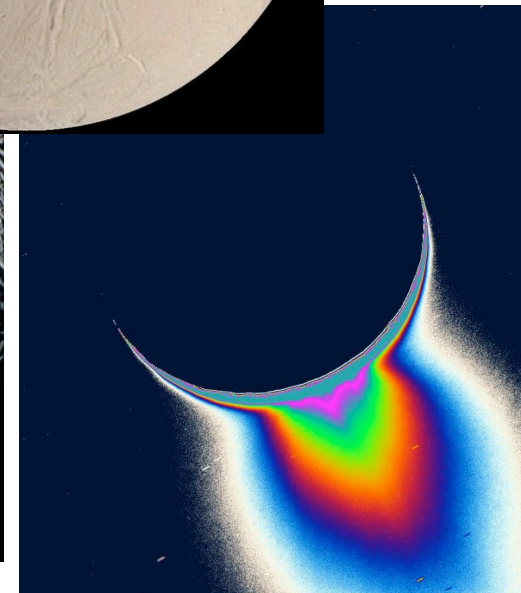
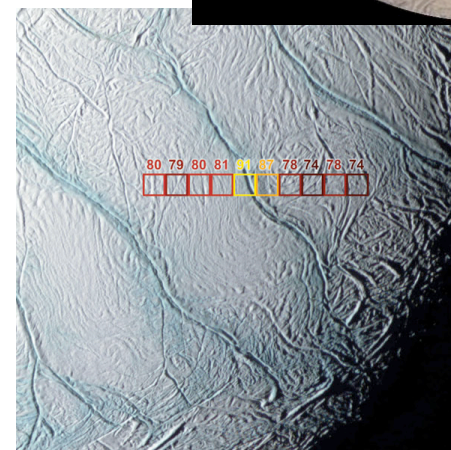
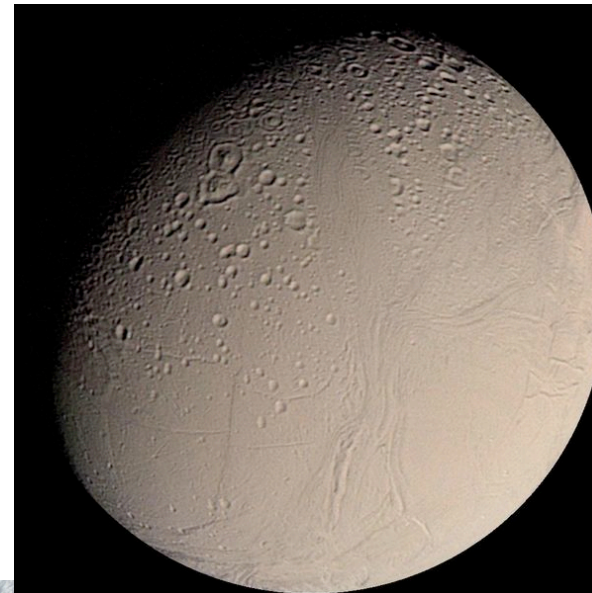




Différenciation des objets de taille moyenne

Christophe Sotin, Jet Propulsion Laboratory / Caltech

- **Ces corps pourraient représenter des briques des planètes.**
 - Connaitre leur composition minérale
 - Etat de différenciation
 - Relations silicates/eau
 - Détecter des organiques
- **Comprendre les processus impliqués dans leur évolution**
 - Evolution thermique
 - A quel moment se sont ils différenciés?
 - Réactions chimiques
 - Possibilité de convection
 - Contraintes sur la formations des planètes





Plan

- **Données**

- surface (imagerie, rayon, spectroscopie)
- Intérieur (champ de gravité → masse, degré de différenciation; champ magnétique (degré de différenciation))

- **Objets**

- Cérès ([Dawn](#))
- Les petits satellites de Saturne ([Cassini](#)) – Japet, Encelade et les autres
- Europe ([Galileo](#) – [EJSM](#))
- Callisto - Titan – Ganymède ([Galileo](#) – [Cassini/Huygens](#) – [EJSM](#))
- Pluton-Charon et KBOs ([New Horizons](#))

