permis de déterminer qu’elles seront les prochains paramètres intéressants à faire varier dans les prochaines simulations.

2.3 profiles

Pour aller plus loin dans le traitement ces fichiers SPH, j’ai utilisé un programme **multi_profiles.F90**, qui calcule les profils radiaux pour un fichier (ou pas de temps). Ainsi je pouvais avoir accès à de nouvelles variables comme la densité de surface, la pression ou la taille, entre autres en fonction de la distance à l’étoile.

Comme ce programme ne s’applique qu’à un seul fichier à la fois, il existait un script **multi_profil** qui permettait d’automatiser à des fichiers numérotés de 242 à 900 avec un pas de 20 dans les dossiers de la poussière, poussières et du gaz. Ceci permet une utilisation plus rapide et moins contraignante du programme **multi_profiles.F90**.

Mais ce script n’était pas très optimisé ni très malléable. En effet, il fallait modifier son code pour y mettre le bon nom de l’exécutable, ou modifier les fichiers à traiter.

C’est pourquoi j’ai commencé par apporter quelques corrections afin d’éviter les redondances dans le code et d’y ajouter la saisie par l’utilisateur du nom de l’exécutable et de 3 paramètres facultatifs qui permettent de sélectionner les fichiers à traiter, tels que le pas, le numéro du premier et du dernier fichier.

Dans un second temps, j’ai complètement repensé ce script pour qu’il aille directement chercher les bons numéros de fichiers. Puis l’utilisateur applique seulement un filtrage sur les fichiers qu’il l’intéresse, ce qui permet d’éviter les erreurs en cas de fichier inexistant.

De plus, j’ai aussi développé 2 outils en C. L’un qui permet d’ajouter des colonnes aux fichiers du dossier de la poussière afin d’avoir des nouvelles variables à manipuler dans **splash**.

Le second permet de garder uniquement les colonnes qui nous intéressent. J’en ai eu besoin pour pallier à une des limites de **splash**, qui ne peut pas mettre sur un même graphique deux colonnes d’un même fichier, mais qui peut superposer la même colonne de deux fichiers différents.

D’une façon analogue à **profiles**, j’ai aussi étendue la portée à tout un dossier avec deux scripts.

2.4 analysis

Précédemment, nos résultats étaient très généralistes, maintenant on va se concentrer sur l’étude des anneaux formés avec **analysis**, qui traite les fichiers **profiles** précédents et en déduit l’orbite de l’anneau de poussière qui se forme au cours de la simulation.

Jusqu’à présent, chaque fichier correspondait à un pas de temps. Avec **analysis.F90**, ce sera chaque ligne qui correspondra à un pas de temps. Sur chaque pas de temps, on gardera les données qui nous intéressent vraiment pour étudier l’anneau de poussières.

Comme nos simulations doivent être vérifiables par les observations, on a considéré que la position de l’anneau est corrélée avec le maximum de la densité surfacique Σ_d . Ainsi le programme **analysis** recherche l’orbite et l’incertitude de ce maximum parmi toutes les lignes d’un fichier **profiles**, et répète l’opération sur tous les autres fichiers.

Plus tard, j’ai été amené à modifier ce code pour qu’il puisse trouver deux anneaux supplémentaires.

3 Résultats - Discussion

Au cours de ce stage, j'ai travaillé sur 18 simulations. À l'exception de *phinewlowfast*, seuls 4 paramètres ont variés : la masse de la planète M_P , le demi grand axe de la planète a en (AU), l'excentricité de la planète e , et la distance à l'étoile de la ligne de gel r_{snow} .

Les paramètres choisis sont récapitulés dans le tableau Figure 1.

| Name | a | r_{snow} | e | M_P |
|----------------------|-------|-------------------|------|-----------|
| alpha | 33,5 | 100 | 0,50 | 10 M_J |
| alphanew | 50 | 100 | 0,00 | 10 M_J |
| beta | 60 | 50 | 0,26 | 10 M_E |
| betanew | 75 | 50 | 0,00 | 10 M_E |
| gamma | 33,5 | 0 | 0,50 | 5 M_J |
| gammanew | 50 | 0 | 0,00 | 5 M_J |
| lambdanew | 100 | 50 | 0,00 | 1 M_J |
| lambdanewlow | 100 | 50 | 0,00 | 1 M_E |
| mu | 33,5 | 50 | 0,50 | 1 M_E |
| nu | 28,25 | 0 | 0,47 | 10 M_J |
| nunew | 40 | 0 | 0,00 | 10 M_J |
| omega | 81 | 40 | 0,16 | 0.1 M_J |
| phi | 67 | 90 | 0,17 | 10 M_J |
| <i>nulow</i> | 28,25 | 0 | 0,47 | 1 M_J |
| <i>omeganew</i> | 80 | 40 | 0,00 | 0.1 M_J |
| <i>phinewlow</i> | 67 | 90 | 0,17 | 5 M_E |
| <i>phinewlowfast</i> | 67 | 90* | 0,17 | 5 M_E |
| <i>thetanew</i> | 90 | 0 | 0,00 | 1 M_E |

