

# Interactions étoile-planètes



**Antoine Strugarek**

*CEA/Saclay*

# Plan

## Contexte

Interactions étoile-planète: effets de marées

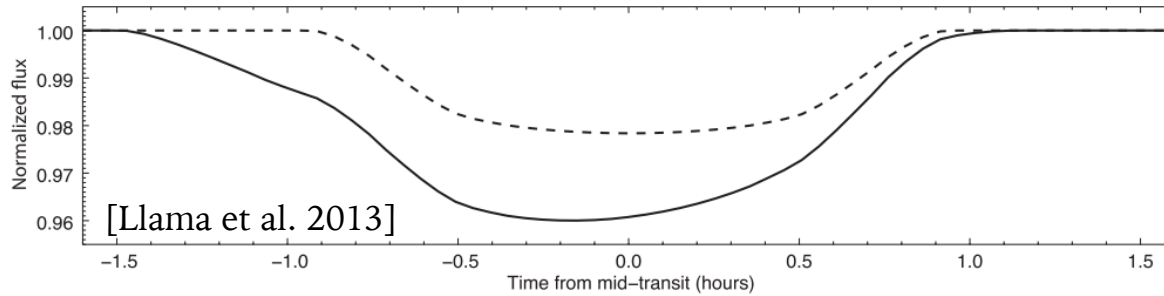
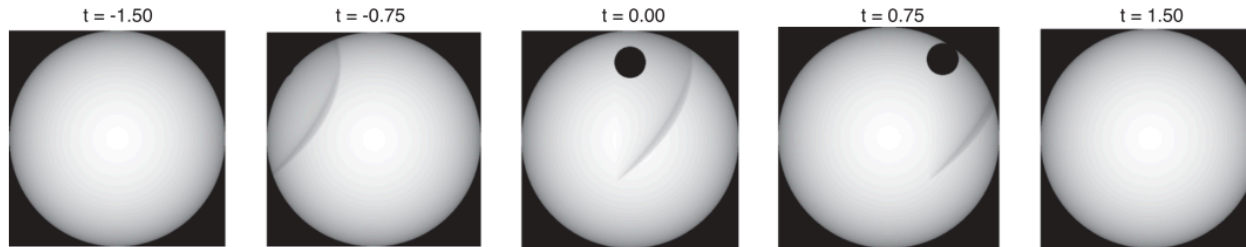
Interactions étoile-planète: effets magnétiques

Interactions étoile-planète:  
évolution séculaire multi-physique



# Effets des interactions étoile-planètes

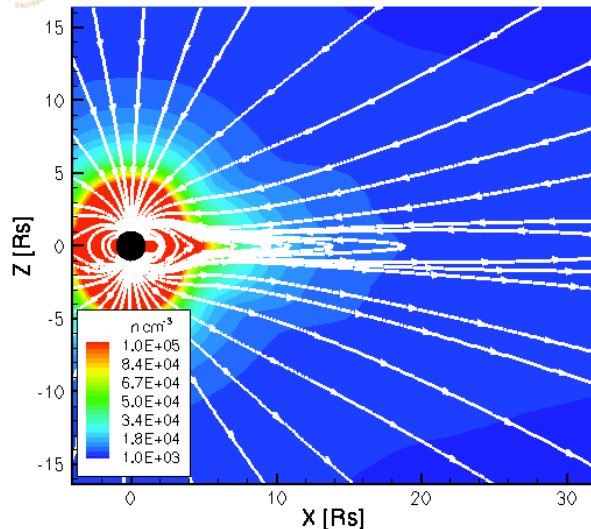
## Transients et effets court terme



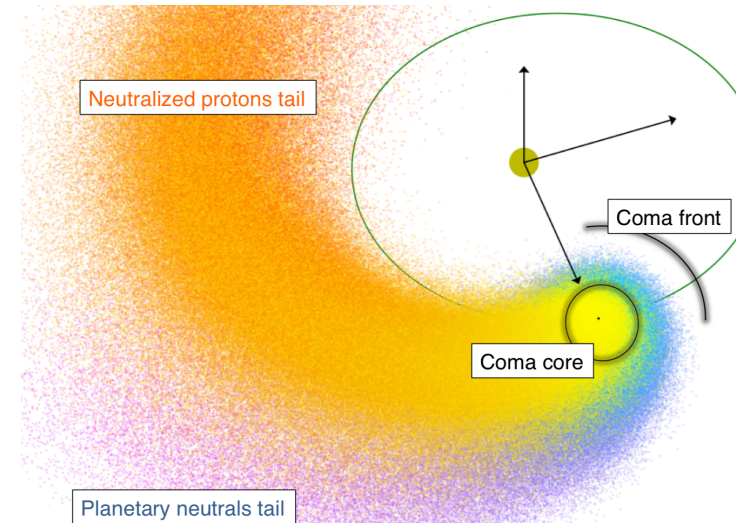
Absorption pre-choc

Echappement atmosphérique

University of Michigan  
Manchester et. al.  
2003



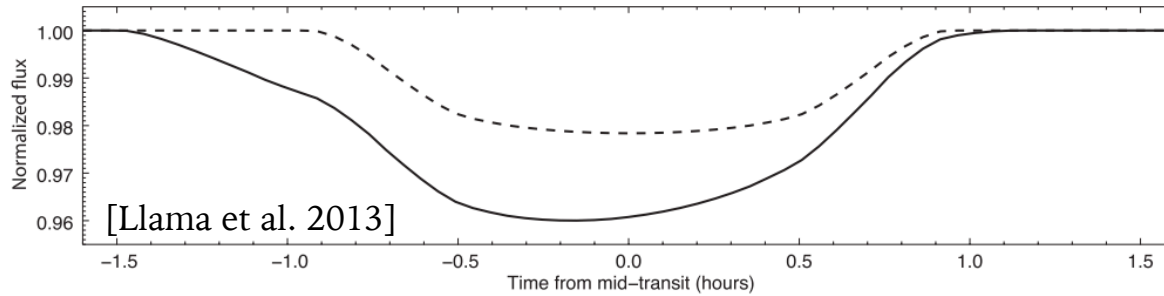
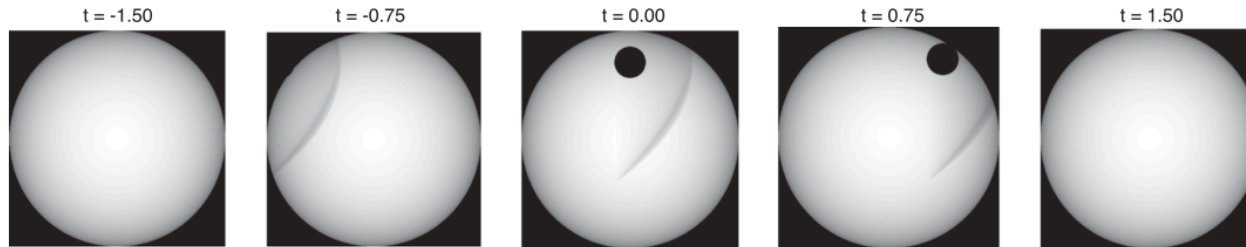
Interactions avec  
des transients



GJ 436b, Bourrier + 2016

# Effets des interactions étoile-planètes

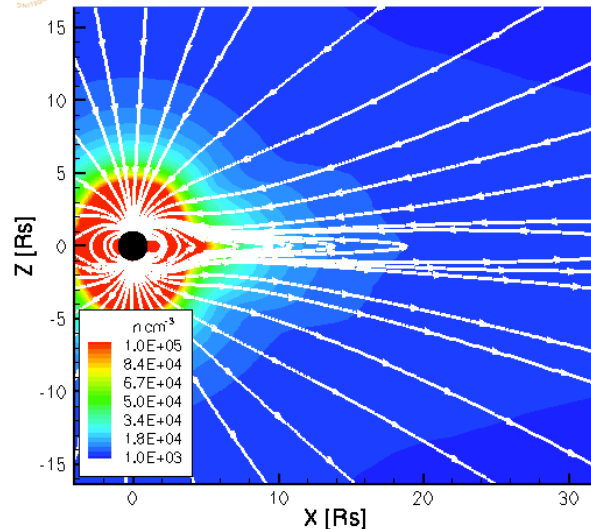
## Transients et effets court terme



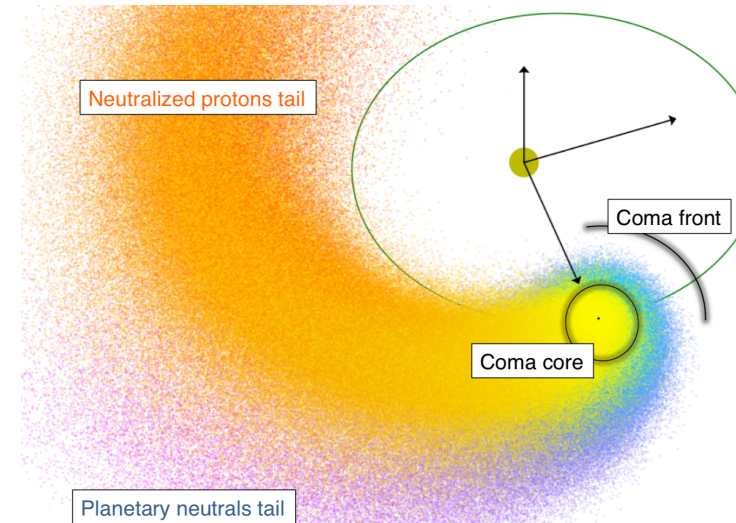
Absorption pre-choc

Echappement atmosphérique

 University of Michigan  
Manchester et. al.  
2003



Interactions avec  
des transients

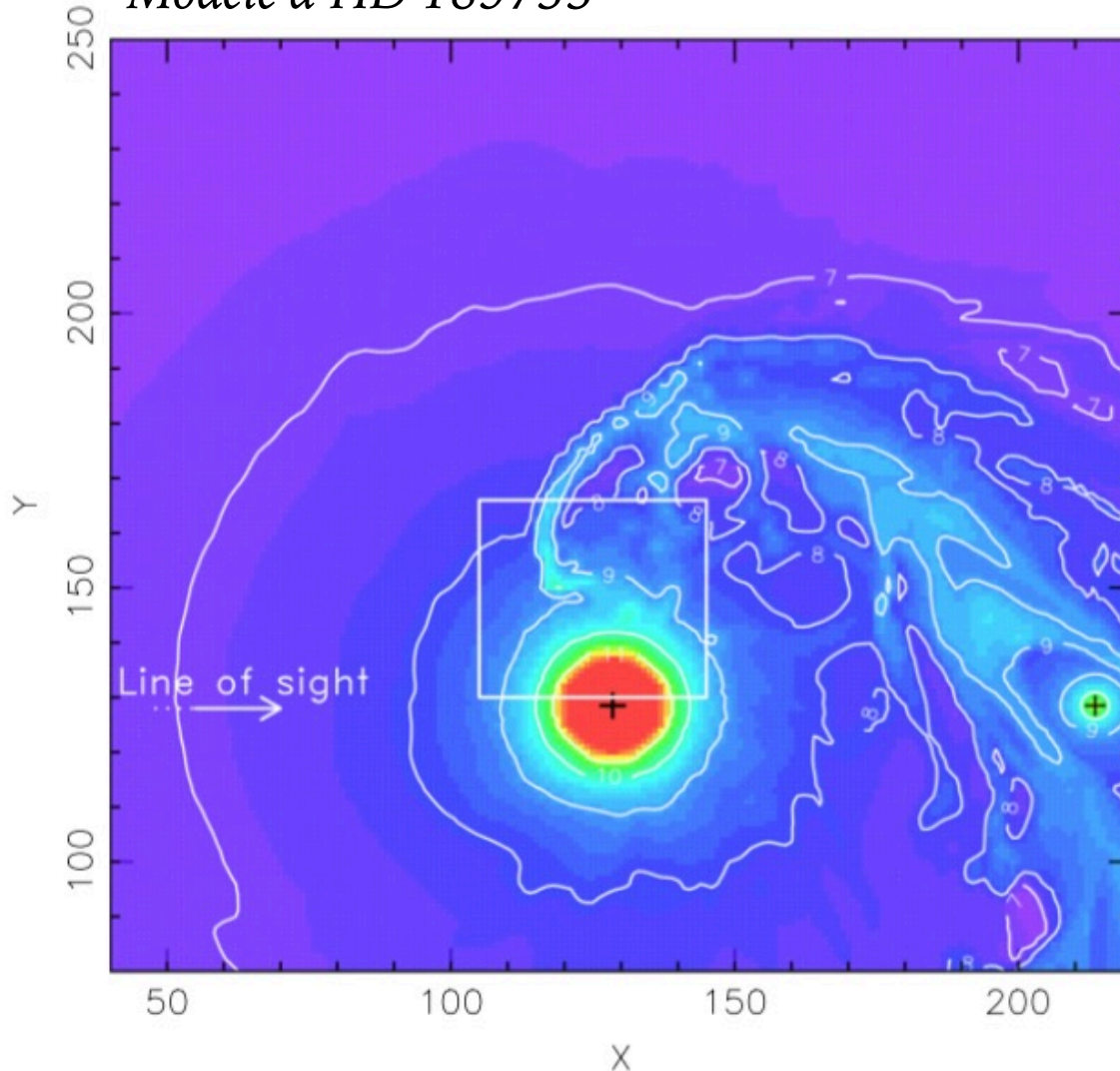


GJ 436b, Bourrier + 2016

# Effets des interactions étoile-planètes

## Transients et effets court terme

*Modèle d'HD 189733*



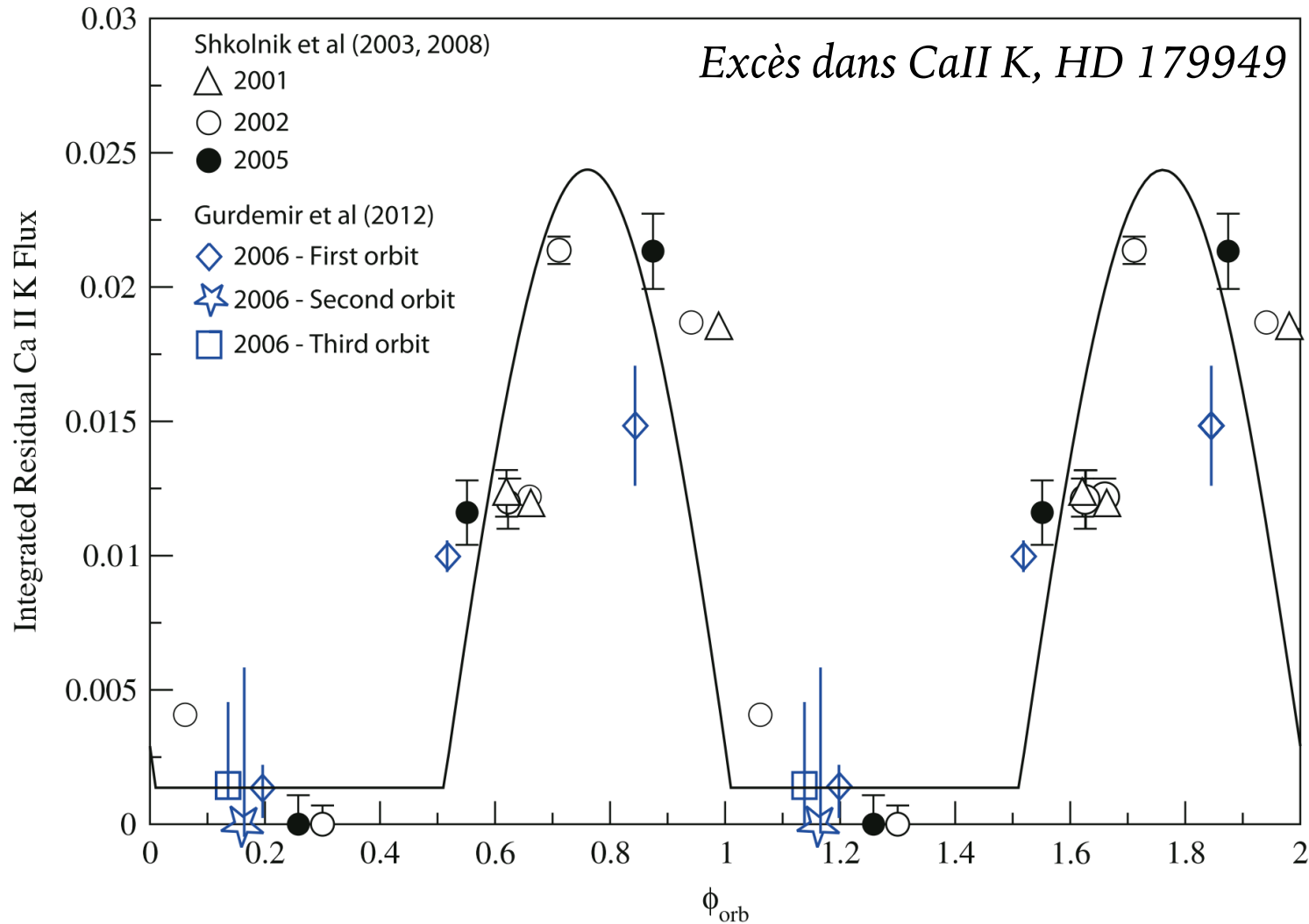
Retro-action sur l'étoile centrale, potentiellement observable...

[Matsakos+ 15; Pillitteri+ 15]



# Effets des interactions étoile-planètes

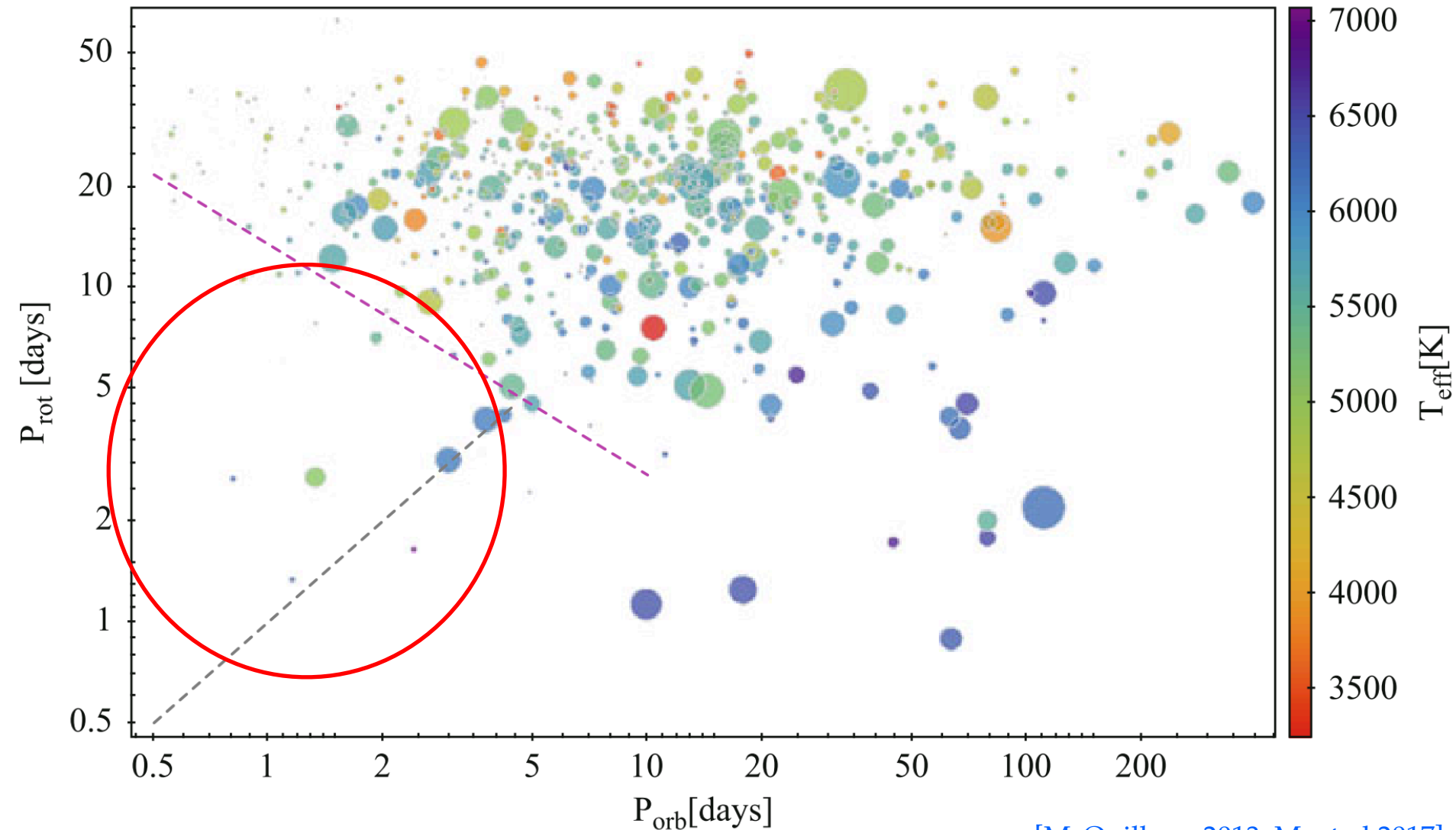
## Transients et effets court terme



# Effets des interactions étoile-planètes

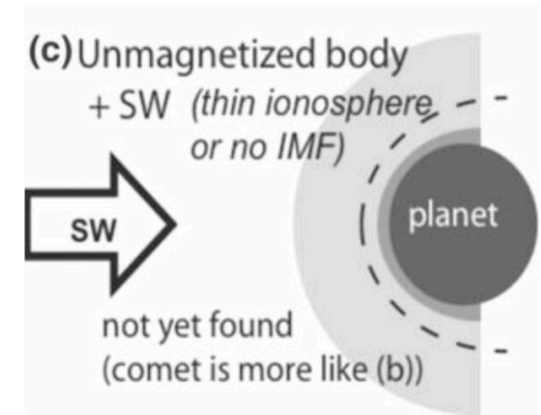
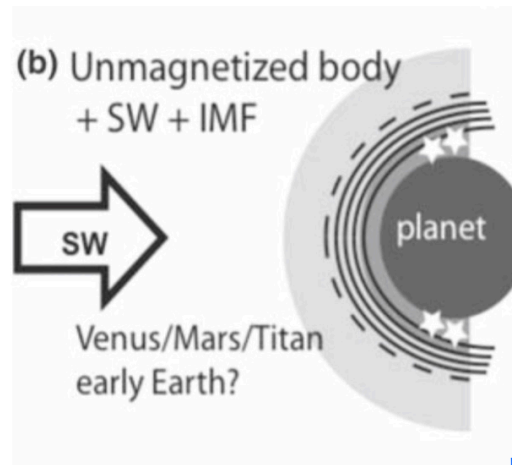
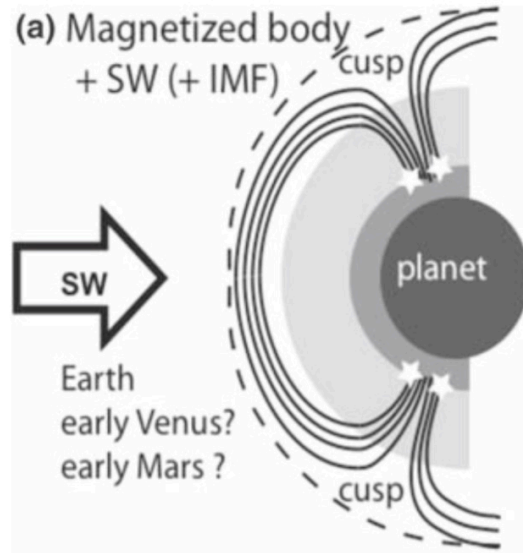
## Effets séculaires

737 Kepler Objects of Interest (KOI)

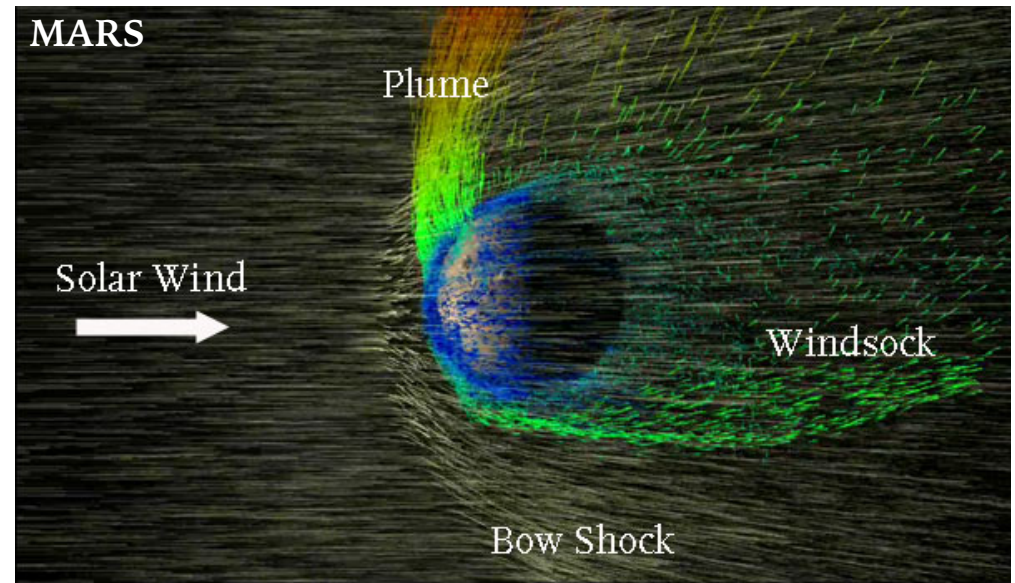
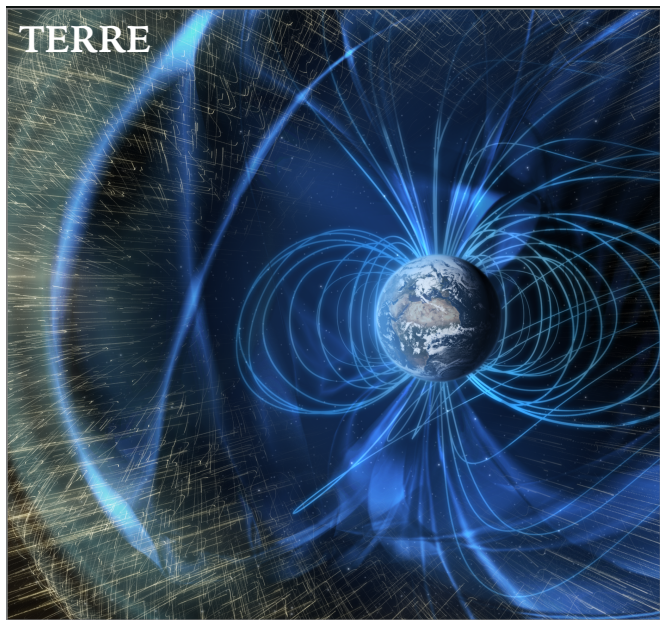


# Effets des interactions étoile-planètes

## Jusqu'à l'habitabilité?



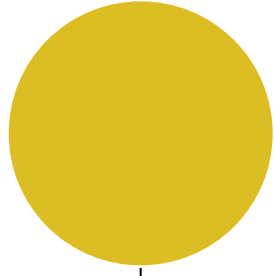
[Yamauchi and Wahlund 2007]





# Moment cinétique dans les systèmes orbitaux

Soleil



0.3-0.6%

Mercure



0.003%



Terre



0.08%



Jupiter



60%

Saturne



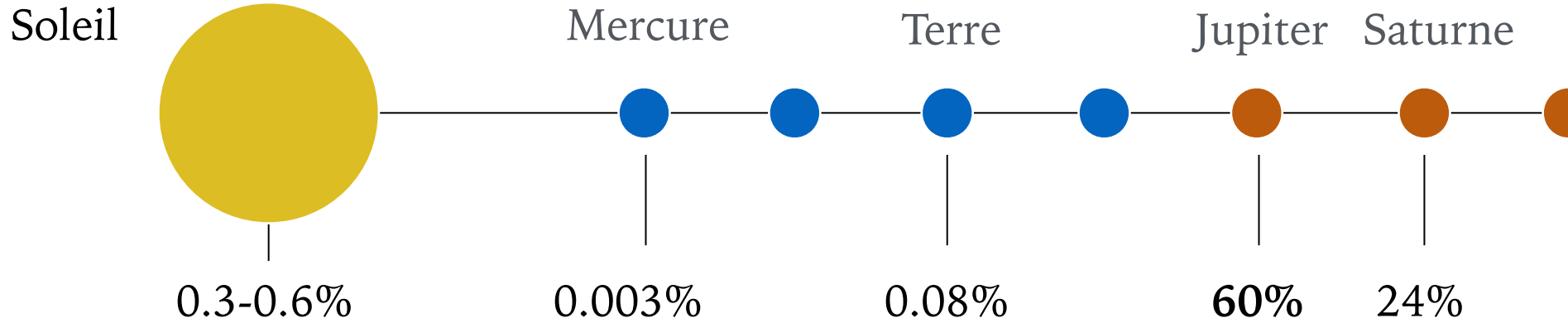
24%



$$J_{\star} \simeq \beta M_{\star} R_{\star}^2 \Omega_{\star}$$

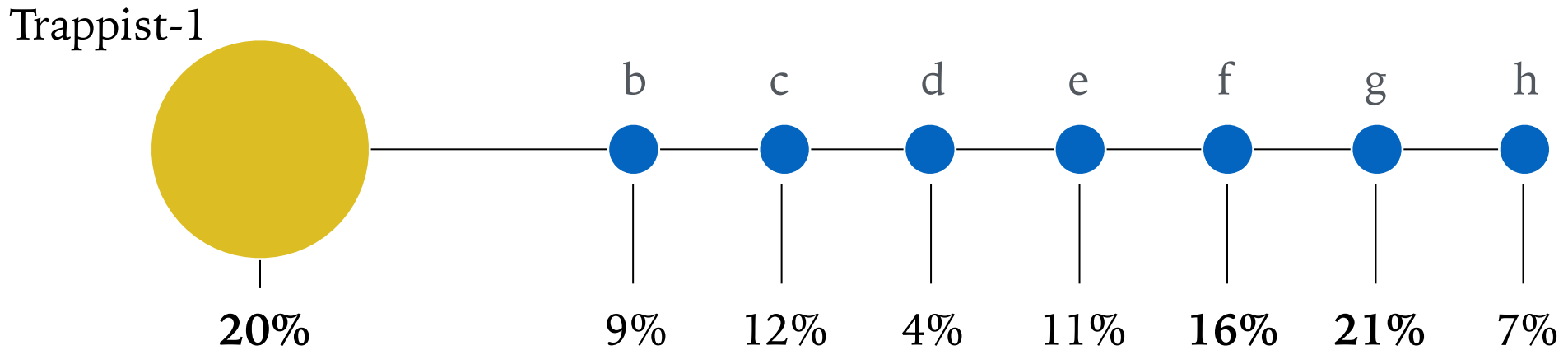
$$J_P \simeq M_P \sqrt{GM_{\star} R_{\text{orb}}}$$