- **Modèles**

- Densité (composition chimique, porosité)
- Evolution thermique (conduction – convection [timing])
- Séparation glace/silicates

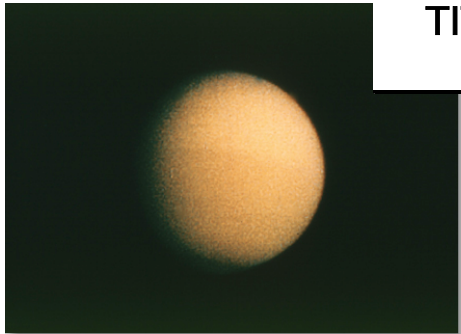


Quelques données

	Ceres	Mimas	Encelade	Tethys	Dione	Rhea	Japet
Rayon (km)	475	198.8	252.31	536.3	562.5	764	734.5
Mass (10²⁰kg)	9.43	0.3798	1.081	6.176	10.958	23.09	18.06
ρ (kg/m³)	2100	1153.6	1607.1	955.5	1469.2	1233.2	1087.8
Fraction massique roche (3.44)	0.76	0.26	0.57	0.03	0.50	0.33	0.20
Fraction volumique	0.45	0.09	0.26	0.01	0.21	0.12	0.06
Cp at 250K	1167	1671.17	1348.87	1907.96	1425.82	1597.45	1740.25
Puissance rad. (GW)	4.28	0.06	0.37	0.13	3.28	4.62	2.13
à t=0	28.5	0.40	2.48	0.86	21.85	30.80	14.17
Total ΔT_{rad}	1950	476.24	1286.38	55.43	1059.67	632.72	341.63
ΔT_{rad} in 10 My	4.32	1.06	2.86	0.12	2.35	1.41	0.76
equiv heat flux (mW/m²)	1.51	0.12	0.46	0.04	0.82	0.63	0.31
surface Gravity	0.279	0.0641	0.1133	0.1432	0.2310	0.2633	0.2233
Vitesse de rotation (heures)	9.075	22.62	32.885	45.307	65.686	108.42	1903.9
Eccentricity		0.0202	0.0045	0	0.0022	0.001	0.0283



Quelques données



	densité (kg/m3)	Rayon km	Masse 10^{22} kg	e %	Prot days
IO	3528	1822	8.94	0.41	1.77
EUROPA	2970	1569	4.81	1.01	3.55
GANYMEDE	1940	2634	14.85	0.15	7.15
CALLISTO	1851	2403	10.76	0.7	16.7
TITAN	1881	2575	13.45	2.92	15.95



Relation entre forme et structure interne

$$U = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left(\alpha_n^m \cos(m\phi) + \beta_n^m \sin(m\phi) \right) P_n^m(\sin(\lambda)) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2(\lambda)$$

$$U = \frac{GM}{r} \left[1 + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \left(-\frac{1}{2} J_2 * (3 \sin^2 \lambda - 1) + 3 J_{2,2} \cos \{ 2(\phi - \phi') \} \cos^2 \lambda \right) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2(\lambda)$$

Cas le plus simple: Cérès ($J_{2,2}$ devrait être nul)

$$U_{pole} = \frac{GM}{c} \left[1 - \left(\frac{a}{c} \right)^2 J_2 \right]$$

$$U_{eq} = \frac{GM}{a} \left[1 + \frac{1}{2} J_2 \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2$$

