

Techniques géophysiques embarquées pour détecter et caractériser les océans souterrains

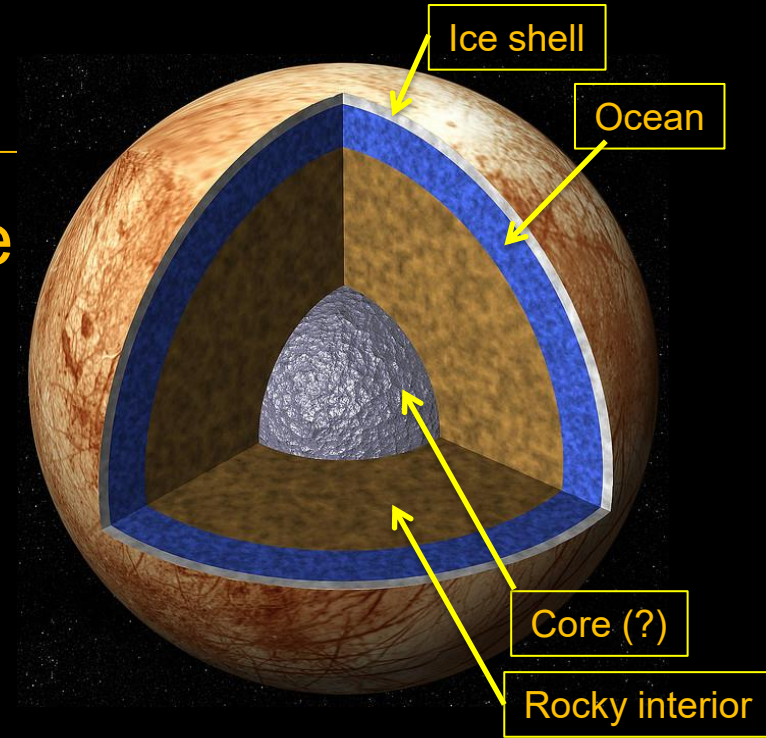
Alain Herique

Europe

L'observation depuis la terre esquisse un satellite glacé et différencié dans les années 70

Voyager 1 & 2 révèlent un monde actif avec un tectonique récente et impose la question d'un océan (1979)

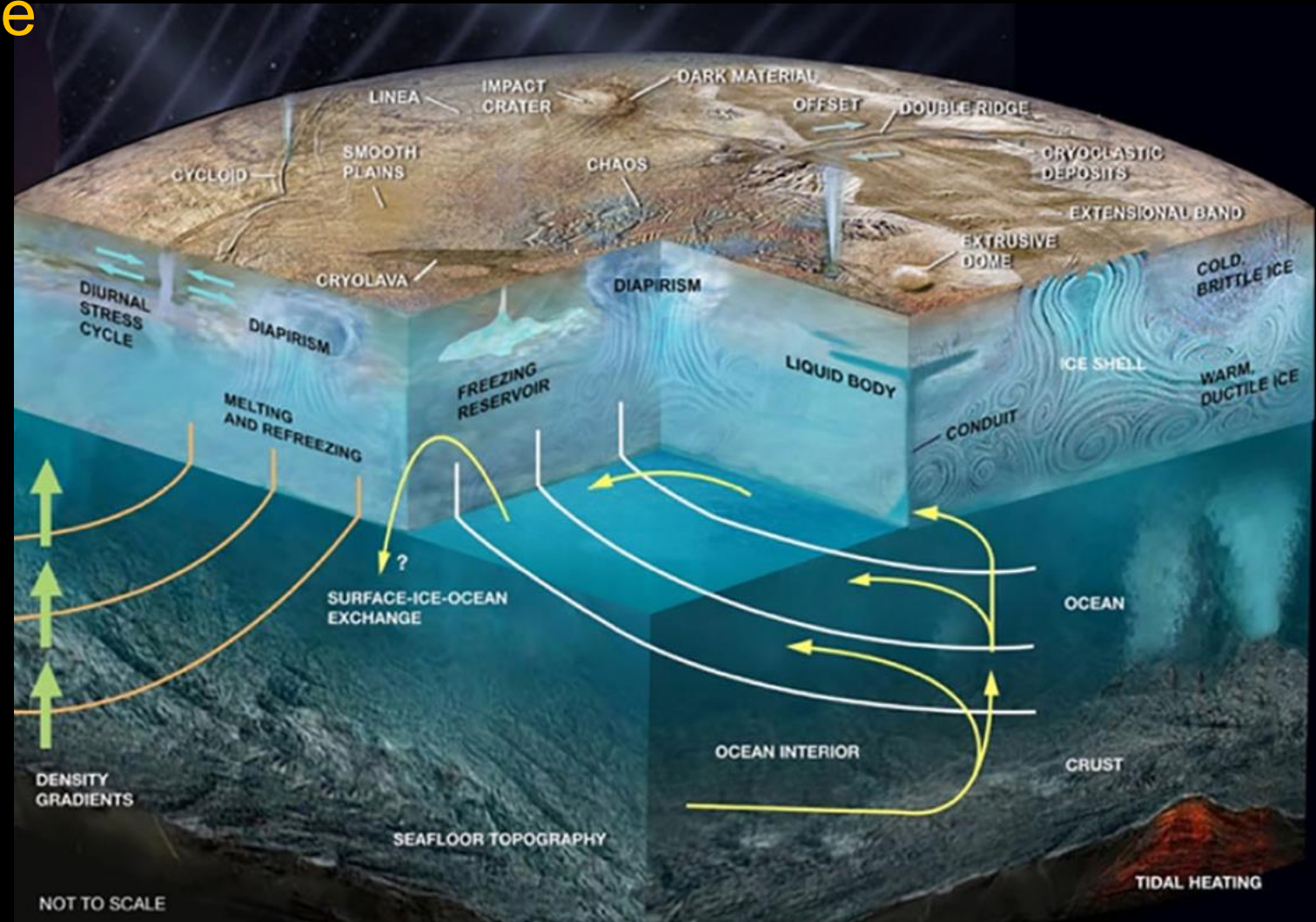
Galileo prouve la présence de cet océan par la mesure du champ magnétique