FIGURE 1 – Tableau récapitulatif des simulations étudiées au cours du stage en fonction de leurs paramètres : la masse de la planète M_P , le demi-grand axe a en (AU), l'excentricité e et la distance de la ligne de gel r_{snow} en (AU). Dans la seconde partie du tableau, elles ont été réalisées au cours du stage et leurs paramètres ont été choisis en fonction des premiers résultats obtenus.

Pour commencer, j'ai effectué des vidéos dans le plan normale à la trajectoire de la planète. Ces vidéos m'ont permis de constater que la poussière s'organise et finie toujours par se concentrer en un anneau [Figures 2, 3].

3.1 Influence de la masse de la planète

La deuxième chose est que la masse de la planète a une influence sur la position de l'anneau.

Sur les 13 simulations initiales, 9 ont une masse supérieure à 1 M_J et toutes, quelque soit leur distance à l'étoile, leur excentricité ou la position de leur ligne de gel, forment un anneau à l'extérieur de l'orbite de la planète.

On peut l'observer sur les images de la Figure 2 qui représente l'évolution du système de *lambdanew*. Au début de la simulation, le disque de poussière est peu dense et très étendu, mais progressivement il se concentre sur une orbite extérieure à celle de la planète.

En effet, une planète massive empêche la migration de la poussière vers l'intérieur du disque car elle modifie localement la structure du gaz et y crée un maximum de pression. Toutes les poussières qui pourraient migrer sont capturées par ce maximum de pression.

Sur les 4 autres simulations, l'anneau a cette fois une orbite intérieure à celle du demi-grand axe de la planète. À

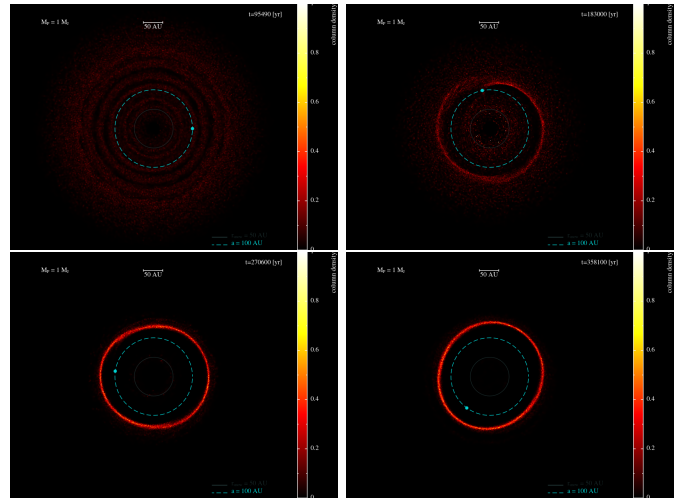


FIGURE 2 – Vision suivant le plan (0xy) du système planétaire de la simulation *lambdanew* [Figure 1] à $t = 95490$, 183000, 270600 et 358100 ans. En turquoise la planète et sa trajectoire. La barre de couleur représente la densité de colonne de matière.

chaque fois, la ligne de gel arrête la migration de la poussière, comme avec l'exemple de *lambdanewlow* [Figure 3] car nous avons choisi une différence forte de vitesse de fragmentation.

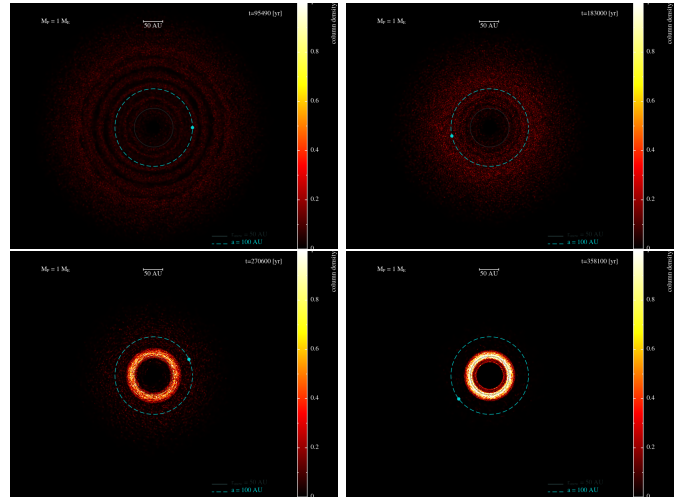


FIGURE 3 – Vision suivant le plan (0xy) du système planétaire de la simulation *lambdanewlow* [Figure 1] à $t = 95490$, 183000, 270600 et 358100 ans. En turquoise la planète et sa trajectoire. La barre de couleur représente la densité de colonne de matière.

