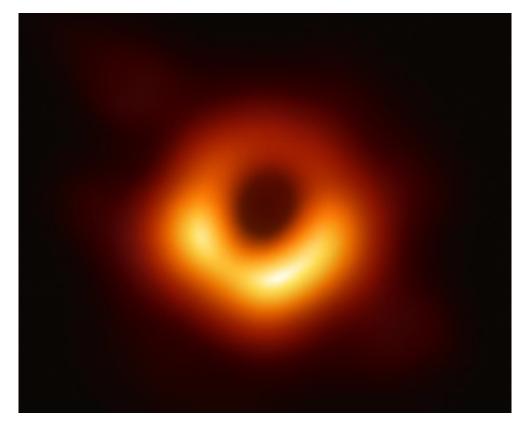
# Relaxation résonante vectorielle et séparation d'étoiles voisines dans le centre Galactique

Juan Giral Martínez

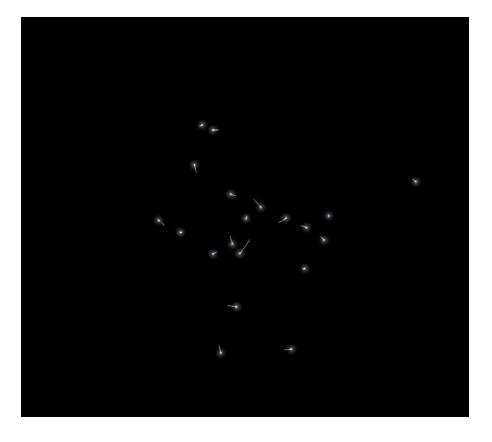
# Qu'est ce qui se trouve dans le centre de la Galaxie ?

### Un trou noir supermassif



M87 (observations)

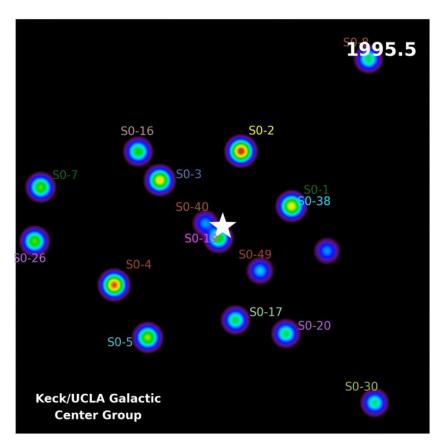
Un amas d'étoiles



Amas central (simulation)

# En quoi le centre Galactique est intéressant ?

### La région centrale est très dense



Cluster S (observations)

 $\sim 1,000,000$  d'étoiles dans le parsec central

Taux d'accrétion dépend de la densité d'étoiles

Présence de trous noirs de masse intermédiaire ?

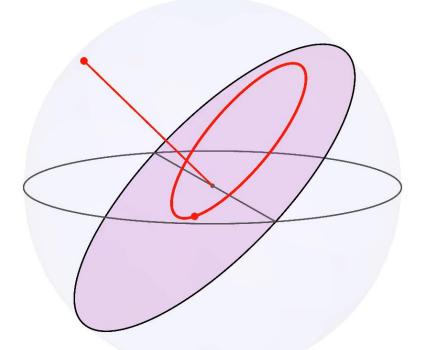
Source d'onde gravitationnelles

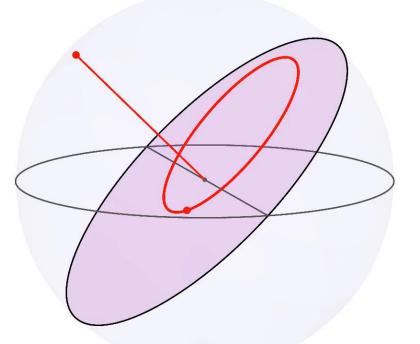
# Quel est le rôle du trou noir supermassif?

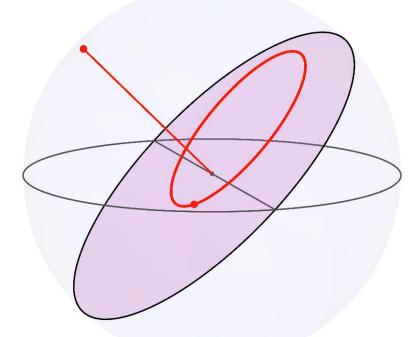
Une hiérarchie du processus agissant sur des échelles de temps bien séparées