Europe

Caractérisation de l'océan,
un objectif crucial pour Juice
et Europa Clipper:

- Composition océanique
- Régime thermique
- Echange surface/ocean
- Tectonique
- Cryovolcanisme



Europe

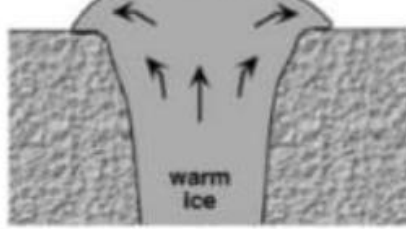
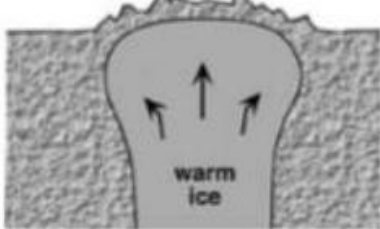
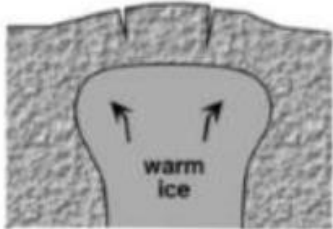
Cryovolcanisme Dôme (Mitten)

(a) Diapirism

surface upwarping

surface disruption

surface breaching and lateral creep

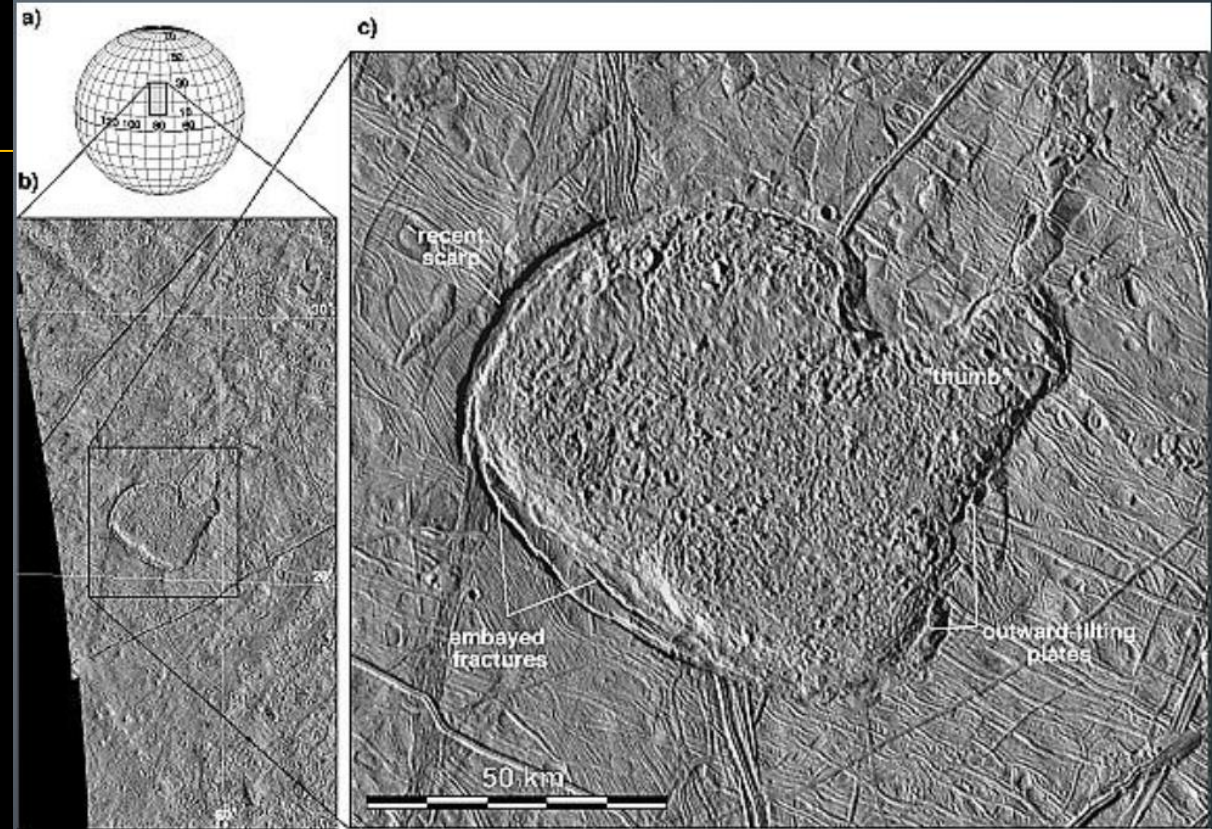
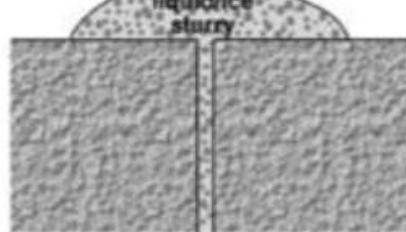
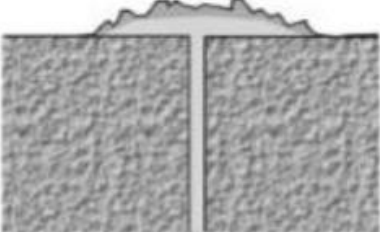
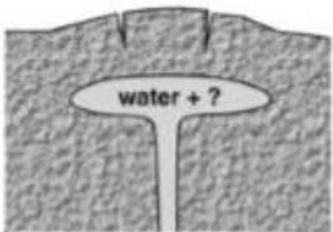


