



## Chauffage par impact des planétésimaux

Félix Bunel et Hadrien Vergnet

12/12/2016



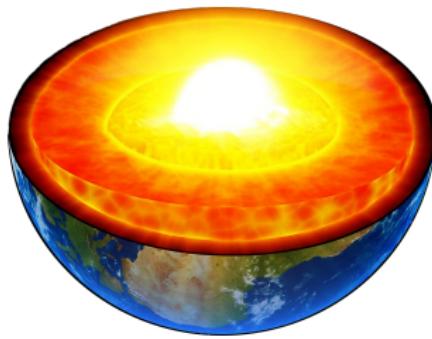
Laboratoire de Géologie de Lyon  
Terre Planètes Environnement

## Comment un noyau peut-il se former rapidement ?

- La séparation des métaux des silicates se fait sous forme (partiellement) fondue.

## D'où vient l'énergie nécessaire à la fusion ?

- Chauffage radioactif



- Chauffage par impact



## 1 Un problème de diffusion

- Equation de la diffusion
- Grandeurs caractéristiques
- Condition initiale
- Méthodes numériques

## 2 Chauffage radioactif

- Influence de la taille du planétésimal
- Influence de la chaleur latente
- Evolution en température

## 3 Ajout d'un terme d'accrétion

- Evolution du rayon
- Profil de température
- Influence sur les températures

## 4 Chauffage par impact

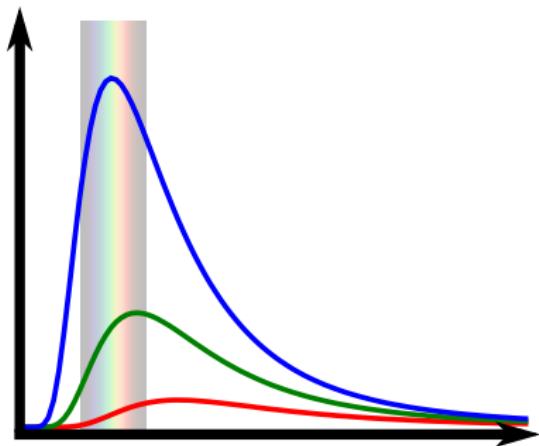
- Description du modèle
- Profil de température

# Un problème de diffusion

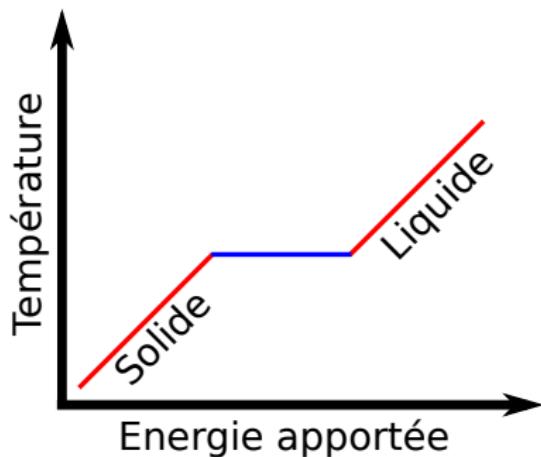
## Equation de la diffusion

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \Delta T + P$$

+ perte radiative  
à la surface



+ chaleur latente  
de changement d'état



# Un problème de diffusion

Grandeurs caractéristiques



Temps de demi-vie

$\tau_{1/2}$

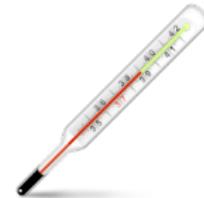
$\simeq 0.7 \text{ My}$



Longueur de diffusion

$$\sqrt{\frac{k_T \tau_{1/2}}{\rho C_p}}$$

$\simeq 10 \text{ km}$



Température de la nébuleuse

$T_{neb}$

$\simeq 300 \text{ K}$

# Un problème de diffusion

Condition initiale



Accrétion rapide d'un nuage de poussière en planétésimal.