Maintenant, si on compare les simulations *lambdanew* (Figure 2) et *lambdanewlow* (Figure 3), elles sont toutes les 2 circulaires, avec un ligne de gel à 50 (AU) et un demi-grand axe de 100 (AU). Le seul paramètre qui les différencie est leur masse (1 M_E pour *lambdanewlow* contre 1 M_J pour *lambdanew*). On remarque bien que l'état initial est semblable, on constate bien que la poussière reste à l'extérieur pour *lambdanew* alors qu'elle finit à l'intérieur pour *lambdanewlow*. La masse de la planète semble alors déterminer la position de l'anneau.

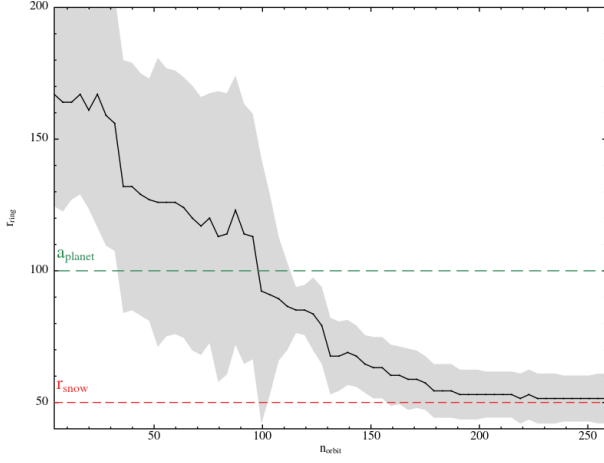


FIGURE 4 – Évolution temporelle de l'orbite du maximum de la densité surfacique de la poussière Σ_d de `lambdanewlow`

3.2 Anneaux multiples

Jusqu'à présent, on a constaté qu'un anneau peut se former à l'intérieur ou à l'extérieur de l'orbite de la planète. Or grâce aux observations, on sait qu'il existe des disques protoplanétaires avec plusieurs anneaux.

Donc en partant de nos premiers résultats, on a cherché à obtenir aussi plusieurs anneaux. Ainsi en rentrant la simulation `phi` circulaire, et en diminuant sa masse de $10 M_J$ à $5 M_E$, on a conservé un anneau à l'extérieur, mais nous avons obtenu un anneau très diffus à l'intérieur [Figure 5].

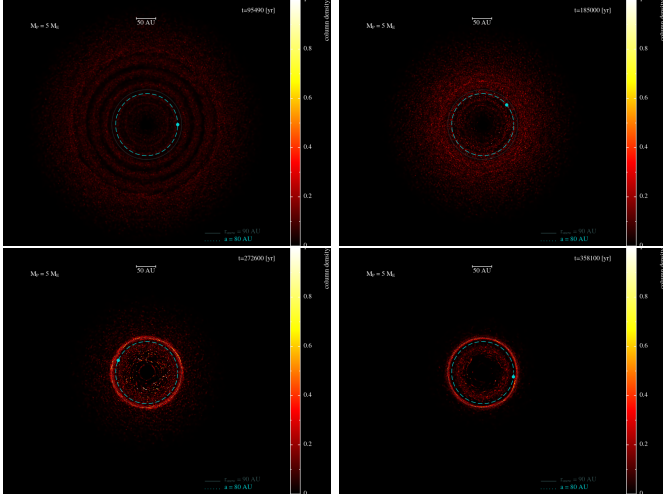


FIGURE 5 – Vision suivant le plan (0xy) du système planétaire de la simulation `phinewlow` [Figure 1] à $t = 95490$, 183000 , 270600 et 358100 ans. En turquoise la planète et sa trajectoire. La barre de couleur représente la densité de colonne de matière.

Alors nous avons diminué l'intensité de la ligne de gel pour baisser sa capacité à piéger la poussière, et on a obtenu de meilleurs résultats, avec 3 à 4 anneaux (Figure 6). On constate une certaine similitude avec certaines récentes images prises par ALMA et ce type de scénario (Pérez et al., 2019, e.g.), ce qui est prometteur.