(b) Cryomagmatism

shallow intrusion, surface upwarping

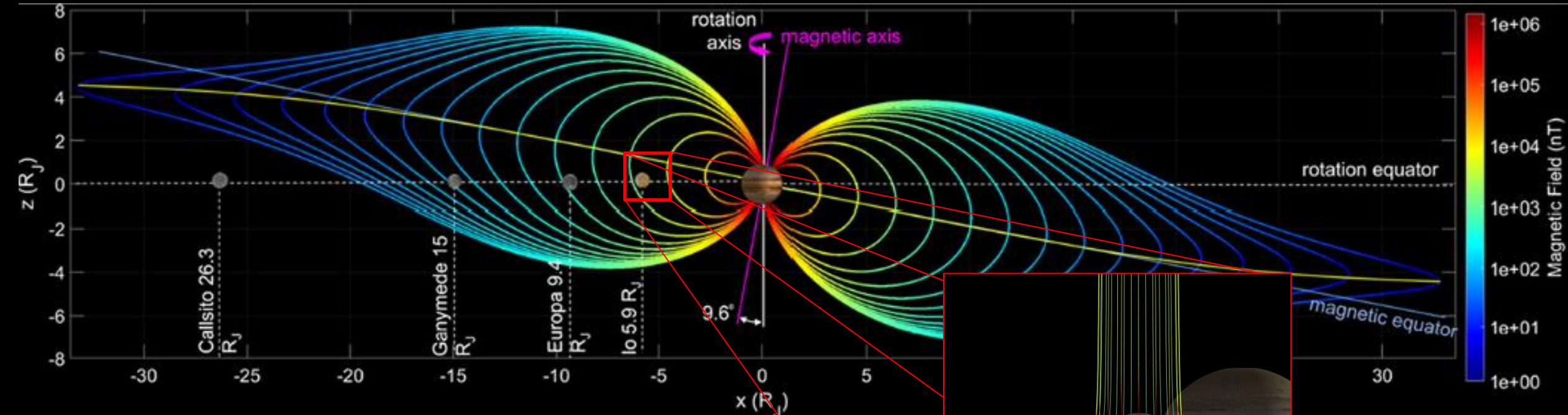
ice-covered effusion

viscous extrusion



Mesure magnétique

Le champ dipolaire Jupiter est décalé de $\sim 10^\circ$ par rapport à son axe de rotation de Jupiter => oscillation de sa magnétosphère



Présence de charges mobiles :
Champ variable => Courant => Champ induit

Mesure magnétique

Galileo 1996-2000 : 8 survols entre 200 et 3600 km (CA)

