

N° d'ordre : 1234

# THÈSE

Présentée par

**Christophe COSSOU**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ  
BORDEAUX 1**

Spécialité : Astrophysique, Plasmas, Corpuscules

---

## Migration et accrétion d'embryons planétaires dans un disque radiatif

---

**Soutenue le :** xx XXXXXXXX xxxx

**Après avis de :** Mmmmmmm NNNNNNN Rapporteurs  
Ooooooooo PPPPPPP . . . .

**Devant la Commission d'examen formée de :**

Aaaaa BBBBBBBB	Astronome, Université Paris VI, LESIA . . . . .	Président du Jury
Ccccccc DDDDDDDDD	Directeur de recherche, Université Bordeaux 1, LAB	Directeur de thèse
Eee FFFFF	Maître de conférence, Université Bordeaux 1, LAB .	Examinateur
Gggggggg HHHHHH	Professeur, Aix-Marseille, Université OAMP . . . . .	Examinateur
Iiii JJJJJJJJJJ	Professeur, Aix-Marseille, Université OAMP . . . . .	Examinateur
Kkkkkkkkkkk LLLLLL	Professeur, Aix-Marseille, Université OAMP . . . . .	Examinateur
Mmmmmmm NNNNNNN	Professeur, Aix-Marseille, Université OAMP . . . . .	Rapporteur
Ooooooooo PPPPPPP	Maître de conférence, Université Bordeaux 1, LAB .	Rapporteur



Thèse préparée au  
**Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux**  
Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (OASU, UMR 5804-LAB)  
2, rue de l'observatoire  
33 271 Floirac CEDEX

## Résumé

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus blandit massa non tellus. Pellentesque blandit. Etiam sapien. Quisque sed massa ac tortor accumsan bibendum. Donec et orci quis mi sollicitudin consectetur. Donec malesuada. Pellentesque bibendum pellentesque elit. Morbi et diam ac wisi auctor fringilla. Cras nec arcu sed velit dapibus blandit. Maecenas mollis aliquet quam. In eget sem nec orci fringilla sagittis. Suspendisse cursus placerat massa. Pellentesque non metus. Morbi congue tellus eget tellus. Suspendisse justo. Suspendisse potenti. Praesent interdum lorem in velit. Nullam sit amet nisl eget wisi consectetur consequat. Mauris vel felis. Nulla sed neque.

Nulla facilisi. Maecenas accumsan gravida wisi. Maecenas sodales gravida neque. Mauris in est a ante molestie gravida. In id neque. Ut augue. Duis fringilla ullamcorper risus. Nullam at lorem. Quisque consequat turpis ac libero. Ut auctor ante commodo magna. Donec in magna. Integer sodales. Donec ac nibh eu felis suscipit elementum.

Fusce convallis dolor sit amet dolor. Nulla sit amet pede. Maecenas et ante vitae risus tempus facilisis. Nullam ut tellus et lacus sollicitudin condimentum. Maecenas vitae lorem. Quisque nec leo varius est euismod posuere. Integer ac diam in enim pellentesque pulvinar. Etiam sodales tristique eros. Curabitur non magna. Suspendisse blandit metus vitae purus. Phasellus nec sem vitae arcu consequat auctor. Donec nec dui. Donec sit amet lorem vel erat tristique laoreet. Duis ac felis tincidunt arcu consequat faucibus. Vestibulum ultrices porttitor purus. In semper consequat dolor. Nunc porta. Vestibulum nisl ipsum, rhoncus quis, adipiscing sed, sollicitudin ut, quam.

**Mots-clefs** : Blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla.

---

## MY ENGLISH THESIS TITLE

### Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus blandit massa non tellus. Pellentesque blandit. Etiam sapien. Quisque sed massa ac tortor accumsan bibendum. Donec et orci quis mi sollicitudin consectetur. Donec malesuada. Pellentesque bibendum pellentesque elit. Morbi et diam ac wisi auctor fringilla. Cras nec arcu sed velit dapibus blandit. Maecenas mollis aliquet quam. In eget sem nec orci fringilla sagittis. Suspendisse cursus placerat massa. Pellentesque non metus. Morbi congue tellus eget tellus. Suspendisse justo. Suspendisse potenti. Praesent interdum lorem in velit. Nullam sit amet nisl eget wisi consectetur consequat. Mauris vel felis. Nulla sed neque.