# Moment cinétique dans les systèmes orbitaux

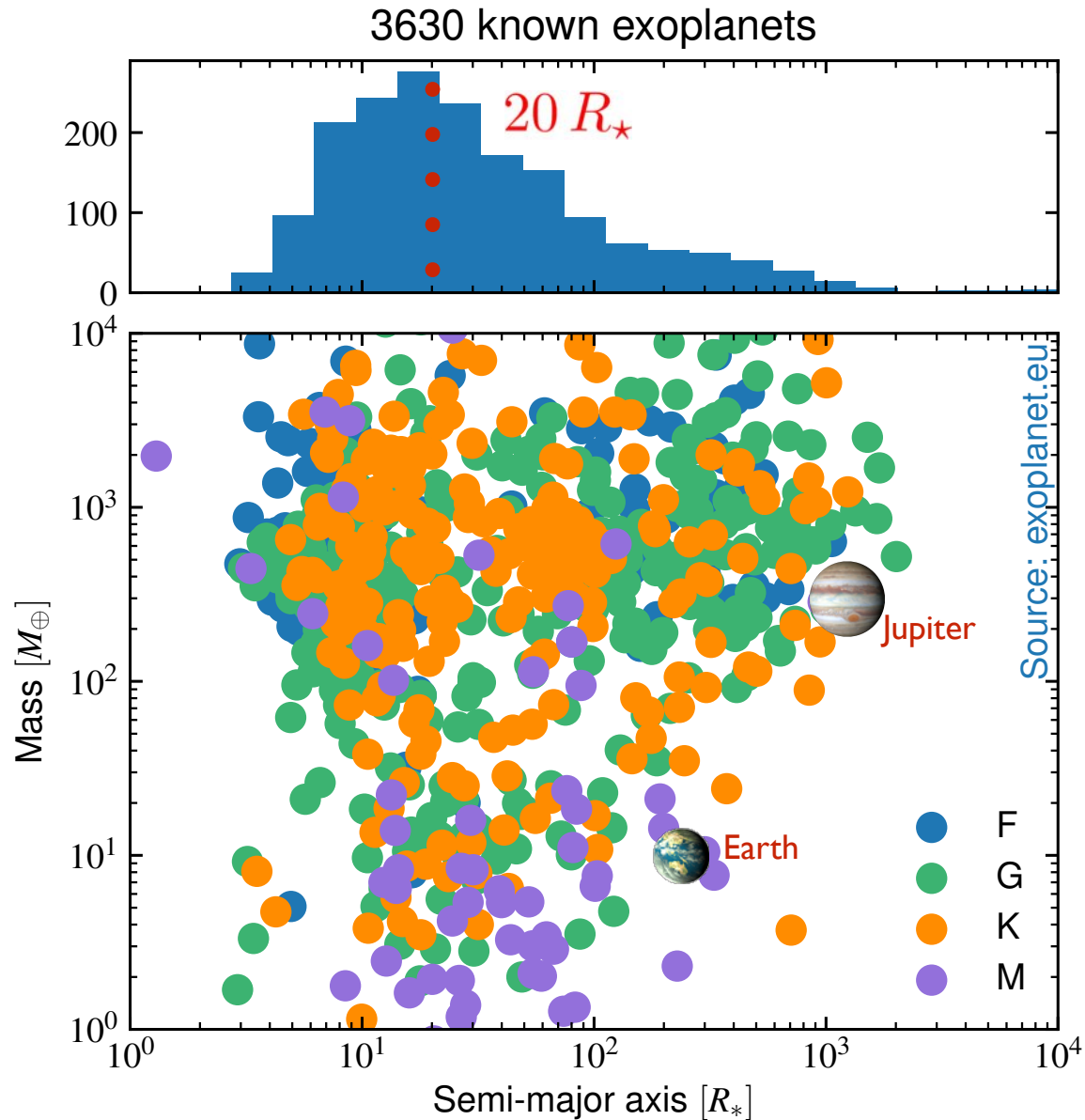


$$J_{\star} \simeq \beta M_{\star} R_{\star}^2 \Omega_{\star}$$

$$J_P \simeq M_P \sqrt{GM_{\star} R_{\text{orb}}}$$



# Beaucoup des exoplanètes connues sont très proches de leur étoile!

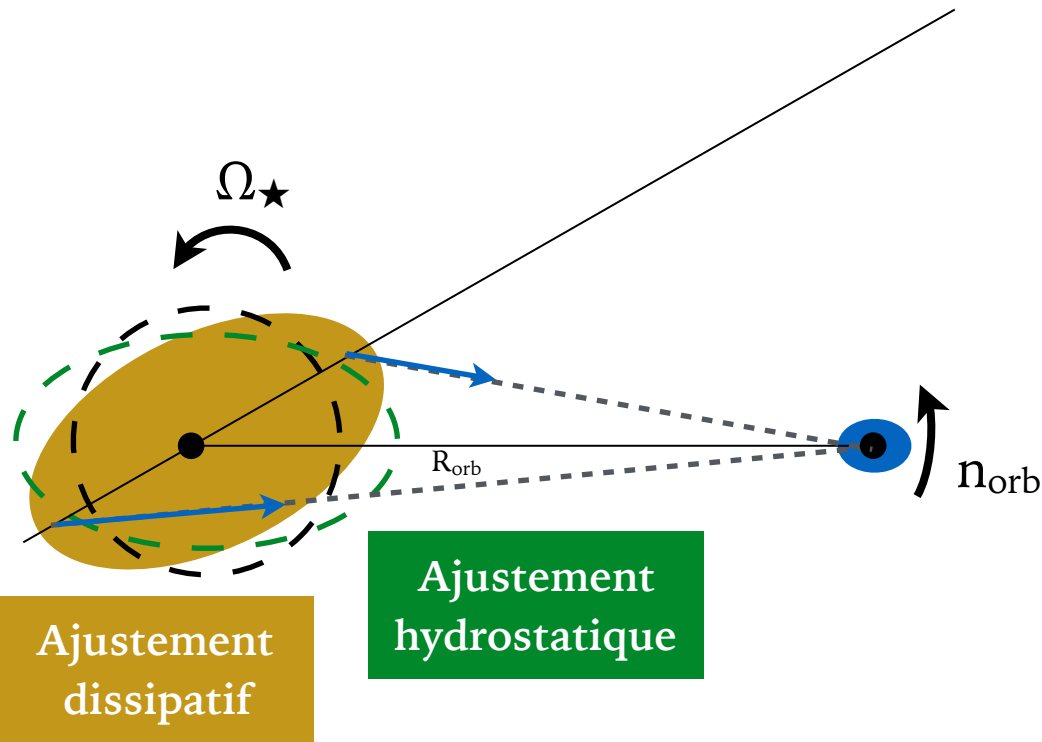






# Interactions étoile-planète: effets de marées

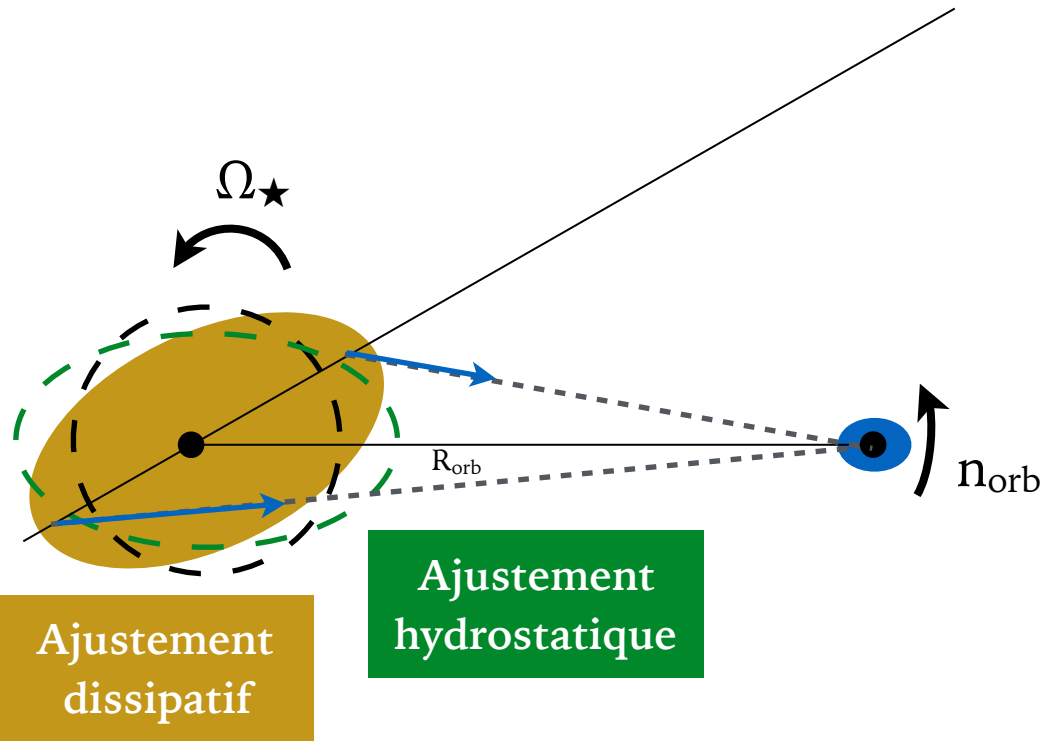
# Qu'est-ce qu'un effet de marée?



Les effets de marées vont

- » Circulariser les orbites
- » Aligner les spins
- » Synchroniser les spins
- » Faire migrer les planètes

# Qu'est-ce qu'un effet de marée?



Les effets de marées vont

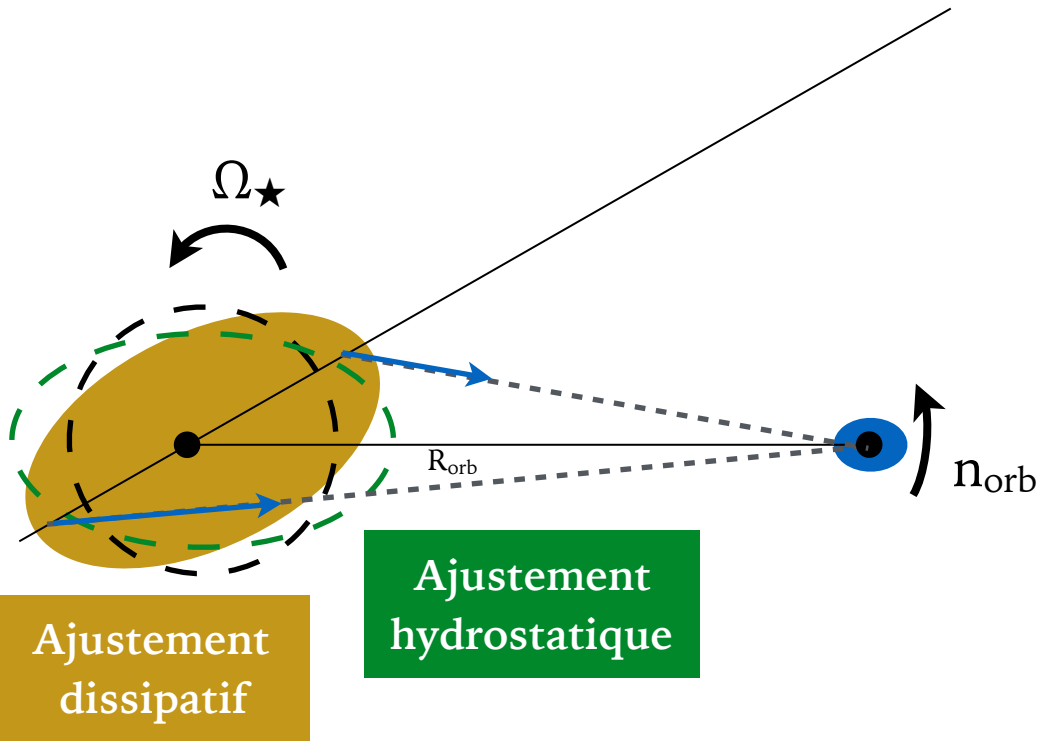
- » Circulariser les orbites
- » Aligner les spins
- » Synchroniser les spins
- » Faire migrer les planètes

Couple de marée (migration planétaire + changement de spin stellaire):

$$\Gamma = - \frac{\overbrace{\Omega_{\star} - n_{\text{orb}}}^{\sigma/2}}{\tau_{\text{friction}}} \left( \frac{M_P}{M_{\star}} \right)^2 M_{\star} R_{\star}^2 \left( \frac{R_{\star}}{R_{\text{orb}}} \right)^6$$



# Qu'est-ce qu'un effet de marée?



Les effets de marées vont

- » Circulariser les orbites
- » Aligner les spins
- » Synchroniser les spins
- » Faire migrer les planètes

Couple de marée (migration planétaire + changement de spin stellaire):

$$\Gamma = - \frac{\overbrace{\Omega_{\star} - n_{orb}}^{\sigma/2}}{\tau_{friction}} \left( \frac{M_P}{M_{\star}} \right)^2 M_{\star} R_{\star}^2 \left( \frac{R_{\star}}{R_{orb}} \right)^6 \quad \tau_{friction} = \frac{|\sigma|}{8n_{\star}} \overbrace{\left( \frac{2}{3} \frac{Q}{k_2} \right)}^{Q'}$$

Pour les habitués

# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

**Le moment cinétique total est conservé:** la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

**Le moment cinétique total est conservé:** la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

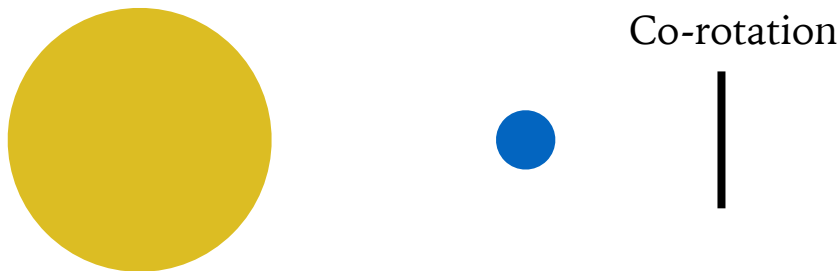
Ainsi, le taux de rotation de l'étoile **et** la période orbitale sont modifiés. Deux cas de figure se présentent:

# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

Le moment cinétique total est conservé: la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

Ainsi, le taux de rotation de l'étoile **et** la période orbitale sont modifiés. Deux cas de figure se présentent:

$$J_P > 3J_\star$$



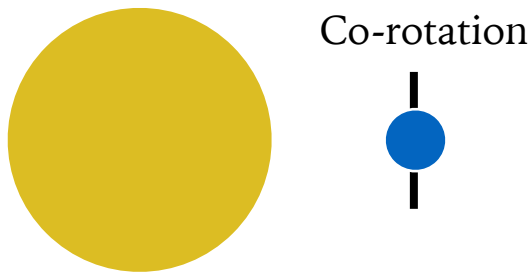
Le système évolue vers la synchronisation

# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

Le moment cinétique total est conservé: la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

Ainsi, le taux de rotation de l'étoile **et** la période orbitale sont modifiés. Deux cas de figure se présentent:

$$J_P > 3J_\star$$



Le système évolue vers la synchronisation

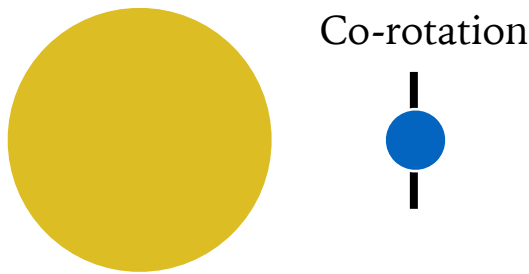


# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

Le moment cinétique total est conservé: la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

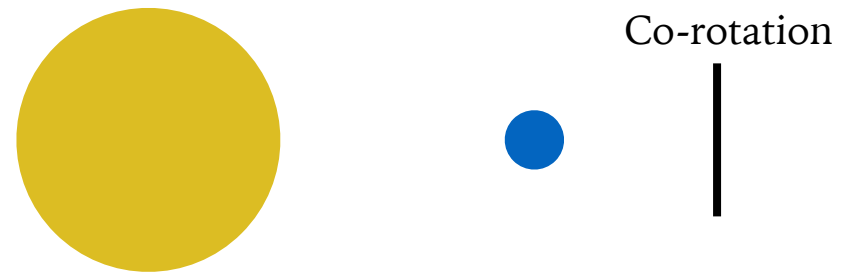
Ainsi, le taux de rotation de l'étoile **et** la période orbitale sont modifiés. Deux cas de figure se présentent:

$$J_P > 3J_\star$$



Le système évolue vers la synchronisation

$$J_P < 3J_\star$$



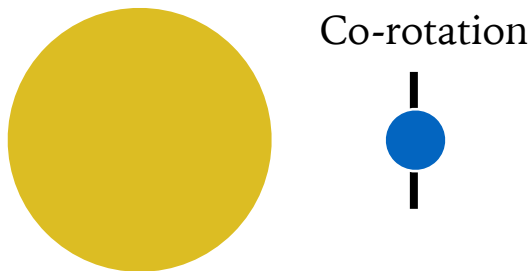
Le système évolue vers la destruction de la planète

# Migration planétaire due à un couple (quelconque)

Le moment cinétique total est conservé: la migration planétaire nécessite un échange entre l'orbite planétaire et la rotation de l'étoile (pour un système à deux corps), i.e.  $\dot{J}_\star = -\dot{J}_P$

Ainsi, le taux de rotation de l'étoile **et** la période orbitale sont modifiés. Deux cas de figure se présentent:

$$J_P > 3J_\star$$



Le système évolue vers la synchronisation

$$J_P < 3J_\star$$

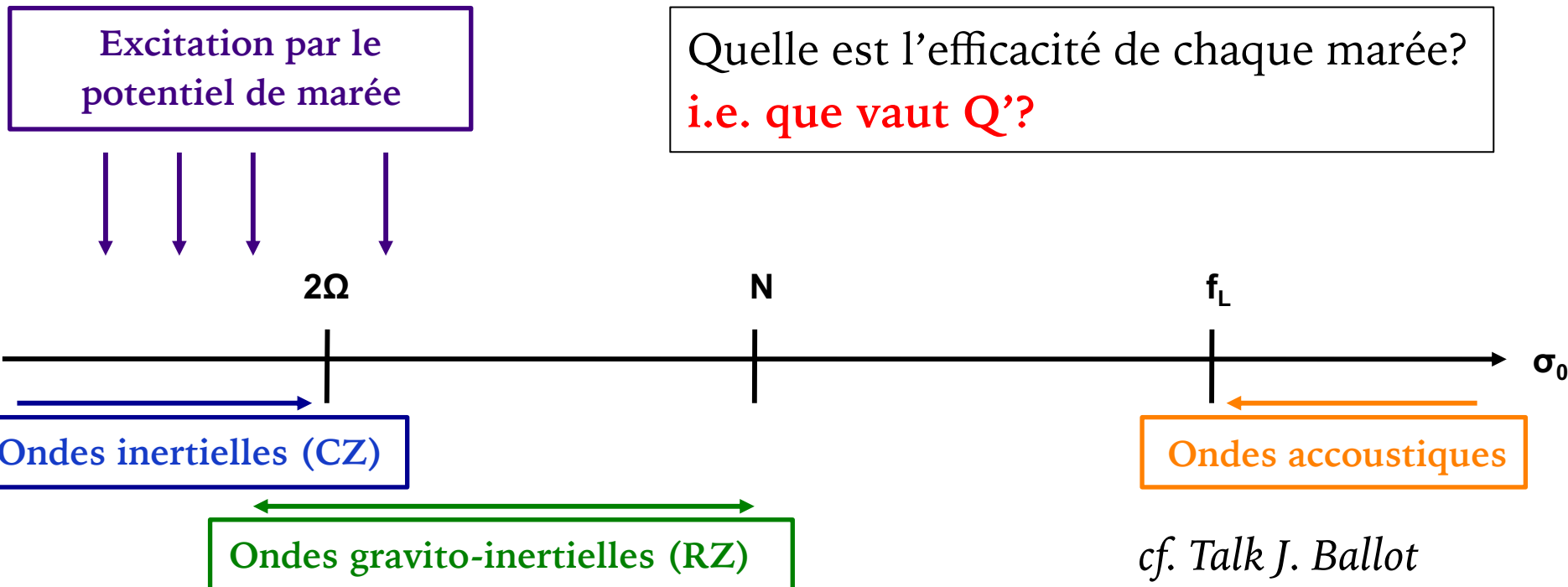


Le système évolue vers la destruction de la planète

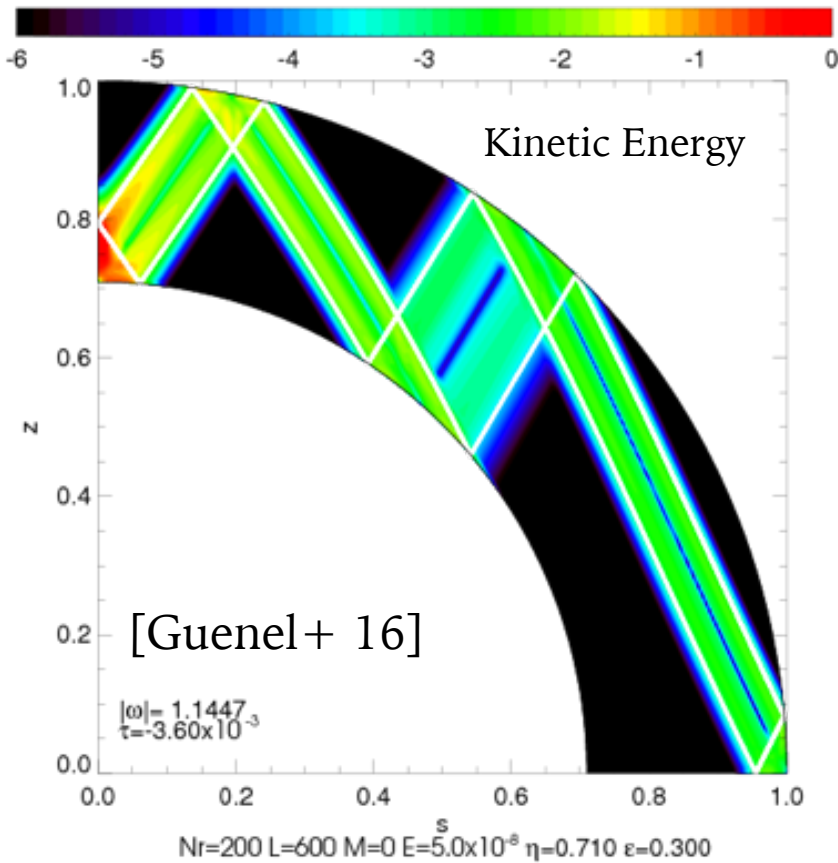
# Deux types de marées: équilibre vs dynamique

**Marée d'équilibre:** un écoulement global est généré du fait de l'ajustement hydrostatique de la structure au forçage du potentiel de marée, écoulement qui ensuite dissipe (viscosité, diffusion thermique). [Zahn 66a&b]

**Marée dynamique:** ondes excitées par le potentiel de marées, qui dissipent également.

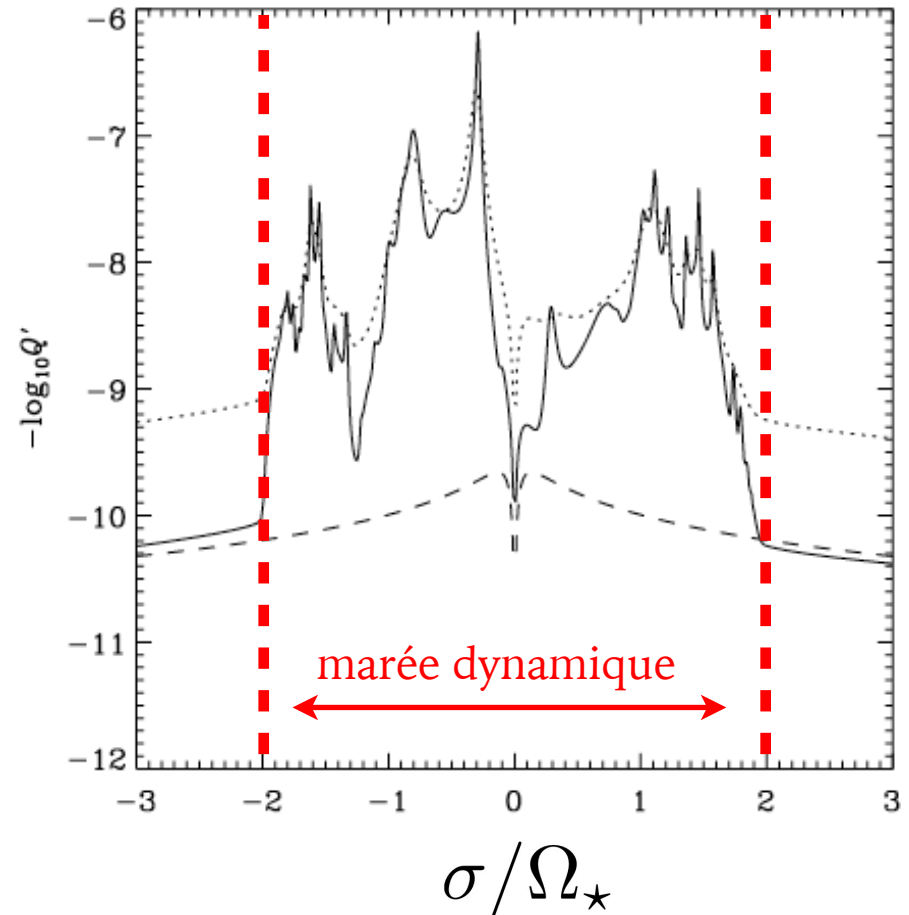


# Marées dans les étoiles: la structure interne est essentielle



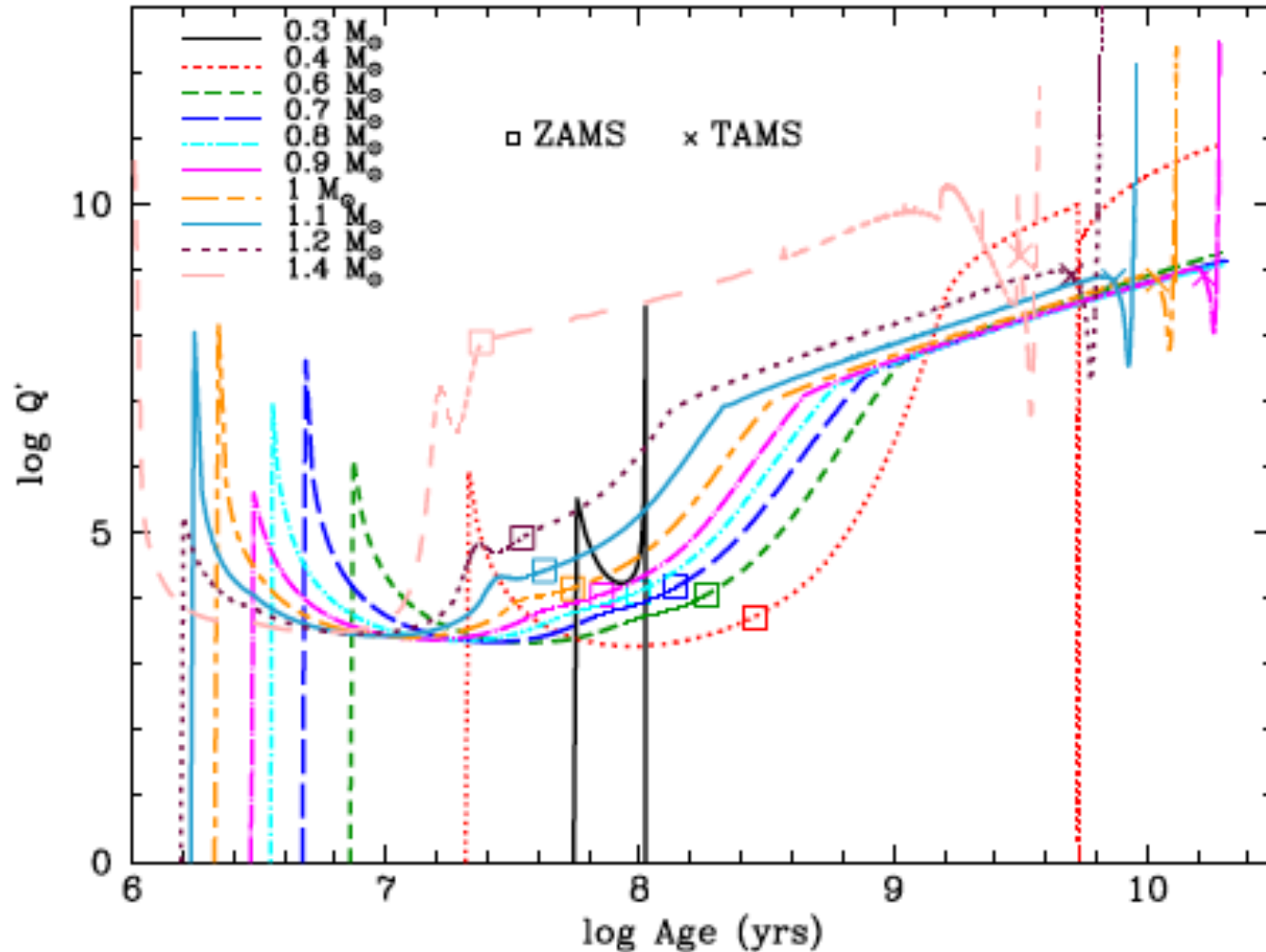
Attracteur de la marée dynamique dans un cas de type solaire

[Ogilvie & Lin 04,07]



Spectre de dissipation par friction turbulente

# Marées dans les étoiles: la structure interne est essentielle



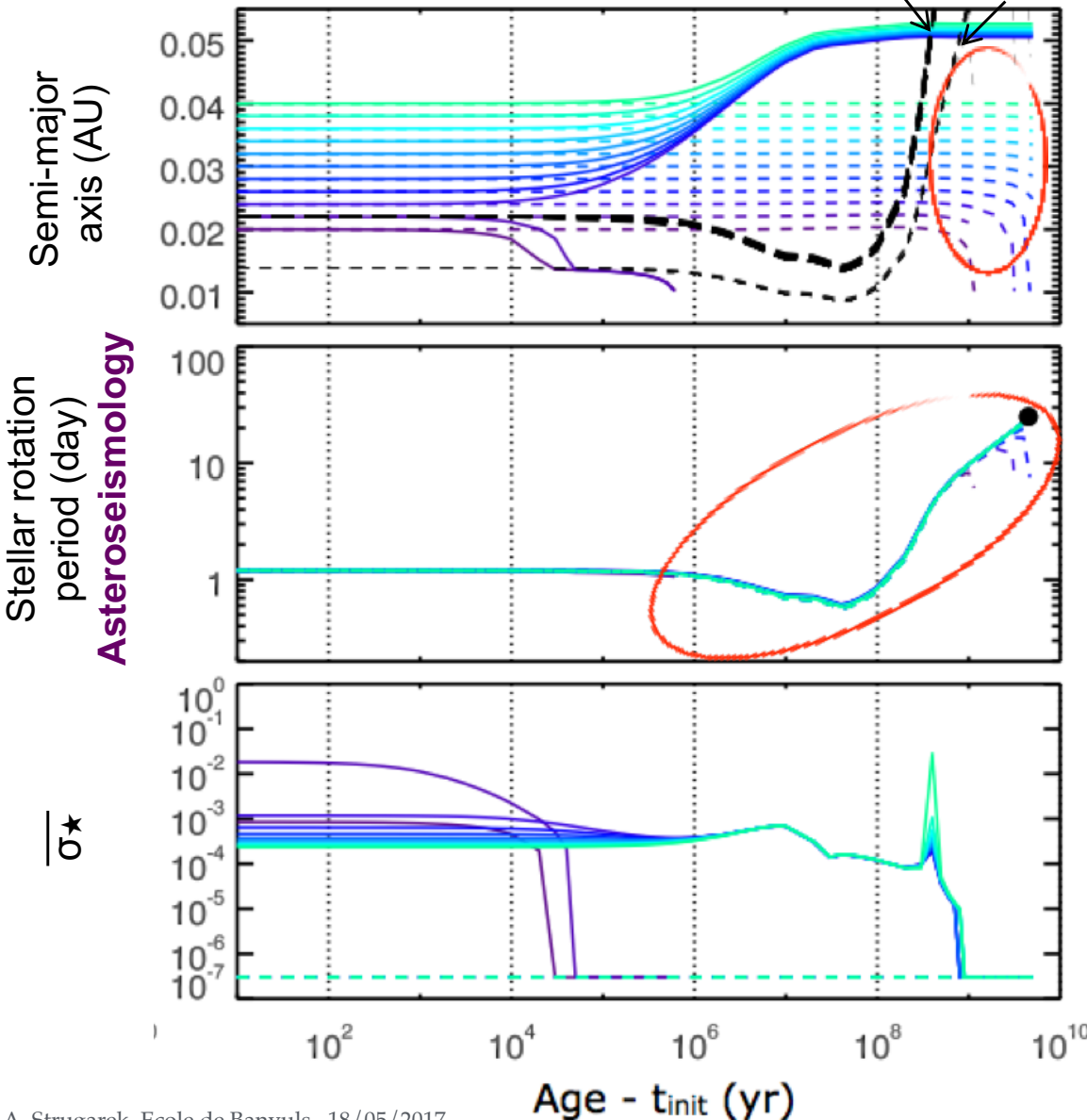
[Mathis 2015; Gallet, Bolmont, Mathis, Charbonnel & Amard 2017]