$$f = \frac{a - c}{a} = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM}$$



Relation entre forme et structure interne

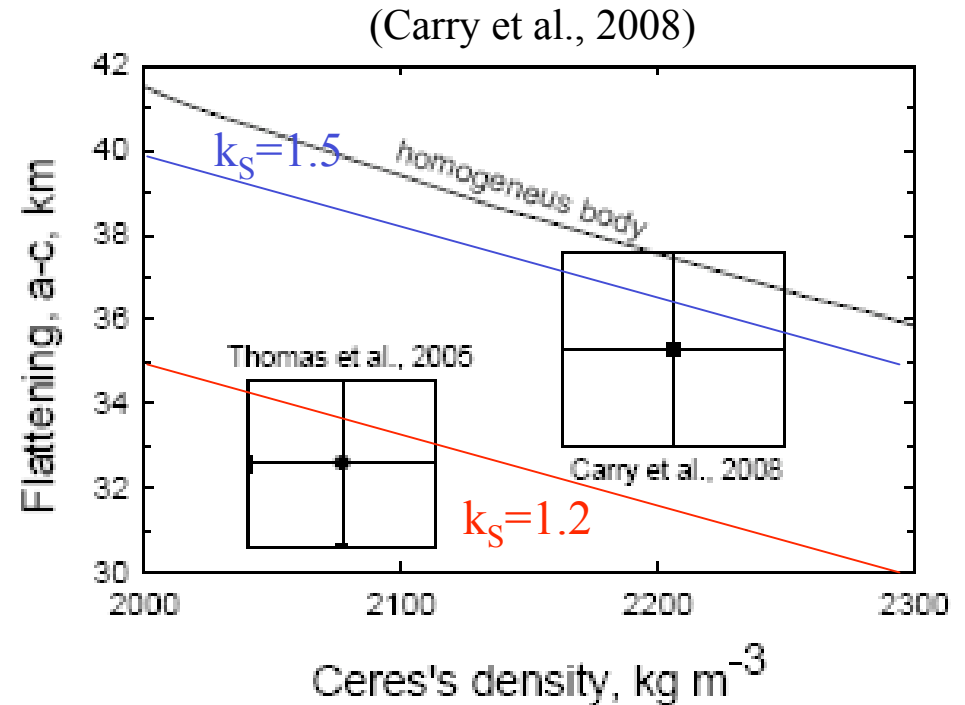
$$f = \frac{a - c}{a} = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM}$$

$$J_2 = J_{2h} + \Delta J_2 = \left(\frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{3} q \right) k_s + \frac{3}{2} \alpha k_2 e \cos(v)$$

$$\frac{C}{MR^2} = \frac{2}{3} \left[1 - \frac{2}{5} \sqrt{\frac{4 - k_s}{1 + k_s}} \right]$$

$$C = \int_M x^2 dm = \iiint r^4 \rho(r, \theta, \psi) \sin^3(\theta) dr d\theta d\psi = \frac{8\pi}{15} \left(\rho_M (R^5 - R_c^5) + \rho_c R_c^5 \right)$$

$$f = \frac{a - c}{a} = \frac{3 \pi (1 + k_s)}{2 GT^2} \frac{1}{\rho}$$



Masse fixée (GM)

Importance d'avoir des mesures de gravité et de forme



Plan de la présentation

- **Données**

- surface (imagerie, rayon, spectroscopie)
- Intérieur (champ de gravité → masse, degré de différenciation; champ magnétique (degré de différenciation))

- **Objets**

- Cérès ([Dawn](#))
- Les petits satellites de Saturne ([Cassini](#)) – Japet, Encelade et les autres
- Europe ([Galileo](#) – [EJSM](#))
- Callisto - Titan – Ganymède ([Galileo](#) – [Cassini/Huygens](#) – [EJSM](#))
- Pluton-Charon et KBOs ([New Horizons](#))

- **Modèles**

- Densité (composition chimique, porosité)
- Evolution thermique (conduction – convection [timing])
- Séparation glace/silicates



Ceres

Table 3. Comparison of Total Object Densities^a

Object	Density
Vesta	3.44
Moon	3.34
Europa	2.97
Pallas	2.71
<i>Ceres</i>	<i>2.10</i>
Ganymede	1.94
Titan	1.88
Callisto	1.86

- **Cérès a une densité proche de celle des satellites de glace de Jupiter et Saturne**
- **Porosité ou eau ?**



Ceres

Différence entre les mesures d'occultation et les mesures en optique adaptative

Reference	Method	RAD-1, km	Error, km	RAD-2, km	Error, km	Equatorial Radius, km	RAD-3 Polar, km	Error, km	Effective Radius, km
<i>Millis et al.</i> [1987]	occultation	479.6	2.4			479.6	453.4	4.5	471
<i>Saint-Pe et al.</i> [1993]	adaptive optics	499	20			(499)	469	20	(489)
<i>Drummond et al.</i> [1998]	adaptive optics	508	5	472.5	5	490	445.25	5	475
<i>Parker et al.</i> [2002]	HST obs	484.8	5.1			484.8	466.4	5.9	479
Average		493		472.5		485 (488)	455 (459)		475 (479)