Nulla facilisi. Maecenas accumsan gravida wisi. Maecenas sodales gravida neque. Mauris in est a ante molestie gravida. In id neque. Ut augue. Duis fringilla ullamcorper risus. Nullam at lorem. Quisque consequat turpis ac libero. Ut auctor ante commodo magna. Donec in magna. Integer sodales. Donec ac nibh eu felis suscipit elementum.

Fusce convallis dolor sit amet dolor. Nulla sit amet pede. Maecenas et ante vitae risus tempus facilisis. Nullam ut tellus et lacus sollicitudin condimentum. Maecenas vitae lorem. Quisque nec leo varius est euismod posuere. Integer ac diam in enim pellentesque pulvinar. Etiam sodales tristique eros. Curabitur non magna. Suspendisse blandit metus vitae purus. Phasellus nec sem vitae arcu consequat auctor. Donec nec dui. Donec sit amet lorem vel erat tristique laoreet. Duis ac felis tincidunt arcu consequat faucibus. Vestibulum ultrices porttitor purus. In semper consequat dolor. Nunc porta. Vestibulum nisl ipsum, rhoncus quis, adipiscing sed, sollicitudin ut, quam.

**Keywords** : Blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla, blabla.



# Remerciements

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus blandit massa non tellus. Pellentesque blandit. Etiam sapien. Quisque sed massa ac tortor accumsan bibendum. Donec et orci quis mi sollicitudin consectetur. Donec malesuada. Pellentesque bibendum pellentesque elit. Morbi et diam ac wisi auctor fringilla. Cras nec arcu sed velit dapibus blandit. Maecenas mollis aliquet quam. In eget sem nec orci fringilla sagittis. Suspendisse cursus placerat massa. Pellentesque non metus. Morbi congue tellus eget tellus. Suspendisse justo. Suspendisse potenti. Praesent interdum lorem in velit. Nullam sit amet nisl eget wisi consectetur consequat. Mauris vel felis. Nulla sed neque.

Nulla facilisi. Maecenas accumsan gravida wisi. Maecenas sodales gravida neque. Mauris in est a ante molestie gravida. In id neque. Ut augue. Duis fringilla ullamcorper risus. Nullam at lorem. Quisque consequat turpis ac libero. Ut auctor ante commodo magna. Donec in magna. Integer sodales. Donec ac nibh eu felis suscipit elementum.

Fusce convallis dolor sit amet dolor. Nulla sit amet pede. Maecenas et ante vitae risus tempus facilisis. Nullam ut tellus et lacus sollicitudin condimentum. Maecenas vitae lorem. Quisque nec leo varius est euismod posuere. Integer ac diam in enim pellentesque pulvinar. Etiam sodales tristique eros. Curabitur non magna. Suspendisse blandit metus vitae purus. Phasellus nec sem vitae arcu consequat auctor. Donec nec dui. Donec sit amet lorem vel erat tristique laoreet. Duis ac felis tincidunt arcu consequat faucibus. Vestibulum ultrices porttitor purus. In semper consequat dolor. Nunc porta. Vestibulum nisl ipsum, rhoncus quis, adipiscing sed, sollicitudin ut, quam.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>10</b>
<b>1 Physique des disques</b>	<b>11</b>
1.1 Les disques protoplanétaire . . . . .	12
1.1.1 Formation et évolution . . . . .	12
1.1.2 La viscosité du disque . . . . .	12
1.1.3 Ionisation et dead-zones . . . . .	12
1.1.4 Profil de densité . . . . .	13
1.1.5 Profil de température . . . . .	13
1.1.6 Les bords du disque . . . . .	13
1.2 Interaction disque-planète . . . . .	13
1.2.1 Migration planétaire . . . . .	13
1.2.2 L'amortissement de l'excentricité . . . . .	15
1.2.3 L'amortissement de l'inclinaison . . . . .	15
1.2.4 L'accrétion du gaz . . . . .	15
1.2.5 Récapitulatif des interactions dans le code N-corps . . . . .	15
<b>2 Le Code N-Corps</b>	<b>16</b>
2.1 Présentation de mercury . . . . .	17
2.2 Disque 1D . . . . .	18
2.2.1 Profil de densité de surface . . . . .	18
2.2.2 Table d'opacité . . . . .	18
2.2.3 Profil de température . . . . .	18
2.3 Migration type I . . . . .	18