→ L'énergie gravitationnelle  $E = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$  est convertie en chaleur.

$$T^0 = T_{neb} + \frac{4\pi}{5} \frac{\rho G}{C_p} R^2 \simeq T_{neb}$$

# Un problème de diffusion

## Discrétisation

Spatiale :  $T(r) \rightarrow T_i$

$$\Delta T = \frac{T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i}{\Delta r^2}$$

Temporelle :  $T(t) \rightarrow T^i$

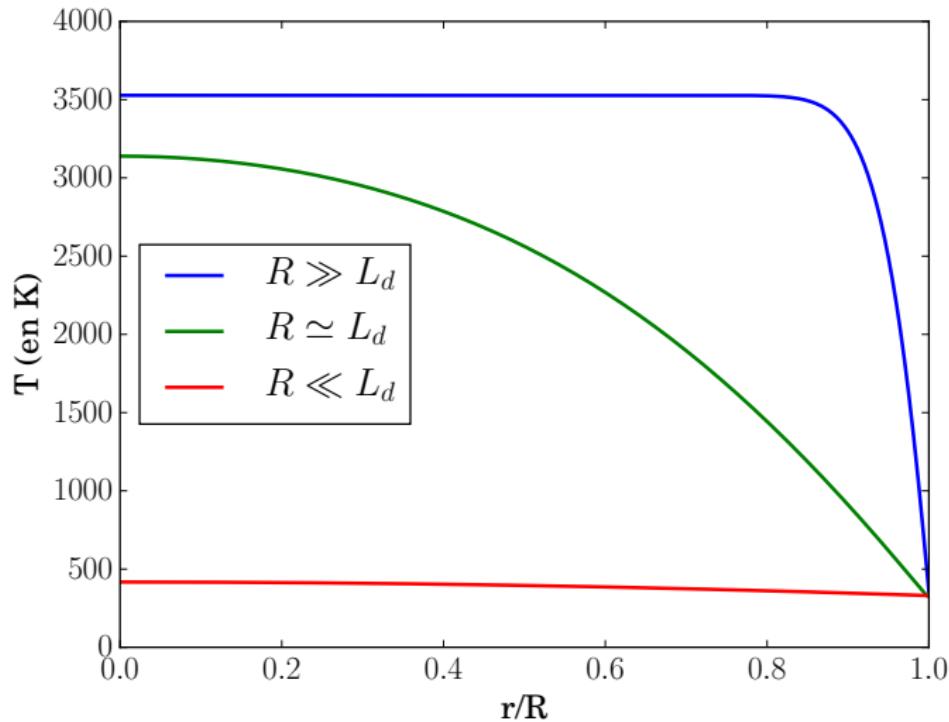
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^{i+1} - T^i}{\Delta t}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \Delta T + P \quad \sim \quad (Id + M) T^{i+1} = T^i + P$$