4.70 (4) 10⁻¹⁰	9.35 10 ²⁰	Michalak (2000) - gravitational perturbations on the orbits of 25 different asteroids
4.759(23) 10⁻¹⁰	9.47 10 ²⁰	Viateau and Rapaport [1998] - perturbations on the orbits of 9 asteroids
4.762 (15) 10⁻¹⁰	9.47 10 ²⁰	Standish [2001] - maintaining and updating planetary ephemerides
4.39 (4) 10⁻¹⁰	8.73 10 ²⁰	Hilton [1999]

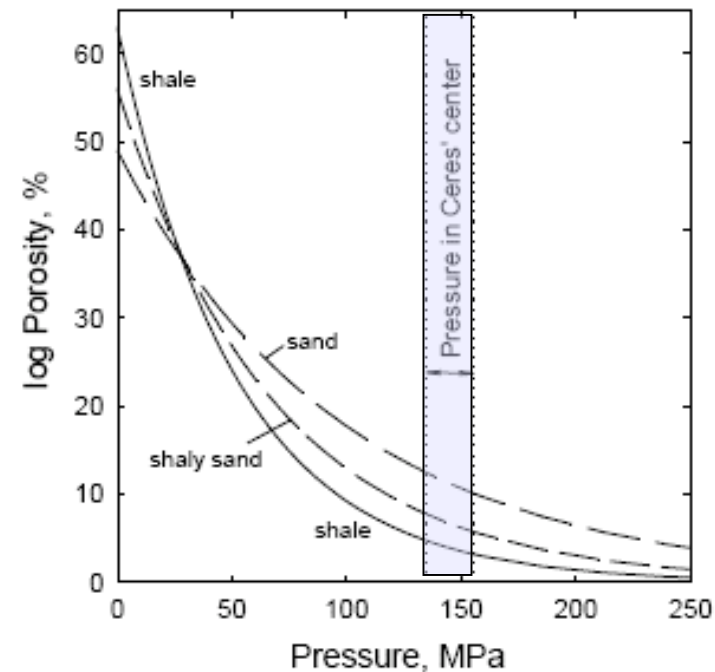


Ceres

- **Incertitudes sur la valeur du rayon et de la masse (?) ne permettent pas d'affirmer que Cérès est différencié.**
- **Si Cérès est homogène, comment expliquer la densité de 2.1/2.2:**
 - Mélange silicates-glace
 - Silicates poreux

Report of a 3 μm absorption in the spectrum of Ceres interpreted to be due to OH and perhaps H₂O [Lebofsky, 1978, 1980]

