



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

---

---

Présentée et soutenue le 11/12/2015 par :

Hadrien Mary

**Analyse et Modélisation de la Dynamique des Chromosomes durant  
la Mitose chez la levure à fission**

---

---

### JURY

PREMIER MEMBRE

SECOND MEMBRE

TROISIÈME MEMBRE

Professeur d'Université

Astronome Adjoint

Chargé de Recherche

Président du Jury

Membre du Jury

Membre du Jury

---

**École doctorale et spécialité :**

*École Doctorale Biologie Santé Biotechnologies*

**Unité de Recherche :**

*Laboratoire de Biologie Cellulaire et Moléculaire du Contrôle de la Prolifération (UMR  
5088)*

**Directeur(s) de Thèse :**

*Sylvie Tournier et Yannick Gachet*

**Rapporteurs :**

*Premier RAPPORTEUR et Second RAPPORTEUR*



« *The dream of every cell is to become two cells.* »  
François Jacob, 1974



# Résumé

La mitose est une étape clé du cycle cellulaire, très préservée chez toutes les cellules eucaryotes, durant laquelle le matériel génétique de la cellule (les chromosomes) est séparé en deux puis réparti de manière égale dans les deux cellules filles. Cette équipartition du matériel génétique est crucial pour le maintien de la stabilité génétique. Durant ce processus la cellule forme une plaque métaphasique au centre du fuseau mitotique composé des chromatides soeurs. Chaque chromatide est alors attaché à son pôle respectif (on parle d'attachement bipolaire) vers lequel elle se dirigera durant l'anaphase.

Les chromatides sont l'unité indivisible du matériel génétique durant la mitose, à l'image des atomes dans une molécule. Initialement chacun de ces « objets » est libre (non attaché) et positionné de manière non ordonné dans le noyau. Toute la complexité de la mitose est d'attacher chacune des chromatides au bon pôle afin d'exercer des forces sur ces derniers pour les positionner sur la plaque métaphasique au centre du fuseau avant leur séparation et migration vers les pôles durant l'anaphase.

Cette étape de la division cellulaire requiert donc non seulement un complexe réseau d'interaction et de signalisation métabolique comme dans beaucoup d'autre processus biologique mais aussi un fin contrôle spatio-temporel du mouvement et du positionnement des ces objets de grande tailles à l'échelle de la cellule; les chromatides.

Il est à ce jour clairement établi qu'une grande partie de l'énergie nécessaire au mouvement des chromatides durant la mitose provient de la dépolymérisation de l'extrémité + des microtubules (MTs) qui attachent chaque chromatide par l'intermédiaire d'un grand complexe protéique appelé le kinétochore. Bien que le mécanisme de transfert d'énergie entre la dépolymérisation des MTs et le mouvement des chromatides reste encore très largement hypothétique.

La dynamique des chromosomes durant la mitose est par ailleurs largement

contrôlée par un grand nombre d'acteurs autre que les microtubules. Certains d'entre eux étant responsables de l'attachement MTs-kinétochore comme les complexes NDC80 et DAM1, tandis que d'autre sont impliqués dans la régulation de la dynamique des microtubules comme la kinésine-8 et la kinésine-13 ainsi que différentes protéines associées aux microtubules (MAPs) tel que XMAP215 ou encore EB1. De plus il existe des preuves que les chromatides peuvent être transportées le long du fuseau à l'aide de kinésine comme Cenp-E mais aussi de la dynéine.

Durant mon travail de thèse j'ai étudié la dynamique des chromosomes en mitose chez la levure à fission qui à l'avantage de conserver les mécanismes primordiaux de la mitose avec les eucaryotes supérieurs. Deux mécanismes que l'on retrouve chez de nombreuses cellules sont l'alignement des chromosomes durant la métaphase ainsi qu'un mouvement de va et vient plus ou moins régulier le long du fuseau aussi appelé oscillations des chromosomes. J'ai montré en analysant les trajectoires des chromosomes que ces deux processus semblent être indépendant chez la levure à fission (article en cours de révision). De plus le processus d'alignement des chromosomes, encore mal compris, semble être en parti contrôlé par la kinésine-8 via une activité dépendante de la longueur des microtubules. Il semblerait donc qu'une protéine, la kinésine-8, soit capable de fournir une information spatiale le long du fuseau mitotique afin de positionner correctement les chromosomes. Enfin j'ai utilisé un modèle mathématique du fuseau mitotique développé dans l'équipe afin de tester de manière quantitative les hypothèses de mécanisme du centrage des chromosomes par la kinésine-8.