# Marées dans les étoiles: la structure interne est essentielle

b)  $M_p = 1 M_{jup}$

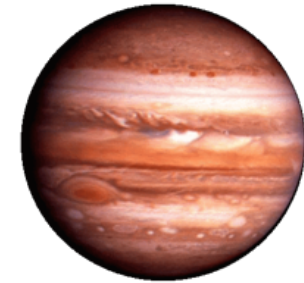
$P_{orb} = P_{\star}$     $P_{orb} = 1/2 P_{\star}$



Standard model

Model Bolmont & Mathis

$M_p = 1 M_{jup}$



$M_{\star} = 1 M_{\odot}$

$P_{\star,i} = 1.2$  day

Marées équil. + dyn.  
**ET** dépendance à la structure  
 au cours de l'évolution

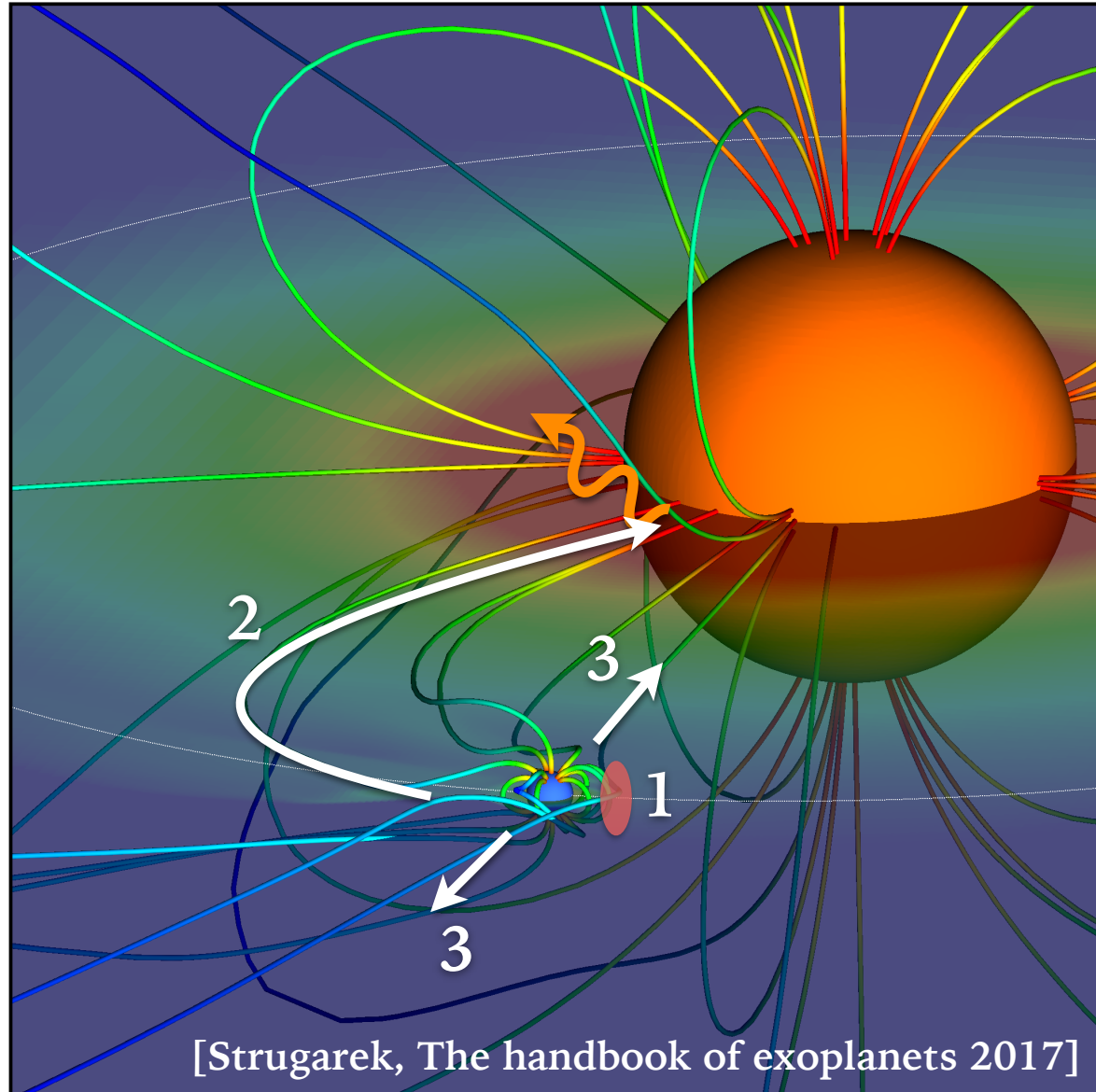
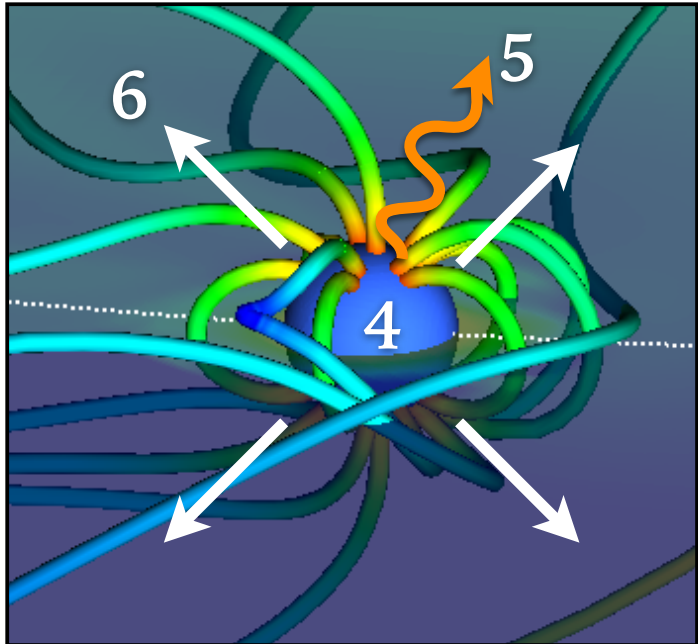
[Bolmont & Mathis 2016]



# Interactions étoile-planète: effets magnétiques

# Effets majeurs de l'interaction magnétique étoile-planète

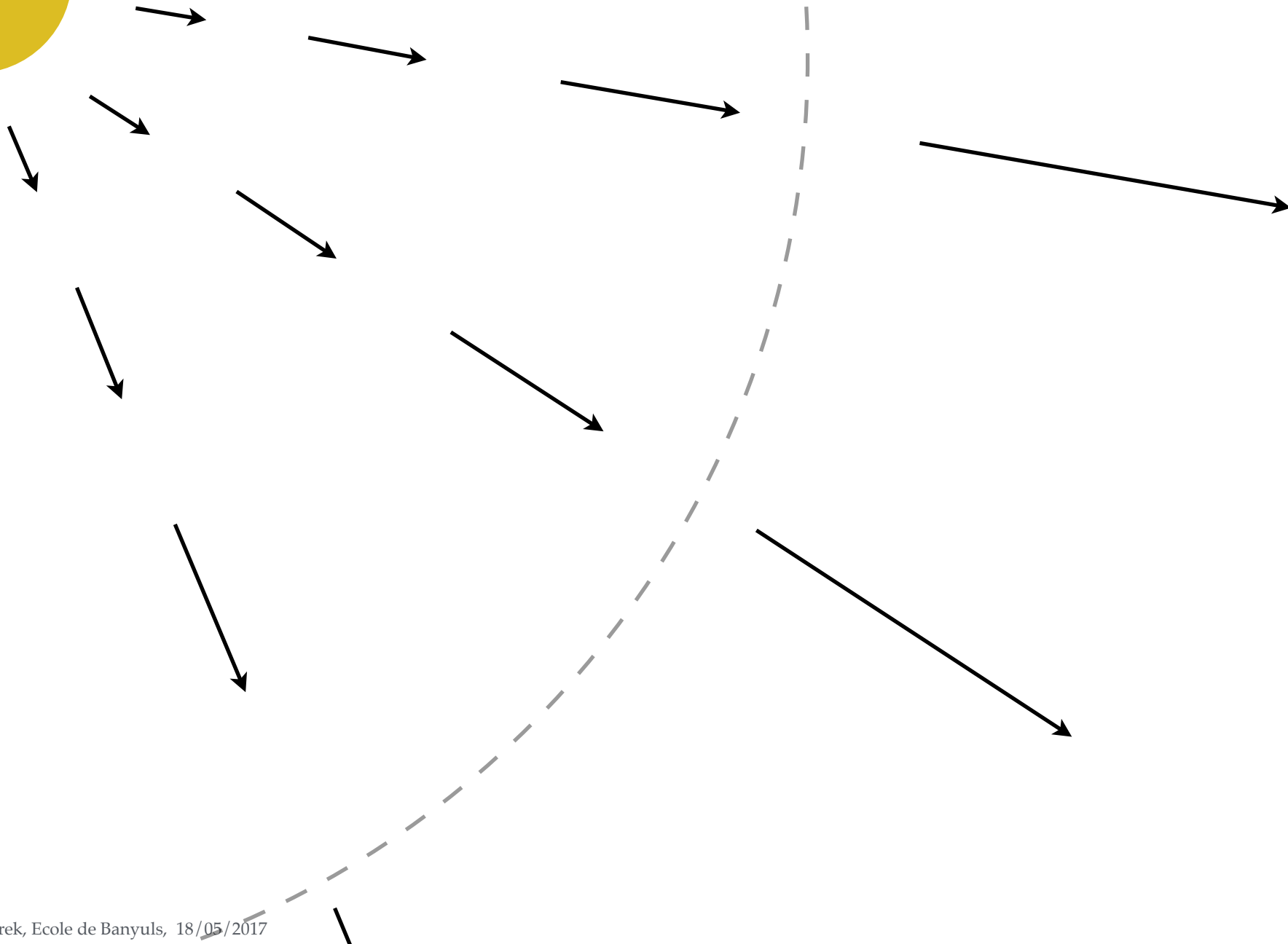
1. Choc MHD
2. Transfert d'énergie
3. Migration planétaire
4. Chauffage planétaire
5. Emissions planétaires
6. Echappement atmosphérique

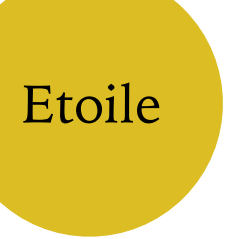


[Strugarek, The handbook of exoplanets 2017]

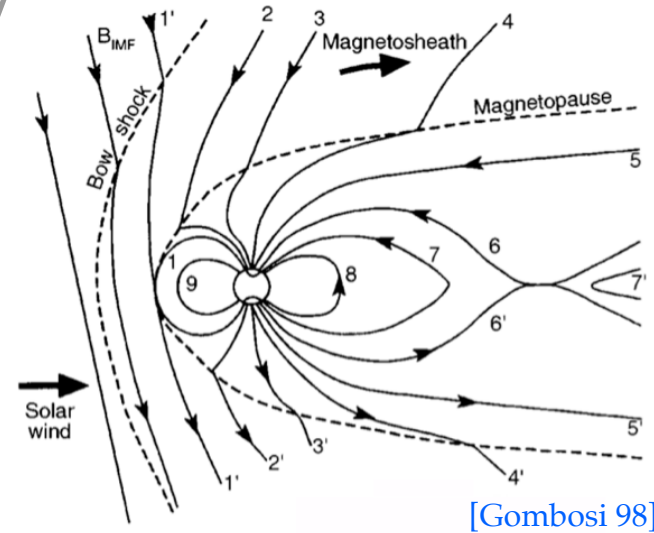
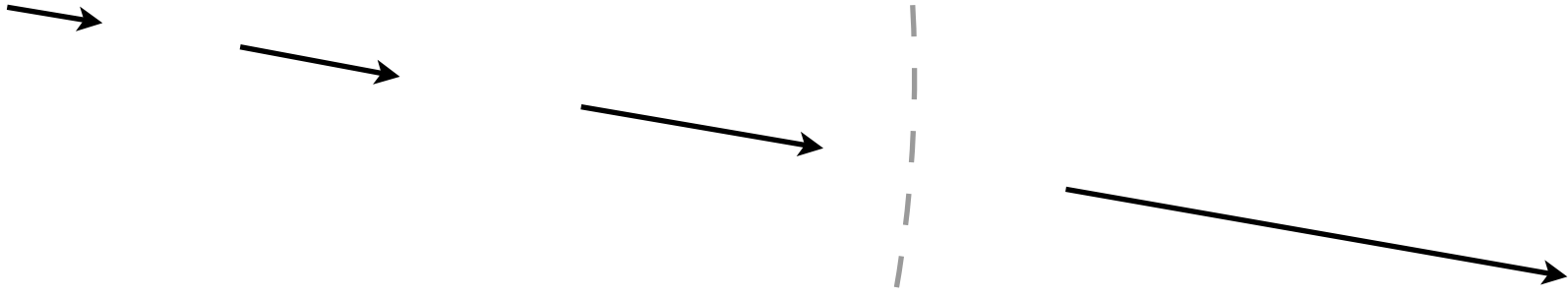


# Deux régimes d'interaction magnétique





# Deux régimes d'interaction magnétique

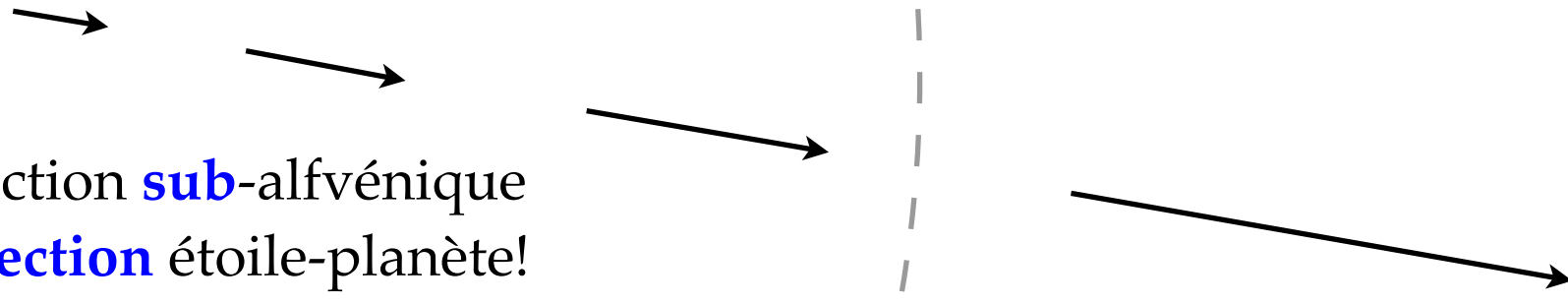


Interaction **super**-alfvéenique  
Création de **chocs**!

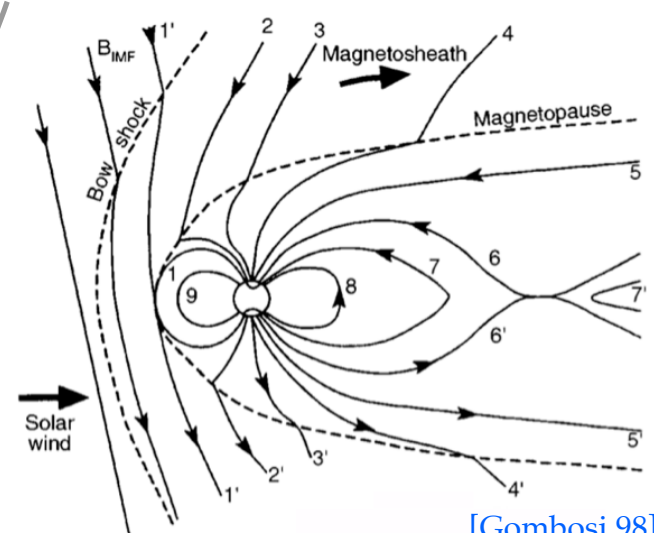
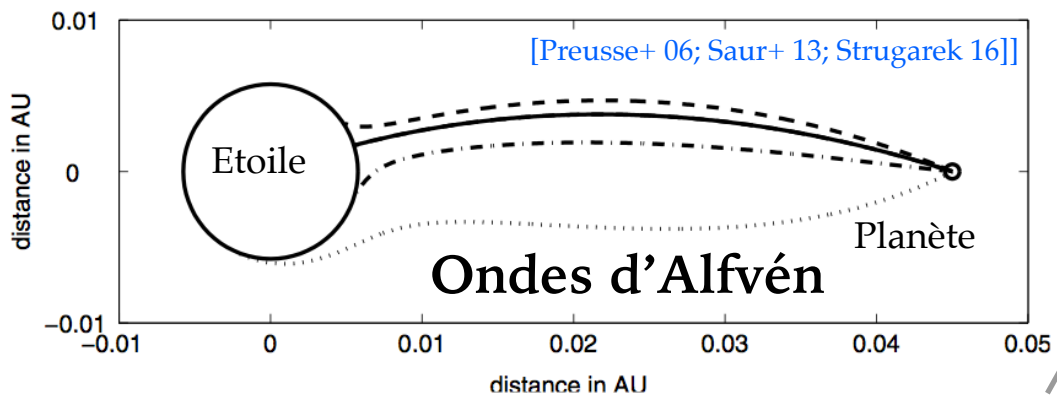




# Deux régimes d'interaction magnétique

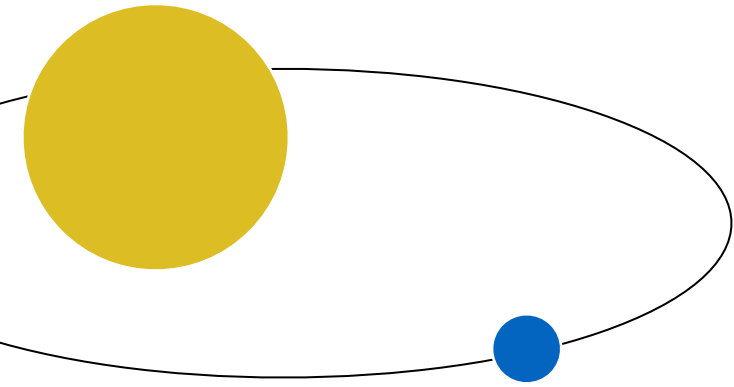


Interaction **sub**-alfvénique  
**Connection** étoile-planète!

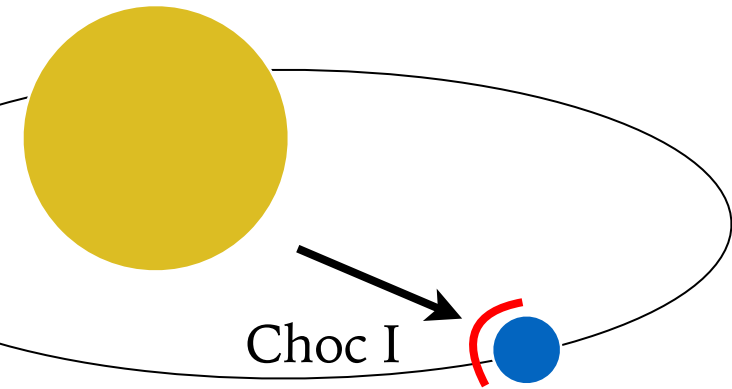


Interaction **super**-alfvénique  
Création de **chocs**!

# Quelles (exo)planètes développent un choc?



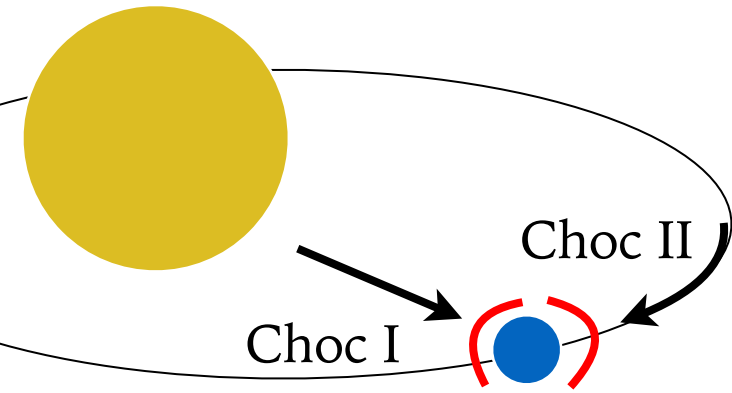
# Quelles (exo)planètes développent un choc?



## Choc I

$$\text{Vitesse radiale du vent} > v_A$$

# Quelles (exo)planètes développent un choc?



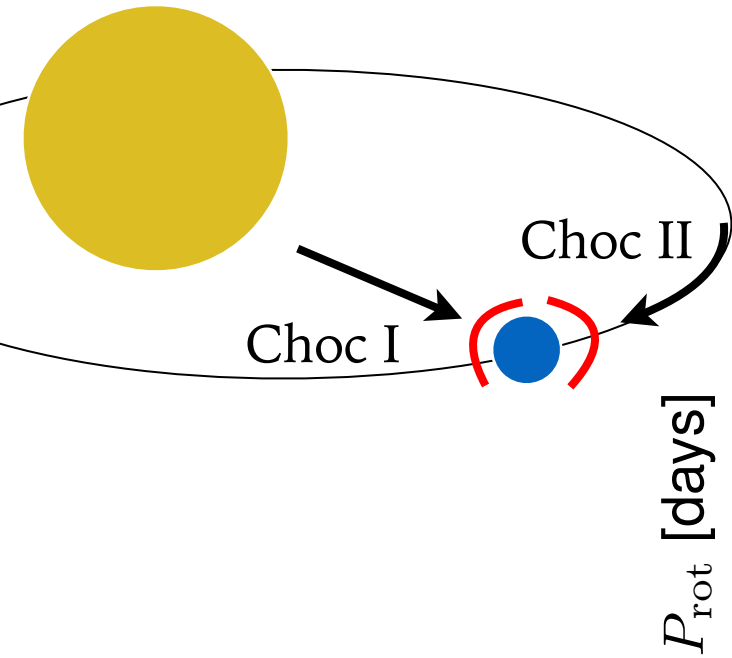
## Choc I

*Vitesse radiale du vent*  $> v_A$

## Choc II

$| \textit{Vitesse keplerienne} - \textit{rotation} | > v_A$

# Quelles (exo)planètes développent un choc?



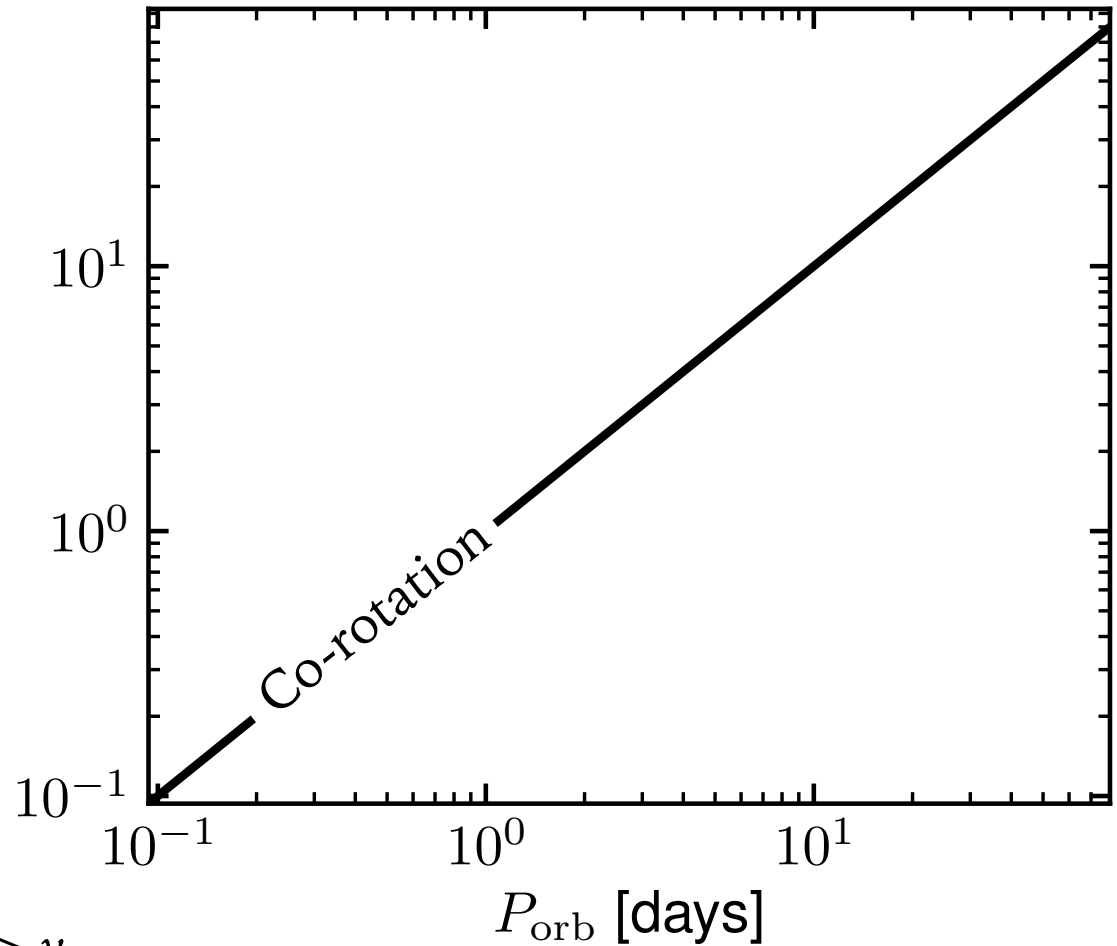
## Choc I

*Vitesse radiale du vent*  $> v_A$

## Choc II

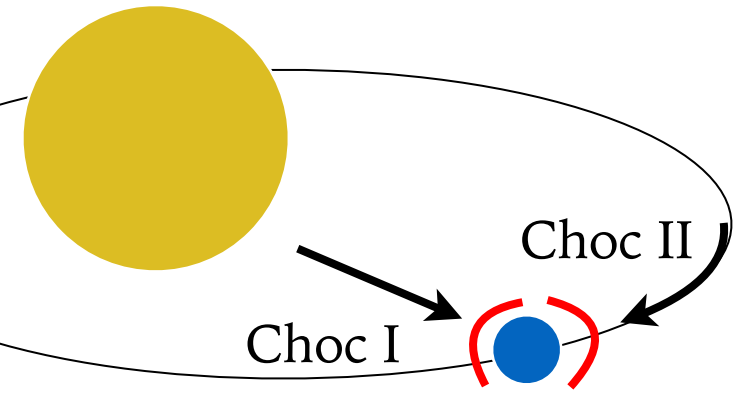
$| \textit{Vitesse keplerienne} - \textit{rotation} | > v_A$

Etoile K (e.g. HD 189733)





# Quelles (exo)planètes développent un choc?



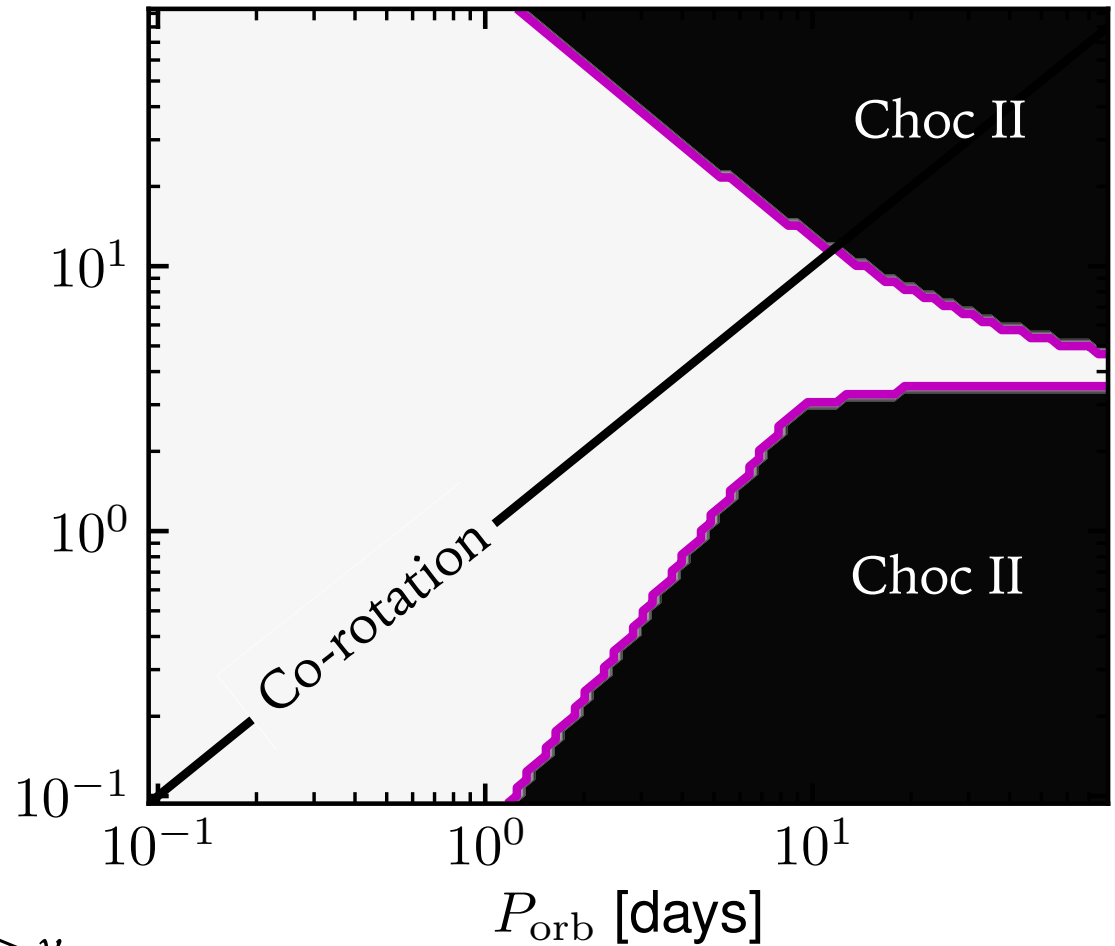
**Choc I**

*Vitesse radiale du vent*  $> v_A$

**Choc II**

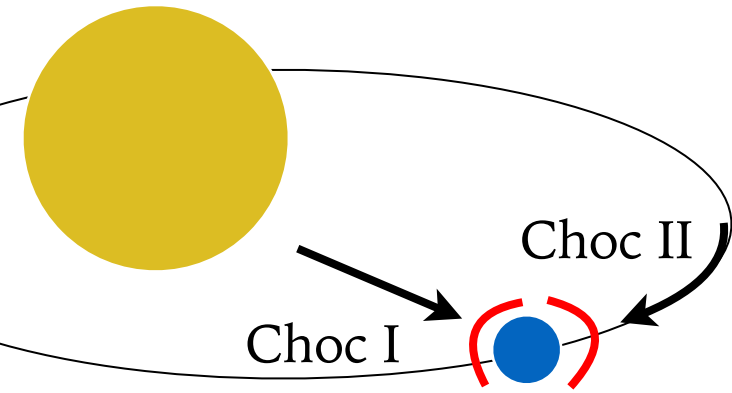
$| \text{Vitesse keplerienne} - \text{rotation} | > v_A$

Etoile K (e.g. HD 189733)



(modèle de vent Weber-Davis)