Observation d'un champ propre variable entre survol = induit

La structure de champ s'explique par une couche conductrice proche de la surface

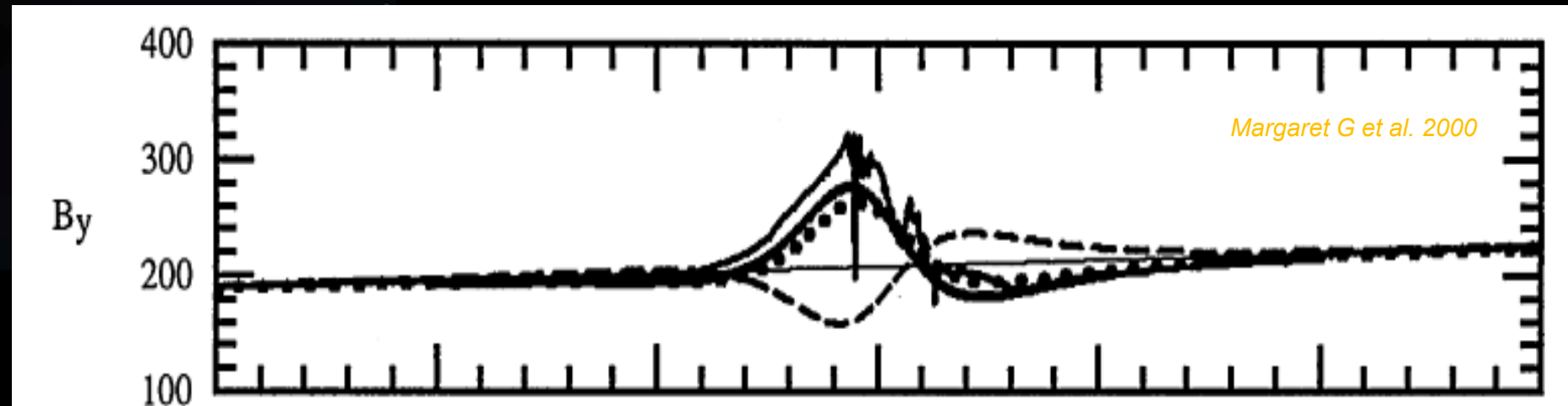
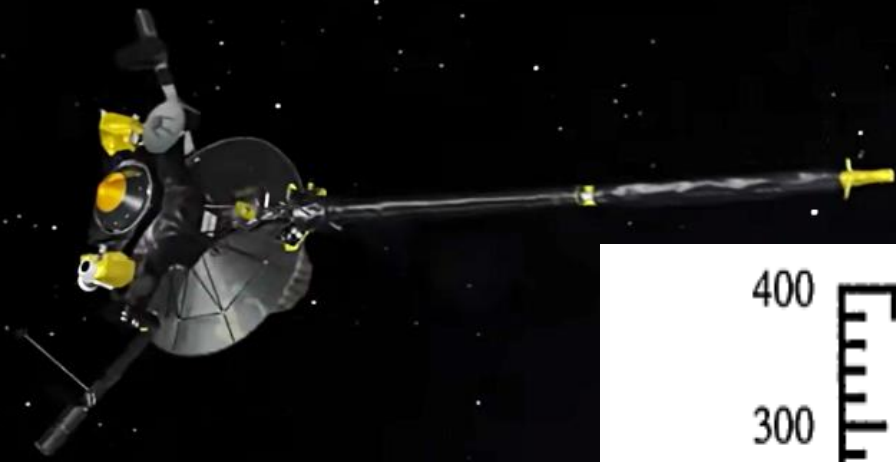
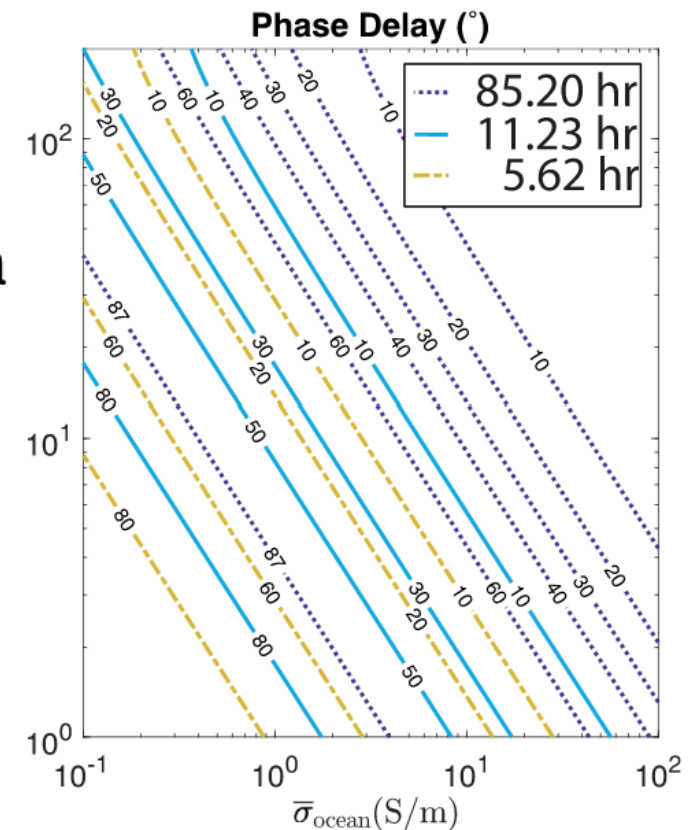
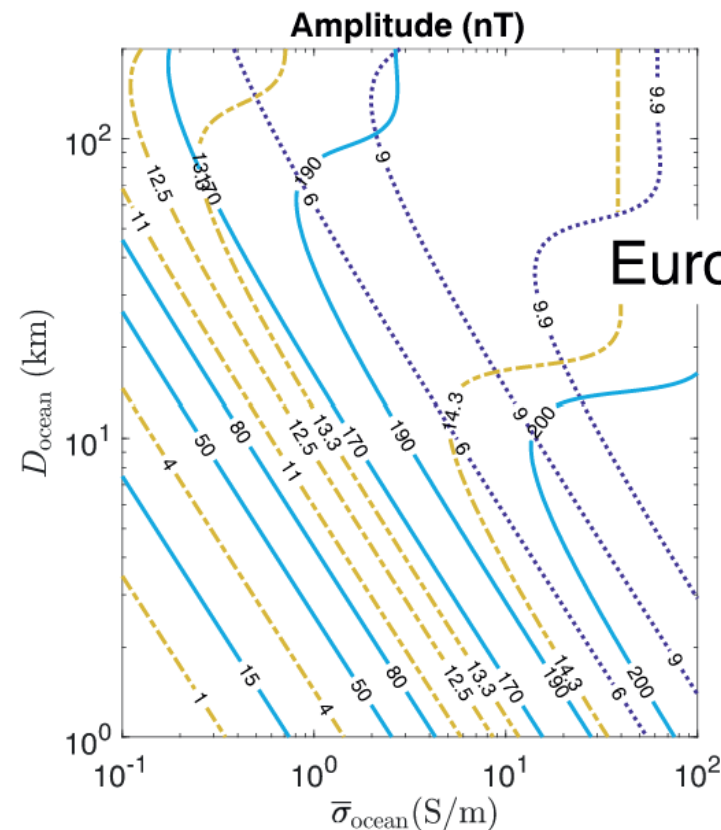


Fig. 4. The E26 pass on 3 January 2000: data within $5 R_E$ from Europa's center. Curves are as in Fig. 2. The dashed curves computed from the dipole moment fit to the E4 pass are in antiphase to both the dipole fitted to the E26 data (heavy solid curves) and to the inductive response model (dotted curves).