2.4	Amortissement de $e$ et $I$ . . . . .	18
2.5	Effet de l'excentricité sur le couple de corotation . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Mécanismes individuels</b>	<b>19</b>
3.1	Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR) . . . . .	20
3.1.1	Définition . . . . .	20
3.1.2	Résonances et excentricité . . . . .	21
3.1.3	Stabilité et ordre des résonances . . . . .	21
3.2	Les Zones de Convergence . . . . .	21
3.2.1	Existence et intérêt . . . . .	21
3.2.2	Les différents types . . . . .	21
3.2.3	Diagrammes de couple $a$ - $m$ . . . . .	21
3.2.4	Résonances et Accrétions . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Mécanismes de formation</b>	<b>22</b>
4.1	Décalage de la Zone de Convergence . . . . .	23
4.2	Formation des super terre chaude . . . . .	23
4.3	Effets des paramètres du disque . . . . .	23
4.3.1	Viscosité du disque . . . . .	23
4.3.2	Profil de densité de surface . . . . .	23
4.3.3	Profil de température . . . . .	23
4.3.4	Masse du disque . . . . .	23
4.3.5	Table d'opacité . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Discussion et limite du modèle</b>	<b>24</b>
5.1	Étude de sensibilité . . . . .	25
5.1.1	Le choix de la table d'opacité et son implémentation . . . . .	25
5.1.2	Modélisation de la viscosité . . . . .	25
5.2	Approximations . . . . .	25
5.2.1	Profil de densité du gaz en 2D . . . . .	25
5.2.2	La modélisation des bords du disque . . . . .	25
5.2.3	Pas d'effet indirect des ondes de densité sur les autres planètes . . . . .	25
5.2.4	Auto-gravité . . . . .	25
5.3	Idées . . . . .	25



5.3.1	Snow line comme source de particules . . . . .	25
	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>27</b>

# Introduction

# Physique des disques

## Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Les disques protoplanétaire</b>	<b>12</b>
1.1.1	Formation et évolution	12
1.1.2	La viscosité du disque	12
	Les disques alpha	12
1.1.3	Ionisation et dead-zones	12
1.1.4	Profil de densité	13
1.1.5	Profil de température	13
1.1.6	Les bords du disque	13
<b>1.2</b>	<b>Interaction disque-planète</b>	<b>13</b>
1.2.1	Migration planétaire	13
	Type I	13
	Type II	14
	Type III	14
1.2.2	L'amortissement de l'excentricité	15
1.2.3	L'amortissement de l'inclinaison	15
1.2.4	L'accrétion du gaz	15
1.2.5	Récapitulatif des interactions dans le code N-corps	15

## 1.1 Les disques protoplanétaire

### 1.1.1 Formation et évolution

### 1.1.2 La viscosité du disque

Quand on parle de viscosité  $\nu$  dans un disque, ce n'est pas la viscosité moléculaire classique. On suppose généralement une viscosité due aux turbulences qui est beaucoup plus importante que la viscosité moléculaire, mais qui peut être traitée par les mêmes équations.

La première hypothèse est de considérer une viscosité constante. Faute de mieux, c'est ce qui semble être le plus évident. On peut, si on veut affiner, utiliser une théorie dite des *disque-alpha*

### Les disques alpha

On peut introduire un paramètre adimensionné  $\alpha$  [Shakura and Sunyaev, 1973]. Dans ce formalisme, plusieurs hypothèses sont faites :

- On considère que les turbulences sont sub-soniques.
- L'échelle des tourbillons des turbulences est plus petite que l'échelle de hauteur du disque

En conséquence, on peut définir la viscosité  $\nu$  associée aux turbulences comme étant

$$\nu = \alpha c_s H \quad (1.1)$$

où  $c_s$  est la vitesse du son et  $H$  l'échelle de hauteur du disque.  $\alpha$  (avec  $\alpha < 1$ ) est alors un paramètre adimensionné qui permet de définir plus ou moins l'intensité des turbulences, et donc la viscosité qui leur est associée. Une valeur typique d' $\alpha$  se situe entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$ .

Même si cette prescription simplifie un peu le problème, il semble probable qu' $\alpha$  ne soit pas constant, et dépende de la position dans le disque. On déplace alors le problème, vu que se pose la question des variations d' $\alpha$  dans le disque, notamment la dépendance radiale de ce dernier.

Le mécanisme qui a le plus de chance d'être à l'origine de la viscosité alpha est l'*Instabilité Magnéto-Rotationnelle* (MRI).