Temps orbital  $\sim 15$  ans

Temps de précession ∼30,000 ans Temps de réorientation ∼1,000,000 ans



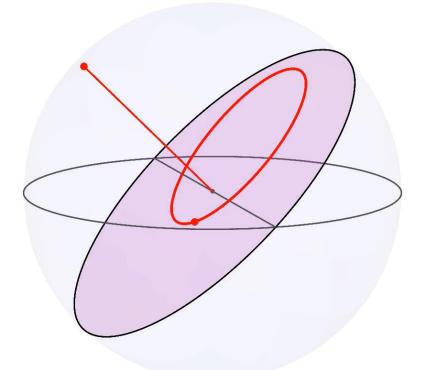




# Qu'est-ce que la relaxation vectorielle?

### Diffusion de l'orientation des plans orbitaux par des effets collectifs

# Temps de réorientation $\sim 1,000,000$ ans



$$T_{\text{orientation}} \gg T_{\text{prec}}$$

Interactions résiduelles après beaucoup d'orbites et de précessions

Quel est le hamiltonien de cette interaction?

Hamiltonien képlérien 
$$\sum_{l} \left( m_l M_{\rm BH} / r_l + m_l v_l^2 / 2 \right)$$

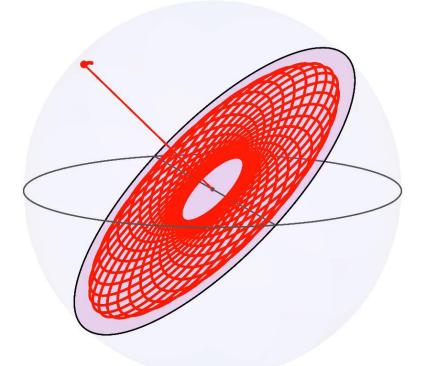
Corrections relativistes 
$$\Phi_{\text{deSitter}} + \Phi_{\text{L.1.}}$$

Auto-interaction de l'amas 
$$-\left\langle \sum_{\{i,j\}} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} \right\rangle$$

# Qu'est-ce que la relaxation vectorielle?

### Une réorientation des plans orbitaux par des effets collectifs

Temps de réorientation ∼1,000,000 ans



C'est une interaction entre des anneaux orbitaux

La relaxation vectorielle ne peut faire changer que **l'orientation orbitale** 

Conservation de demi-axe et excentricité.

Equation dynamique de la relaxation résonante

Coordonnée dynamique:  $\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{L}/L$ 

$$\frac{\mathrm{d}\hat{\mathbf{L}}_{j}}{\mathrm{d}t} = \hat{\mathbf{L}}_{j} \times \widehat{\mathbf{\Omega}}(\{\hat{\mathbf{L}}_{i\neq j}\})$$
 mouvement alimenté par toutes les particules

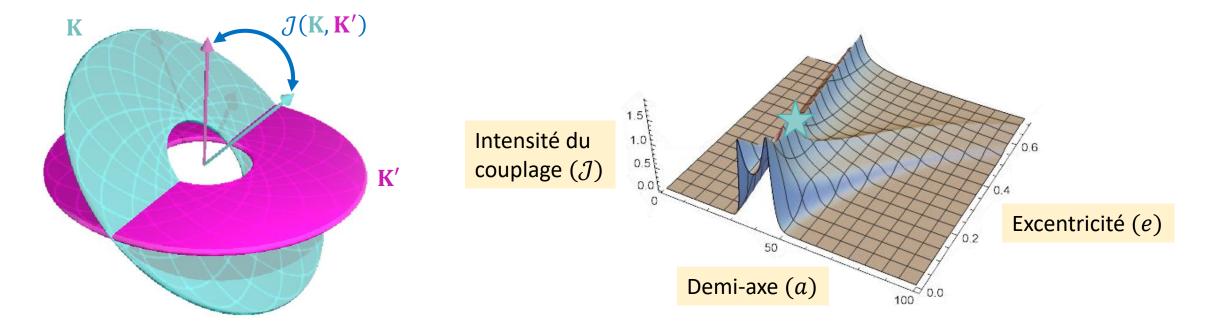
### Qu'est-ce que la relaxation vectorielle ?

### Une réorientation des plans orbitaux par des effets collectifs

Equation dynamique de la relaxation résonante

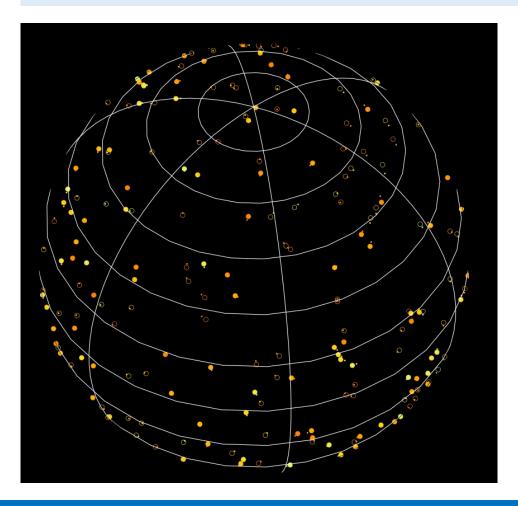
Coefficients de couplage entre deux particules  $\mathcal{J} = \mathcal{J}(\mathbf{K}, \mathbf{K}')$ 