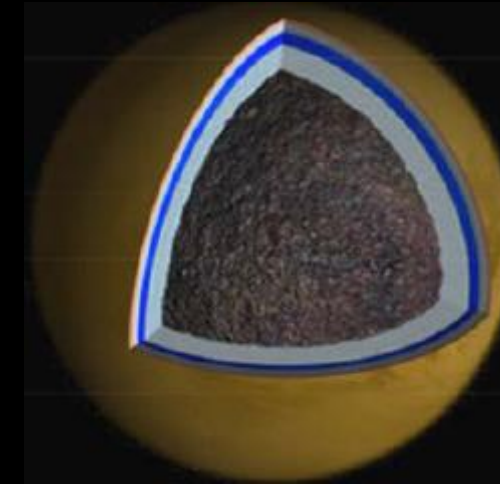
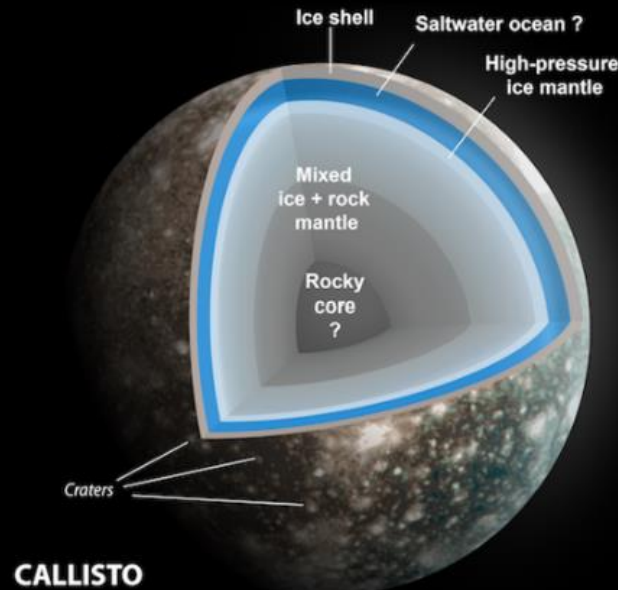
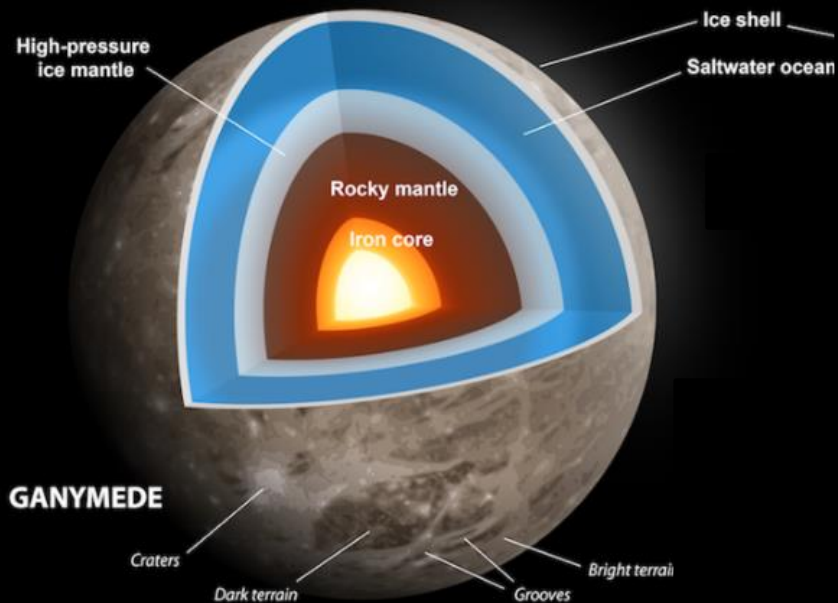
Mesure magnétique

La profondeur de sondage dépend de la fréquence du champ (effet de peau)

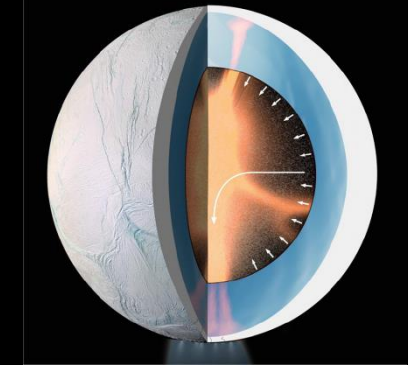
La multiplication des observations permet de dissocier les périodes et de mieux contraindre son épaisseur et sa conductivité