### 1.1.3 Ionisation et dead-zones

Pour qu'une instabilité magnéto rotationnelle ait lieu, c'est à dire qu'il y ait un couplage entre le champ magnétique et les mouvements du disque, il faut qu'une partie au moins du disque soit ionisé. Dans ces régions ionisé, on pourra alors avoir transport du moment angulaire via la viscosité due au champ magnétique (et turbulences engendrées).

Or, comment ioniser ? Que ce soit le rayonnement X de l'étoile centrale, des rayons cosmiques ou l'ionisation thermique, il n'est pas si évident que ça de se représenter

l'ionisation totale du disque de gaz. Il est donc probable que certaines zones du disque ne soient pas ionisées, et donc que le transport du moment angulaire s'y fasse peu ou pas du tout. Ces zones, appelées *dead-zones*, sont donc des zones sans viscosité magnétique.

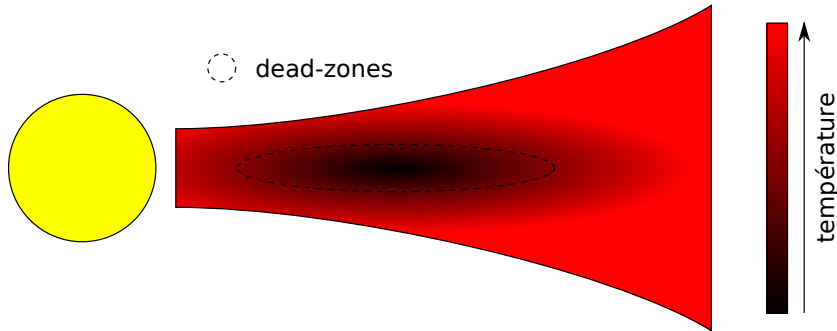


FIGURE 1.1 – Représentation d'un disque à couches (layered disk). L'ionisation d'une zone est déterminé par sa température. Ainsi, les zones internes à température plus faible ne sont pas ionisées et n'ont donc pas de viscosité dues aux turbulences magnétique (MRI). Les régions externes ne sont pas des zones mortes parce qu'elles peuvent être sujettes à des ionisations non thermiques en raison de leur densité plus faible. À distance intermédiaire, le disque est trop froid pour de l'ionisation thermique, et trop dense pour de l'ionisation non thermique.

### 1.1.4 Profil de densité

### 1.1.5 Profil de température

Du point de vue de la température, il y a principalement deux types de disques :

- les *disques actifs* : la source de température est le disque lui même, qui par frottements visqueux (on appelle ça le *chauffage visqueux*) va émettre de la chaleur, et donc chauffer le disque ;
- les *disques passifs* : la source de chaleur/température est l'étoile centrale qui éclaire le disque.

Un disque peut à la fois être actif et passif, mais généralement on essaie d'approximer, de considérer que l'un est négligeable devant l'autre. De plus, un disque aura des zones actives et des zones passives, c'est à dire que certaines zones seront principalement chauffées par la viscosité alors que d'autres le seront par l'*irradiation de l'étoile*.

### 1.1.6 Les bords du disque

## 1.2 Interaction disque-planète

### 1.2.1 Migration planétaire

#### Type I

Ce type de migration ne concerne que les planètes de faible masse (de l'ordre de  $10M_{\oplus}$ ) pour lesquelles l'interaction de marée entre la planète et le disque a une réponse

linéaire (Le profil de densité surfacique reste quasiment le même). Ces planètes, qui ne creusent pas de sillon (gap) dans le disque de gaz, vont migrer vers l'intérieur.

**Remarque :** Pour plus de détails, se référer au chapitre 9, page 188–191 de [Barnes \[2010\]](#) ou [Ward \[1997\]](#) pour l'article original.

La présence d'une planète dans un disque de gaz entraîne la création d'ondes de densités aux *résonances de Lindblad* [[Goldreich and Tremaine, 1979](#)]. Le couplage gravitationnel entre les ondes de densité et la planète qui les crée aboutit à un *couple* qui agit sur la planète.

Lors de la création d'ondes de densité par une planète dans un disque, il se forme un déséquilibre naturel entre les couples agissant sur les disques internes et externes. La position des résonances de Lindblad externes tend à être plus proche de la planète que ne l'est celle des résonances internes.

## Type II

Quand une planète dans un disque devient suffisamment massive, la réponse du disque n'est plus linéaire, et des ondes de densité induites par la planète forment des chocs non loin de là où elles sont émises. La répulsion entre le disque et la planète devient si forte qu'une cavité annulaire se forme autour de l'orbite de la planète, creusant le disque de gaz.