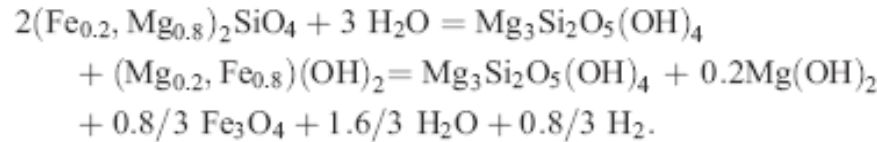
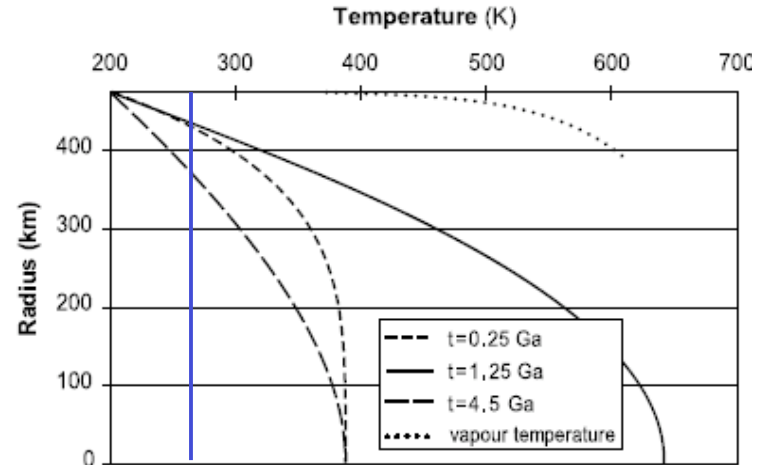
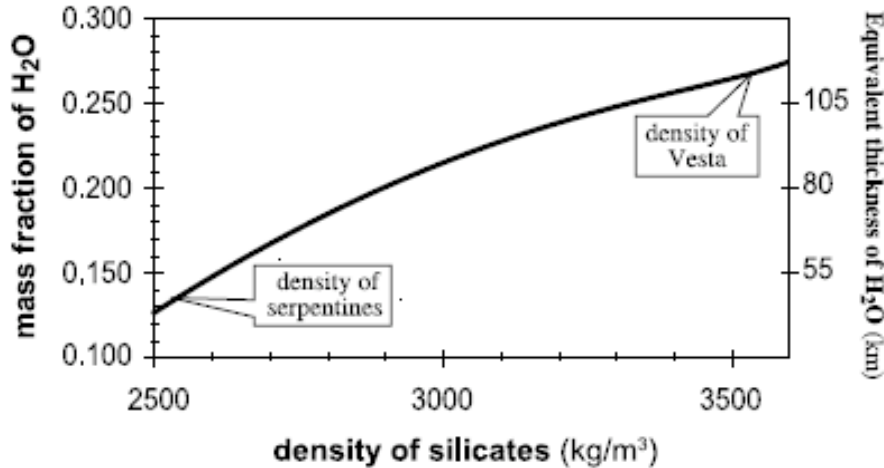
Dans le cas d'un mélange silicates-glace, il faut s'intéresser à l'évolution thermique



(Zolotov, 2009)

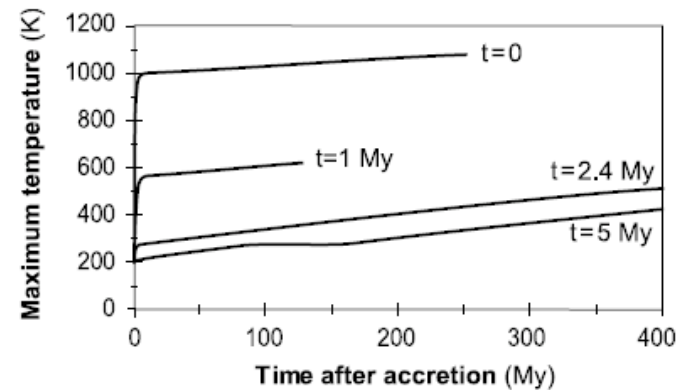


Ceres: évolution thermique



$$\frac{\partial(k \cdot \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + \frac{2}{r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_P \left(\frac{dT}{dt} \right) - H_R,$$