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

# Chauffage radioactif

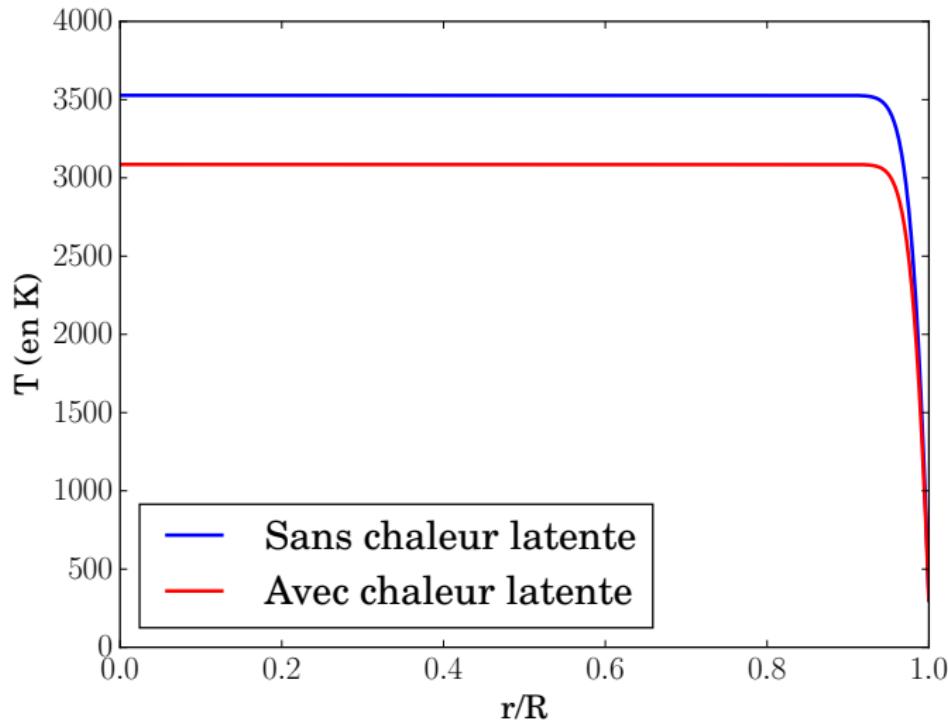
Influence de la taille du planétésimal



Profil de température après 1 million d'années pour différents  $R$ .

# Chauffage radioactif

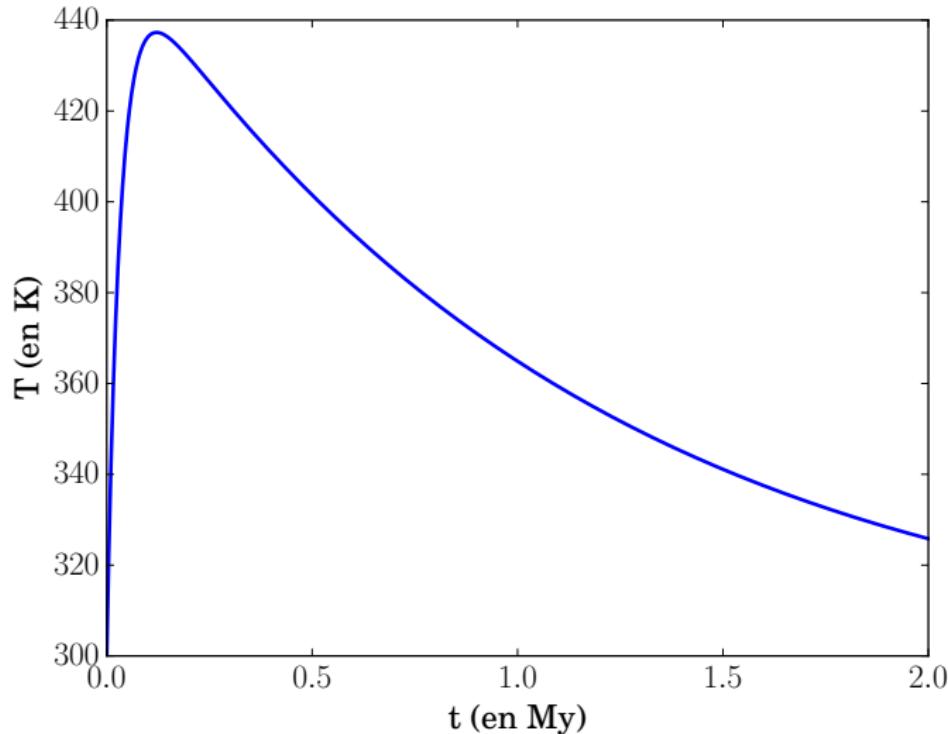
## Influence de la chaleur latente



Profil de température après 1 million d'années pour  $R = 500$  km.

# Chauffage radioactif

## Evolution de la température



Température moyenne en fonction du temps pour  $R = 5$  km.