Une fois que la cavité est formée, la planète est dite en migration de *type II* : son orbite agit alors essentiellement comme une barrière entre les deux parties du disque de gaz, *interne* et *externe*. Du gaz peut parfois sauter le gap, ou être accrété par la planète mais cette dernière voit son mouvement régit par le disque de gaz, se retrouvant entraînée par la migration de celui-ci.

Compte tenu que la planète a une masse de l'ordre de <sup>1</sup> la masse du disque local (avec lequel elle interagit), la migration se passe sur des temps de l'ordre du *temps visqueux* du disque.

**Remarque :** Pour plus de détails, se référer au chapitre 9, page 191–192 de [Barnes \[2010\]](#) ou [Lin and Papaloizou \[1986\]](#) pour des détails sur les planètes capables de former un sillon dans le disque de gaz.

## Type III

**Remarque :** Pour plus de détails, se référer au chapitre 9, page 192–193 de [Barnes \[2010\]](#) ou [Masset and Papaloizou \[2003\]](#).

---

1. Quand la masse de la planète devient supérieure à la masse du disque local, l'inertie de celle-ci devient importante afin de déterminer son taux de migration

### 1.2.2 L'amortissement de l'excentricité

### 1.2.3 L'amortissement de l'inclinaison

### 1.2.4 L'accrétion du gaz

Dans le modèle d'*accrétion de cœur*, les planètes géantes sont d'abord des cœurs rocheux qui grossissent jusqu'à atteindre une masse critique de l'ordre de  $15M_{\oplus}$ . Une fois cette masse atteinte, le cœur commence à accréter rapidement du gaz jusqu'à former une géante gazeuse.

Ceci implique que la formation des planètes géantes doit se passer avant que le disque de gaz ne se dissipe (ce qui intervient au bout de  $10^7$  ans environ).

Les noyaux de ces planètes sont supposés se former au delà de la ligne des glaces (limite radiale virtuelle au delà de laquelle on peut trouver de l'eau sous forme solide ; autour de 4 ua). En effet, au delà de cette limite, la quantité de matière solide augmente, et donc le taux d'accrétion augmente aussi.



La formation des embryons de planètes géantes n'est toujours pas clair. On ne sait pas vraiment s'il y a une zone privilégiée ou non, la limite virtuelle de la ligne des glaces pourrait ne pas être valable, la glace ne rajoutant qu'environ 50% de masse en plus.

À noter qu'il n'y a pas de pression et donc pas de liquide dans l'espace, juste du gaz ou du solide.

Pour une simulation donnée, si on augmente le taux d'accrétion de la planète, celle-ci sera plus massive, et aura donc une inertie plus grande. Elle mettra donc plus de temps à migrer par migration Type II car son inertie s'y opposera. D'un autre côté, si la planète n'a pas encore créé de gap, la migration de Type I est plus rapide à mesure que la masse augmente.

### 1.2.5 Récapitulatif des interactions dans le code N-corps

# Chapitre 2

## Le Code N-Corps

### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Présentation de mercury</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Disque 1D</b>	<b>18</b>
2.2.1	Profil de densité de surface	18
2.2.2	Table d'opacité	18
2.2.3	Profil de température	18
<b>2.3</b>	<b>Migration type I</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Amortissement de e et I</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Effet de l'excentricité sur le couple de corotation</b>	<b>18</b>



Afin d'étudier la formation planétaire et les interactions avec le disque de gaz, j'ai utilisé un code de simulation N-corps, qui permet de regarder l'évolution d'un nombre arbitraire de corps orbitant autour d'un astre central.

Ce choix est apparu naturellement. Au début de ma thèse j'ai fait quelques simulations hydrodynamiques avec le code Genesis développé par Arnaud Pierens. J'ai rapidement constaté que ce genre de simulations, bien que modélisant de manière poussée le disque, ne permettait pas d'étudier de manière approfondie la dynamique planétaire. Le temps de calcul nécessaire pour une simulation limite en effet grandement le nombre de corps ainsi que la durée d'intégration. J'ai donc souhaité me tourner vers un code N-corps, afin de privilégier la dynamique planétaire, et de modifier ce programme afin d'y inclure les effets d'un disque de gaz sur la dynamique planétaire.

J'ai ainsi gagné en temps de calcul, et j'ai ouvert un vaste champ d'investigation sur les paramètres du disque, le nombre de corps en interaction, me permettant de faire des systèmes planétaires très divers, parfois avoir plusieurs centaines d'embryons pour plusieurs millions d'années, chose impossible dans les simulations hydrodynamiques du début de ma thèse où 20 corps pendant quelques dizaines de milliers d'années était un maximum.