Ganymede, Calisto et les autres



Titan



Enceladus

Suspecté par Galileo
(Champ permanent complexifie la mesure)
Confirmé par observation des aurores

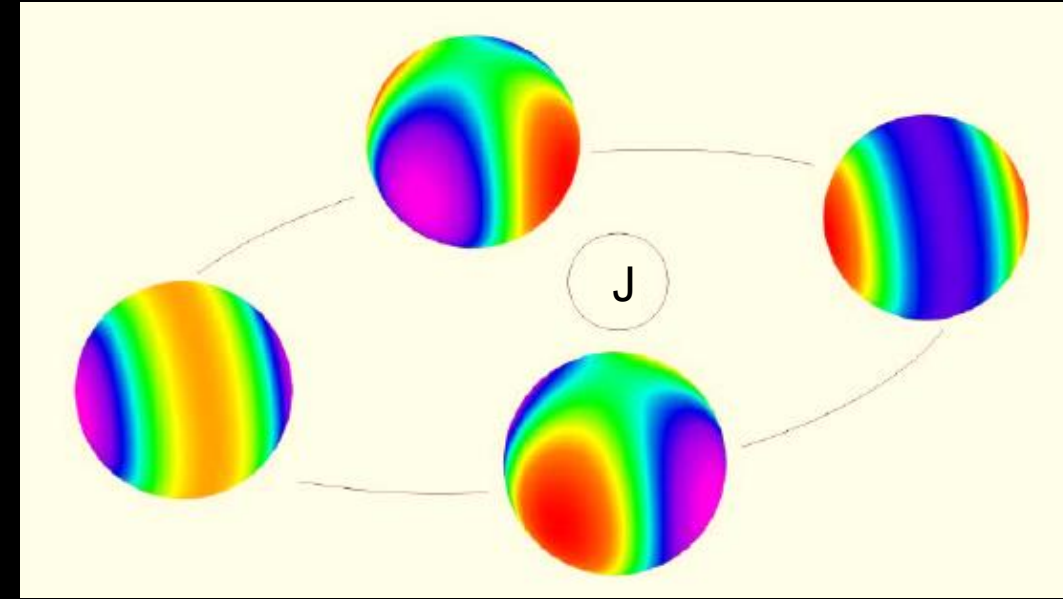
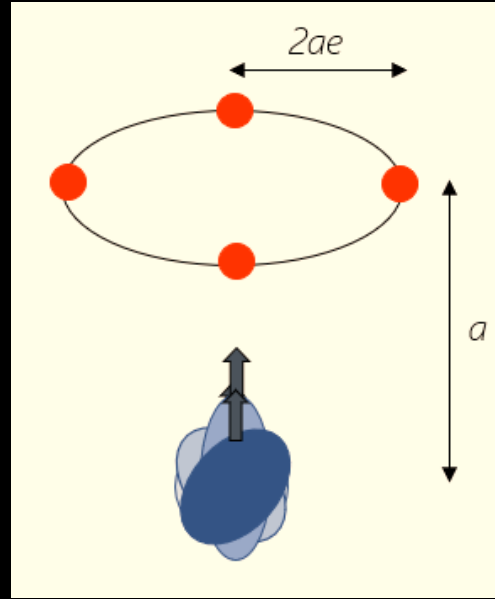
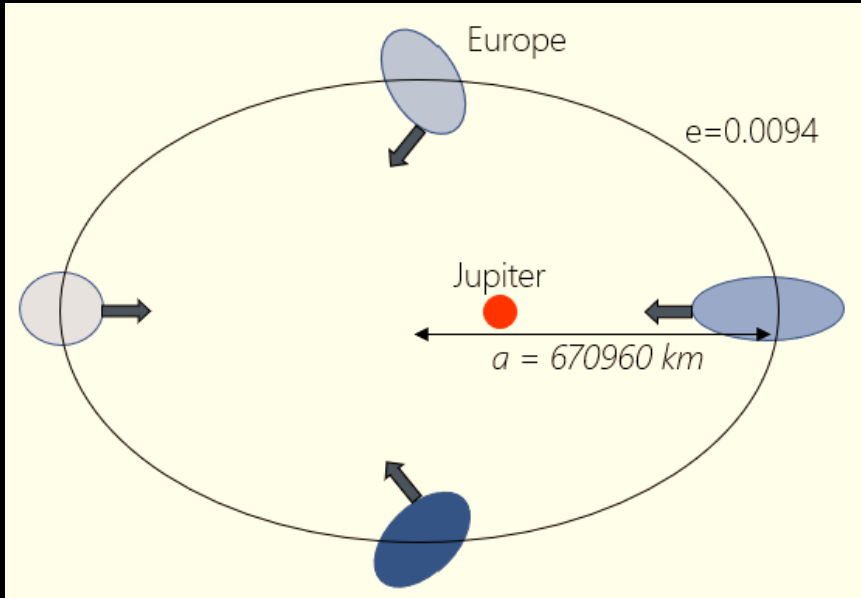
Galileo
non conclusif