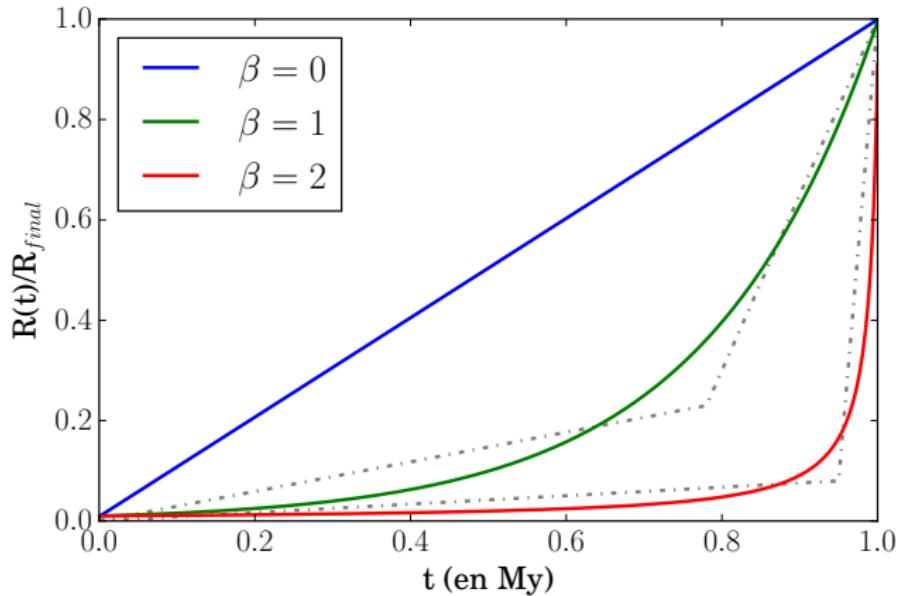
# Ajout d'un terme d'accréation

Evolution du rayon

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) = k_T \Delta T + P$$

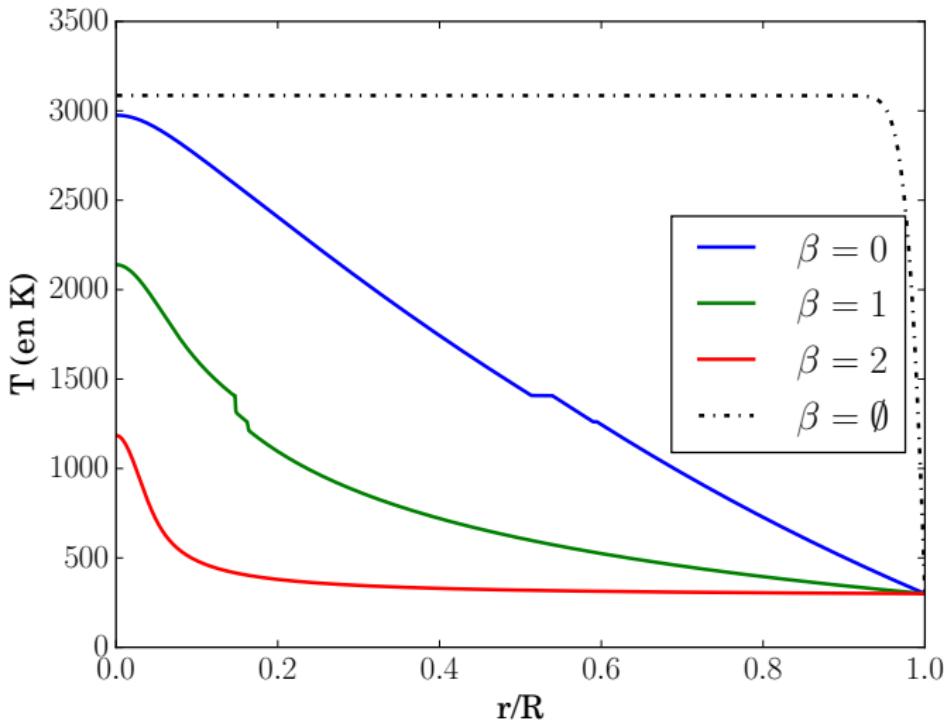
$$\dot{R} \simeq R^\beta$$

5 → 500 km en 1 My