Avec le profil de la densité de poussière (Figure 7) on constate clairement trois maximums, plus un moins marqués. Ces quatre pics correspondent bien aux anneaux vus

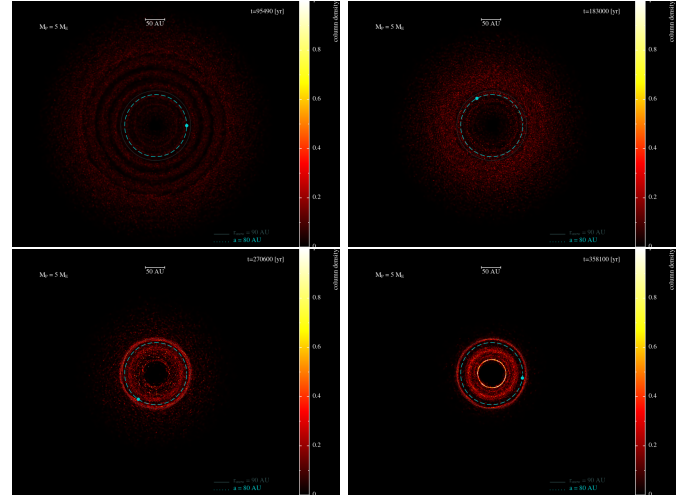


FIGURE 6 – Vision suivant le plan (0xy) du système planétaire de la simulation `phinewlowfast` [Figure 1] à $t = 95490$, 183000 , 270600 et 358100 ans. En turquoise la planète et sa trajectoire. La barre de couleur représente la densité de colonne de matière.

aux images précédentes (Figure 6). S'il s'avère que le mécanisme est bien semblable aux observations, cela signifierait qu'on pourrait en déduire, à partir de la répartition de plusieurs anneaux, la présence d'une planète.

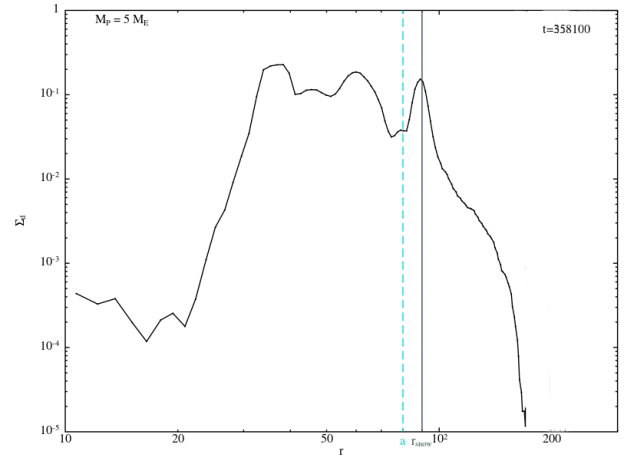


FIGURE 7 – Profil de la densité surfacique de la poussière au bout de 358.100 ans de `phinewlowfast` [Figure 1]. En turquoise l'orbite de la planète et en gris la ligne de gel.

3.3 Position de l'anneau de poussière en fonction de la masse de la planète

À cause du nombre de variables de ces simulations (Tableau 1), il est difficile de s'affranchir des dégénérescences. Il est donc nécessaire de répartir ces simulations parmi plusieurs catégories : les planètes excentriques et les circulaires, puis entre les simulations qui ont une ligne de gel extérieure à celle de la planète et les autres (Figure 8).

De plus, les planètes avec des orbites excentriques étant moins courantes, je me suis principalement concentrée sur les simulations aux orbites circulaires.

Ensuite, grâce à une étude des positions de leurs anneaux faites avec `analysis`, j'ai trouvé un lien entre la

| | $e = 0$ | $e \neq 0$ |
|-----------------------|---|---------------------------------------|
| $a > r_{\text{snow}}$ | betanew gammanew lambdanew lambdanewlow nunew omeganew thetanew | beta gamma nu nulow omega |
| $a < r_{\text{snow}}$ | alphanew phinewlow phinewlowfast | alpha mu phi |

FIGURE 8 – Les simulations divisées selon leur excentricité et la position de la ligne de gel par rapport au demi-grand axe.

masse de la planète et le rapport entre la position de l’anneau et le demi- grand axe de la planète respective.

Il semblerait que plus une planète est massive plus $\frac{r_{\text{ring}}}{a}$ est grand. Ceci indique donc que, pour les planètes peu massives (inférieur à "0.2 M_J "), $\frac{r_{\text{ring}}}{a} < 1$ donc r_{ring} est inférieur au demi-grand axe a , et inversement. Bien sûr, il faudrait effectuer d’avantage de simulation pour savoir si cette tendance se confirme et affiner les résultats. De manière plus globale, la tendance est la suivante : plus la planète est massive et plus l’anneau de poussière se forme à l’extérieur de l’orbite de la planète car son influence sur le gaz est de plus en plus important.