Ce choix a bien entendu introduit son lot d'incertitudes et d'approximations qui sont discutés dans la partie [§ 5 page 25]. La présente section a pour but de présenter le code N-corps que j'ai utilisé ainsi que les différents effets du disque que j'ai modélisé. J'ai avant tout souhaité présenter les parties qui ont des conséquences sur la physique du disque, que ce soit en terme de choix d'un modèle particulier, ou de limitations numériques qu'il est bien de garder à l'esprit quand on interprète les résultats.

## 2.1 Présentation de mercury

Le code N-corps choisi est le code **mercury** [Chambers, 1999]. Ce code offre la possibilité de choisir un algorithme parmi 5 différents (BS, BS2, RADAU, MVS et HYBRID), ayant des propriétés diverses. Dans le cadre de ma thèse, je n'ai utilisé que l'algorithme HYBRID, qui utilise l'algorithme MVS la plupart du temps, mais change pour l'algorithme BS2 lors de rencontres proches. Il est possible de déterminer à quel moment on considère qu'une rencontre est "proche" dans le fichier de paramètre de programme, j'ai laissé le paramètre par défaut.

La raison de ce changement est assez simple. MVS est un algorithme symplectique, c'est à dire à pas de temps constant, dans lequel on définit un hamiltonien que l'on résout pour faire évoluer les orbites. La conservation de l'énergie est moins bonne que pour un algorithme à pas de temps adaptatif, mais le point très important est que cette conservation de l'énergie est bien meilleure au cours du temps. C'est à dire que là où les algorithmes tels que BS, BS2 et RADAU verront leur erreur sur l'énergie augmenter au cours du temps, les algorithmes symplectiques vont eux voir leur erreur rester plus ou moins constante au cours du temps.

Dans le cadre de mes simulations, j'ai accordé une importance limitée aux variations d'énergie, étant donné que les couples que l'on rajoute pour simuler la présence du disque de gaz font que l'énergie n'est pas conservée pour une planète donnée. Cependant, il est

important de bien résoudre les orbites et c'est ce point qui est le plus crucial ici. En effet, quelques tests ont permis de contraindre le pas de temps minimal qu'il est nécessaire d'avoir en fonction de la distance orbitale d'une planète. La contrainte de pas de temps dans mes simulations vient donc d'une distance minimale en dessous de laquelle les orbites ne sont pas correctement calculées. Cette limite, afin d'éviter tout problème, est choisie pour être en dessous du bords interne du disque de gaz que je défini.

## 2.2 Disque 1D

Afin de calculer les effets d'un disque de gaz, une modélisation de ce dernier est nécessaire. Le but étant d'avoir une grande souplesse, le disque implémenté est bien entendu très simplifié. Toutes les quantités sont intégrées et invariantes selon la hauteur  $z$  et la position azimutale  $\theta$  dans le disque, résultant en un modèle radial de toutes les quantités.

Dans la mesure du possible, les quantités du disque ont été calculées de manière consistante. Je vais présenter dans la suite de manière chronologique comment sont calculées les grandeurs physiques du disque.

### 2.2.1 Profil de densité de surface

Le profil de densité de surface est défini au début de la simulation comme une loi de puissance de la forme :

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 \times R^{-\alpha} \quad (2.1)$$

où  $\Sigma_0$  est la densité de surface à 1 AU et  $\alpha$  l'indice de la loi de puissance.

Ce profil de densité de surface est défini pour une certaine étendue radiale. On définit donc un bord interne  $R_{\text{in}}$  et un bord externe  $R_{\text{out}}$ . Le bord interne est généralement à 0,1 AU et le bord externe à 100 AU.

Afin de calculer les valeurs suivantes, ce disque est échantillonné et toutes les valeurs nécessaires sont ensuite calculées à chacun de ces points.