L'ensemble de mon travail s'est donc intéressé au contrôle du mouvement, de l'attachement et du positionnement des chromosomes durant la mitose afin de mieux comprendre la biophysique du fuseau mitotique.

# Summary

TODO





# Remerciements

...



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Summary</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 La division cellulaire : la mitose . . . . .	2
1.2 Les différentes étapes de la mitose . . . . .	2
1.3 L'appareil mitotique : un objet sous contrainte . . . . .	2
1.4 La métaphase : point d'orgue de la division . . . . .	2
1.5 La dynamique des chromosomes durant la métaphase . . . . .	2
1.6 Modélisation mathématique du mouvement des chromosomes en mitose . . . . .	2
1.7 La levure à fission : un organisme modèle pour l'étude du cycle cel- lulaire . . . . .	2
1.8 Problématique . . . . .	2
<b>2 Méthodes</b>	<b>3</b>
2.1 Vidéo-microscopie à fluorescence . . . . .	3
2.2 Détection et suivi dans le temps des chromosomes . . . . .	3
2.3 La modélisation mathématique de la mitose . . . . .	3

<b>3 Résultats</b>	<b>5</b>
3.1 « Kinetochore oscillations are not required for the role of Kinesin-8 in chromosome congression » . . . . .	5
3.2 Modélisation bio-mécanique du fuseau mitotique . . . . .	5
3.3 Analyse du mouvement des chromosomes par la MSD via une approche bayésienne . . . . .	5
<b>4 Discussion</b>	<b>7</b>
4.1 Le mouvement de chromosomes durant la mitose . . . . .	7
4.2 Le mécanisme d'alignement des chromosomes: de l' <i>in silico</i> à l' <i>in vivo</i>	7
<b>A Annexes</b>	<b>9</b>
A.1 Annexe 1 : bla bla bla bla . . . . .	9
<b>Bibliographie</b>	<b>11</b>

## Liste des figures



# Liste des tableaux





# 1

## Introduction

Résumé.

Test -> Varga et al. (2009)

and Dumont and Mitchison (2009)

- 1.1 La division cellulaire : la mitose**
- 1.2 Les différentes étapes de la mitose**
- 1.3 L'appareil mitotique : un objet sous contrainte**
- 1.4 La métaphase : point d'orgue de la division**
- 1.5 La dynamique des chromosomes durant la métaphase**
- 1.6 Modélisation mathématique du mouvement des chromosomes en mitose**
- 1.7 La levure à fission : un organisme modèle pour l'étude du cycle cellulaire**
- 1.8 Problématique**

# 2

## Méthodes

- 2.1 Vidéo-microscopie à fluorescence**
- 2.2 Detection et suivi dans le temps des chromosomes**
- 2.3 La modélisation mathématique de la mitose**



# 3

## Résultats

### **3.1 « Kinetochore oscillations are not required for the role of Kinesin-8 in chromosome congression »**

### **3.2 Modélisation bio-mécanique du fuseau mitotique**

- parler modèle d'attachement à deux états et des avantages d'un modèle à trois états

### **3.3 Analyse du mouvement des chromosomes par la MSD via une approche bayésienne**

- bla bla bla



# 4

## Discussion

- 4.1 Le mouvement de chromosomes durant la mitose
- 4.2 Le mécanisme d'alignement des chromosomes: de  
*l'in silico* à *l'in vivo*







## Annexes

### **A.1    Annexe 1 : bla bla bla bla**



# Bibliographie

Dumont, S., and Mitchison, T.J. (2009). Force and Length in the Mitotic Spindle. *Current Biology* 19, R749–61.

Varga, V., Leduc, C., Bormuth, V., Diez, S., and Howard, J. (2009). Kinesin-8 Motors Act Cooperatively to Mediate Length-Dependent Microtubule Depolymerization. *Cell* 138, 1174–1183.