



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 ?

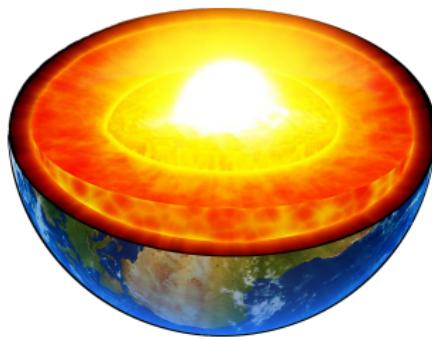
- La séparation des métaux des silicates se fait sous forme (partiellement) fondue.

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

- Chauffage radioactif



- Chauffage par impact



Sommaire

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

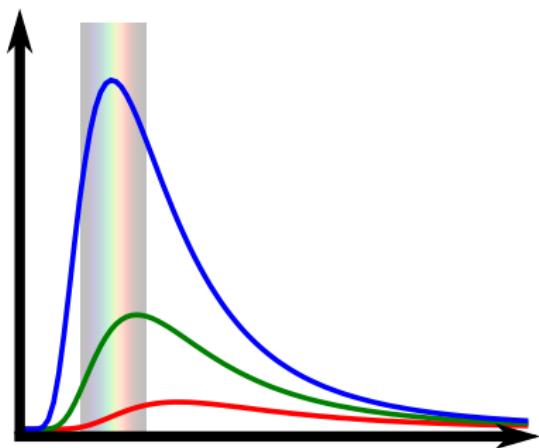
- Description du modèle
- Profil de température

Un problème de diffusion

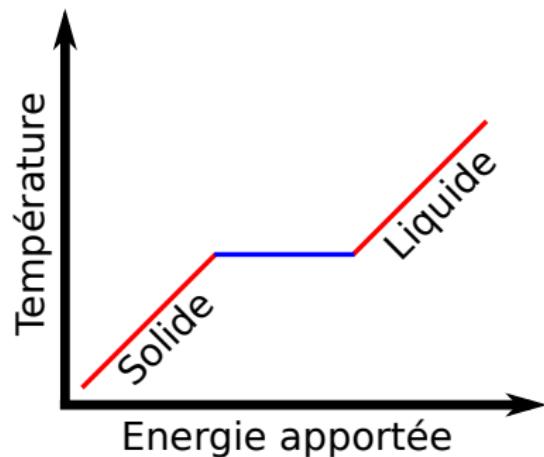
Equation de la diffusion

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

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

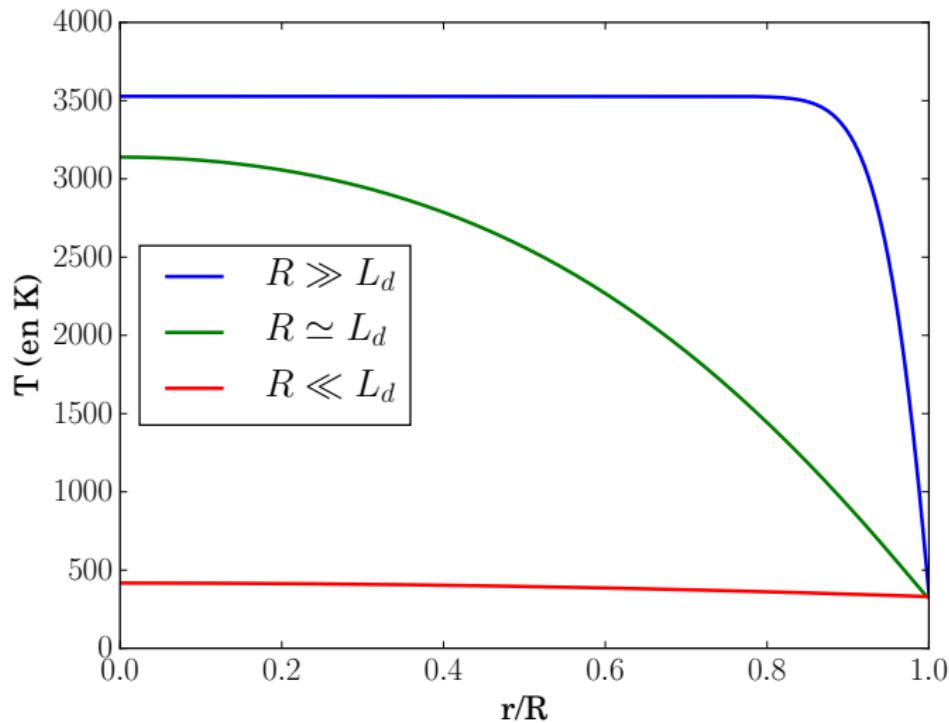
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^{i+1} - T^i}{\Delta t}$$