# Quelles (exo)planètes développent un choc?



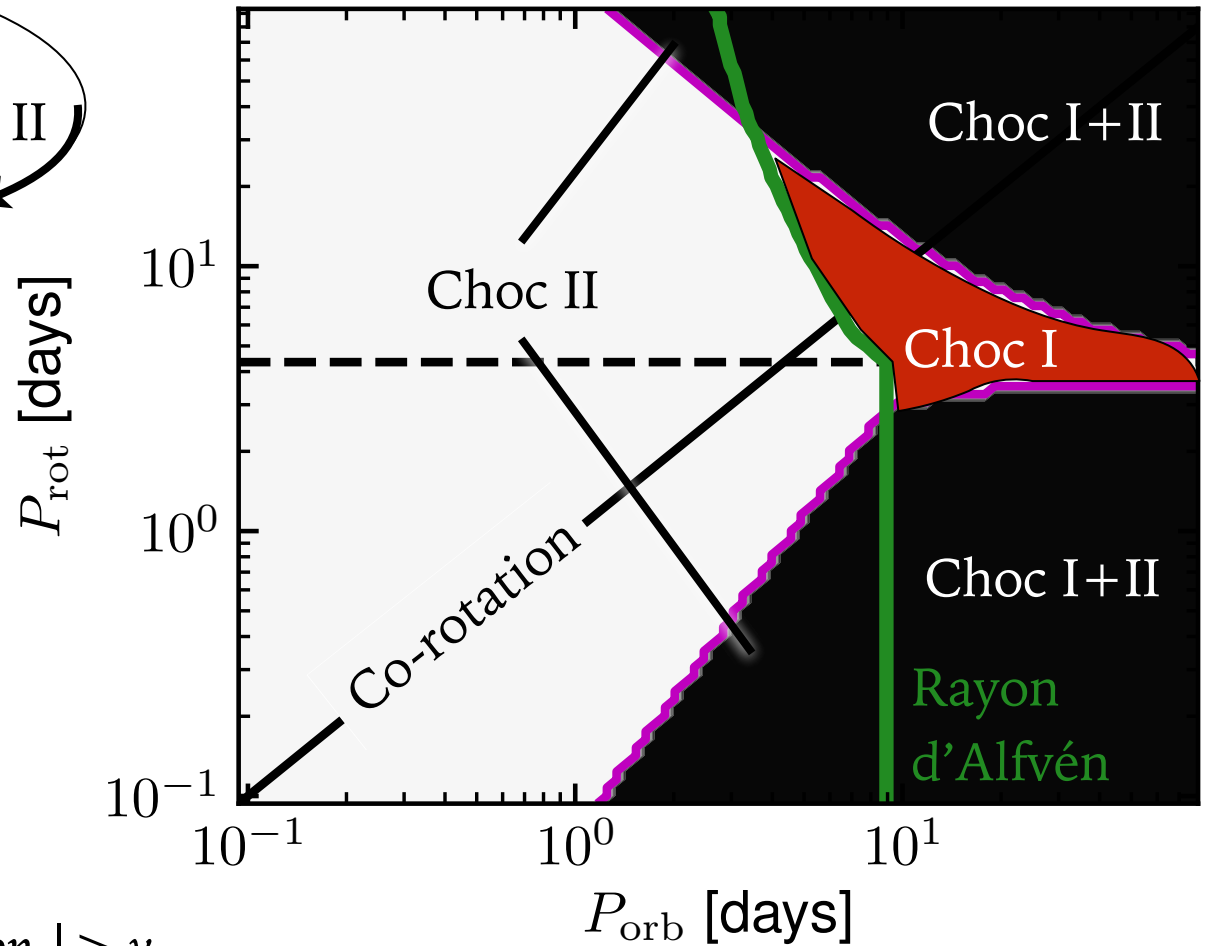
**Choc I**

*Vitesse radiale du vent*  $> v_A$

**Choc II**

*|Vitesse keplerienne - rotation|*  $> v_A$

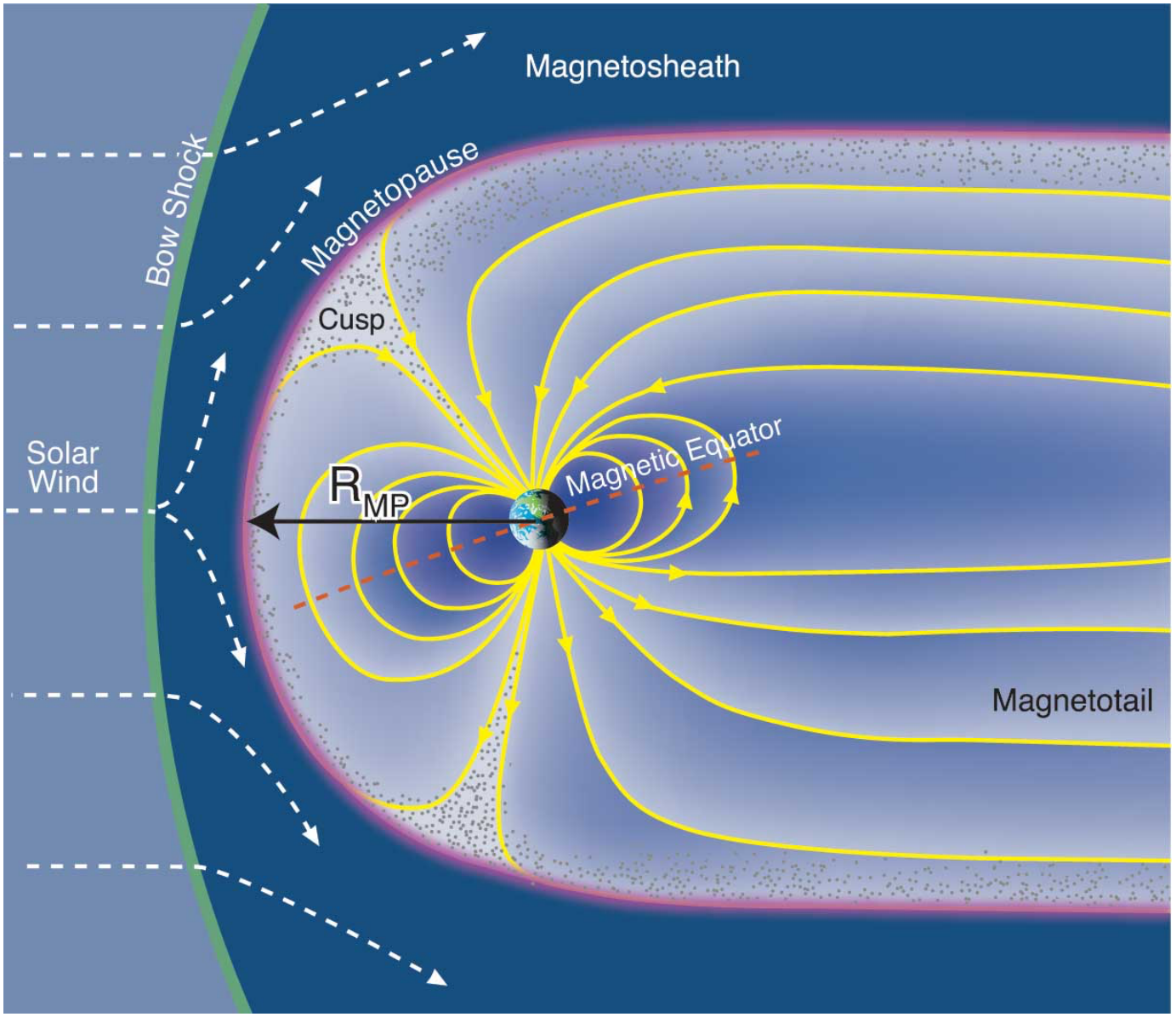
Etoile K (e.g. HD 189733)



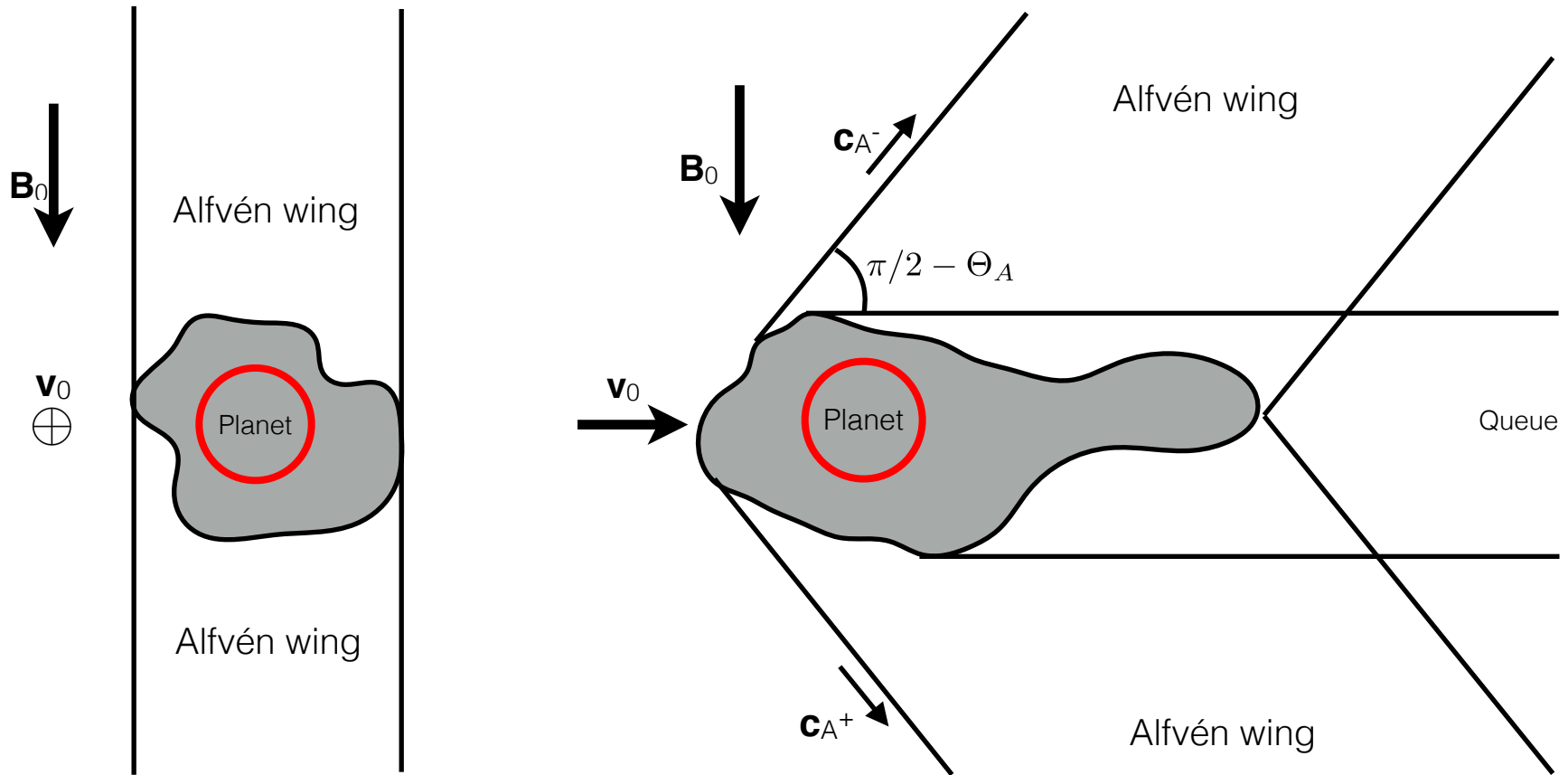
(modèle de vent Weber-Davis)



# Régime super-alfvénique: le cas de la Terre



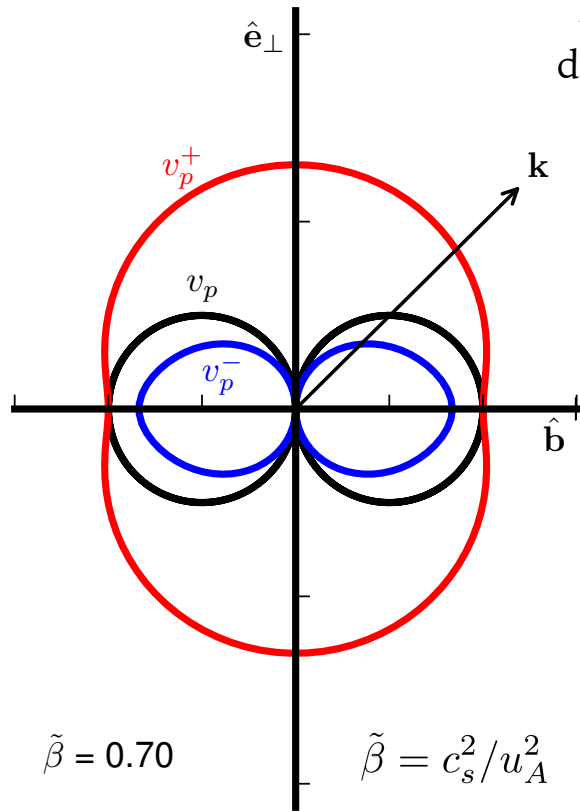
# Régime sub-alfvénique: le concept des ailes d'Alfvén



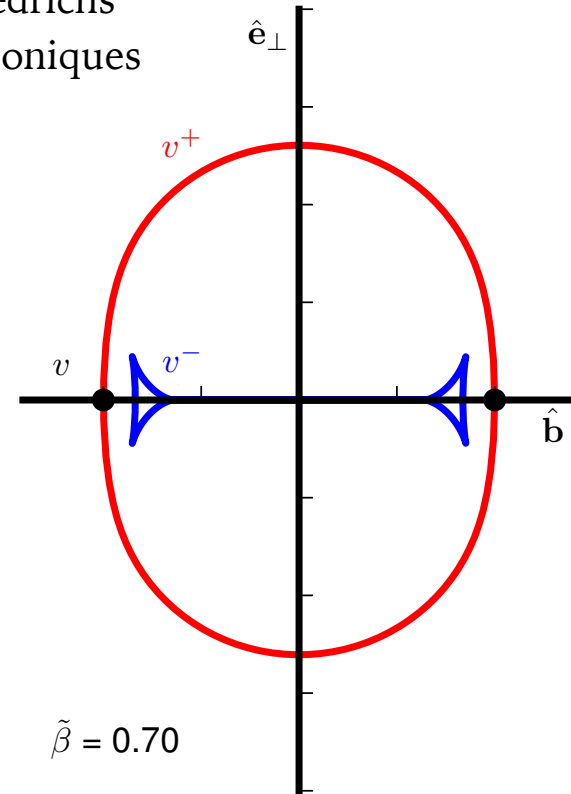
Les ailes sont en fait la superposition d'ondes d'Alfvén, dont la vitesse de groupe dégénérée leur permet de former une aile. Les ondes magnéto-soniques et lentes et rapides, quant à elles, se propagent dans toutes les directions et leur contribution moyenne est ainsi négligeable.

# Aparté sur les ondes magnéto-soniques (I)

Diagrammes de Friedrichs  
des ondes magnéto-soniques



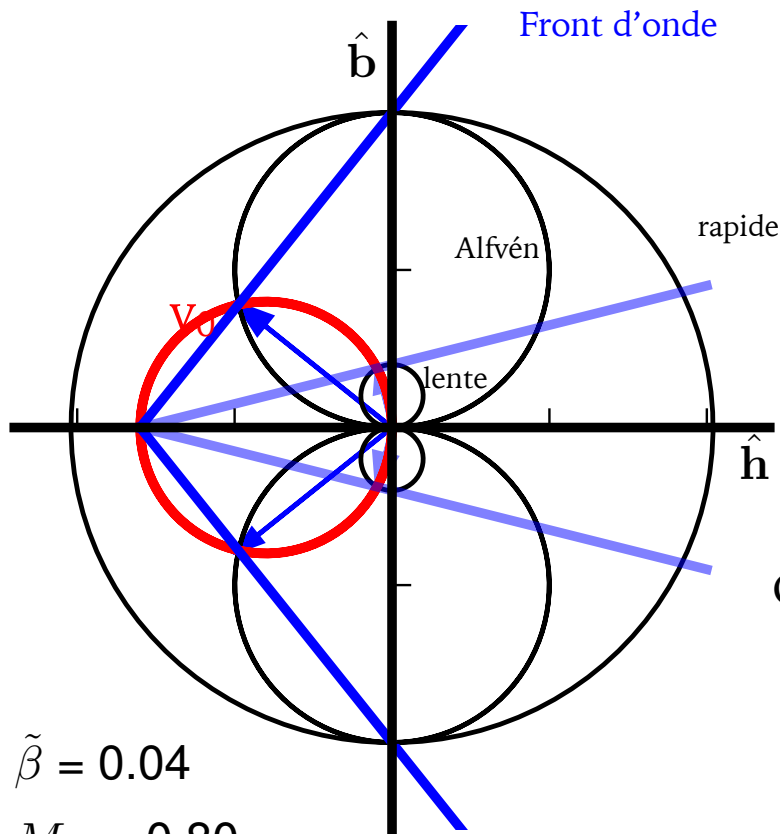
Vitesse de **phase** des ondes magnéto-soniques:  
pas de direction privilégiée



Vitesse de **groupe** des ondes magnéto-soniques:  
l'onde d'Alfvén pure est **dégénérée**, les paquets d'ondes se propagent selon **b** permettant une 'focalisation' de ceux-ci

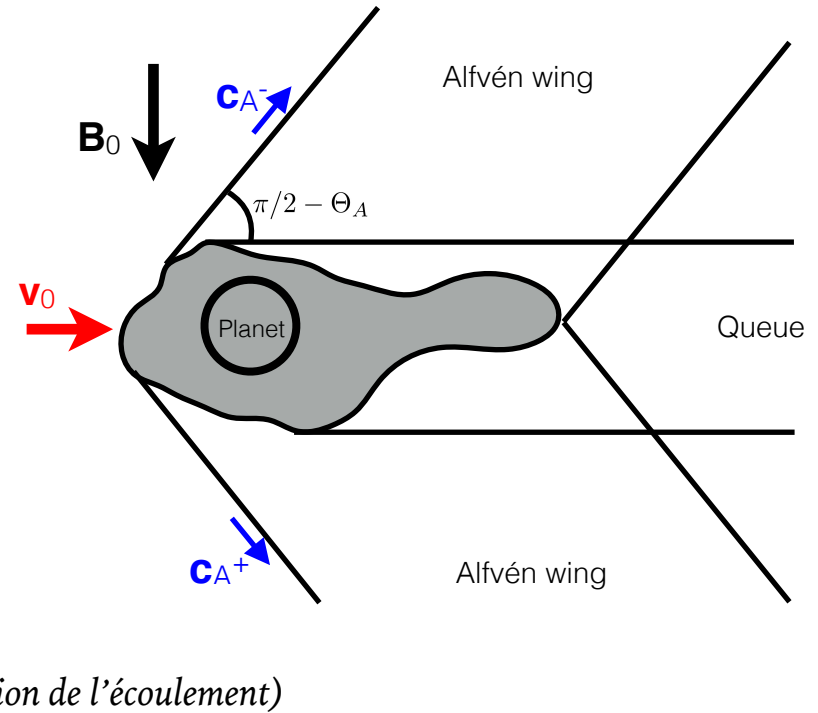
# Aparté sur les ondes magnéto-soniques (II)

Diagrammes de Friedrichs  
dans un repère où l'obstacle est au repos



$$\tilde{\beta} = 0.04$$

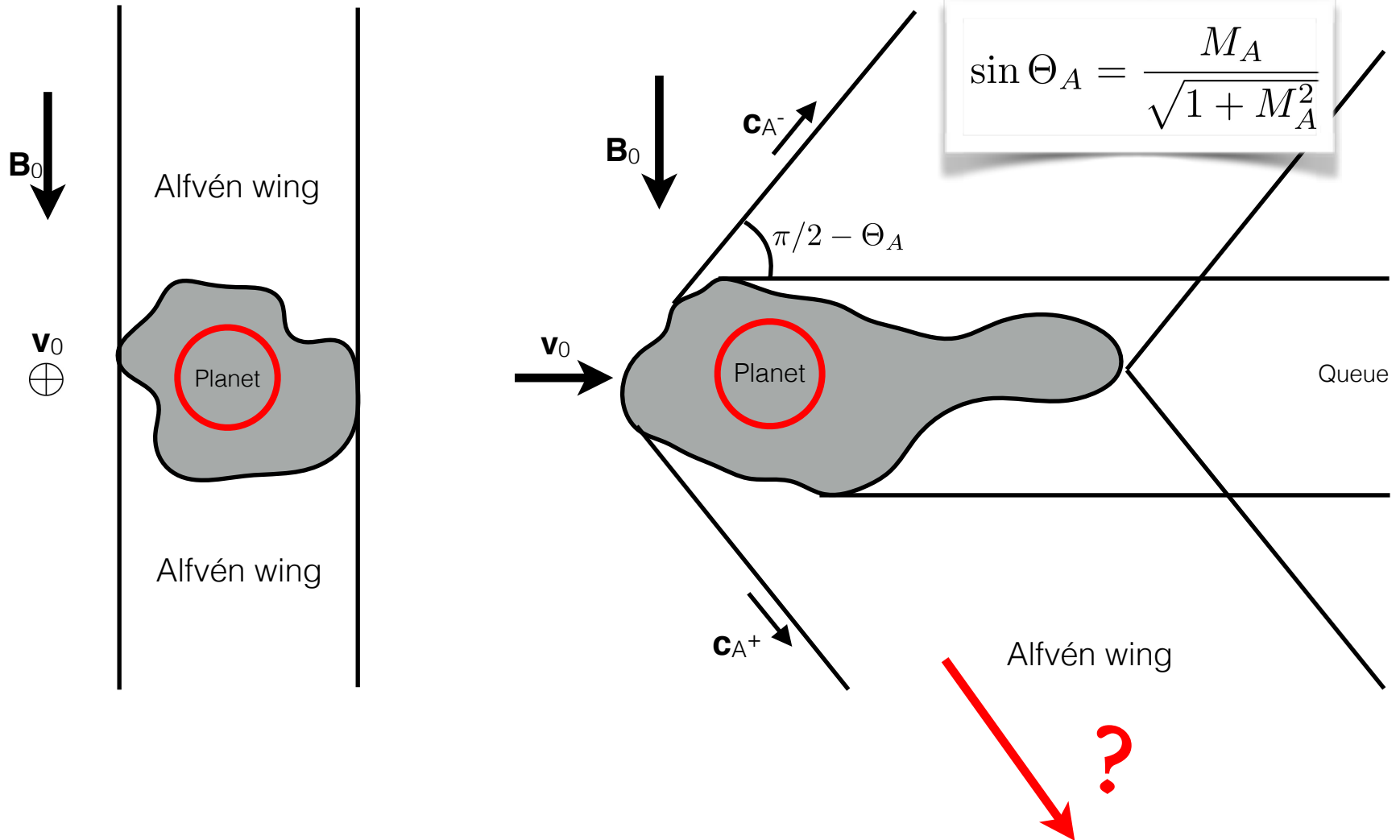
$$M_A = 0.80$$



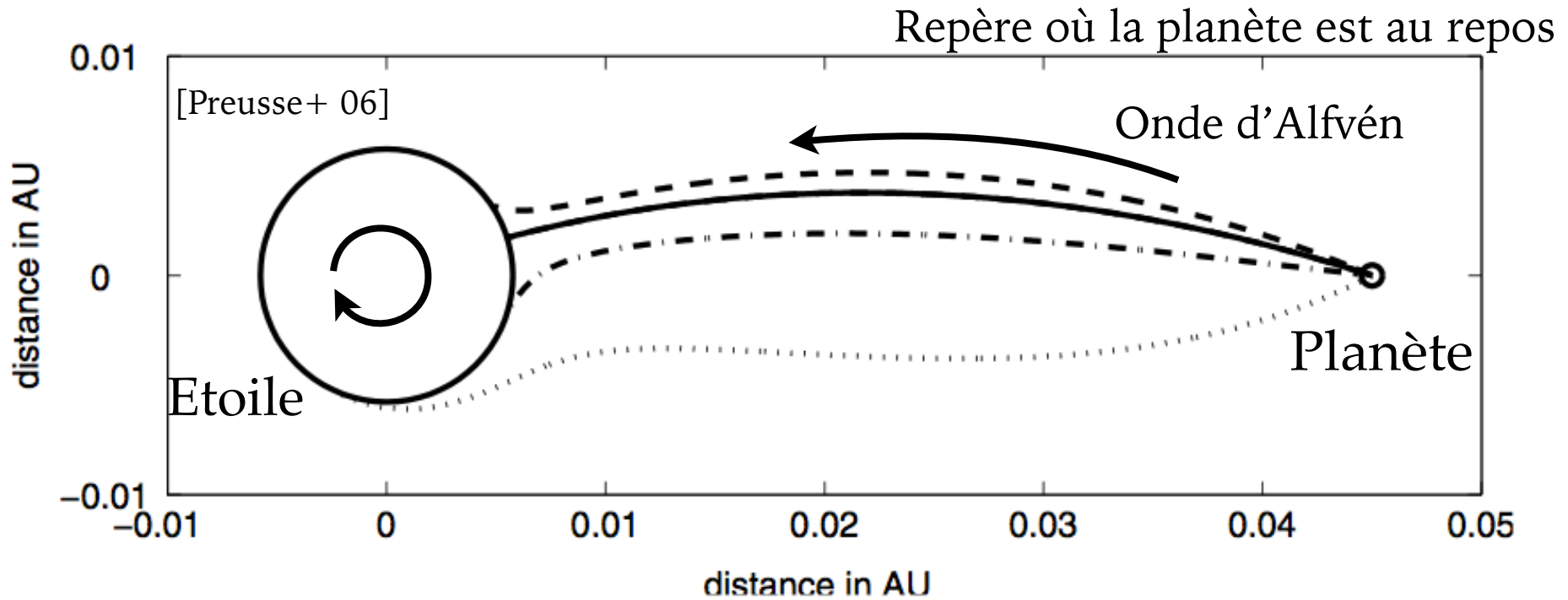
- Quels sont les ondes qui peuvent se propager:
- » **Magnéto-sonique rapide:** pas d'intersection ( $M_A < 1$ )
  - » **Magnéto-sonique lente:** la distribution de vitesse de groupe les rend faible à grande distance
  - » **Alfvén:** ok, se propagent selon  $c_A^\pm = v_0 \pm u_A$



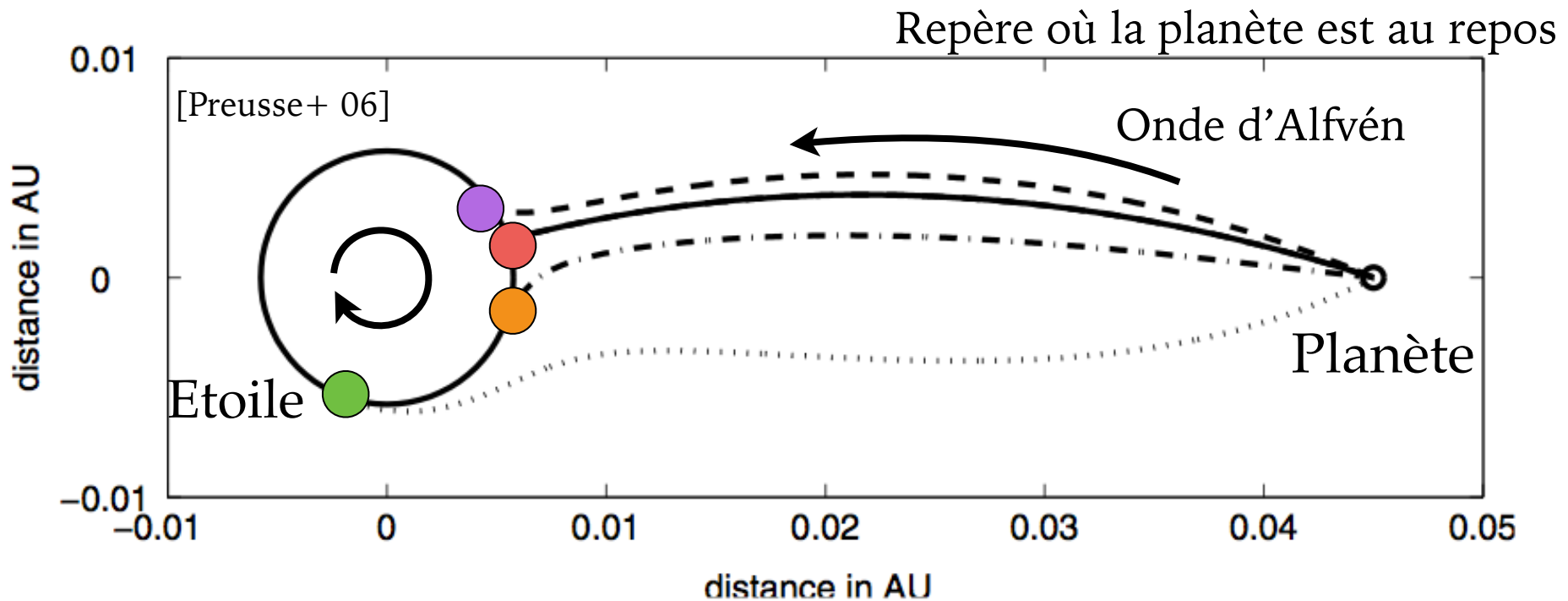
# Régime sub-alfvénique: le concept des ailes d'Alfvén



# Régime sub-alfvénique: connectivité magnétique!



# Régime sub-alfvénique: connectivité magnétique!



●  $P_{\text{orb}} = 12$  jours

●  $P_{\text{orb}} = 9$  jours

●  $P_{\text{orb}} = 6$  jours

●  $P_{\text{orb}} = 3$  jours

» Point d'impact peut être déphasé ( $\Delta\varphi$ )

»  $\Delta\varphi$  dépend fortement de **l'étoile**

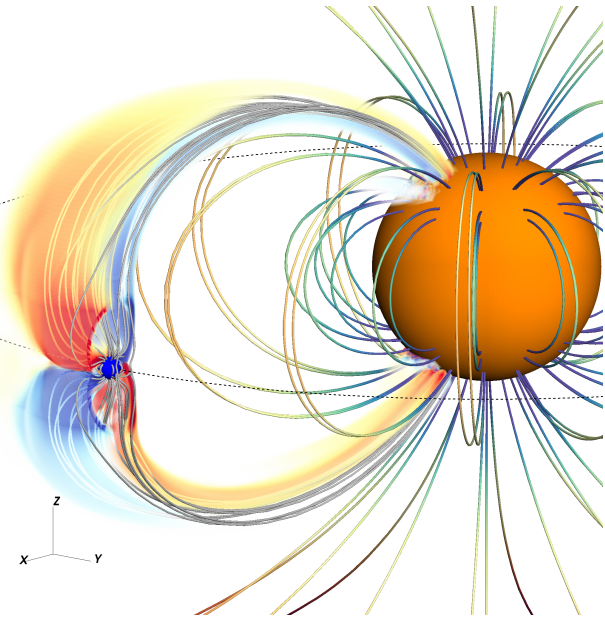
»  $B_{\star}$  (amplitude, topologie)

»  $T_{\text{couronne}}$  et vent stellaire

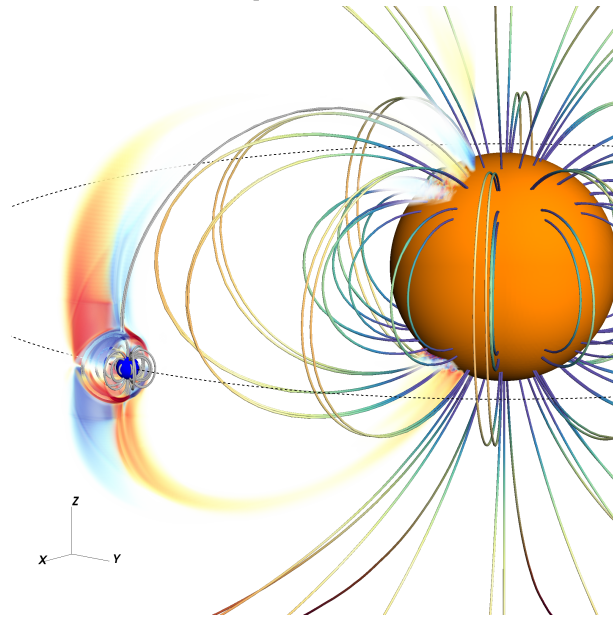
» Rotation

# Avec une topologie magnétique complexe...

Dipole stellaire

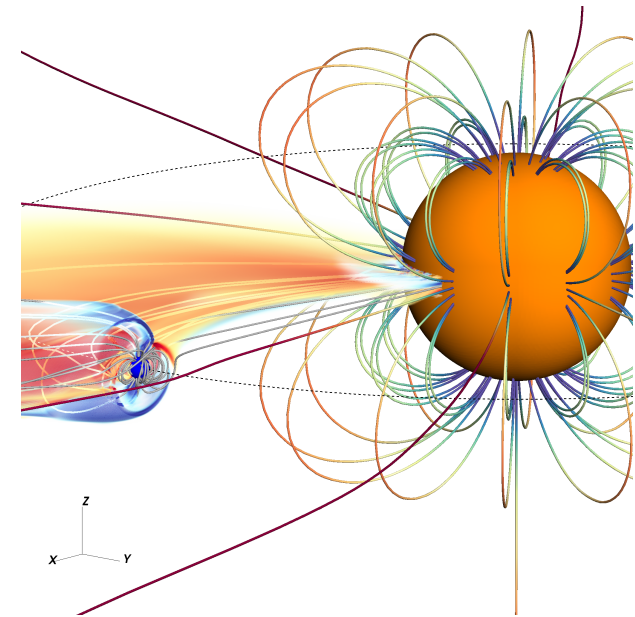


Deux ailes d'Alfvén fortes



Deux ailes d'Alfvén faibles

Quadrupole stellaire



Une aile d'Alfvén forte

Le pied de l'interaction est à une latitude et longitude particulière

Le pied de l'interaction est uniquement sur l'équateur, sur une bande de longitudes