# Ajout d'un terme d'accréation

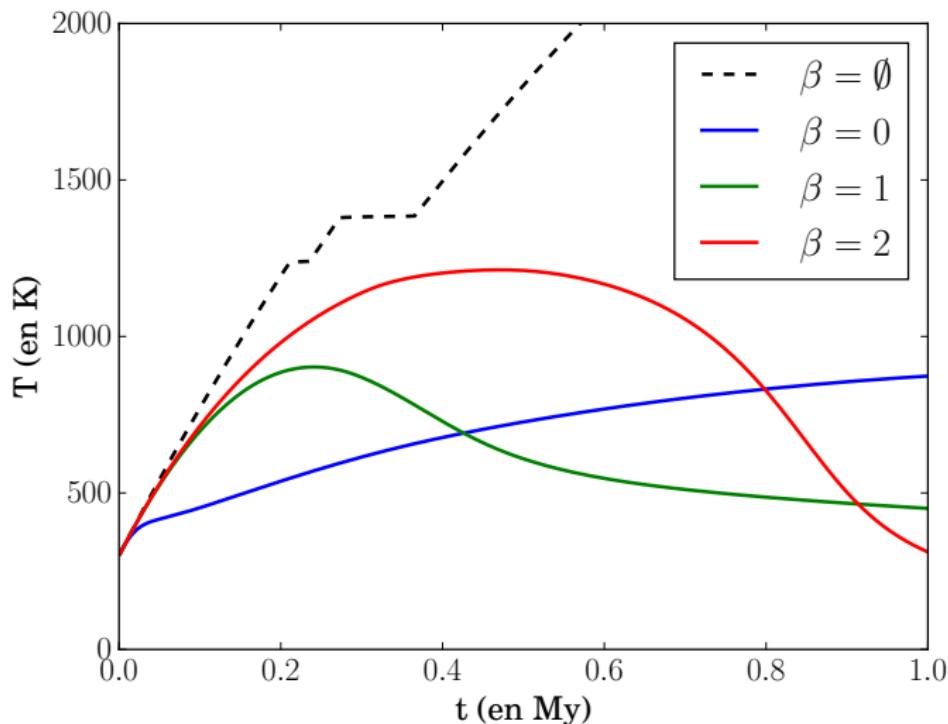
## Profil de température



Profil de température après 1 million d'années pour  $R = 500$  km.

# Ajout d'un terme d'accréation

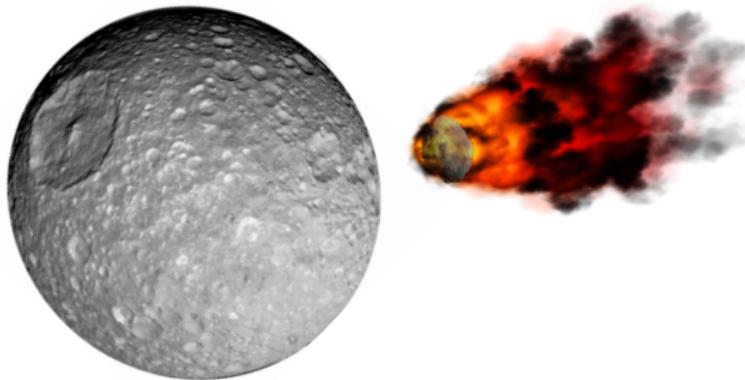
Evolution de la température



Température moyenne en fonction du temps.