$$\mathbf{K} = (a, e)$$



### Comment décrire la dynamique de l'amas stellaire ?

### Des processus de diffusion



### Caractéristiques de l'interaction :

Les trajectoires sont stochastiques

Les trajectoires sont lisses

Particules proches restent proches

Le système est en moyenne isotrope et stationnaire

Les effets sont collectifs

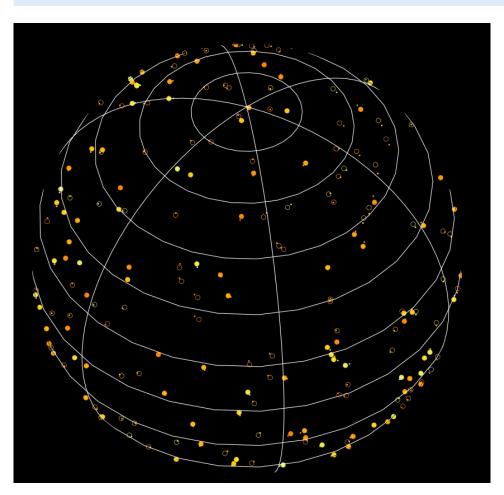
L'interaction est à longue portée

Le potentiel est continu

Le système est relaxé

### Comment décrire la dynamique de l'amas stellaire ?

### Des processus de diffusion



Nombre de particules  $N \gg 1$ 

Description dynamique exacte du système impossible

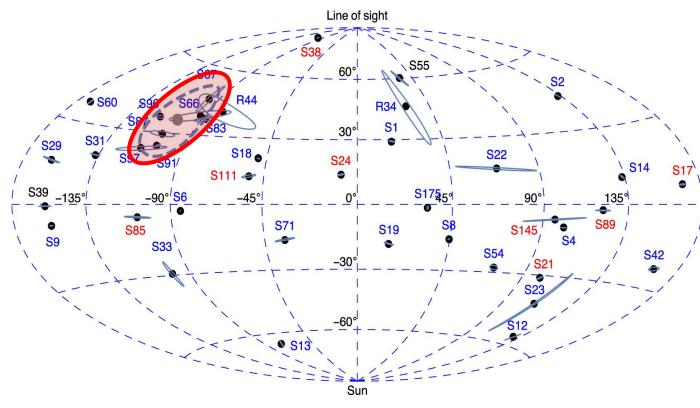
On a recours a des outils de physique statistique

#### On veut:

- Connaître les propriétés moyennes du système
- Générer des « fausses » réalisations du système à faible coût

# Pourquoi la relaxation vectorielle est-elle intéressante ?

### Contraindre les propriétés de l'amas stellaire en observant ses effets dynamiques



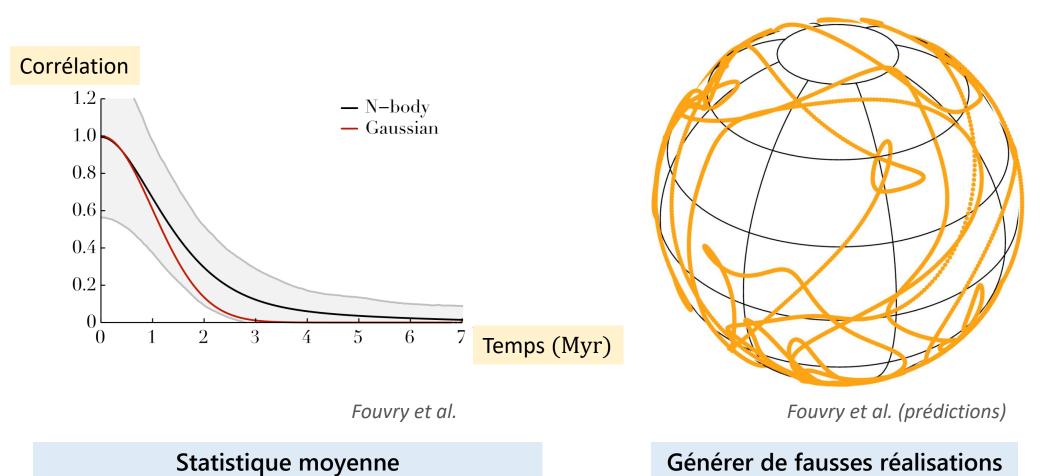
Gillessen et al. (observations)



Observatoire Keck (observations)