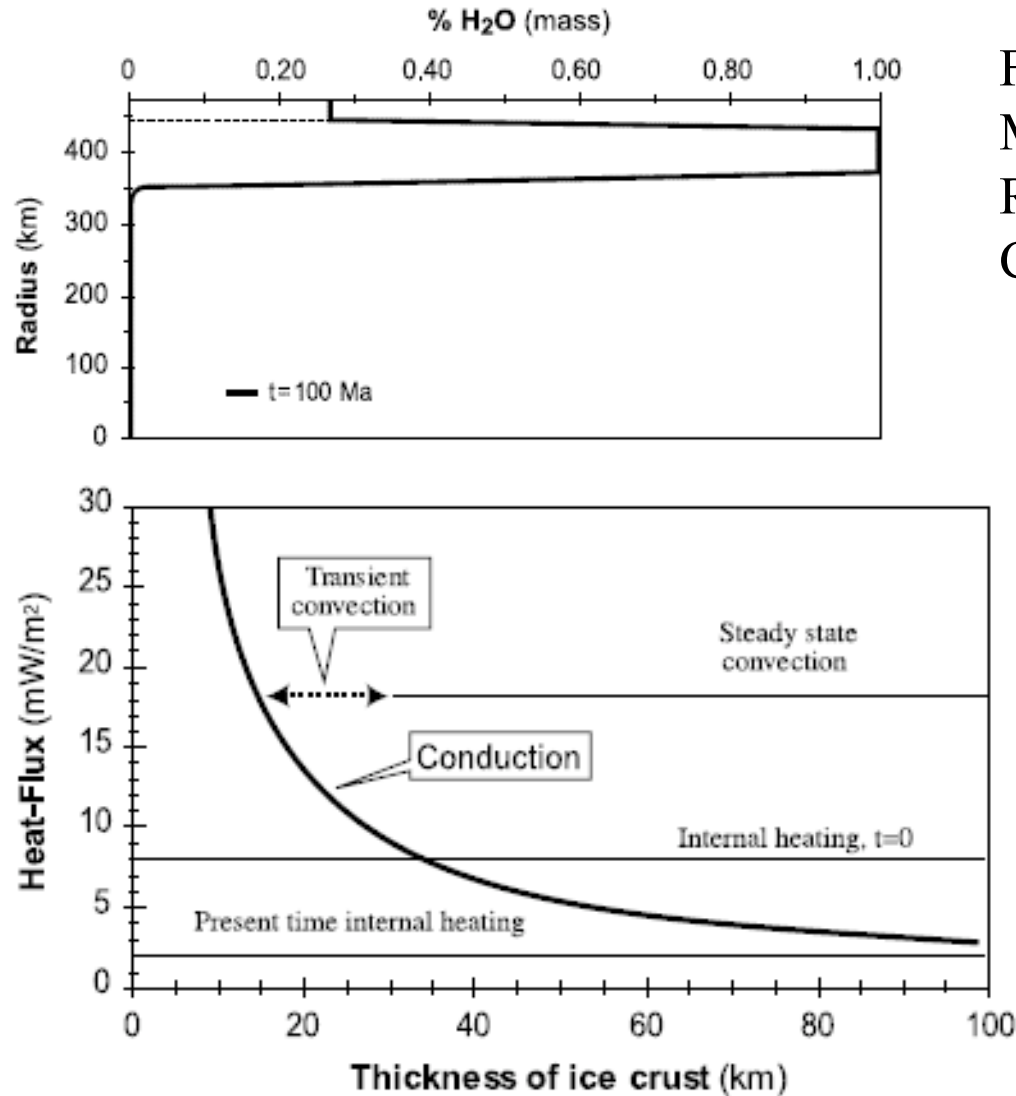
+ Chaleur latente de fusion de la glace: 334 kJ/kg



	Silicate	Ice	Mixture of Ice and Silicates
Density (ρ)	2.54 to 3.44 ^b	1.0	$fs \cdot \rho_S + (1-fs) \cdot \rho_I$
Thermal conductivity (k in W/m/K)	4.2	$0.4685 + 488.12/T$	$fs \cdot k_S + (1-fs) \cdot k_I$
Heat capacity (C in J/kg/K)	920	$185 + 7.037 T$	$xs \cdot C_S + (1-xs) \cdot C_I$
Thermal expansion, K^{-1}	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-7} \cdot T - 1.25 \cdot 10^{-5}$	Not necessary