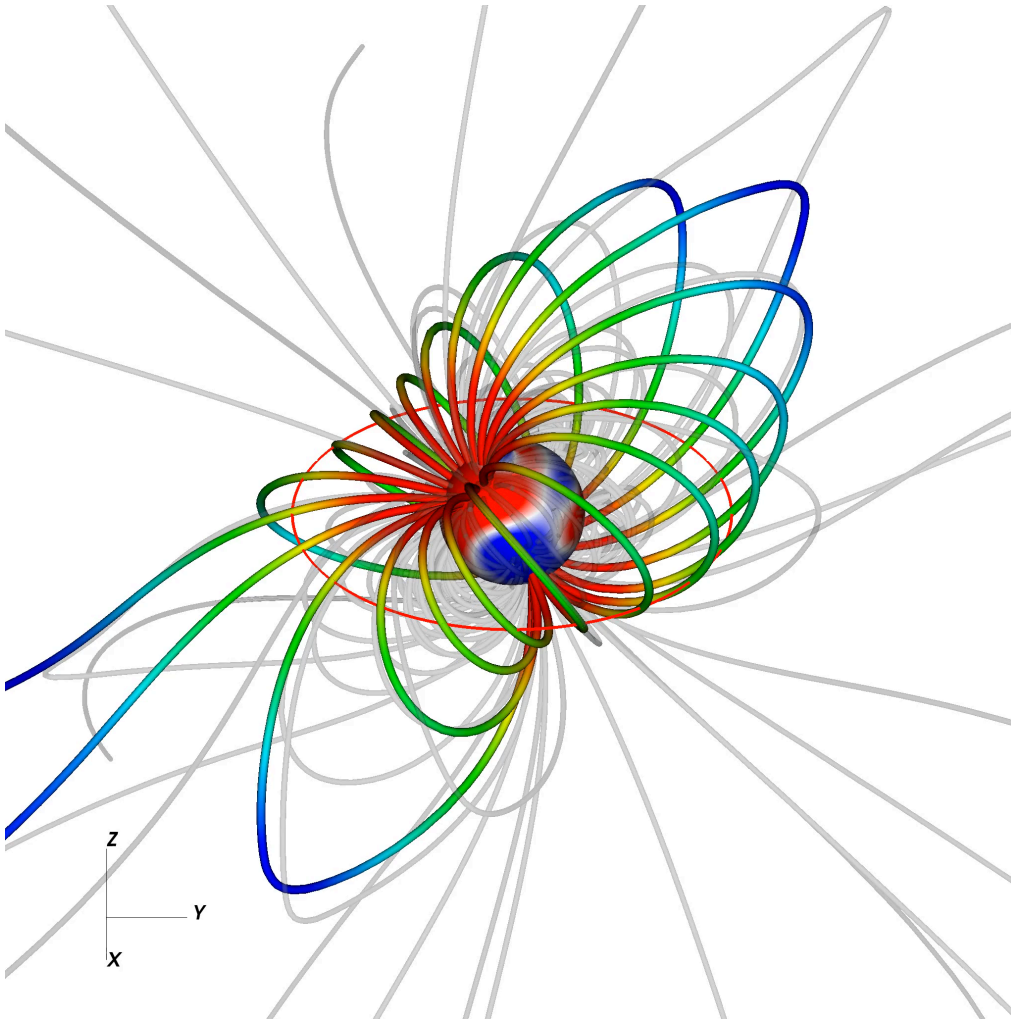
# Avec une topologie magnétique complexe... et réaliste

## Système Kepler-78

(avec J.F. Donati et C. Moutou)

### Paramètres stellaire et planétaire

$T_{\text{eff}}$ [K]	$5089 \pm 50$
$M_{\star}$ [ $M_{\odot}$ ]	$0.81 \pm 0.08$
$R_{\star}$ [ $R_{\odot}$ ]	$0.74 +0.1, -0.8$
$P_{\text{rot}}$ [days]	12.5
<hr/>	
$R_p$ [ $R_{\oplus}$ ]	$1.16 +0.19, -0.14$
$M_p^1$ [ $M_{\oplus}$ ]	$1.86 \pm 0.25$
$R_{\text{orb}}$ [ $R_{\star}$ ]	$3.0 +0.5, -1.0$



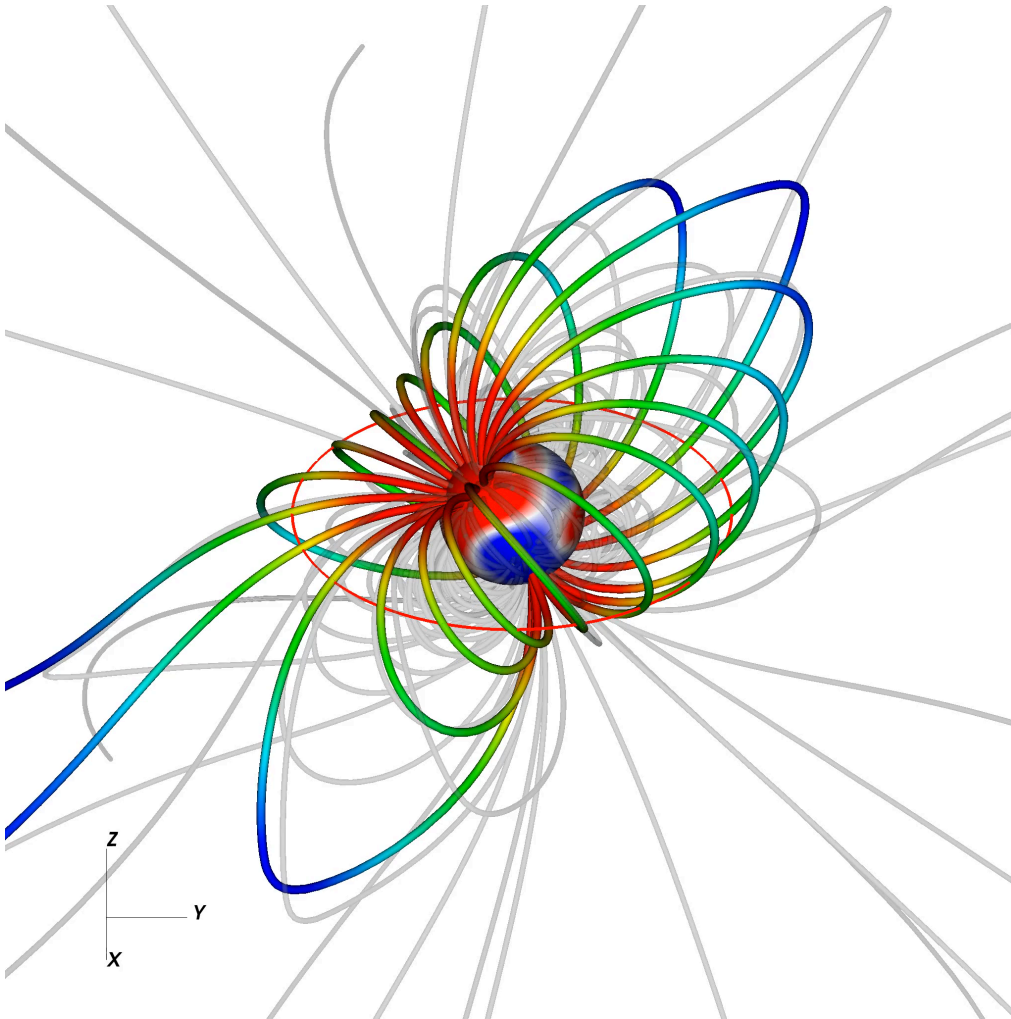
# Avec une topologie magnétique complexe... et réaliste

## Système Kepler-78

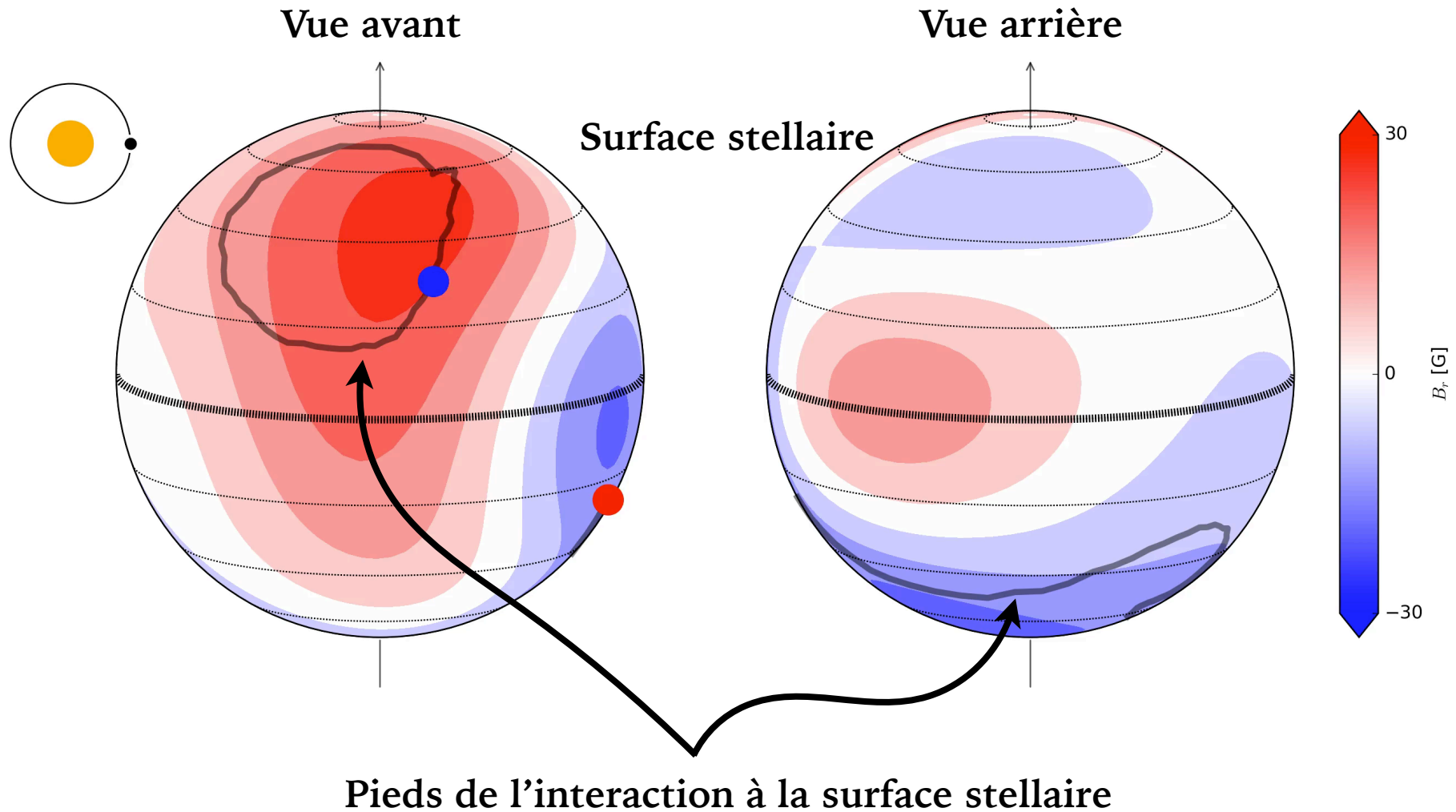
(avec J.F. Donati et C. Moutou)

### Paramètres stellaire et planétaire

$T_{\text{eff}}$ [K]	$5089 \pm 50$
$M_{\star}$ [ $M_{\odot}$ ]	$0.81 \pm 0.08$
$R_{\star}$ [ $R_{\odot}$ ]	$0.74 +0.1, -0.8$
$P_{\text{rot}}$ [days]	12.5
<hr/>	
$R_p$ [ $R_{\oplus}$ ]	$1.16 +0.19, -0.14$
$M_p^1$ [ $M_{\oplus}$ ]	$1.86 \pm 0.25$
$R_{\text{orb}}$ [ $R_{\star}$ ]	$3.0 +0.5, -1.0$



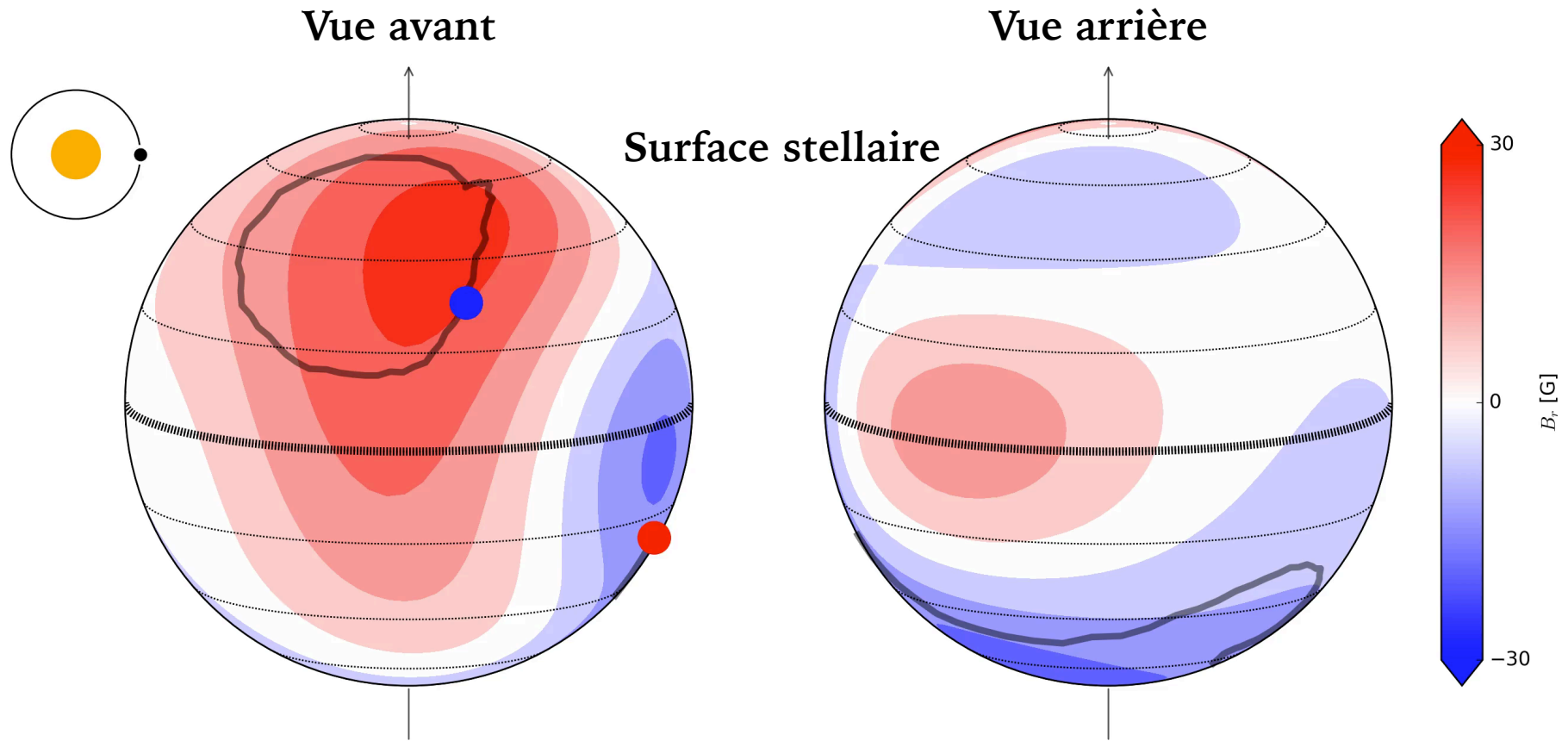
# Avec une topologie magnétique complexe... et réaliste



Fort potentiel avec les futurs spectro-polarimètres (e.g SPIRou)



# Avec une topologie magnétique complexe... et réaliste



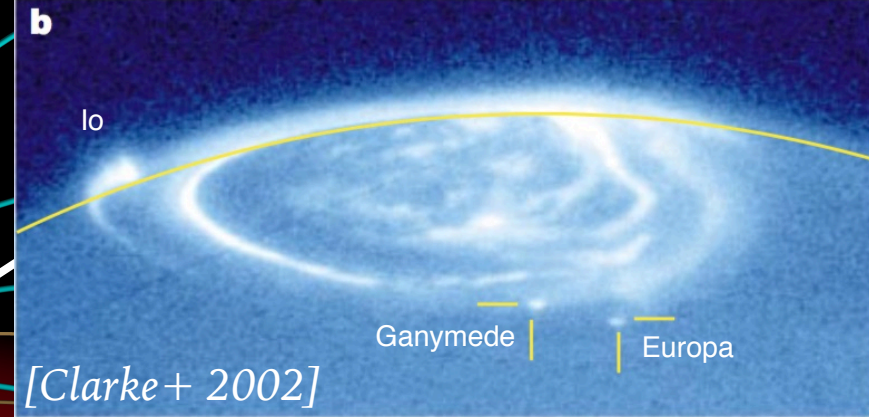
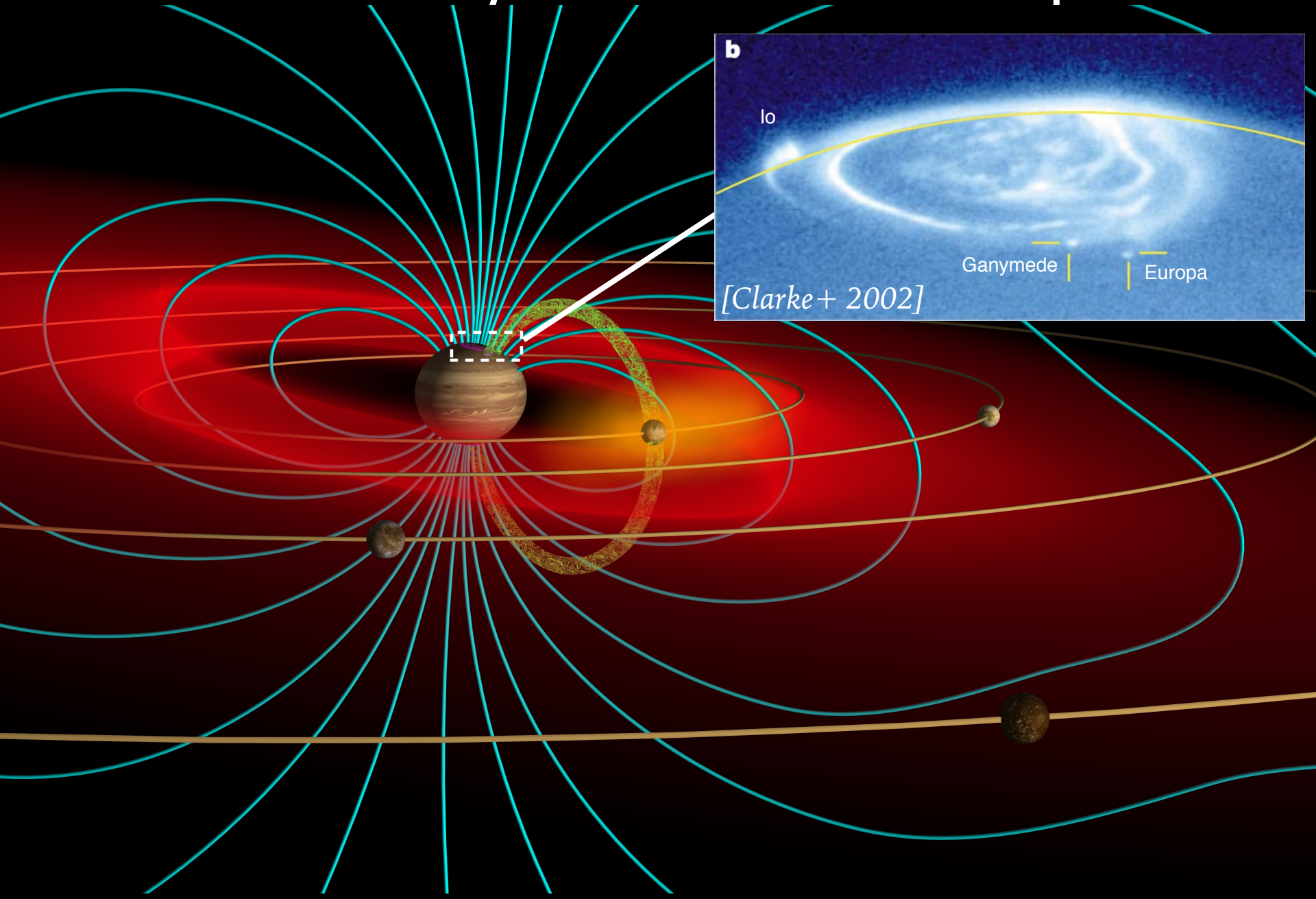
Fort potentiel avec les futurs spectro-polarimètres (e.g SPIRou)



# Quelques points à retenir sur l'interaction magnétique

- » Sa trace peut être **largement** déphasée de la position planétaire
- » En fait, elle n'est même **pas forcément directement corrélée** à la période orbitale de la planète
- » Elle est variable dans le temps du fait l'inhomogénéité du champ magnétique **stellaire** le long de l'orbite
- » Attendue pour des planètes dans la surface d'Alfvén, donc **très proches** de leur hôte

# Ailes d'Alfvén dans le système solaire: le cas de Jupiter



# Energétique de l'interaction magnétique

Flux d'énergie cinétique

$$P_c = \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) v A_{\text{obst}}$$

Flux de Poynting du milieu inter-planétaire

$$P_m = \frac{B_{\perp}^2}{2\mu_0} v A_{\text{obst}}$$

# Energétique de l'interaction magnétique

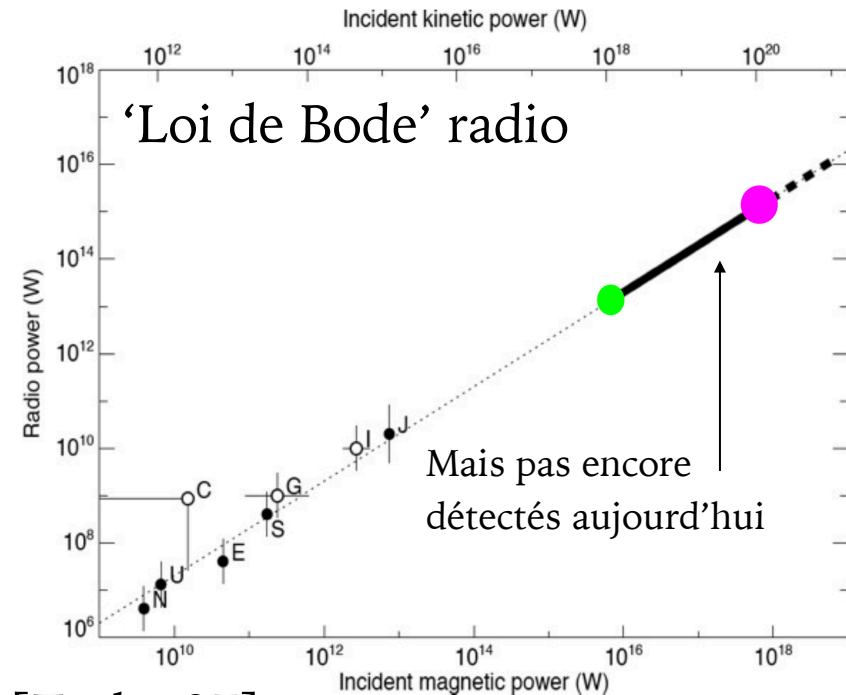
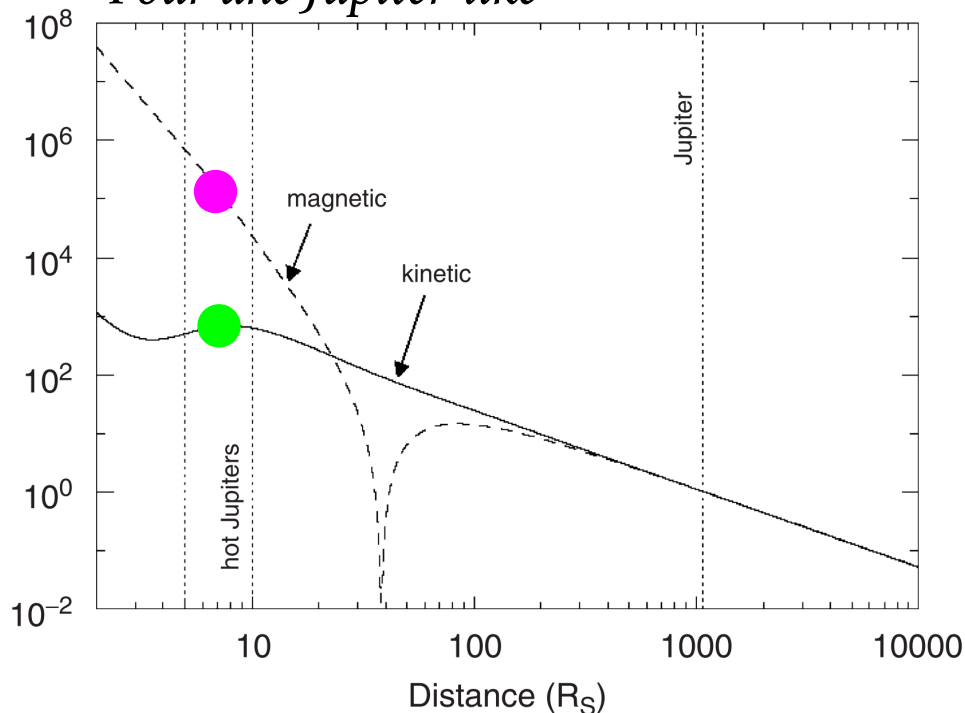
Flux d'énergie cinétique

$$P_c = \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) v A_{\text{obst}}$$

Flux de Poynting du milieu inter-planétaire

$$P_m = \frac{B_{\perp}^2}{2\mu_0} v A_{\text{obst}}$$

*Pour une Jupiter-like*



[Zarka 07]

# Energétique de l'interaction magnétique

Flux d'énergie cinétique

$$P_c = \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) v A_{\text{obst}}$$

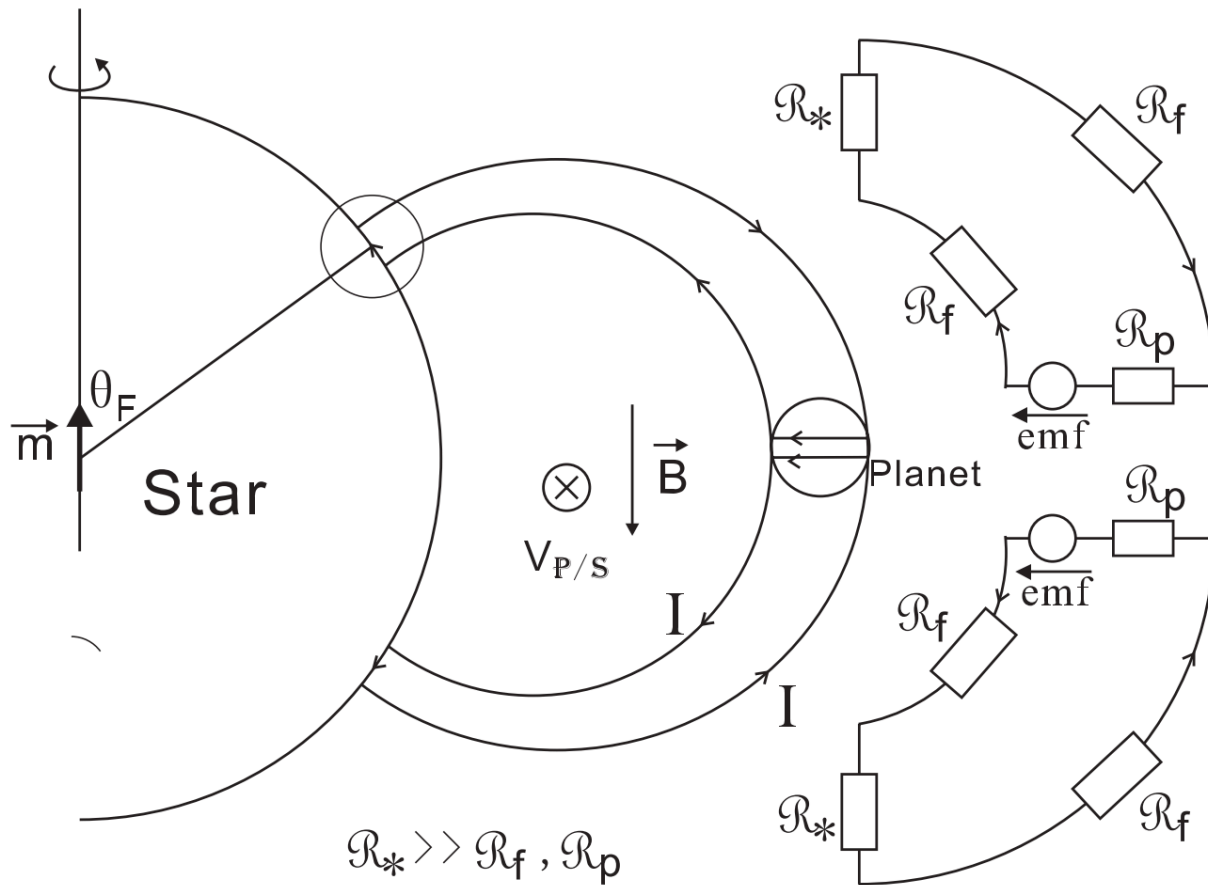
Flux de Poynting du milieu inter-planétaire

$$P_m = \frac{B_{\perp}^2}{2\mu_0} v A_{\text{obst}}$$

**Plusieurs questions non-triviales se posent alors:**

- » Quelle est la forme de l'obstacle (et que vaut  $A_{\text{obst}}$ )?
- » Quelle fraction de cette puissance est échangée/déviée par l'interaction?
- » A quelle énergie cela correspond-t-il?

# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag. Le cas unipolaire



Hypothèses principales:

- » Champ magnétique planétaire **négligeable**
- » La résistance  $\Sigma$  au pied de l'interaction (surface stellaire) est **plus grande** que dans la planète (i.e. la conductivité est plus forte dans la planète)

On peut alors déduire le couple appliqué à l'étoile (et à l'orbite planétaire):

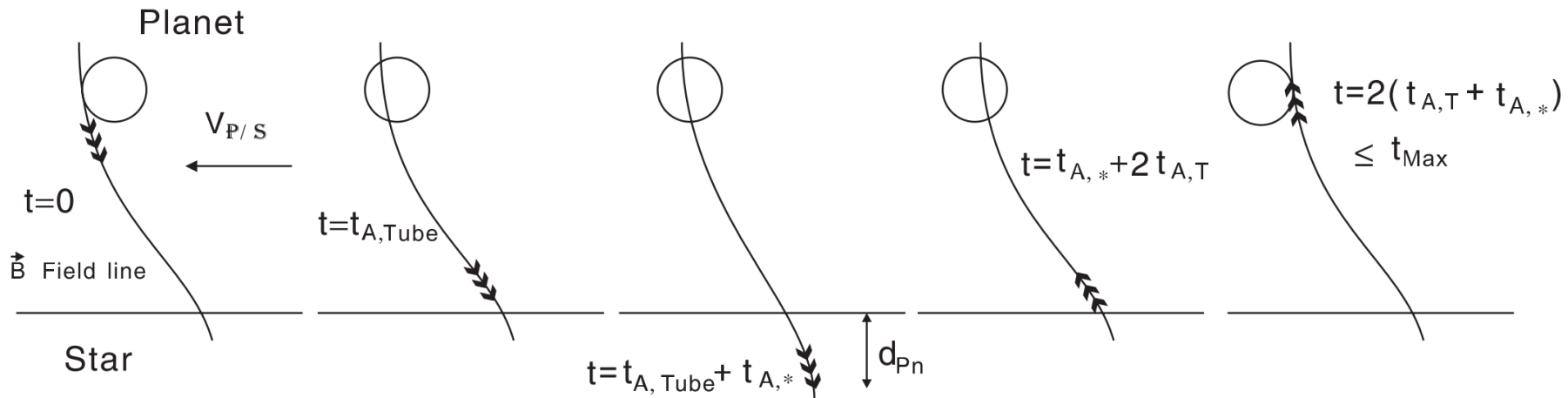
$$\mathcal{T}_* = 8R_P^2 R_{orb}^2 \sigma B_w^2 \Sigma$$

[Laine & Lin 2008]

# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag. Le cas unipolaire

Pour que le modèle soit complètement valide, le système de courant doit être **fermé**.

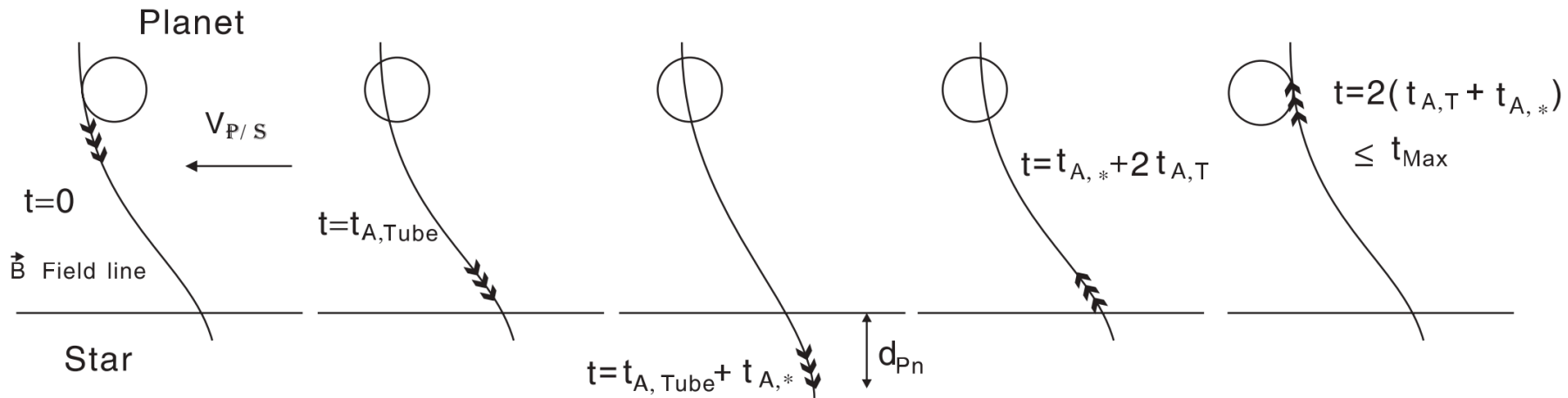
[Laine & Lin 2008]



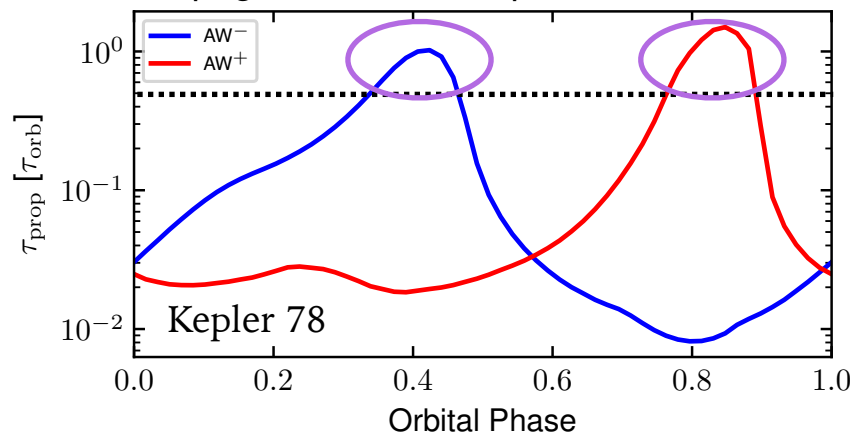
# Obstacle and conversion of energy in the magnetic interaction. The unipolar case

For the model to be completely valid, the current system must be **closed**.

[Laine & Lin 2008]



Propagation time from planet to star

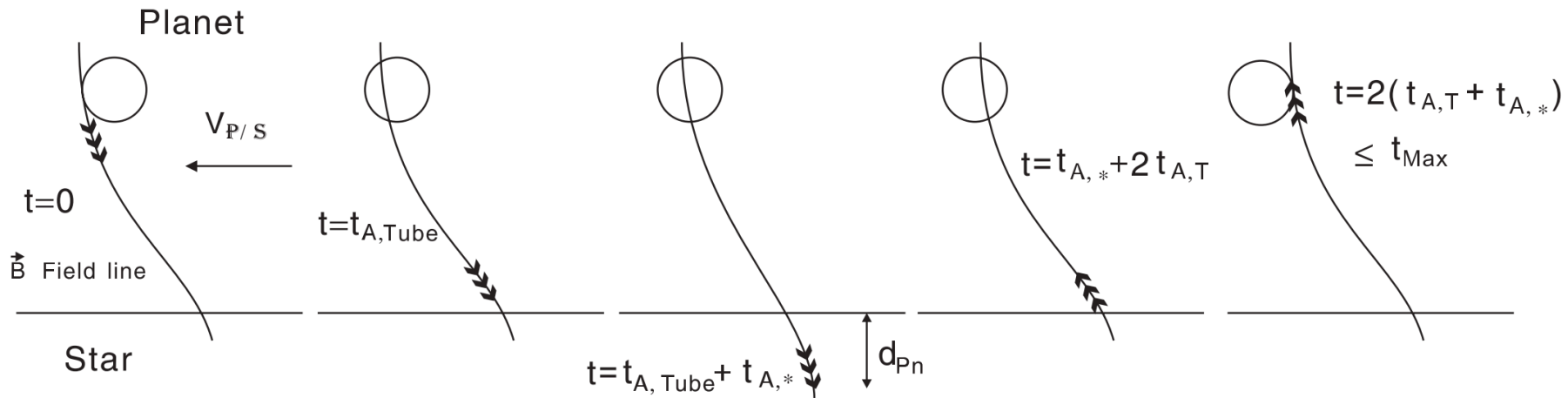




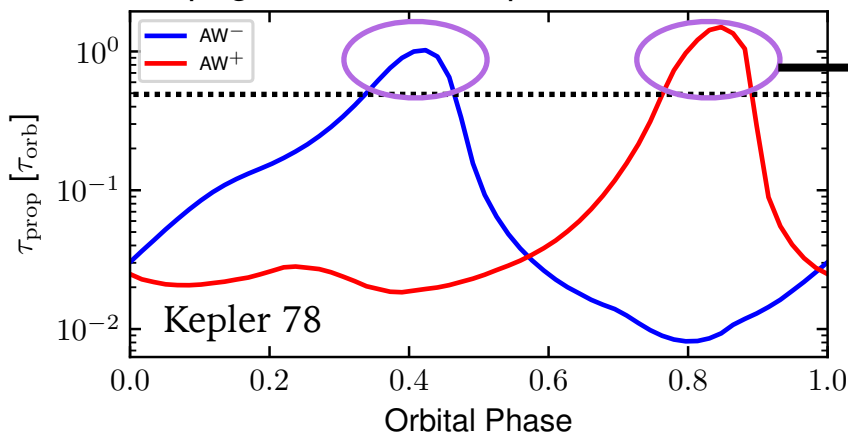
# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag. Le cas unipolaire

Pour que le modèle soit complètement valide, le système de courant doit être **fermé**.

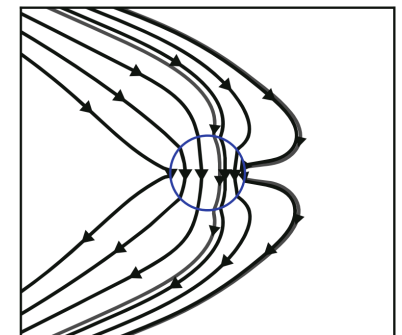
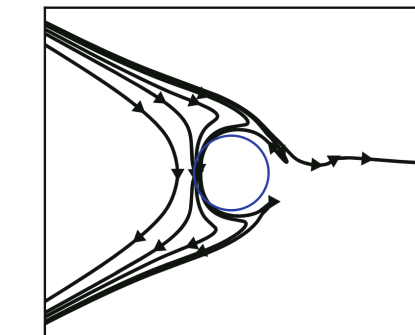
[Laine & Lin 2008]



Propagation time from planet to star

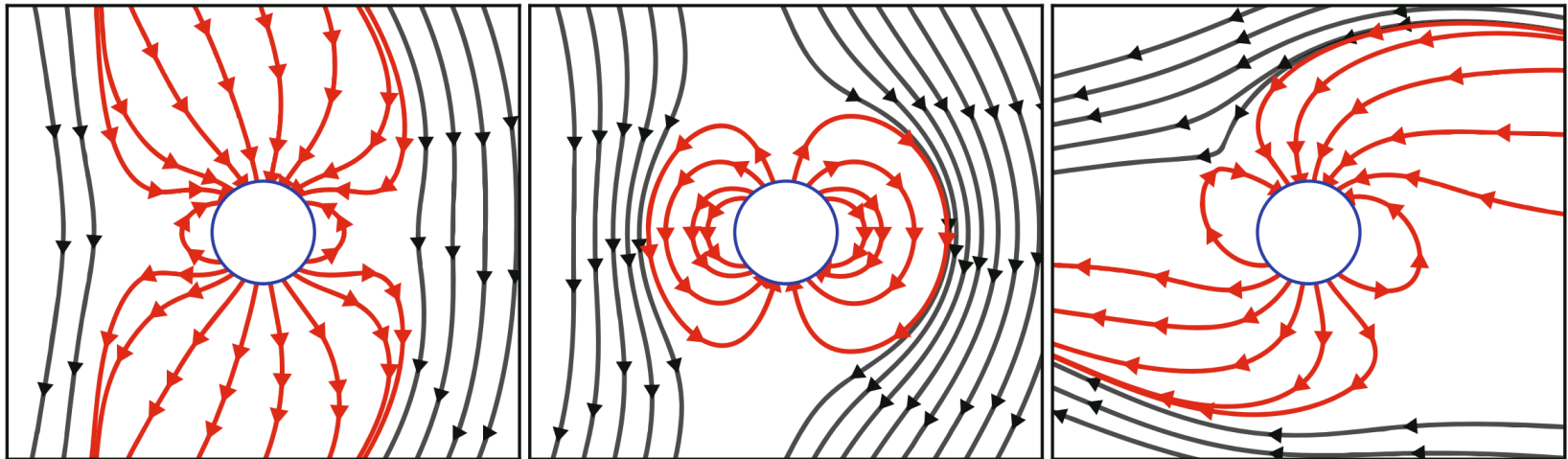


Deux situations sont alors possibles



# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag. Le cas dipolaire

Et si le champ magnétique planétaire ne peut pas être négligé?



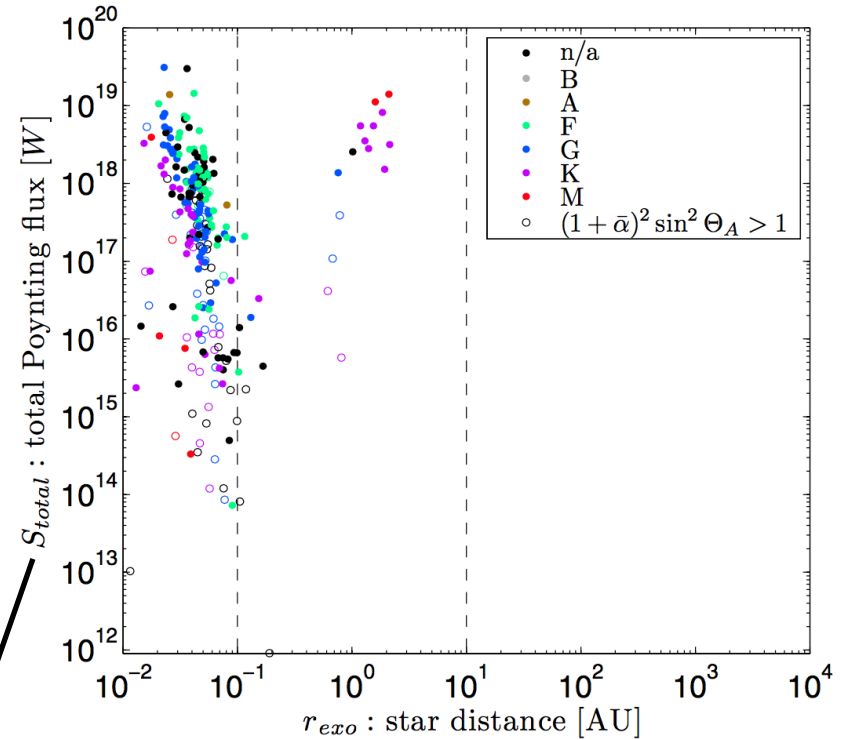
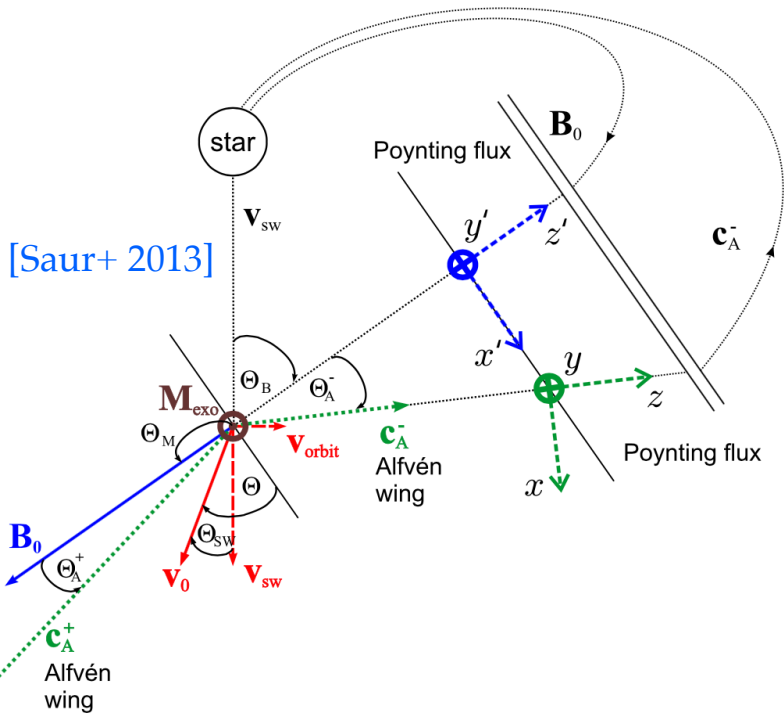
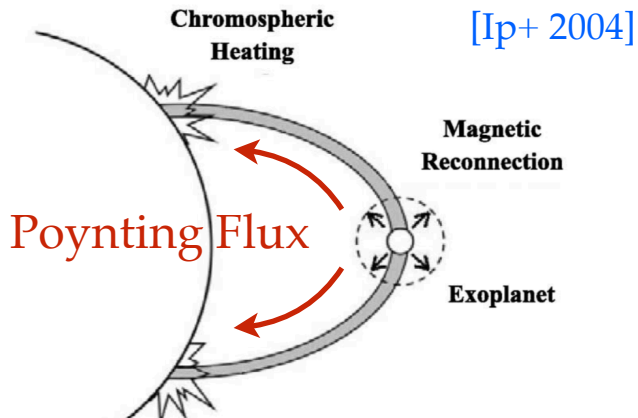
Aligné

Anti-aligné

Perpendiculaire

# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag.

## Le cas dipolaire

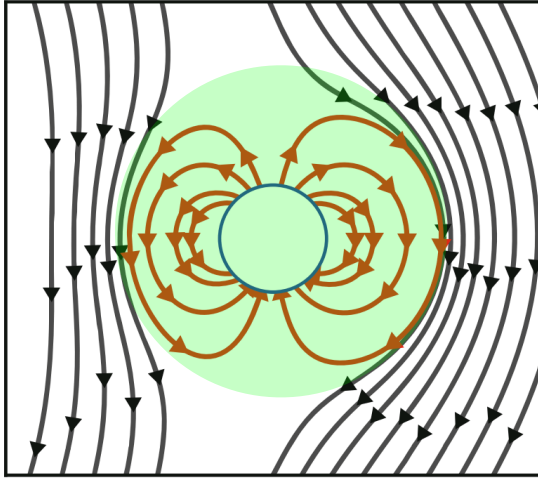


$$S_{total} = \left\langle \int S_A d\Sigma_{wing} \right\rangle_A$$

$$\left( S_a = \frac{c\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{c}_A^\pm}{|\mathbf{c}_A^\pm|} \right)$$

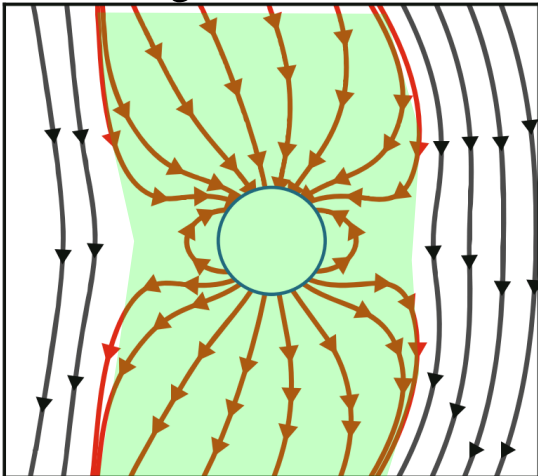
# Obstacle et conversion d'énergie dans l'interaction mag. Le cas dipolaire

Cas anti-aligné



$$R_{\text{obst}} = R_P \left( \frac{B_P^2}{8\pi P_t} \right)^{1/6}$$

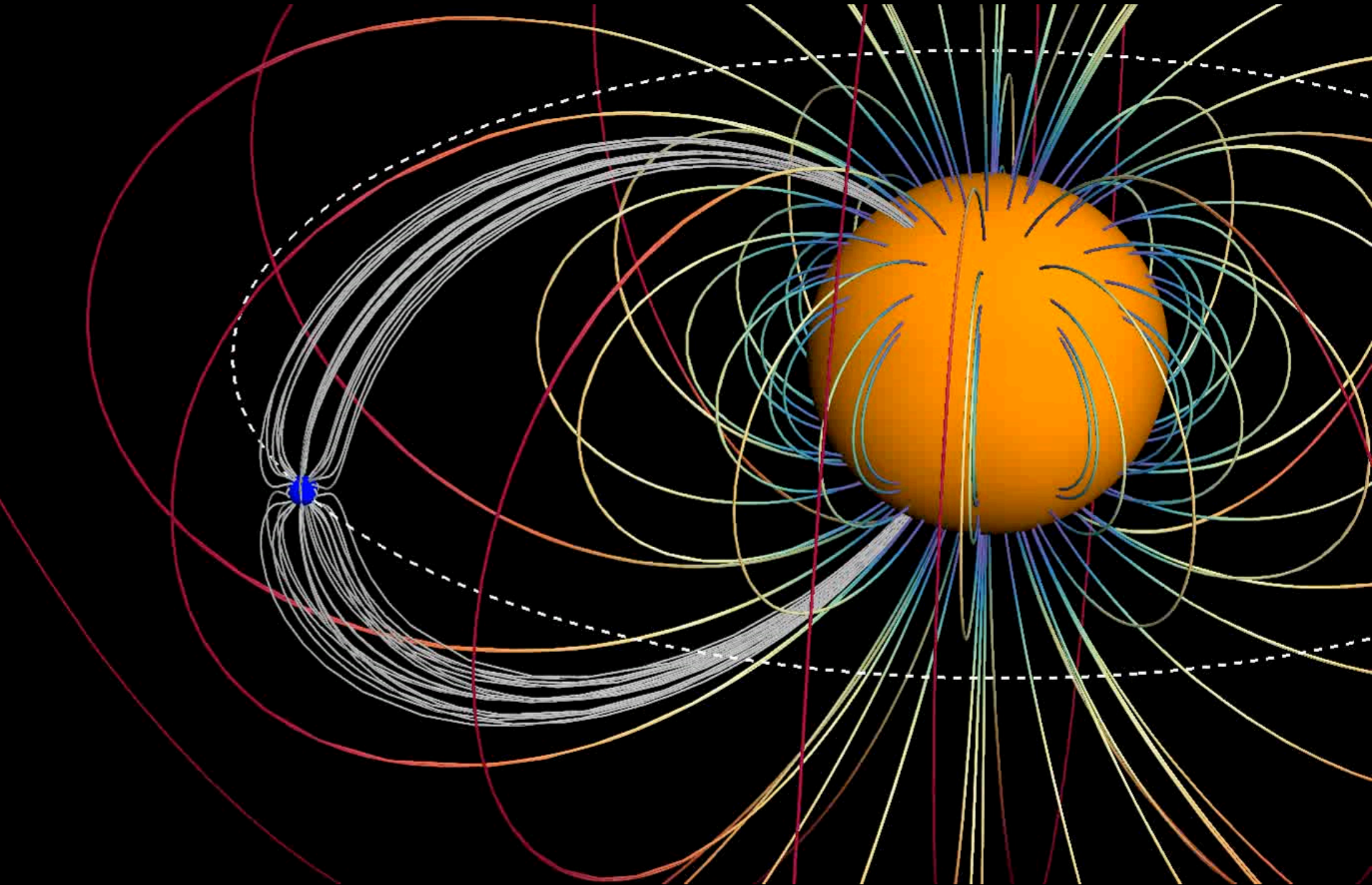
Cas aligné



L'obstacle peut être beaucoup plus grand,  
beaucoup plus d'énergie peut être mise en jeu

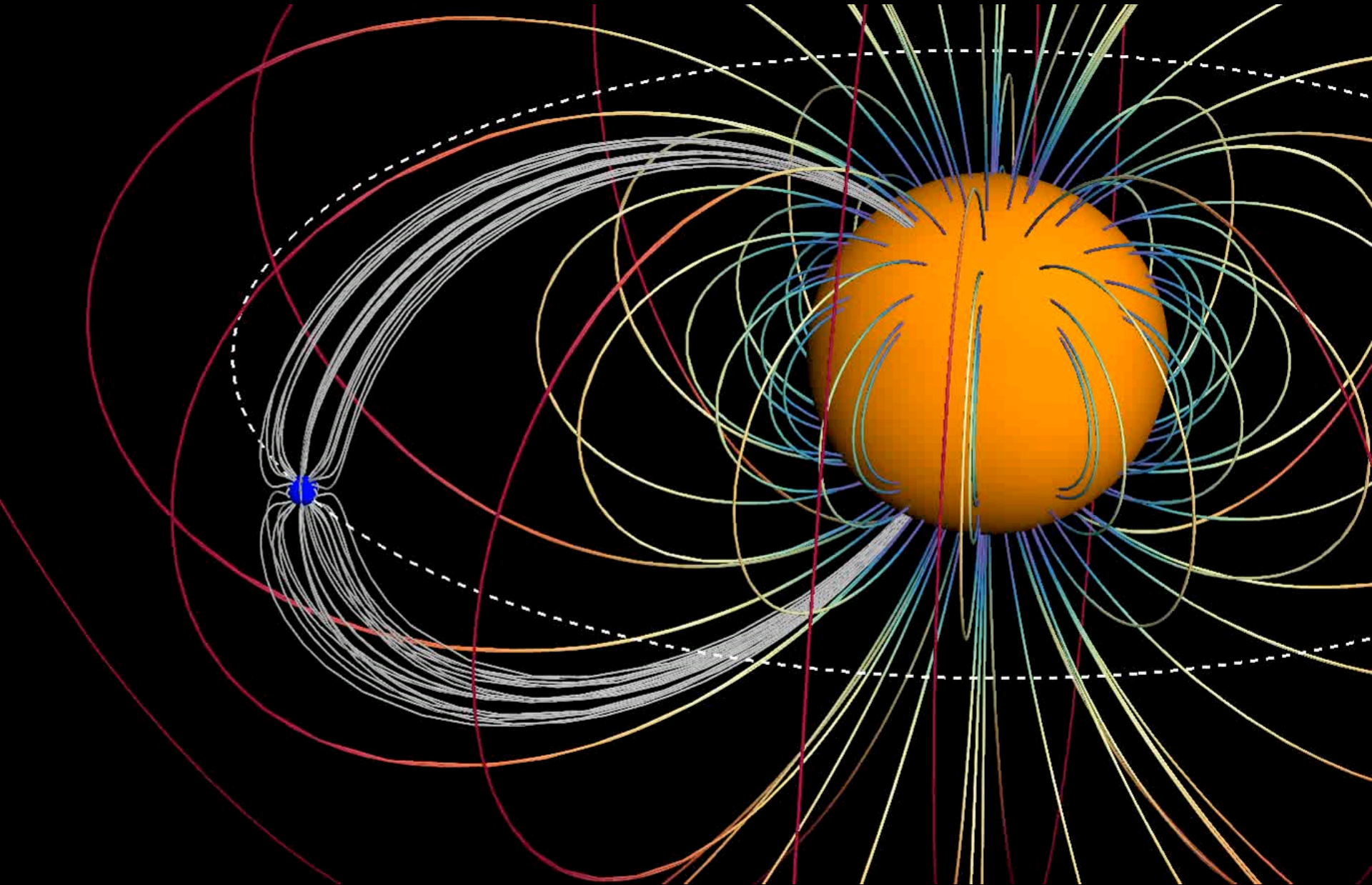
-> possible à contraindre à l'aide de  
simulation numériques

# Modèle 3D de l'interaction magnétique étoile planète



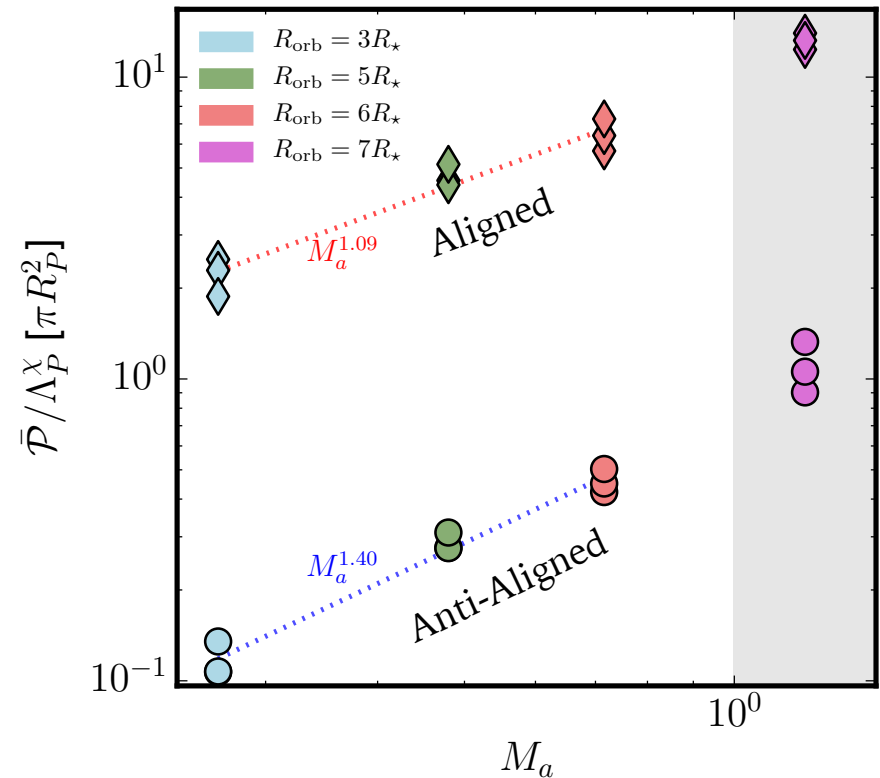


# Modèle 3D de l'interaction magnétique étoile planète



# Paramétrer l'interaction magnétique: le flux de Poynting

$$\mathcal{P} = A_1 \pi \left( c_d S_w M_a^\xi \bar{\eta}_a^{\nu^3} \right) \cdot \left( R_P^2 \bar{\eta}_P^{\nu^4} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\chi \right)$$

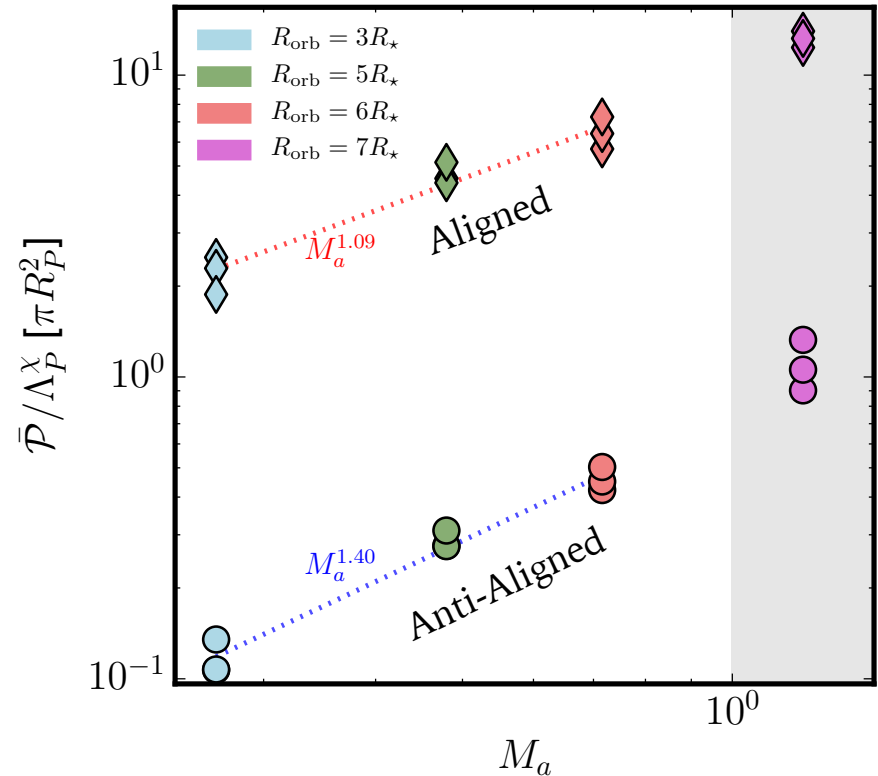


[Strugarek 2016]

# Paramétrer l'interaction magnétique: le flux de Poynting

$$\mathcal{P} = A_1 \pi \left( \underbrace{c_d}_{\text{drag coeff.}} \underbrace{S_w}_{\text{Alf. Mach}} M_a^\xi \bar{\eta}_a^{\nu^3} \right) \cdot \left( R_P^2 \bar{\eta}_P^{\nu^4} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\chi \right)$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)



[Strugarek 2016]