Avec une étude plus approfondie nous pourrions en déduire, depuis la position d’anneau observé dans les disques, la présence et la masse d’une ou plusieurs exoplanète(s).

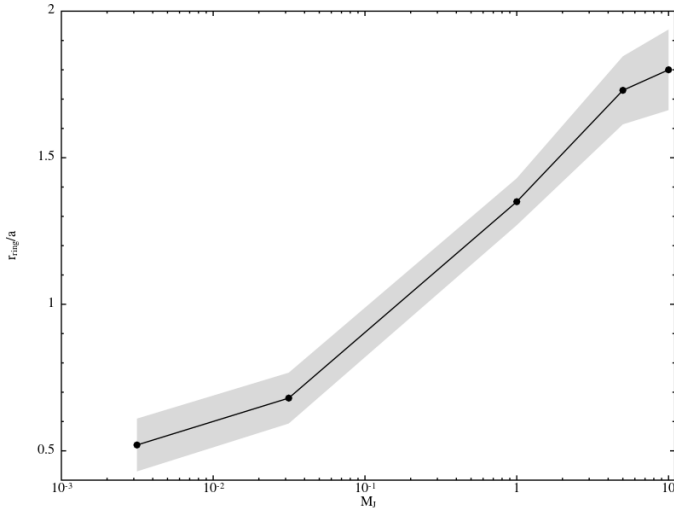


FIGURE 9 – Le rapport entre la distance de l’anneau à l’étoile r_{ring} et le demi grand axe a en fonction de la masse de la planète M_P . Avec en zone grise Δr_{ring} l’erreur sur r_{ring}

4 Conclusion

Durant ce stage j’ai été amené à utiliser, améliorer et développer de nouveaux outils numériques, afin de répondre au mieux au problème posé. J’ai pu comprendre qu’elle était l’influence d’une planète qui se forme rapidement dans un système stellaire sur les poussières du disque pro-

toplanétaire.

J’ai pu constaté l’influence de sa masse sur ce disque. Et j’ai trouvé un lien entre cette masse, son demi-grand axe et l’orbite de l’anneau de poussière (Figure 9). Ceci pourrait être un nouveau moyen de trouver et d’étudier des exoplanètes (potentiellement moins massives que celles trouvées actuellement).

N’ayant pas de talent quelconque en TP, je ne souhaite pas me tourner vers la physique expérimentale. Ce stage m’a permis de confirmer que la simulation numérique est pour moi une bonne alternative. De plus, ce stage m’a permis de me conforter dans mes vœux de poursuite en thèse.

Remerciements Tout d’abord, je souhaite remercier Arnaud Vericel, pour m’avoir permis de travailler avec lui, de m’avoir accompagner et de m’avoir délégué une partie de son travail de thèse.

Je souhaite également remercier Jean-François Gonzalez pour m’avoir aidé à trouver ce stage et pour m’avoir accueillie dans son équipe.

Merci à toutes l’équipe HARISSA, Jean-François Gonzalez, Arnaud Vericel et Kieran Hirsh plus précisément, et aux autres stagiaires de M1, Alexandre Revol et Pierre Cuinet, pour la cohésion de groupe et leurs conseils.

Merci aussi à Laurence Tresse et aux personnels du CRAL pour nous avoir si bien accueilli.

Références

- Blum, J. and Wurm, G. (2008). The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Protoplanetary Disks. , 46 :21–56.
- Gonzalez, J. F., Laibe, G., and Maddison, S. T. (2017). Self-induced dust traps : overcoming planet formation barriers. , 467(2) :1984–1996.
- Gonzalez, J. F., Laibe, G., Maddison, S. T., Pinte, C., and Ménard, F. (2015). The accumulation and trapping of grains at planet gaps : Effects of grain growth and fragmentation. , 116 :48–56.
- Pérez, S., Casassus, S., Baruteau, C., Dong, R., Hales, A., and Cieza, L. (2019). Dust Unveils the Formation of a Mini-Neptune Planet in a Protoplanetary Ring. , 158(1) :15.
- Price, D. J. (2012). Smoothed particle hydrodynamics and magnetohydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 231(3) :759–794.
- Vericel, A. (2017). Influence des lignes de gel sur la formation des pièges à poussières auto-induits(stage de m2). Master’s thesis, UCBL1.
- Weidenschilling, S. J. (1977). Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. , 180 :57–70.