Ceres: évolution thermique



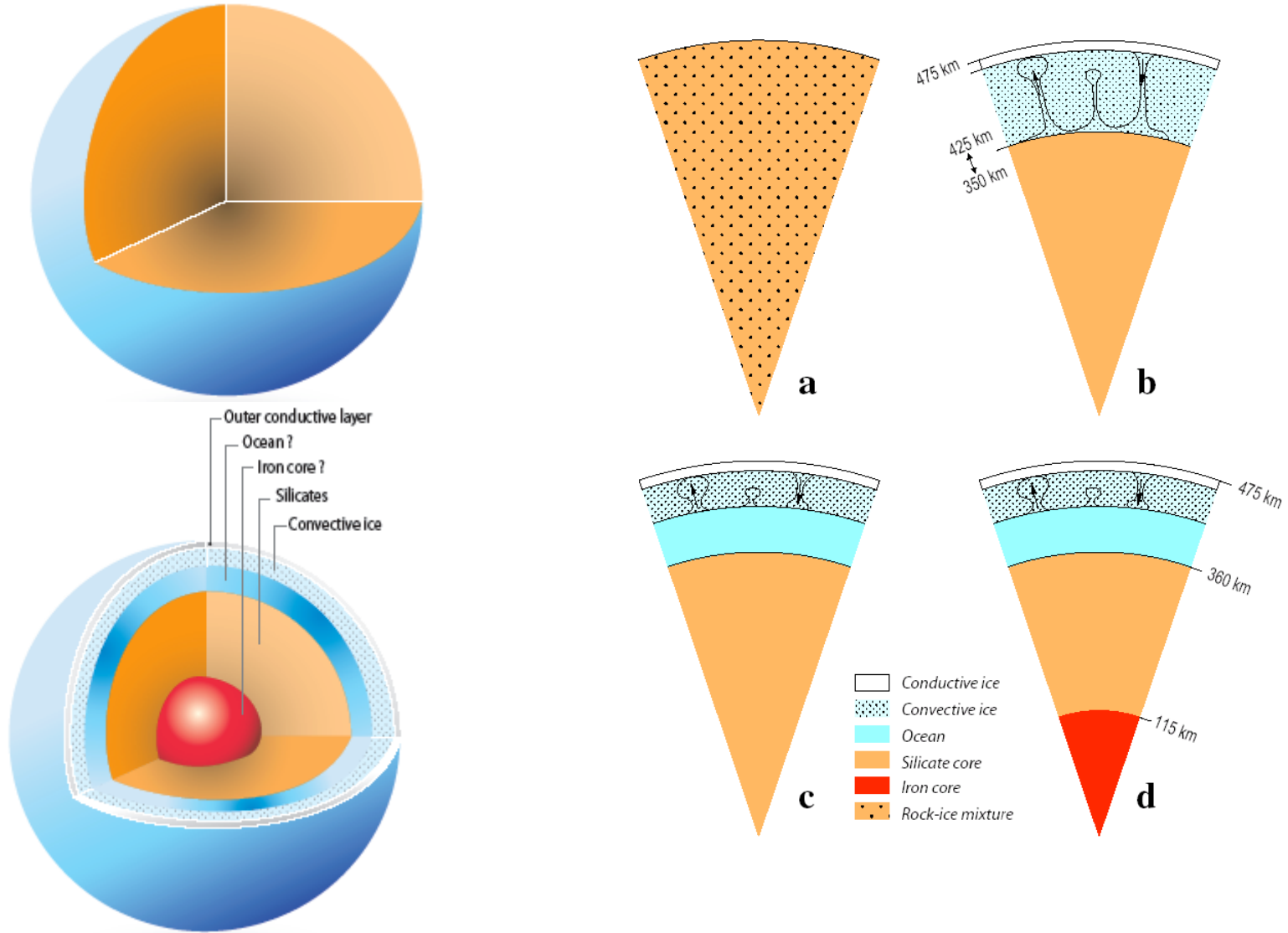
Fusion de la glace
Migration des liquides
Refroidissement
Cristallisation d'une croûte de glace

$$Ra = \frac{\alpha \rho g \Delta T D^3}{\kappa \eta}$$

Refroidissement rapide par convection.
Si de l'ammoniaque est présent, un océan interne devrait découpler la surface du noyau de silicates



Modèles de structure interne de Cérès





Conclusion sur Ceres

- **Plusieurs modèles de structure interne ont été proposés mais ils sont très mal contraints. De « faibles variations » sur la valeur des rayons changent les conclusions.**
- **Evolution thermique dépend de l'âge d'accrétion et de la présence de radioactivité éteinte**
- **La mission Dawn permettra d'avoir des informations sur la composition de surface (présence d'organiques ?) et sur la structure interne (différenciée, présence d'un océan)**
- **Elle permettra aussi de répondre à des questions comme la porosité dans ce type de corps**