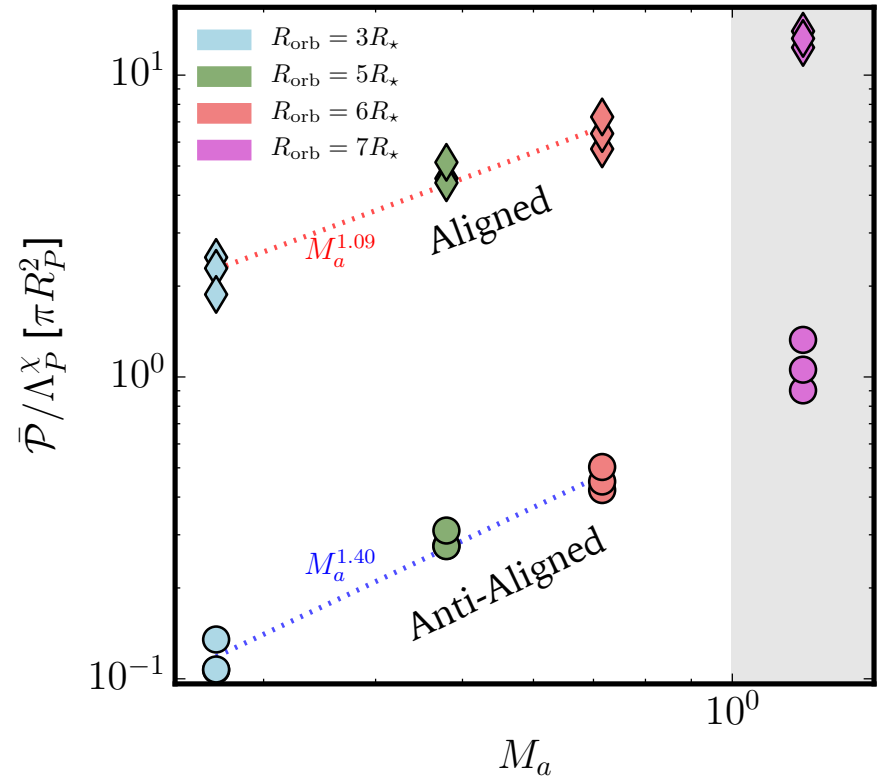


# Paramétrer l'interaction magnétique: le flux de Poynting

$$\mathcal{P} = A_1 \pi \left( \underbrace{c_d}_{\text{drag coeff.}} \underbrace{S_w}_{\text{Alf. Mach}} M_a^\xi \bar{\eta}_a^{\nu^3} \right) \cdot \left( R_P^2 \bar{\eta}_P^{\nu^4} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\chi \right)$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)

Paramètres dépendant de la planète  
(rayon, composition)



[Strugarek 2016]

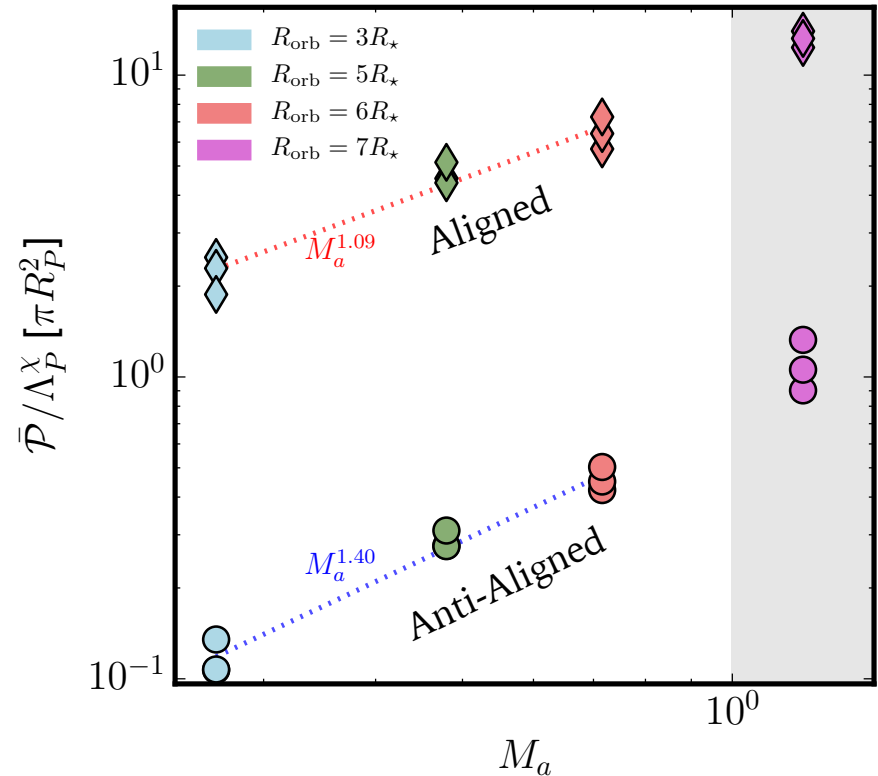
# Paramétrer l'interaction magnétique: le flux de Poynting

$$\mathcal{P} = A_1 \pi \left( \underbrace{c_d}_{\text{drag coeff.}} \underbrace{S_w}_{\text{Alf. Mach}} M_a^\xi \bar{\eta}_a^{\nu 3} \right) \cdot \left( R_P^2 \bar{\eta}_P^{\nu 4} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\chi \right)$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)

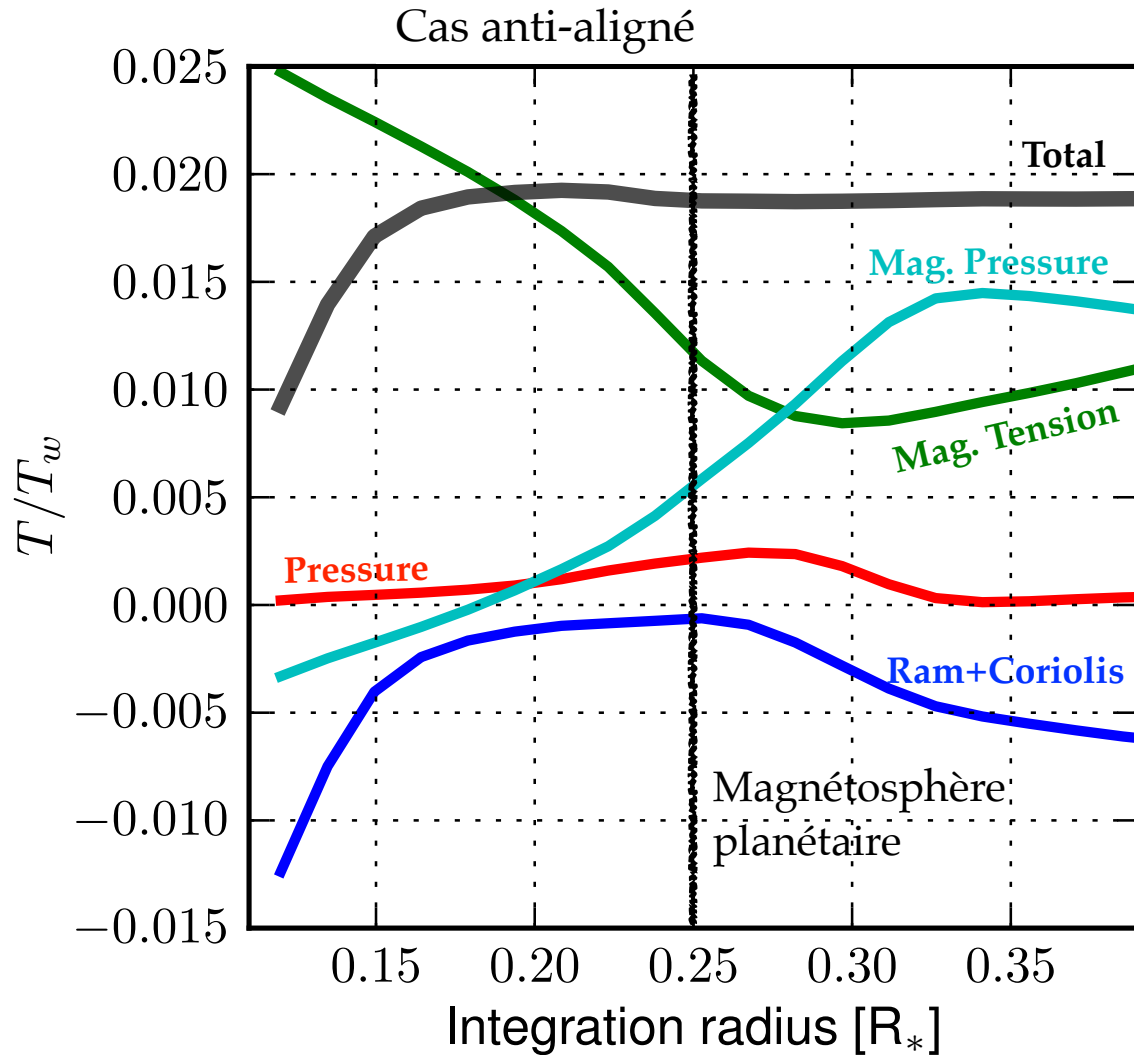
Paramètres dépendant de la planète  
(rayon, composition)

Equilibre magnétosphère-vent  
(**champ planétaire**, vent)

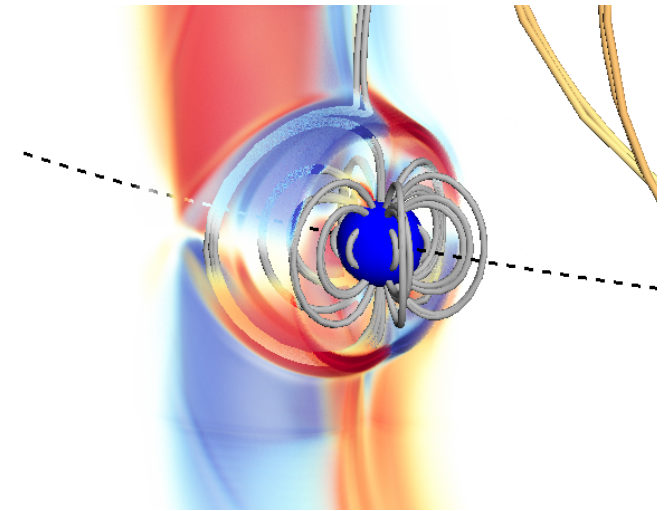


[Strugarek 2016]

# Migration magnétique: couple dans le cas dipolaire



Les deux termes magnétiques dominant clairement le bilan de moment cinétique orbital

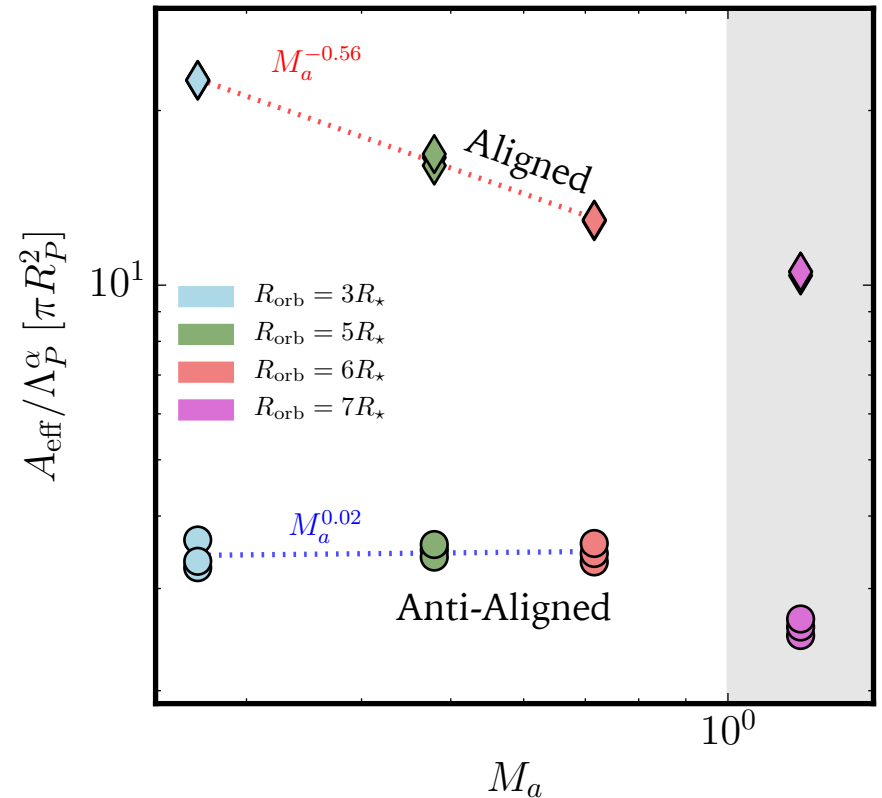


Pour une T-Tauri standard ( $\dot{M} \sim 10^5 \dot{M}_{\text{sun}}$ ),  $\tau_{\text{mig}} \sim 10\text{-}100 \text{ Myr}$

[Strugarek 2016]

# Paramétrer l'interaction magnétique: le couple magnétique

$$|\Gamma_M| = A_0 \pi \left( c_d P_t M_a^\beta \bar{\eta}_a^{\nu_1} \right) \cdot \left( R_P^2 R_o \bar{\eta}_P^{\nu_2} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\alpha \right)$$

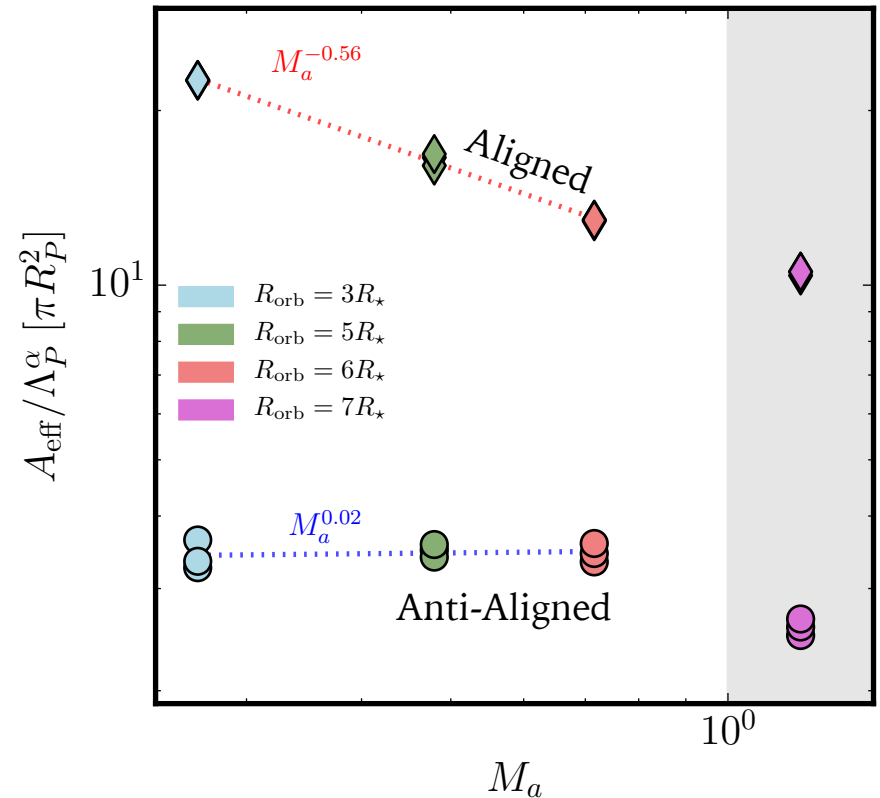


[Strugarek 2016]

# Paramétrer l'interaction magnétique: le couple magnétique

$$|\Gamma_M| = A_0 \pi \left( \underbrace{c_d}_{\text{drag coeff.}} \underbrace{P_t}_{\text{Pression total}} \underbrace{M_a^\beta}_{\text{Alf. Mach}} \bar{\eta}_a^{\nu_1} \right) \cdot \left( R_P^2 R_o \bar{\eta}_P^{\nu_2} \right) \cdot \left( \Lambda_P^\alpha \right)$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)



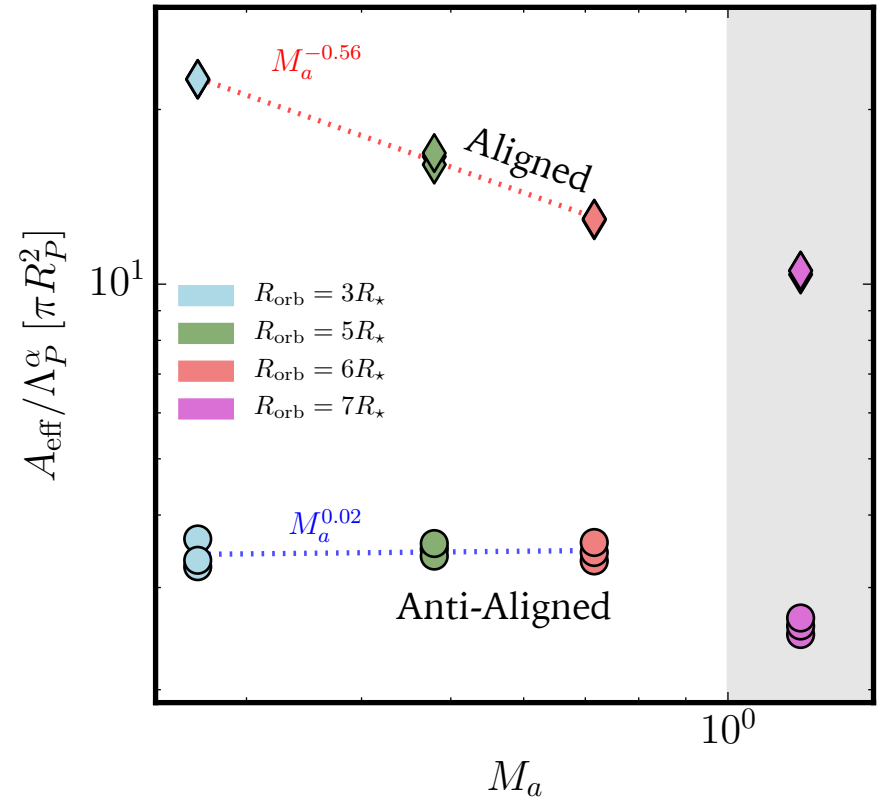
[Strugarek 2016]

# Paramétrer l'interaction magnétique: le couple magnétique

$$|\Gamma_M| = A_0 \pi \underbrace{\left( c_d P_t M_a^\beta \bar{\eta}_a^{\nu_1} \right)}_{\substack{\text{drag coeff.} \\ \text{Alf. Mach}}} \cdot \underbrace{\left( R_P^2 R_o \bar{\eta}_P^{\nu_2} \right)}_{\substack{\text{Reconnection eff.} \\ \text{Orbite Pedersen diff.}}} \cdot \left( \Lambda_P^\alpha \right)$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)

Paramètres dépendant de la planète  
(rayon, orbite, composition)



[Strugarek 2016]

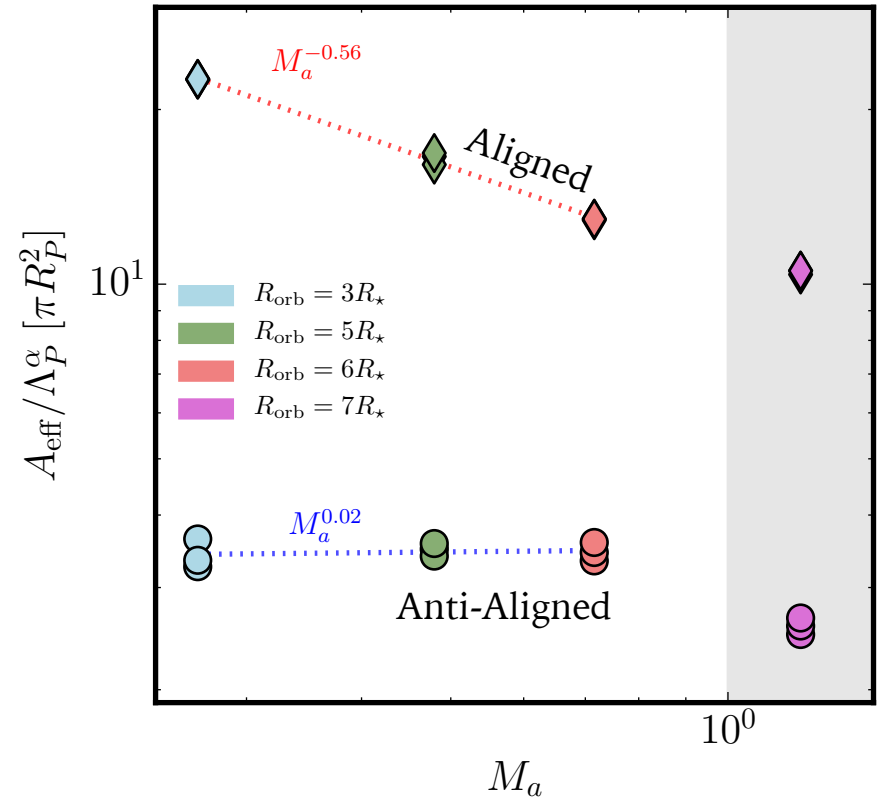
# Paramétrer l'interaction magnétique: le couple magnétique

$$|\Gamma_M| = A_0 \pi \underbrace{\left( c_d P_t M_a^\beta \bar{\eta}_a^{\nu_1} \right)}_{\substack{\text{drag coeff.} \\ \text{Alf. Mach}}} \cdot \underbrace{\left( R_P^2 R_o \bar{\eta}_P^{\nu_2} \right)}_{\substack{\text{Reconnection eff.} \\ \text{Orbite}}} \cdot \underbrace{\left( \Lambda_P^\alpha \right)}_{\text{Pedersen diff.}}$$

Paramètres dépendant de l'étoile  
(champ magnétique, densité, vitesse)

Paramètres dépendant de la planète  
(rayon, orbite, composition)

Equilibre magnétosphère-vent  
(**champ planétaire**, vent)



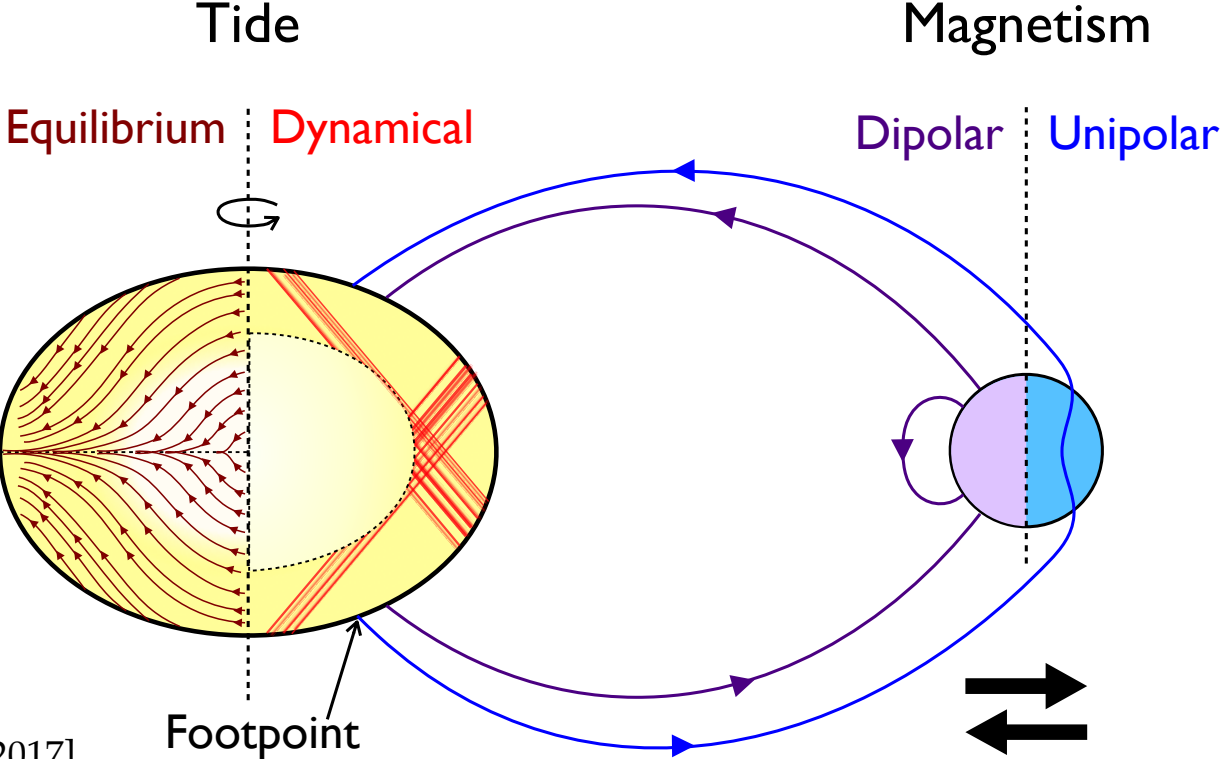
[Strugarek 2016]



**Interactions étoile-planète:  
évolution séculaire multi-physique**

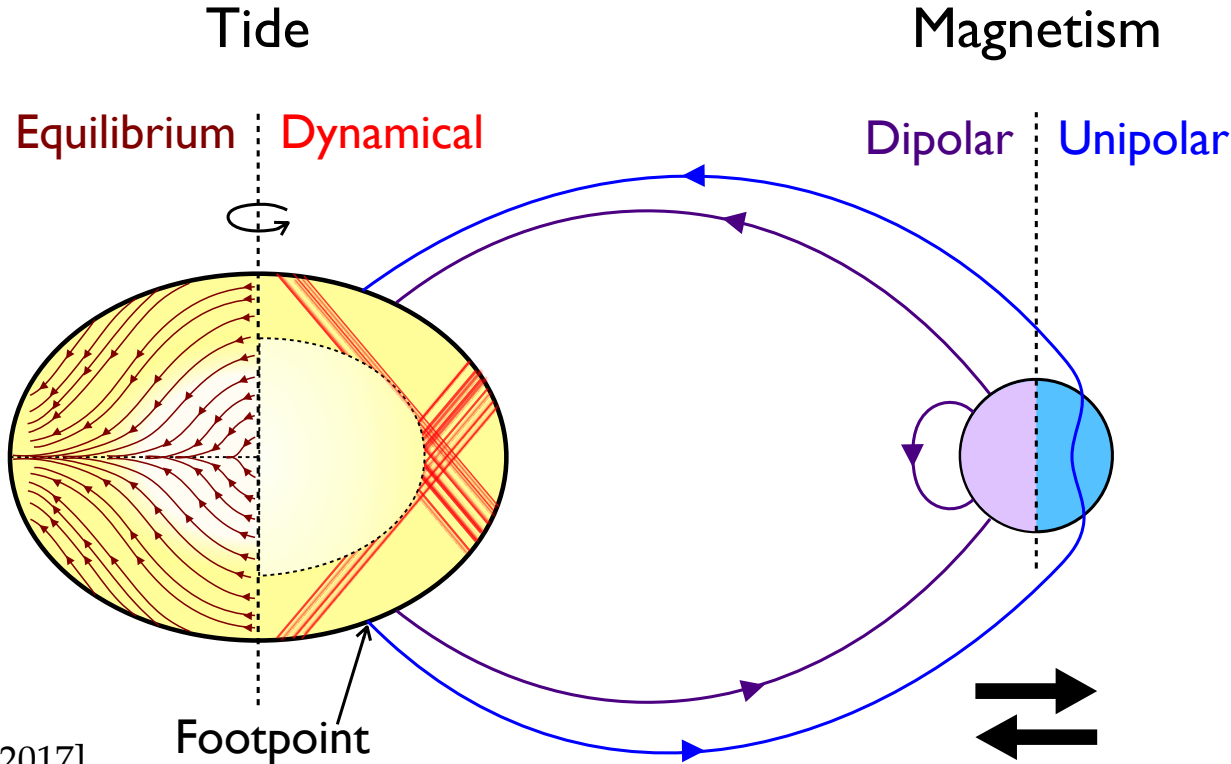


# Comparaison couples magnétiques et de marées



[Strugarek+, ApJL 2017]

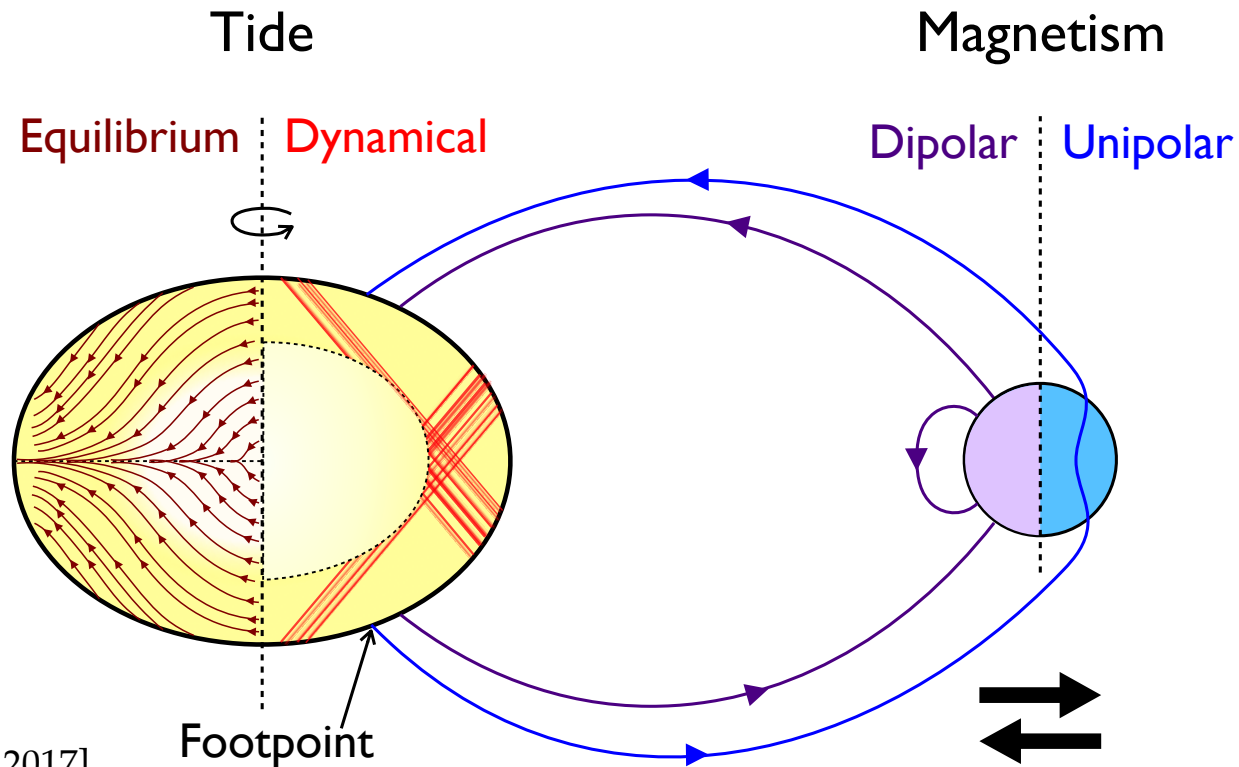
# Comparaison couples magnétiques et de marées



[Strugarek+, ApJL 2017]