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

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

Chauffage radioactif

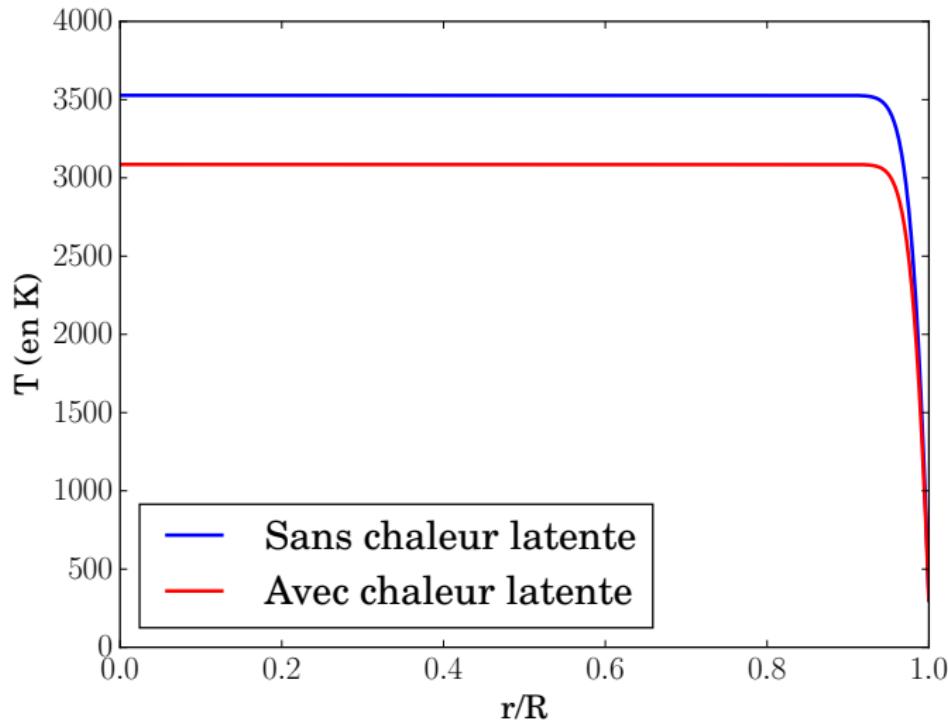
Influence de la taille du planétésimal



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

Chauffage radioactif

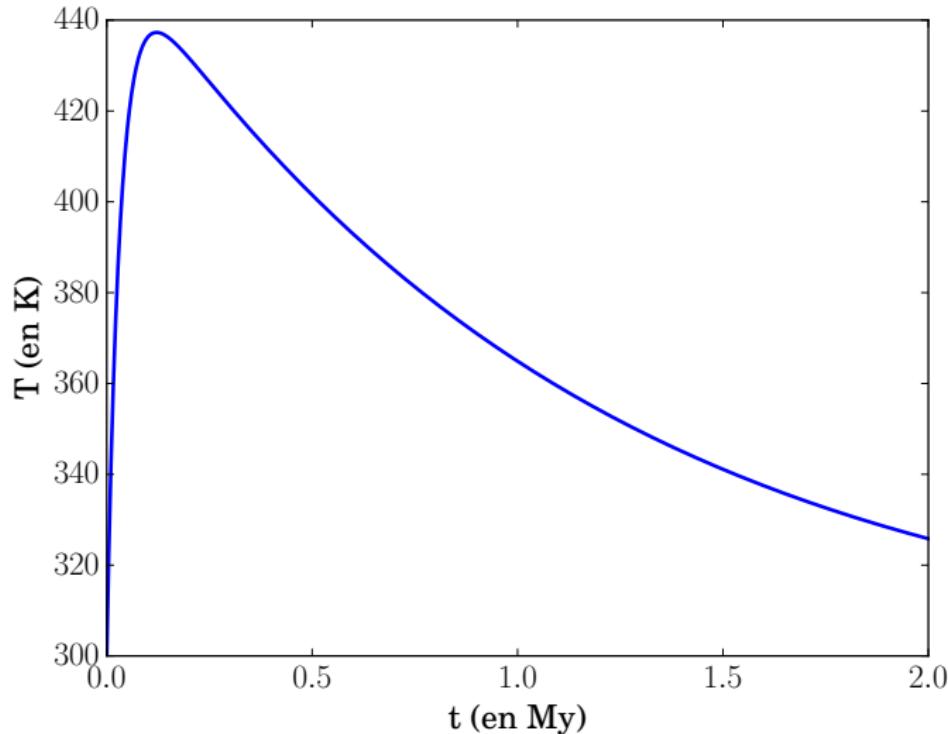
Influence de la chaleur latente



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.