### 2.2.2 Table d'opacité

### 2.2.3 Profil de température

## 2.3 Migration type I

## 2.4 Amortissement de $e$ et $I$

## 2.5 Effet de l'excentricité sur le couple de corotation

# Chapitre 3

## Mécanismes individuels

### Sommaire

<b>3.1 Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR)</b>	<b>20</b>
3.1.1 Définition	20
3.1.2 Résonances et excentricité	21
3.1.3 Stabilité et ordre des résonances	21
<b>3.2 Les Zones de Convergence</b>	<b>21</b>
3.2.1 Existence et intérêt	21
3.2.2 Les différents types	21
3.2.3 Diagrammes de couple a-m	21
3.2.4 Résonances et Accrétions	21

## 3.1 Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR)

### 3.1.1 Définition

Les *résonances de moyen mouvement* sont des configurations orbitales particulières de deux planètes dans lesquelles il existe un lien entre les périodes orbitales des planètes. Exemple, si deux planètes sont en résonance 3 : 2, ça signifie que la planète interne effectuera 3 orbites pendant que la planète externe en effectuera 2.

Ces configurations particulières confèrent une stabilité accrue aux planètes. Plus la résonance est forte et plus il sera difficile pour les planètes d'en sortir.

On met généralement une résonance sous la forme  $(p + q) : p$  où  $p$  et  $q$  sont des entiers. Cette forme permet de mettre en évidence un des paramètres qui permet de rendre compte de la force de la résonance. En effet, plus  $q$  est petit et plus la résonance est forte. Ainsi, les résonances avec  $q = 1$  sont les plus fortes. On dit que  $q$  est l'ordre de la résonance (plus l'ordre est petit et plus la résonance est forte).



Mais ce n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour évaluer la force d'une résonance et je suis bien incapable de tous les décrire.

Pour une résonance  $(p + q) : p$  on définit un certain nombre d'angles  $\theta_i$  dits *angles de résonance* de la forme :

$$\theta_{i+1} = (p + q)\lambda_2 - p\lambda_1 - [i\varpi_1 + (q - i)\varpi_2] \quad (3.1)$$

avec  $i$  allant de 0 à  $q$  ; où  $\lambda$  sont les longitudes moyennes,  $\varpi$  les longitudes du péricentre et les indices 1 et 2 se réfèrent respectivement à la planète interne et externe. Pour une résonance  $(p + q) : p$  on a donc  $q + 1$  angles de résonance.

Les angles de résonances mesurent l'angle entre les deux planètes au point de conjonction. Si un seul de ces angles est en libration (oscillation autour d'une valeur moyenne) au lieu de circuler librement de 0 à  $2\pi$  alors on dit que les planètes sont en résonances. Le nombre d'angles en libration permettra aussi d'avoir une idée de la force de la résonance.

**Exemple :** Soit une résonance 7 : 2, les angles de résonances sont :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - 5\varpi_1 \\ \theta_2 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - (4\varpi_1 + 1\varpi_2) \\ \theta_3 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - (3\varpi_1 + 2\varpi_2) \\ \theta_4 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - (2\varpi_1 + 3\varpi_2) \\ \theta_5 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - (1\varpi_1 + 4\varpi_2) \\ \theta_6 &= 7\lambda_2 - 2\lambda_1 - 5\varpi_2 \end{aligned}$$

**Remarque :** Les *lacunes de Kirkwood* font elles aussi intervenir des résonances mais contrairement à ce qu'on pourrait penser, ces résonances avec Jupiter sont des

zones déplétées en astéroïdes. La raison profonde n'est pas parfaitement connue mais il semblerait que ce soit dû au chaos. Je ne saurais pas expliquer exactement ce que ça veut dire par contre.

La résonance impose une valeur de  $a$ , mais des échanges sont possibles entre les deux corps en résonance (je ne sais pas bien de quelles valeurs par contre), et il est possible que par ce biais l'excentricité puisse augmenter, et ainsi dépleter la lacune de Kirkwood en favorisant les collisions entre les objets en résonance et les autres qui sont dans la ceinture.

### 3.1.2 Résonances et excentricité

### 3.1.3 Stabilité et ordre des résonances

## 3.2 Les Zones de Convergence

### 3.2.1 Existence et intérêt

### 3.2.2 Les différents types

### 3.2.3 Diagrammes de couple $a-m$

### 3.2.4 Résonances et Accrétions

# Chapitre 4

## Mécanismes de formation

### Sommaire

<b>4.1</b>	<b>Décalage de la Zone de Convergence . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Formation des super terre chaude . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>4.3</b>	<b>Effets des paramètres du disque . . . . .</b>	<b>23</b>
4.3.1	Viscosité du disque . . . . .	23
4.3.2	Profil de densité de surface . . . . .	23
4.3.3	Profil de température . . . . .	23
4.3.4	Masse du disque . . . . .	23
4.3.5	Table d'opacité . . . . .	23