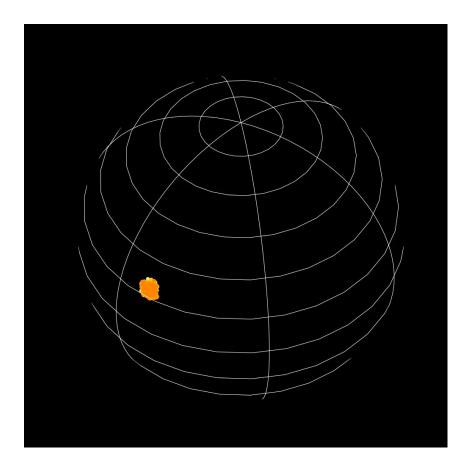
### Quel est l'état de l'art ?

Diffusion d'une particule pour un système isotrope (Fouvry, Bar-Or, Chavanis 2019)



Relaxation résonante vectorielle et séparation d'étoiles voisines dans le Centre Galactique

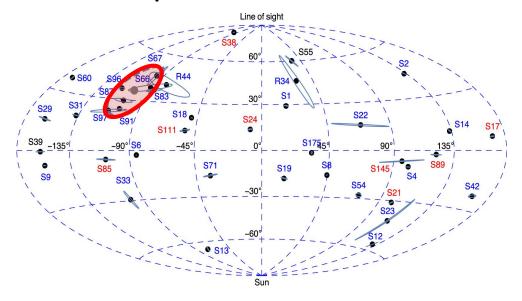
# Que peut apporter la séparation de voisins ?



Simulation

La position d'un étoile est une observable inutile dans un **ensemble isotrope**.

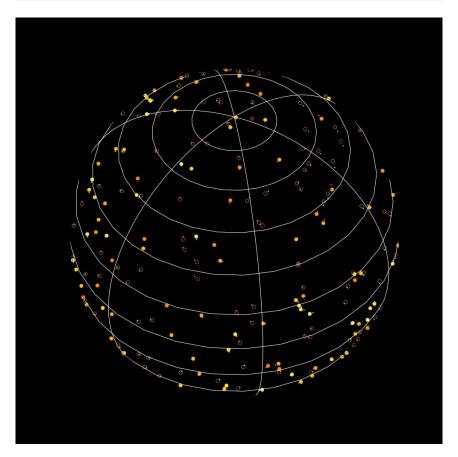
La séparation de deux étoiles est en revanche une **observable exploitable**.



Gillessen et al. (observations)

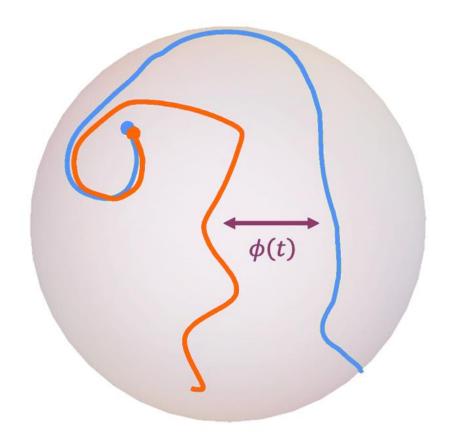
# Séparation de voisins: hypothèses de travail

### Un bain de *N* particules



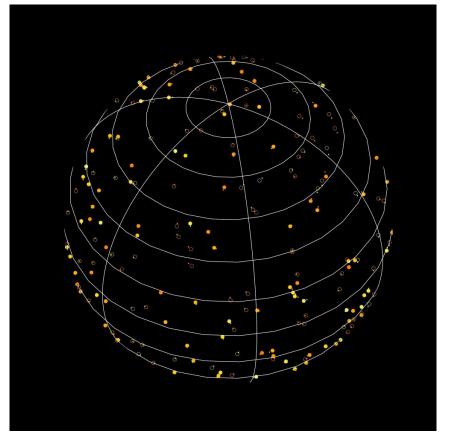
Simulation

### Deux particules sans masse (test)



# Séparation de voisins: hypothèses de travail

### Un bain de *N* particules



Simulation

### Deux particules sans masse (test)

Hamiltonien effectif

Interactions entre les deux particules test

Action du bain sur les particules test

Action des particules test sur le bain-

Auto-interaction du bain

Description statistique

1 interaction

 $\mathcal{O}(N)$  interactions

 $\mathcal{O}(N)$  interactions

 $\mathcal{O}(N^2)$  interaction

 $\langle \cos \phi \rangle = \langle \mathbf{L}_1 \cdot \mathbf{L}_2 \rangle$ 

# Séparation de voisins : résultat analytique

 $\mathbf{K} = (a, e)$  (demi axe, excentricité)