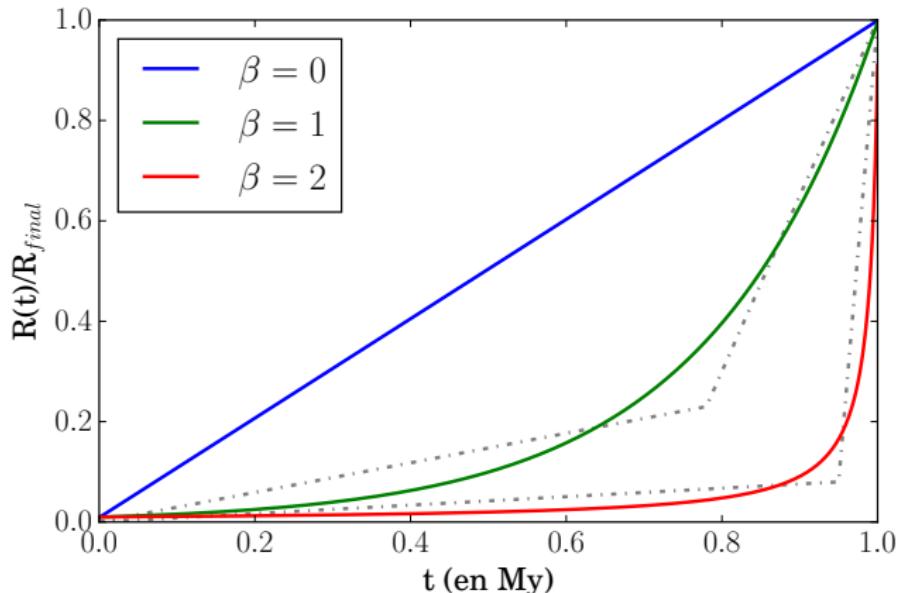
Ajout d'un terme d'accréation

Evolution du rayon

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

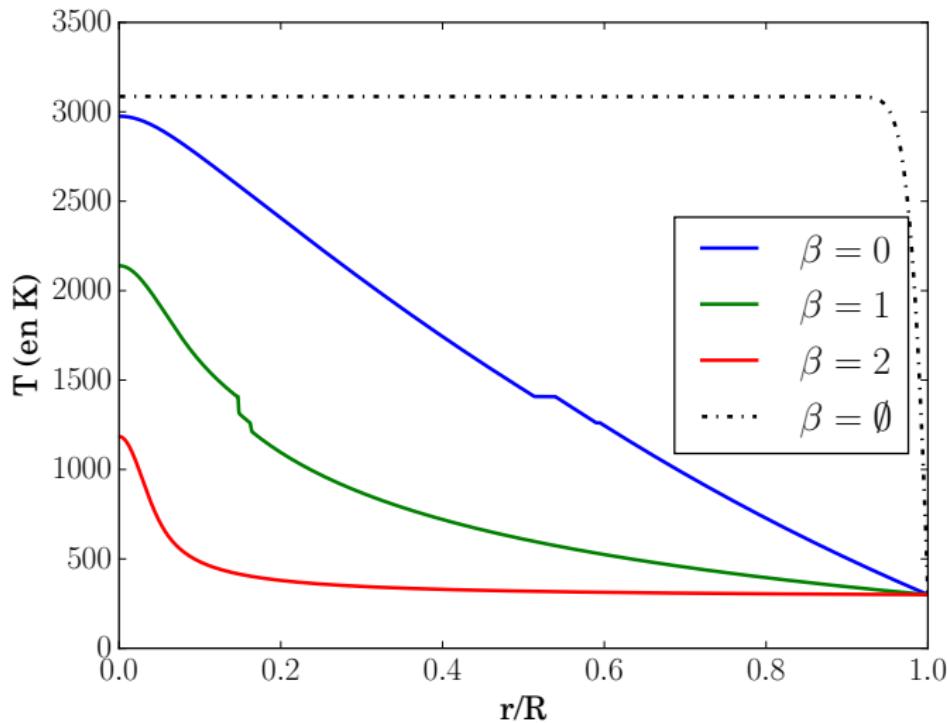
$$\dot{R} \simeq R^\beta$$

5 → 500 km en 1 My



Ajout d'un terme d'accrétion

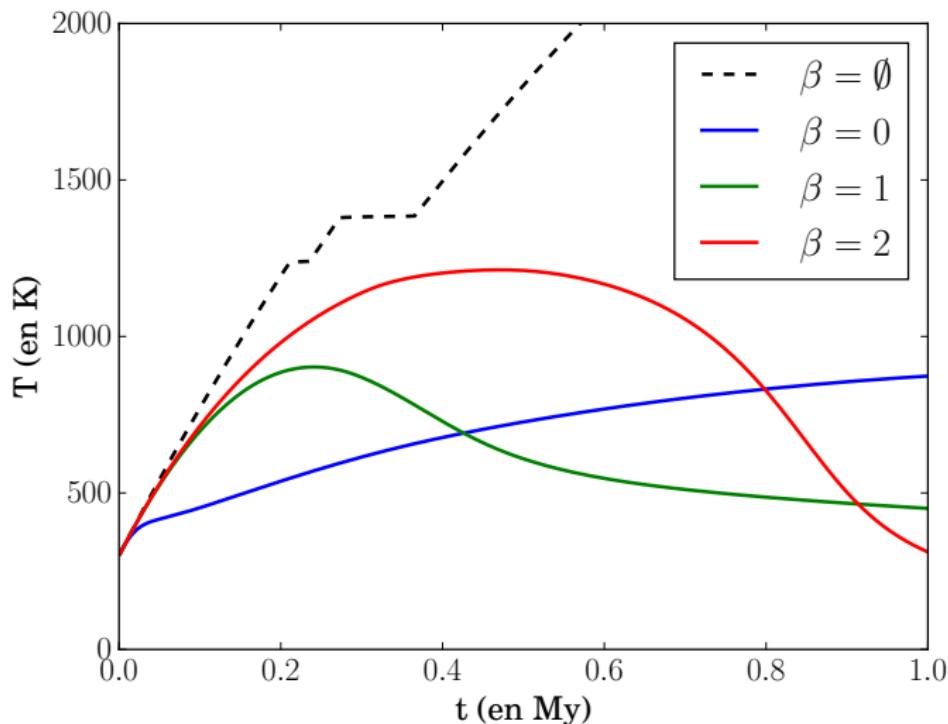
Profil de température



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

Ajout d'un terme d'accréation

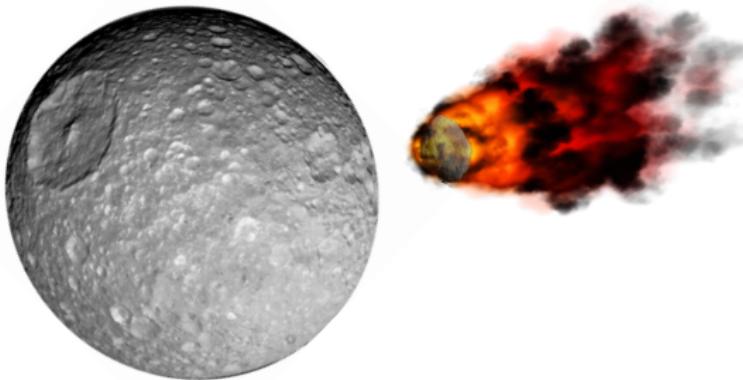
Evolution de la température