Grilles d'évolution stellaire (STAREVOL) from Gallet+ 2017

# Comparaison couples magnétiques et de marées

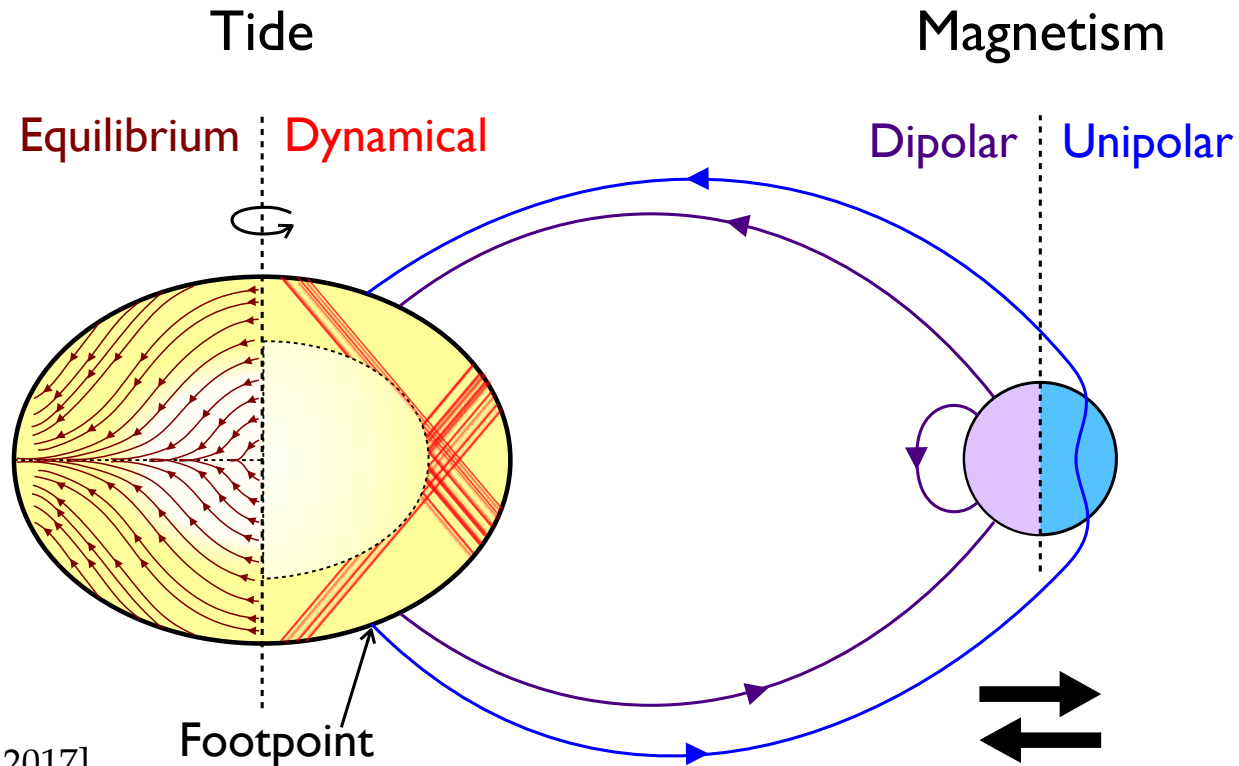


[Strugarek+, ApJL 2017]

Grilles d'évolution stellaire  
(STAREVOL) from Gallet+ 2017

Modèle de vent stellaire *starAML*  
from Réville+ 2016

# Comparaison couples magnétiques et de marées



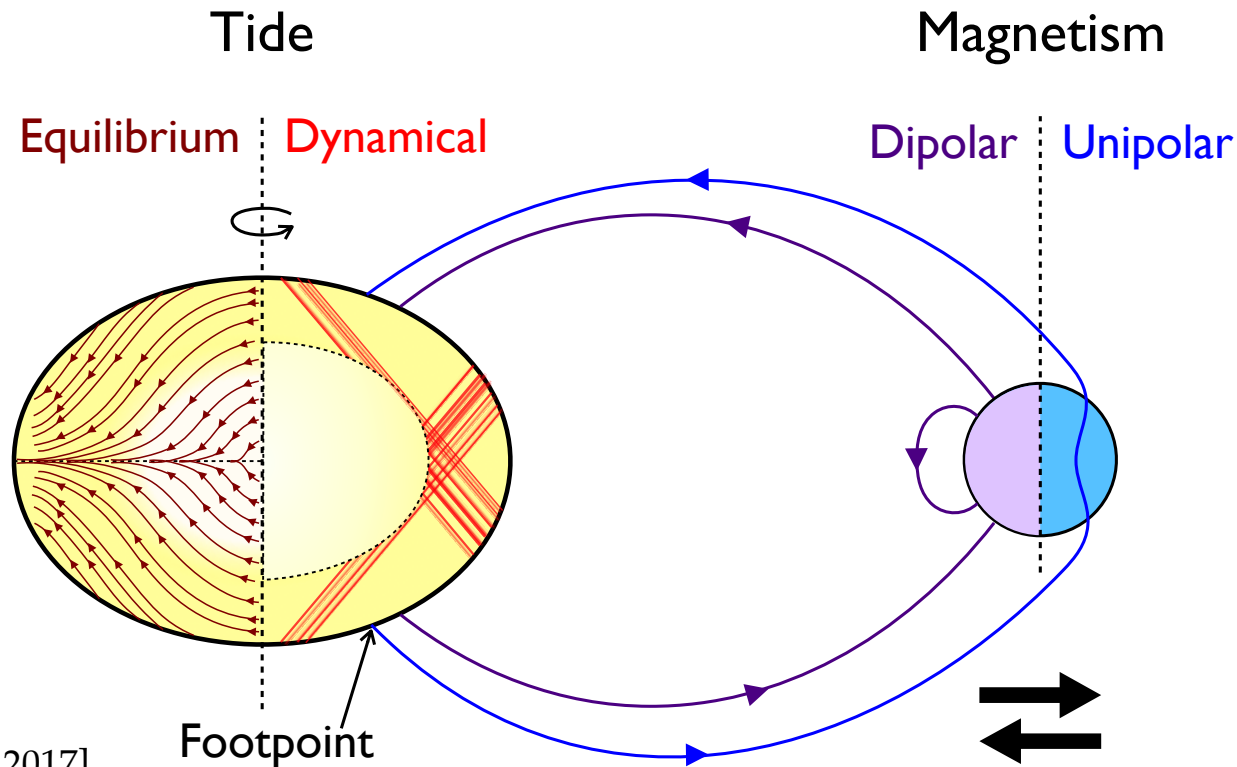
[Strugarek+, ApJL 2017]

Grilles d'évolution stellaire  
(STAREVOL) from Gallet+ 2017

Couple de marées Remus+ 2012,  
Mathis 2015, Mathis+ 2016

Modèle de vent stellaire *starAML*  
from Réville+ 2016

# Comparaison couples magnétiques et de marées



[Strugarek+, ApJL 2017]

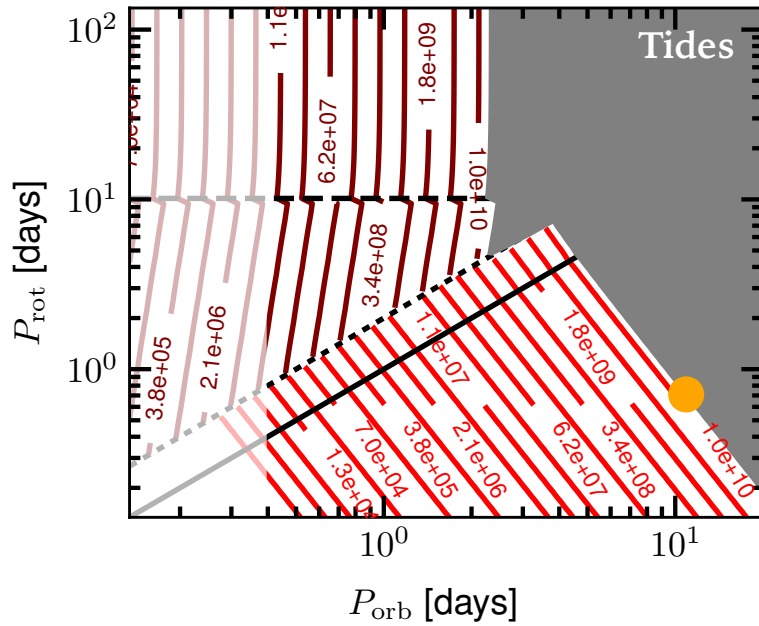
Grilles d'évolution stellaire  
(STAREVOL) from Gallet+ 2017

Couple de marées Remus+ 2012,  
Mathis 2015, Mathis+ 2016

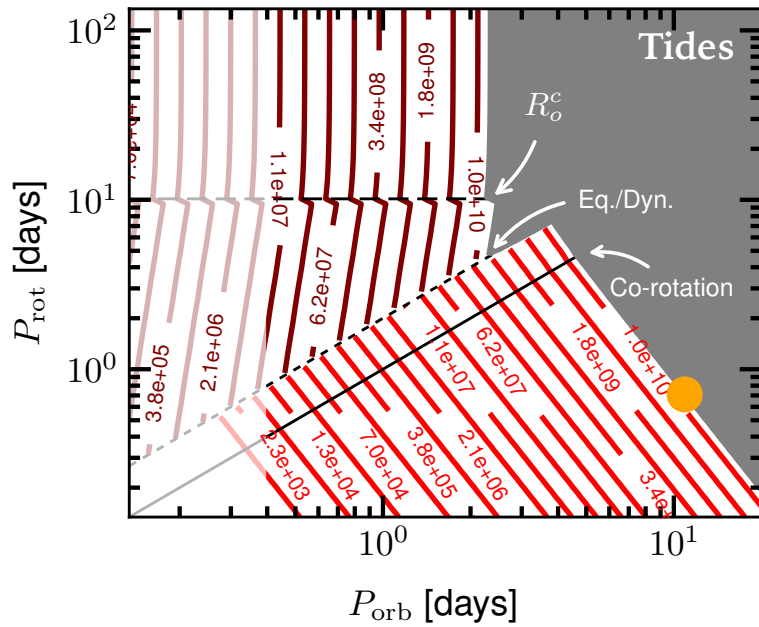
Modèle de vent stellaire *starAML*  
from Réville+ 2016

Couples magnétiques (Strugarek  
2016)

# Application: $\tau$ Tauri & Jupiter chaude (e.g. Tap 26)

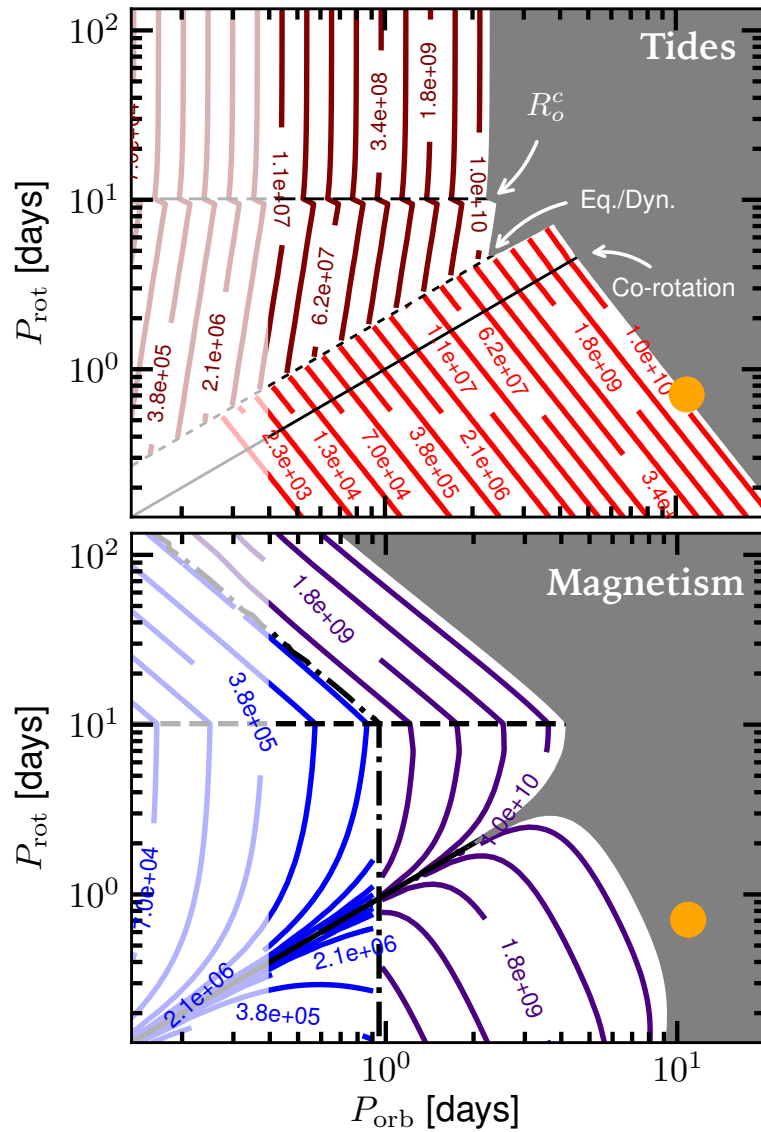


# Application: $\tau$ Tauri & Jupiter chaude (e.g. Tap 26)

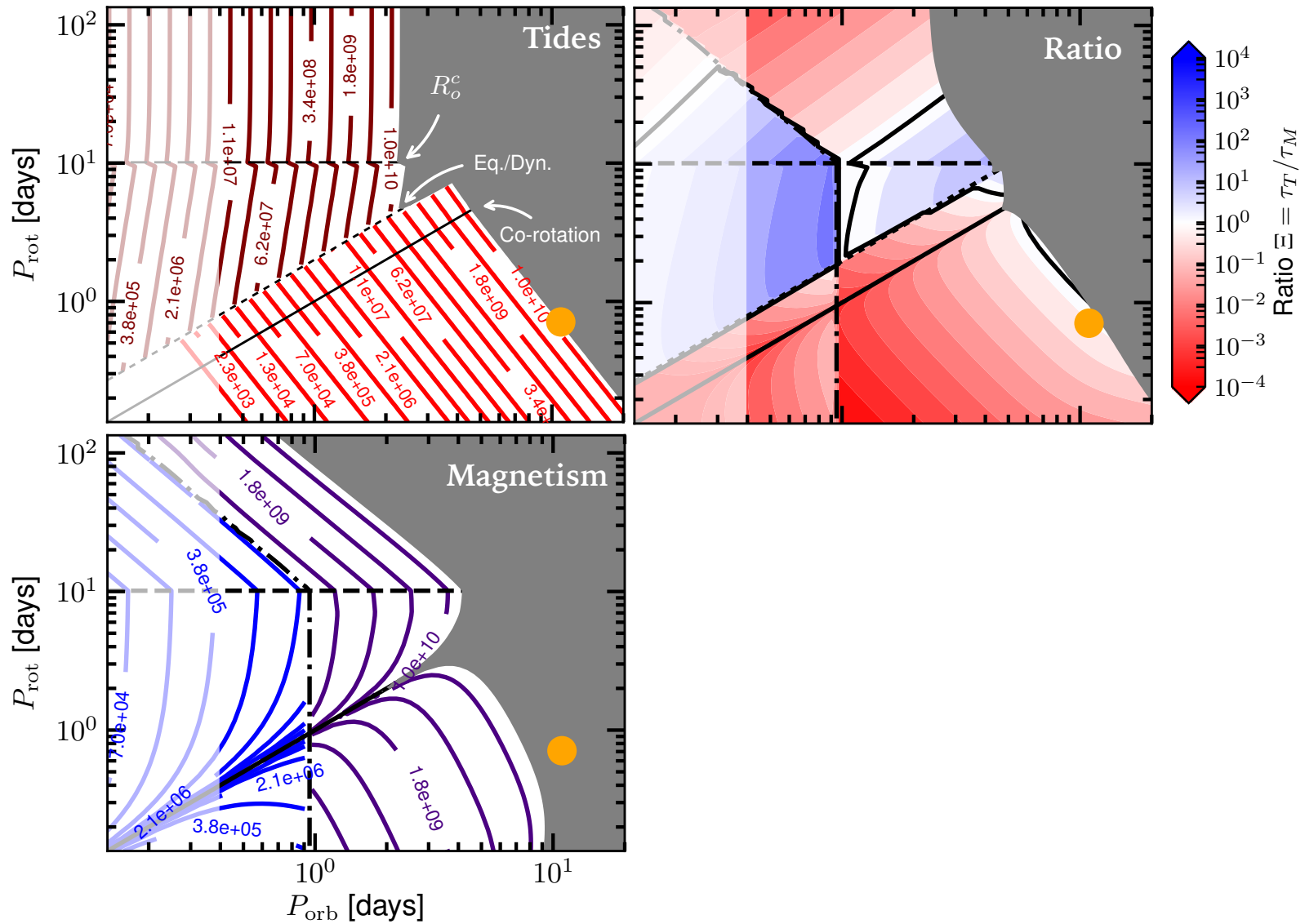




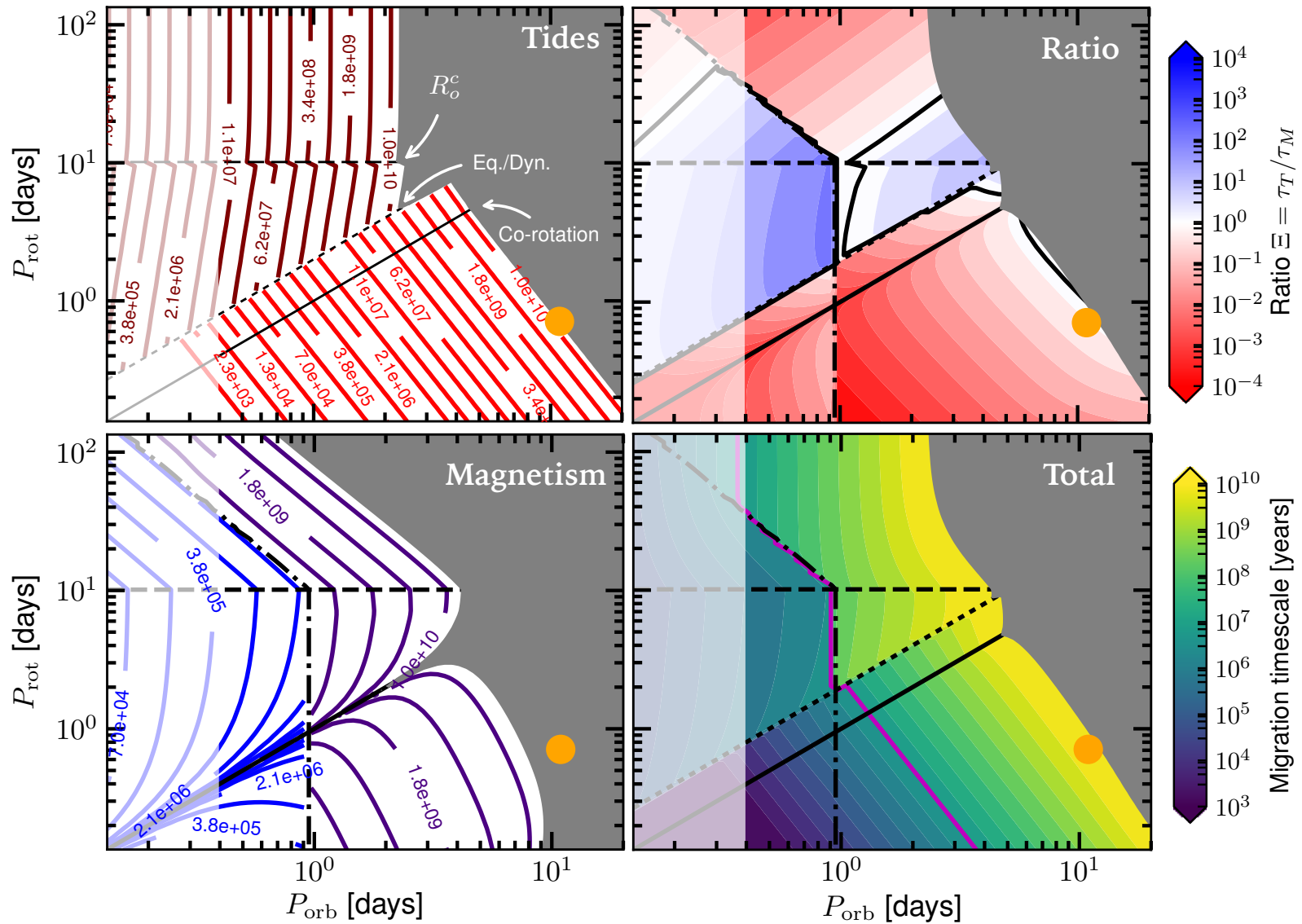
# Application: $\tau$ Tauri & Jupiter chaude (e.g. Tap 26)



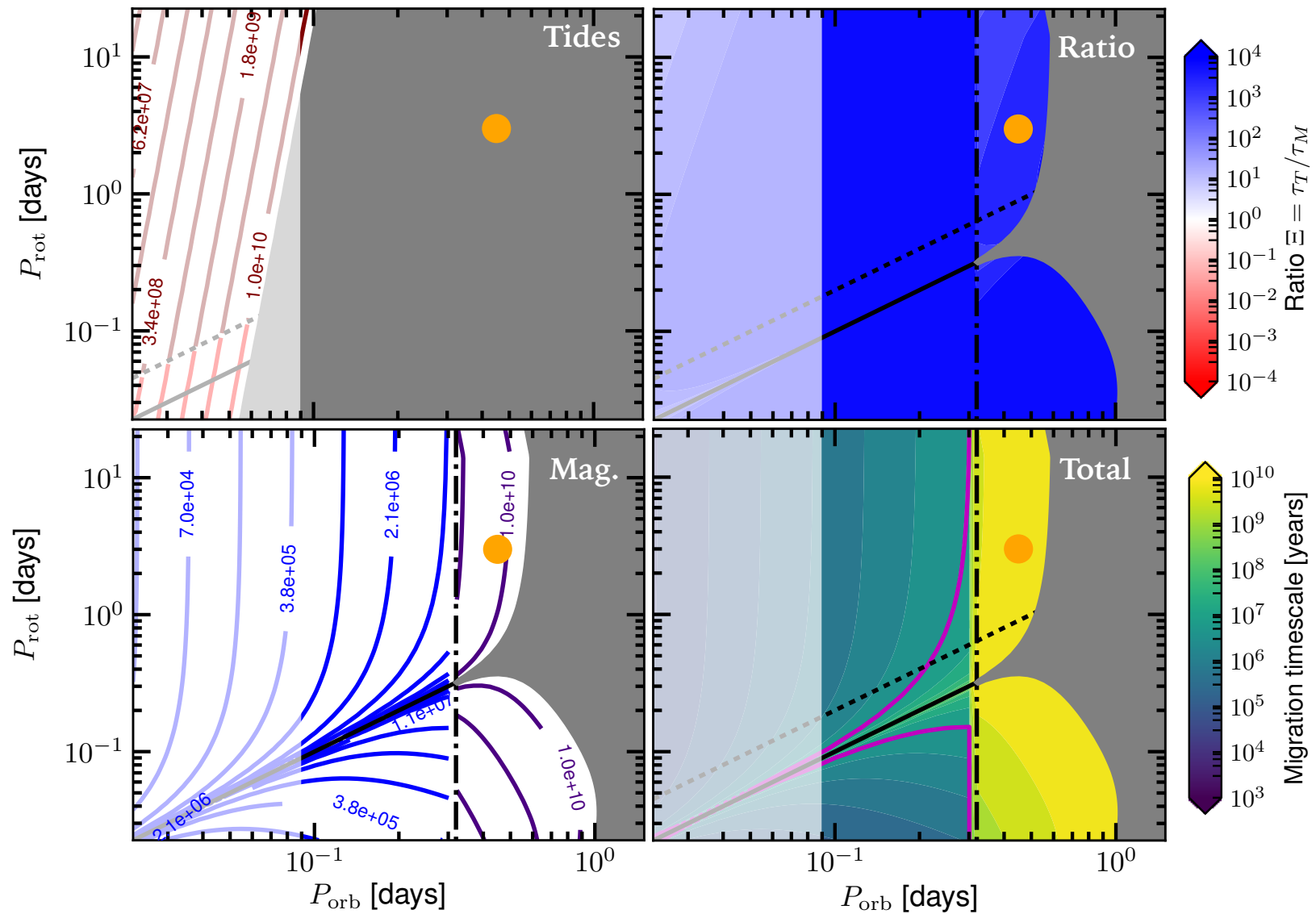
# Application: $\tau$ Tauri & Jupiter chaude (e.g. Tap 26)



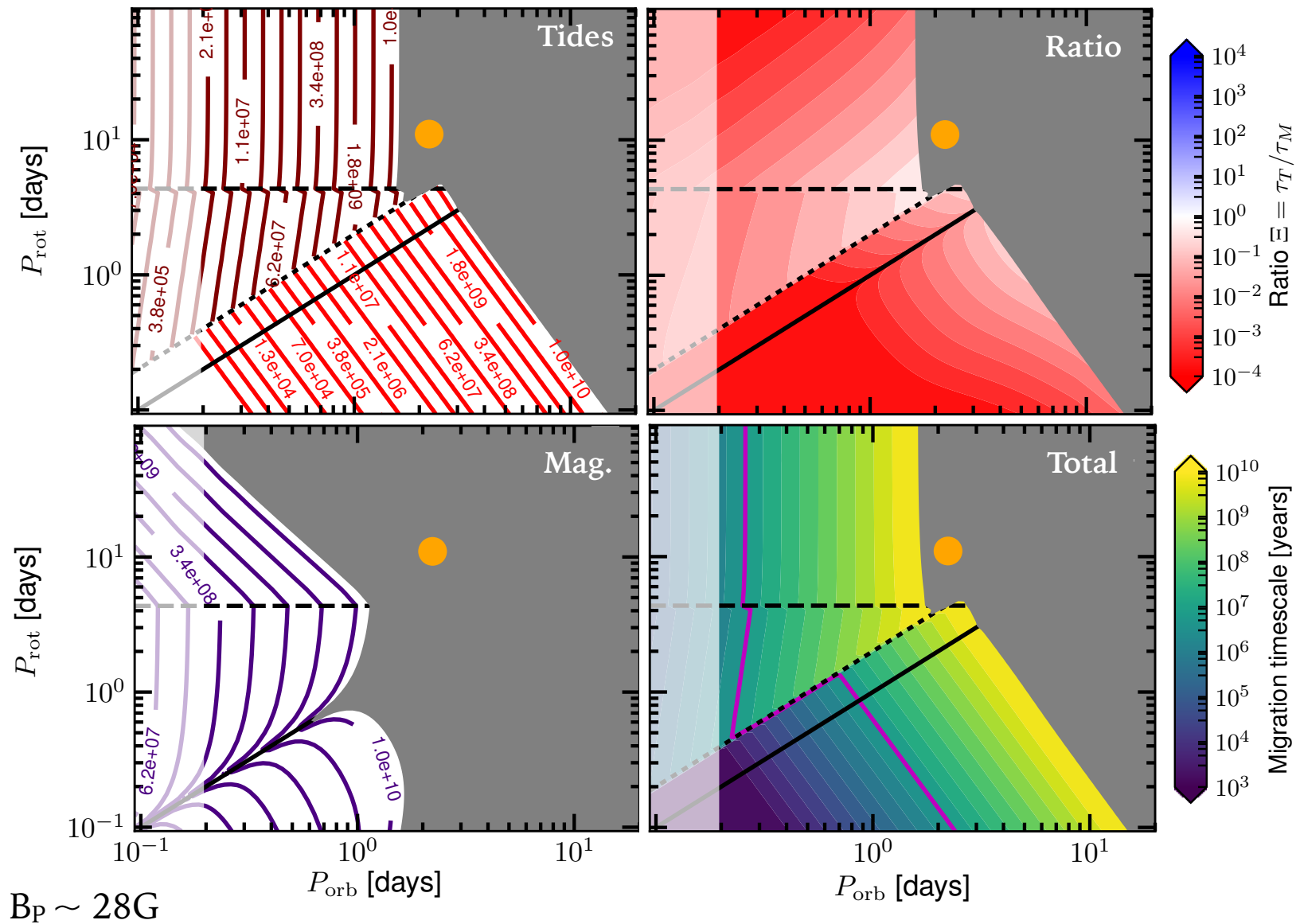
# Application: $\tau$ Tauri & Jupiter chaude (e.g. Tap 26)



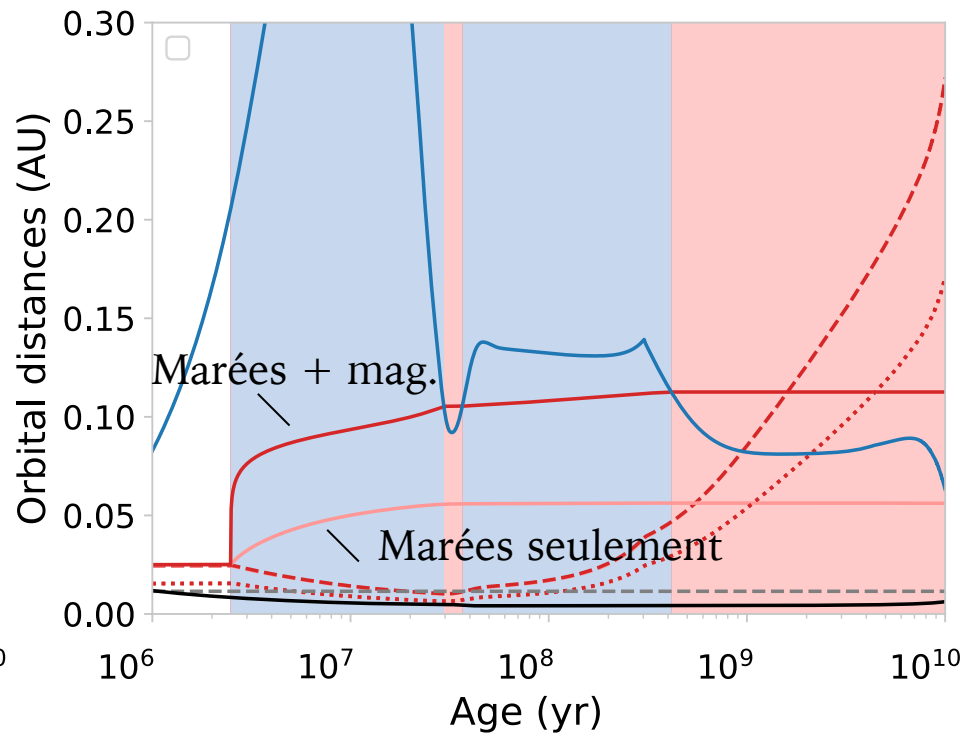
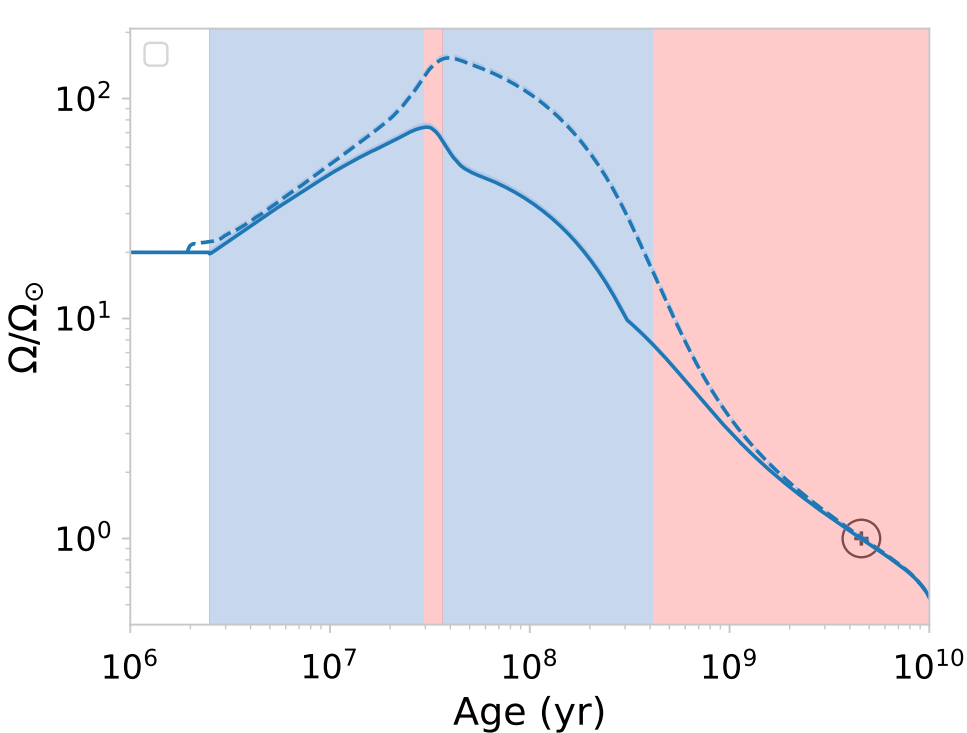
# Application: naine M & Terre (e.g. système Kepler-42)



# Application: K star & Jupiter chaude (e.g. HD 189733)



# Vers une évolution séculaire cohérente incluant marées et magnétisme



**ESPEM:** évolution séculaire étoile-planète cohérente avec évolution stellaire, vent magnétisé, interactions de marées et interactions magnétiques



# Interactions étoile-planètes