deux sources de décorrélation

$$\langle \cos \phi \rangle = \exp \left( -\sum_{\ell} B_{\ell} \int d\mathbf{K} \frac{n(\mathbf{K})}{n(\mathbf{K})} (\mathcal{J}_{\ell}(\mathbf{K}_{1}, \mathbf{K}) - \mathcal{J}_{\ell}(\mathbf{K}_{2}, \mathbf{K}))^{2} \chi \left( \frac{t}{T_{c,\ell}(\mathbf{K})} \right) \right)$$
 paramètres orbitaux différents

$$\times \exp \left( \sum_{\ell} \frac{D_1 - D_{\ell}}{3D_1} \left( E_{\ell}^L \right)^2 \int d\mathbf{K} \frac{\mathbf{n}(\mathbf{K})}{\mathbf{n}(\mathbf{K})} \frac{\mathcal{J}_{\ell}(\mathbf{K}_1, \mathbf{K}) \mathcal{J}_{\ell}(\mathbf{K}_2, \mathbf{K})}{\mathcal{J}_{\ell}(\mathbf{K}_2, \mathbf{K})} \chi \left( \frac{t}{T_{c,\ell}(\mathbf{K})} \right) \right) \right] \qquad \text{orientations initiales}$$

Les particules se séparent parce que :

Bain sous-jacent

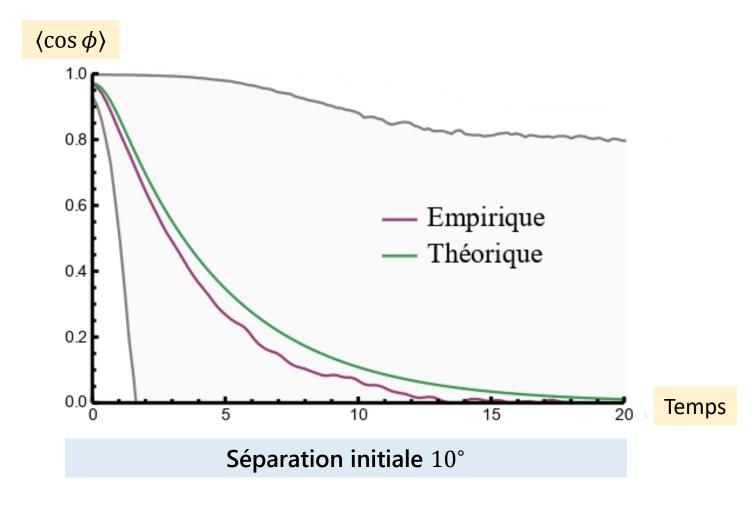
Interactions avec le bain différentes

Interaction avec le bain

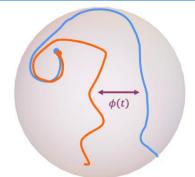
Orientations initiales différentes

Décorrélation du bain

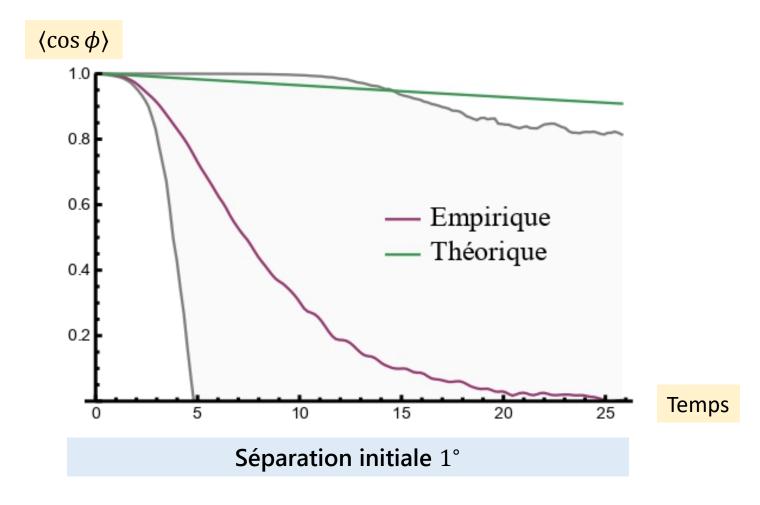
# Le modèle est-il précis ?