## 4.1 Décalage de la Zone de Convergence

## 4.2 Formation des super terre chaude

## 4.3 Effets des paramètres du disque

### 4.3.1 Viscosité du disque

### 4.3.2 Profil de densité de surface

### 4.3.3 Profil de température

### 4.3.4 Masse du disque

### 4.3.5 Table d'opacité

# Chapitre 5

## Discussion et limite du modèle

### Sommaire

<b>5.1 Étude de sensibilité</b>	<b>25</b>
5.1.1 Le choix de la table d'opacité et son implémentation	25
5.1.2 Modélisation de la viscosité	25
<b>5.2 Approximations</b>	<b>25</b>
5.2.1 Profil de densité du gaz en 2D	25
5.2.2 La modélisation des bords du disque	25
5.2.3 Pas d'effet indirect des ondes de densité sur les autres planètes	25
5.2.4 Auto-gravité	25
<b>5.3 Idées</b>	<b>25</b>
5.3.1 Snow line comme source de particules	25



## 5.1 Étude de sensibilité

### 5.1.1 Le choix de la table d'opacité et son implémentation

### 5.1.2 Modélisation de la viscosité

## 5.2 Approximations

### 5.2.1 Profil de densité du gaz en 2D

### 5.2.2 La modélisation des bords du disque

### 5.2.3 Pas d'effet indirect des ondes de densité sur les autres planètes

### 5.2.4 Auto-gravité

## 5.3 Idées

### 5.3.1 Snow line comme source de particules

# Conclusion

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Phasellus blandit massa non tellus. Pellentesque blandit. Etiam sapien. Quisque sed massa ac tortor accumsan bibendum. Donec et orci quis mi sollicitudin consectetur. Donec malesuada. Pellentesque bibendum pellentesque elit. Morbi et diam ac wisi auctor fringilla. Cras nec arcu sed velit dapibus blandit. Maecenas mollis aliquet quam. In eget sem nec orci fringilla sagittis. Suspendisse cursus placerat massa. Pellentesque non metus. Morbi congue tellus eget tellus. Suspendisse justo. Suspendisse potenti. Praesent interdum lorem in velit. Nullam sit amet nisl eget wisi consectetur consequat. Mauris vel felis. Nulla sed neque.

Nulla facilisi. Maecenas accumsan gravida wisi. Maecenas sodales gravida neque. Mauris in est a ante molestie gravida. In id neque. Ut augue. Duis fringilla ullamcorper risus. Nullam at lorem. Quisque consequat turpis ac libero. Ut auctor ante commodo magna. Donec in magna. Integer sodales. Donec ac nibh eu felis suscipit elementum.

Fusce convallis dolor sit amet dolor. Nulla sit amet pede. Maecenas et ante vitae risus tempus facilisis. Nullam ut tellus et lacus sollicitudin condimentum. Maecenas vitae lorem. Quisque nec leo varius est euismod posuere. Integer ac diam in enim pellentesque pulvinar. Etiam sodales tristique eros. Curabitur non magna. Suspendisse blandit metus vitae purus. Phasellus nec sem vitae arcu consequat auctor. Donec nec dui. Donec sit amet lorem vel erat tristique laoreet. Duis ac felis tincidunt arcu consequat faucibus. Vestibulum ultrices porttitor purus. In semper consequat dolor. Nunc porta. Vestibulum nisl ipsum, rhoncus quis, adipiscing sed, sollicitudin ut, quam.

# Bibliographie

- R. Barnes. *Formation and Evolution of Exoplanets*. 2010.
- J. E. Chambers. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *MNRAS*, 304 :793–799, April 1999. doi : 10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x.
- P. Goldreich and S. Tremaine. The excitation of density waves at the Lindblad and corotation resonances by an external potential. *ApJ*, 233 :857–871, November 1979. doi : 10.1086/157448.
- D. N. C. Lin and J. Papaloizou. On the tidal interaction between protoplanets and the protoplanetary disk. III - Orbital migration of protoplanets. *ApJ*, 309 :846–857, October 1986. doi : 10.1086/164653.
- F. S. Masset and J. C. B. Papaloizou. Runaway Migration and the Formation of Hot Jupiters. *ApJ*, 588 :494–508, May 2003. doi : 10.1086/373892.
- N. I. Shakura and R. A. Sunyaev. Black holes in binary systems. Observational appearance. *A&A*, 24 :337–355, 1973.
- W. R. Ward. Protoplanet Migration by Nebula Tides. *Icarus*, 126 :261–281, April 1997. doi : 10.1006/icar.1996.5647.