# Chauffage par impact

## Description du modèle

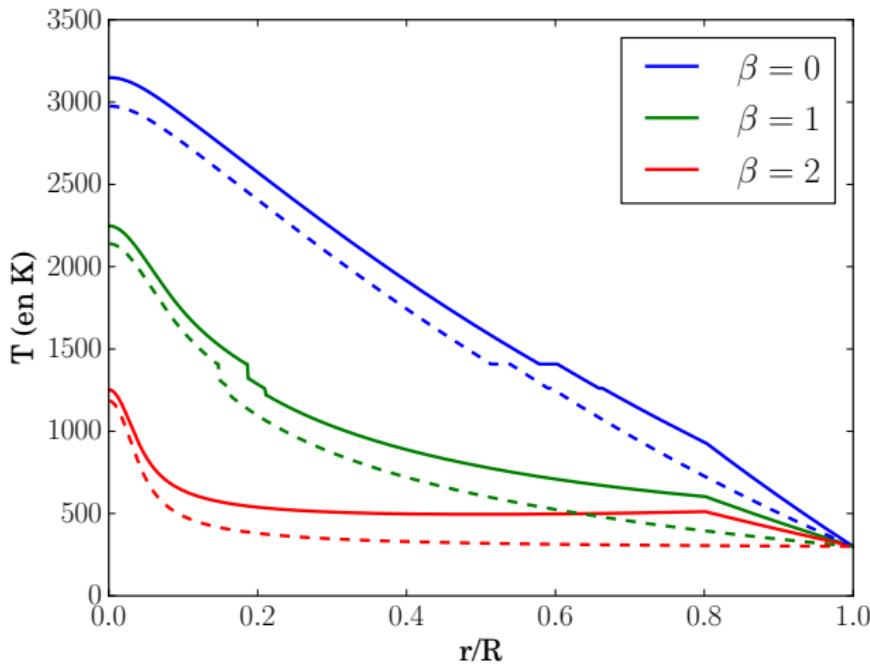


Energie des impactants :  
énergie gravitationnelle + énergie thermique

- ① La croissance est due à la masse apportée par les impactants
- ② Seulement 20% de l'énergie des impactants est introduite
- ③ L'énergie est répartie sur une couche d'épaisseur  $R/5$
- ④ La température des impactants est de 1000 K

# Ajout d'un terme d'accréation

## Profil de température

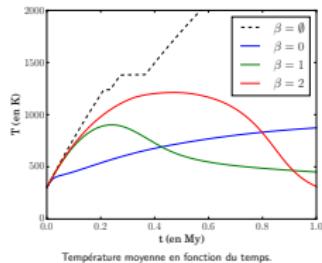


Profil de température après 1 million d'années pour  $R = 500$  km.

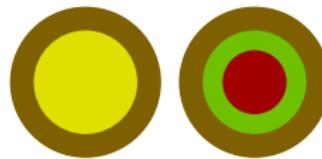
# Conclusion

- L'énergie apportée par l'impact n'est pas très importante dans la formation du noyau.
- Le noyau n'apparaît que pour une croissance rapide au début de la vie du planétésimal ( $\beta = 0$  et  $\beta = 1$ ).

- ④ La température des impactants est de 1000 K  
→ La température des impactants est calculée



- Influence de la vitesse des impacts sur le surplus de température.
- Séparation métal-silicate :



→ La séparation favorise la formation d'un noyau

# Merci pour votre attention

# Equation matricielle

$$(Id + M)T^{t+1} = T^t + c_0(P + S)$$

$$c_0 = \frac{\Delta t \tau_{1/2}}{\rho C_p T_{neb}}$$

$$M = \frac{\Delta t \ r_{i+1/2}^2}{r_i^2 \Delta r^2} \ d1 + \frac{\Delta t \ r_{i-1/2}^2}{r_i^2 \Delta r^2} \ d2$$

$$d1 = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ & 1 & -1 \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & 1 & -1 \\ & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad d2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \\ & \ddots & \ddots \\ & & -1 & 1 \\ & & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$