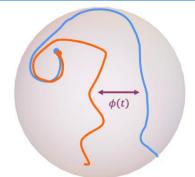


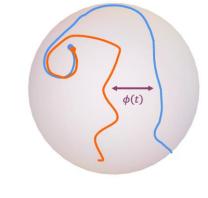


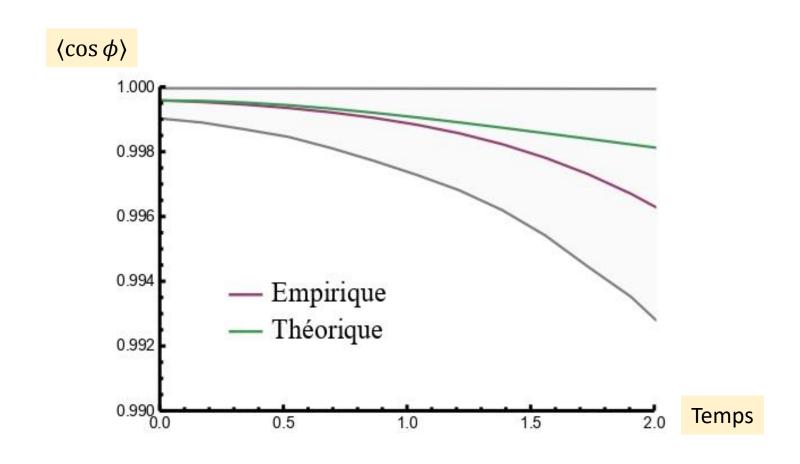
# Le modèle est-il précis ?



...mais pas pour des taches initiales trop denses



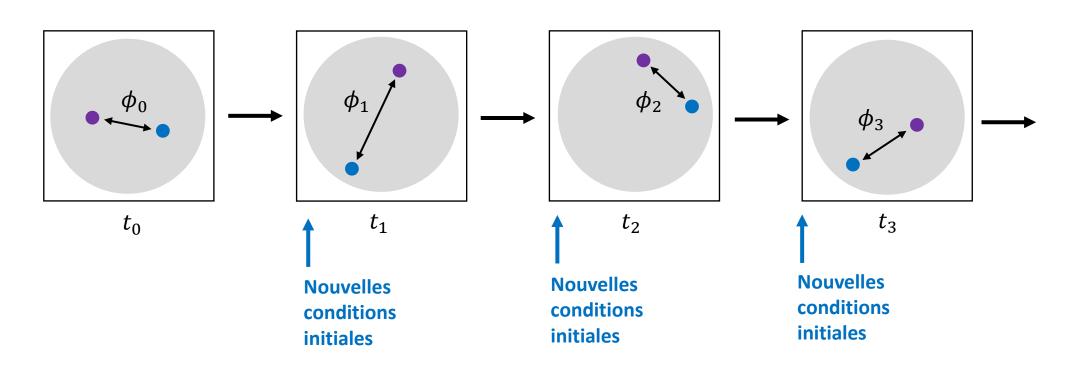




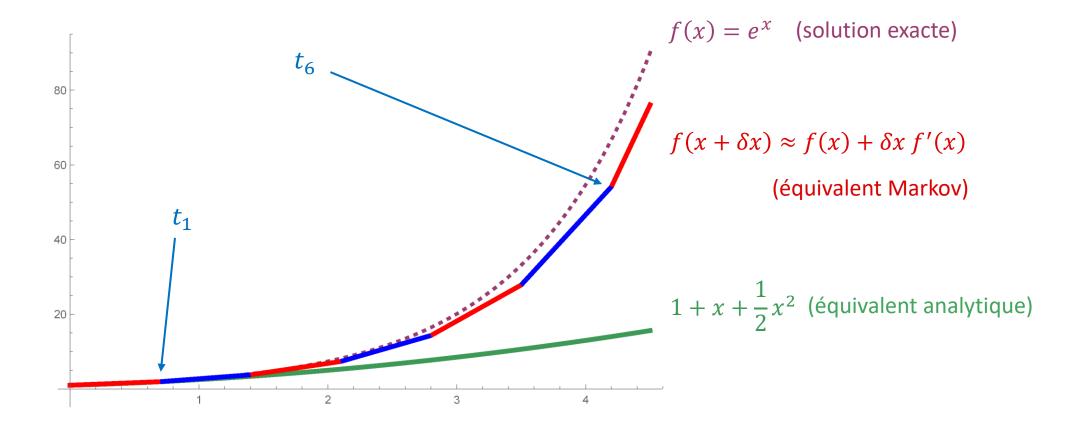
Mais dans tous les cas, ça marche pour les temps courts!

