

# 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 XXXXXXXXX xxxx devant la Commission d'examen:

M.	Aaaaa	BBBBBBBB	
M.	Cccccccc	DDDDDDDDDD	
M.	Eee	FFFFF	(Directeur de thèse)
M.	Gggggggg	HHHHHHH	
M.	liii	JJJJJJJJJJ	(Président du jury)
M.	Kkkkkkkkkkk	LLLLL	

Rapporteurs:

M.	Mmmmmmmmm	Nnnnnnnnn
M.	Oooooooooo	Pppppppp



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.

---

## 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.



# 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>9</b>
<b>1 Physique des disques</b>	<b>10</b>
1.1 Les disques protoplanétaire . . . . .	11
1.1.1 Formation et évolution . . . . .	11
1.1.2 Propriétés . . . . .	11
1.1.3 Les bords du disque . . . . .	11
1.2 Interaction disque-planète . . . . .	11
1.2.1 Migration planétaire . . . . .	11
1.2.2 L'amortissement de l'excentricité . . . . .	11
1.2.3 L'amortissement de l'inclinaison . . . . .	11
1.2.4 L'accrétion du gaz . . . . .	11
<b>2 Le Code N-Corps</b>	<b>12</b>
2.1 Présentation de mercury . . . . .	13
2.2 Disque 1D . . . . .	14
2.2.1 Profil de densité de surface . . . . .	14
2.2.2 Table d'opacité . . . . .	14
2.2.3 Profil de température . . . . .	14
2.3 Migration type I . . . . .	14
2.4 Amortissement de $e$ et $I$ . . . . .	14
2.5 Effet de l'excentricité sur le couple de corotation . . . . .	14
<b>3 Mécanismes individuels</b>	<b>15</b>

3.1	Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR) . . . . .	16
3.1.1	Résonances et excentricité . . . . .	16
3.1.2	Stabilité et ordre des résonances . . . . .	16
3.2	Les Zones de Convergence . . . . .	16
3.2.1	Existence et intérêt . . . . .	16
3.2.2	Les différents types . . . . .	16
3.2.3	Diagrammes de couple a-m . . . . .	16
3.2.4	Résonances et Accrétions . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Mécanismes de formation</b>	<b>17</b>
4.1	Décalage de la Zone de Convergence . . . . .	18
4.2	Formation des super terre chaude . . . . .	18
4.3	Effets des paramètres du disque . . . . .	18
4.3.1	Viscosité du disque . . . . .	18
4.3.2	Profil de densité de surface . . . . .	18
4.3.3	Profil de température . . . . .	18
4.3.4	Masse du disque . . . . .	18
4.3.5	Table d'opacité . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Discussion et limite du modèle</b>	<b>19</b>
5.1	Étude de sensibilité . . . . .	20
5.1.1	Le choix de la table d'opacité et son implémentation . . . . .	20
5.1.2	Modélisation de la viscosité . . . . .	20
5.2	Approximations . . . . .	20
5.2.1	Profil de densité du gaz en 2D . . . . .	20
5.2.2	La modélisation des bords du disque . . . . .	20
5.2.3	Pas d'effet indirect des ondes de densité sur les autres planètes . .	20
5.2.4	Auto-gravité . . . . .	20
	<b>Conclusion</b>	<b>21</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>22</b>



# Introduction

# Chapitre 1

## Physique des disques

### Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Les disques protoplanétaire . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1.1	Formation et évolution . . . . .	11
1.1.2	Propriétés . . . . .	11
1.1.3	Les bords du disque . . . . .	11
<b>1.2</b>	<b>Interaction disque-planète . . . . .</b>	<b>11</b>
1.2.1	Migration planétaire . . . . .	11
1.2.2	L'amortissement de l'excentricité . . . . .	11
1.2.3	L'amortissement de l'inclinaison . . . . .	11
1.2.4	L'accrétion du gaz . . . . .	11

## 1.1 Les disques protoplanétaire

### 1.1.1 Formation et évolution

### 1.1.2 Propriétés

Profil de densité

Profil de température

### 1.1.3 Les bords du disque

## 1.2 Interaction disque-planète

### 1.2.1 Migration planétaire

Type I

Type II

Type III

### 1.2.2 L'amortissement de l'excentricité

### 1.2.3 L'amortissement de l'inclinaison

### 1.2.4 L'accrétion du gaz

# Chapitre 2

## Le Code N-Corps

### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Présentation de mercury . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Disque 1D . . . . .</b>	<b>14</b>
2.2.1	Profil de densité de surface . . . . .	14
2.2.2	Table d'opacité . . . . .	14
2.2.3	Profil de température . . . . .	14
<b>2.3</b>	<b>Migration type I . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Amortissement de e et I . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>Effet de l'excentricité sur le couple de corotation . . . . .</b>	<b>14</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 on page 20]. 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</b>	<b>Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR)</b>	<b>16</b>
3.1.1	Résonances et excentricité	16
3.1.2	Stabilité et ordre des résonances	16
<b>3.2</b>	<b>Les Zones de Convergence</b>	<b>16</b>
3.2.1	Existence et intérêt	16
3.2.2	Les différents types	16
3.2.3	Diagrammes de couple a-m	16
3.2.4	Résonances et Accrétions	16

## 3.1 Les Résonances de Moyen Mouvement (MMR)

### 3.1.1 Résonances et excentricité

### 3.1.2 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>18</b>
<b>4.2</b>	<b>Formation des super terre chaude . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>4.3</b>	<b>Effets des paramètres du disque . . . . .</b>	<b>18</b>
4.3.1	Viscosité du disque . . . . .	18
4.3.2	Profil de densité de surface . . . . .	18
4.3.3	Profil de température . . . . .	18
4.3.4	Masse du disque . . . . .	18
4.3.5	Table d'opacité . . . . .	18

## 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</b>	<b>Étude de sensibilité</b>	<b>20</b>
5.1.1	Le choix de la table d'opacité et son implémentation	20
5.1.2	Modélisation de la viscosité	20
<b>5.2</b>	<b>Approximations</b>	<b>20</b>
5.2.1	Profil de densité du gaz en 2D	20
5.2.2	La modélisation des bords du disque	20
5.2.3	Pas d'effet indirect des ondes de densité sur les autres planètes	20
5.2.4	Auto-gravité	20

## 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

## Conclusion

# Bibliographie

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.