Température moyenne en fonction du temps.

Chauffage par impact

Description du modèle

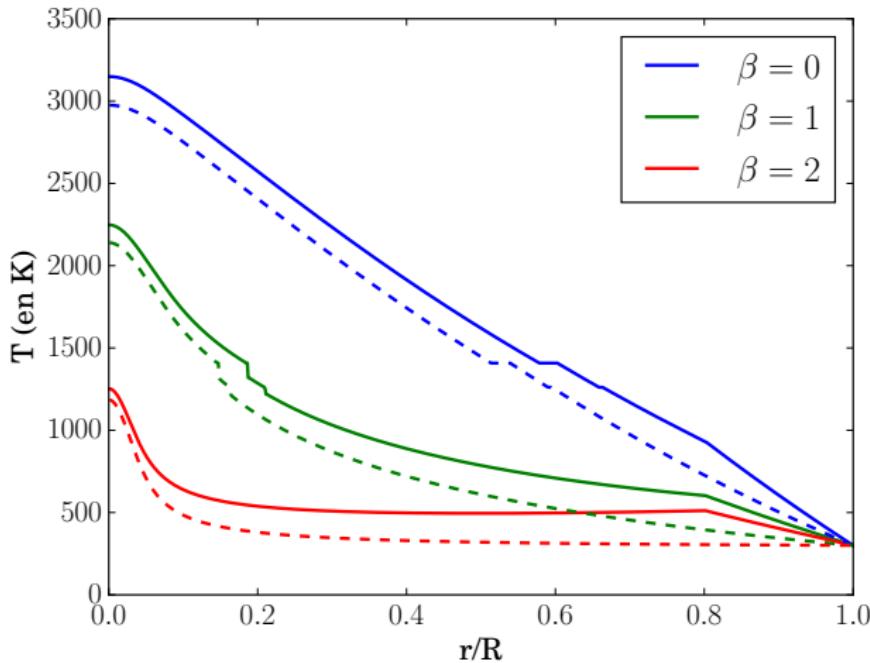


Energie des impactants :
énergie gravitationnelle + énergie thermique

- 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



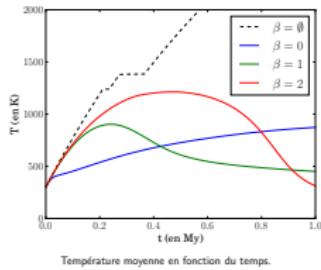
Profil de température après 1 million d'années pour $R = 500$ km.

Conclusion

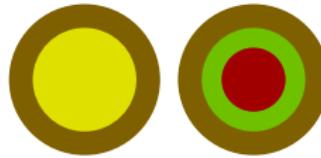
- L'énergie apportée par l'impact n'est pas très importante dans la formation du noyau.
- Le noyau n'apparaît que pour une croissance rapide au début de la vie du planétésimal ($\beta = 0$ et $\beta = 1$).

Conclusion

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



- Séparation métal-silicate :



→ La séparation favorise la formation d'un noyau

Equation matricielle

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

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

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

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