**Principe:** Enchaîner les prédictions par tronçons:

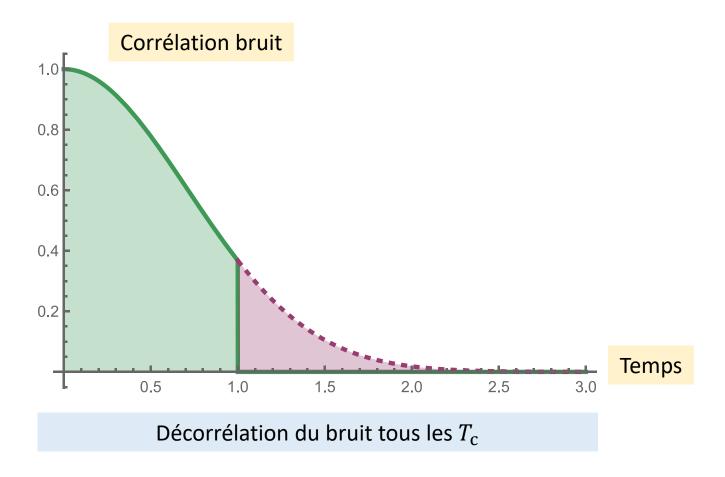
$$\phi_0 \to \phi_1 \to \phi_2 \to \cdots \to \phi_n$$

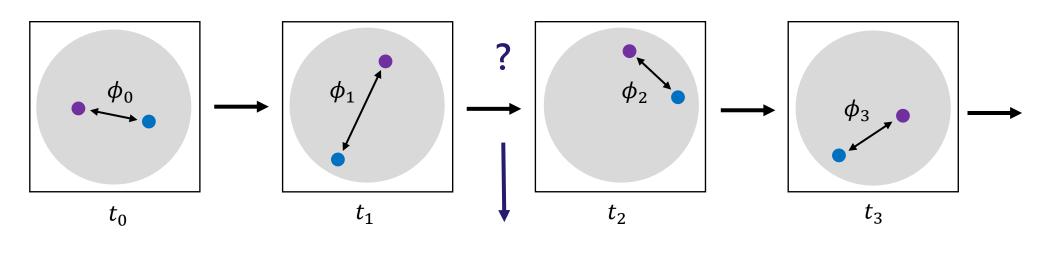


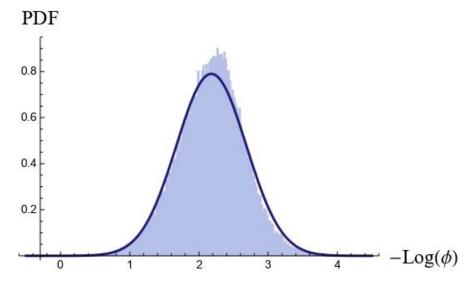
# Une analogie simple

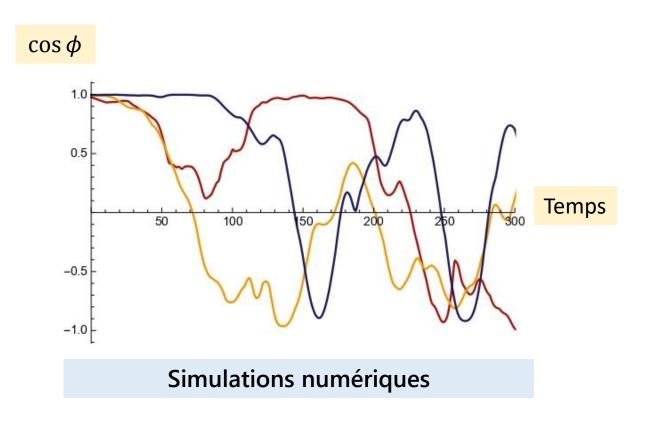


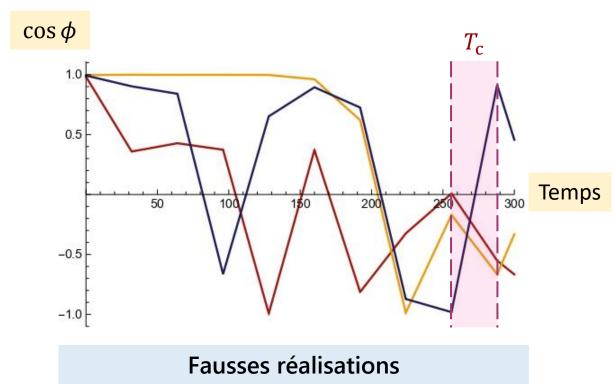
Ceci introduit une hypothèse...

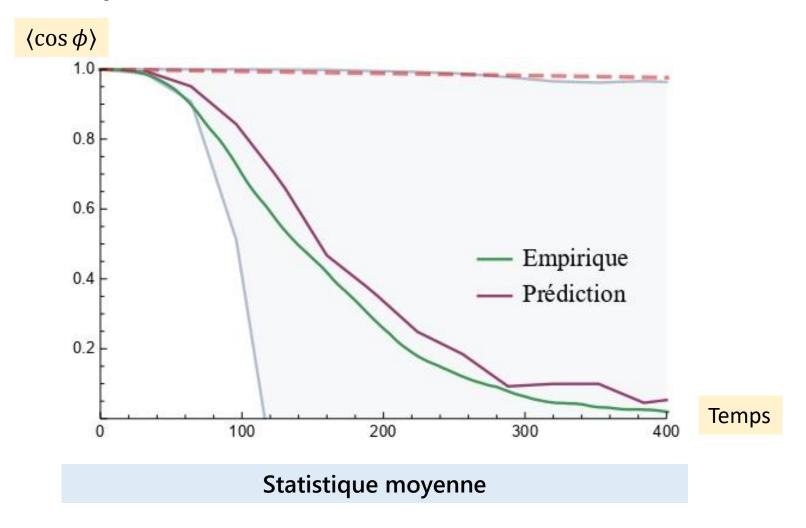


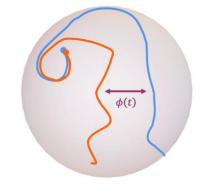








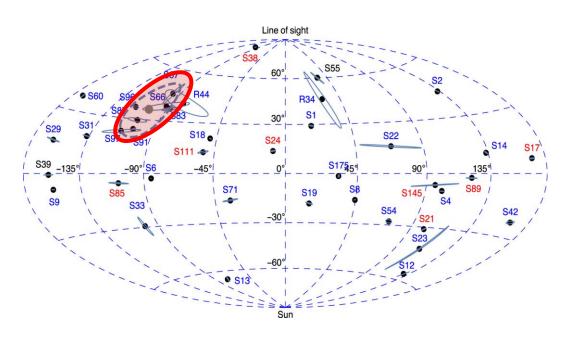




# Application au centre Galactique

Paramètres du centre Galactique ⇔ Efficacité de la séparation de voisins

### Des étoiles ne se sont pas séparées...



Gillessen et al. (observations)

### Un modèle du centre Galactique

 $n(\mathbf{K}) \rightarrow \text{distribution de densité d'étoiles dans le CG}$ 

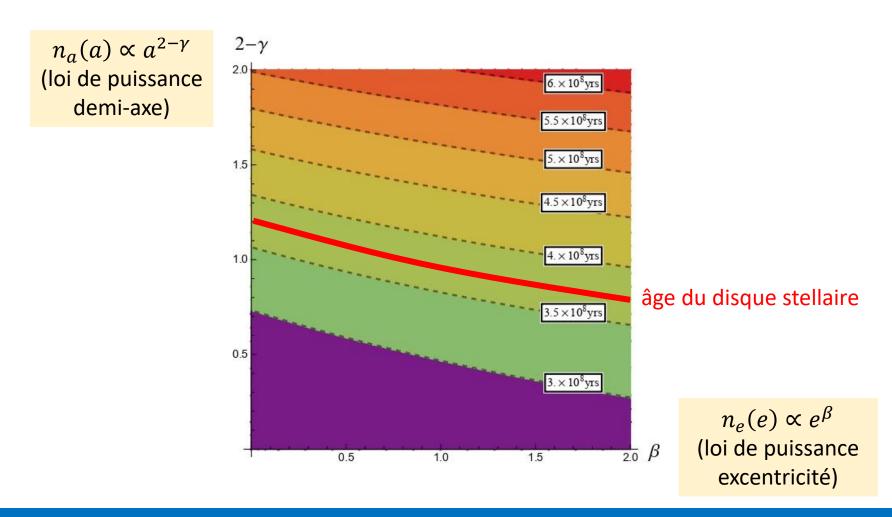
$$n(\mathbf{K}) = n(a, e, m) = n_a(a)n_e(e)\delta(m - m_0)$$

$$n_a(a) \propto a^{2-\gamma}$$
  
 $n_e(e) \propto e^{\beta}$ 

$$n_e(e) \propto e^{\beta}$$

# Application au centre Galactique

Paramètres du centre Galactique ⇔ Efficacité de la séparation de voisins

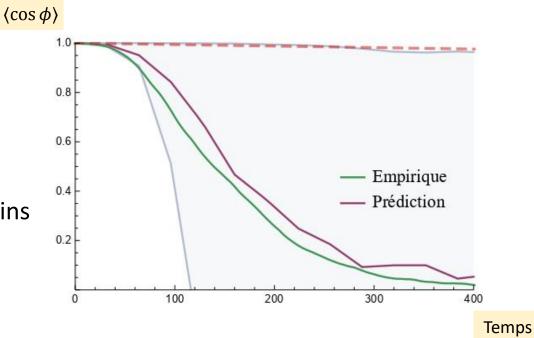


# Conclusions et perspectives

Pendant mon stage j'ai pu...

Développer un formalisme permettant de

- i. prédire les probabilités de transitions Markov
- ii. générer des simulations de séparation de voisins
- iii. prédire la statistique moyenne de séparation



### **Perspectives**

Comparer les prédictions théoriques aux observations pour contraindre les propriétés du Centre Galactique.