Champ magnétique de
saturne aligné

Pas de champ inducteur
significatif

Les marées

une résonance 1:1 associé à une orbite elliptique



Les marées

Une réponse dépend de la structure interne

L'océan découple le noyaux et la surface glacée

cold brittle ice

thin ice layer

completely frozen

ocean

	Océan	Solide
Europa	~ 20 à 30 m	~60 cm
Ganymede	~ 3 – 4 m	~20 cm
Callisto	~ 2 – 3 m	~10 cm

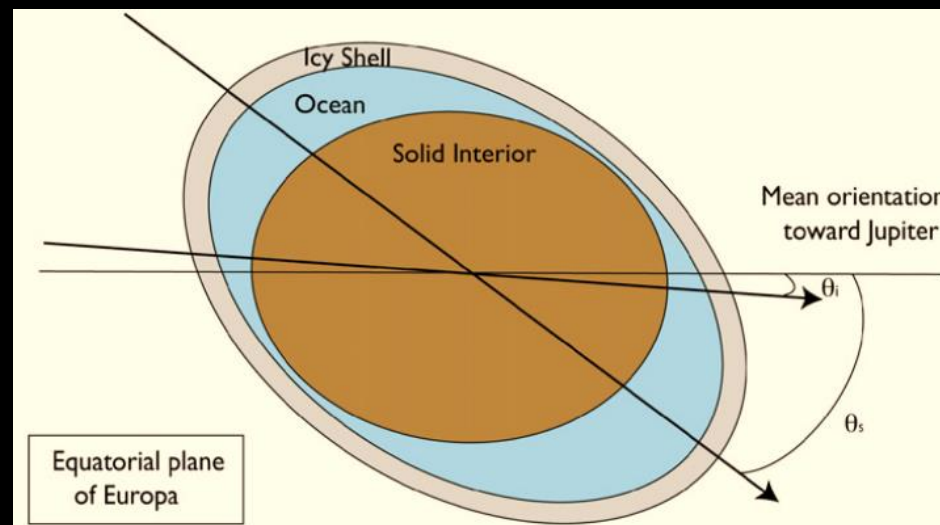
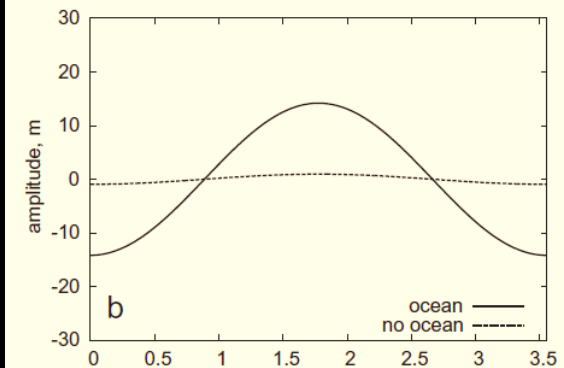
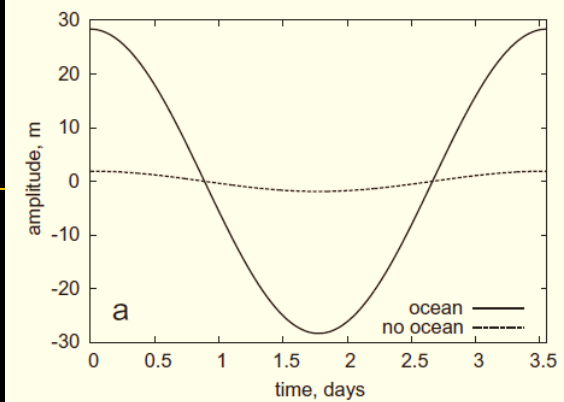
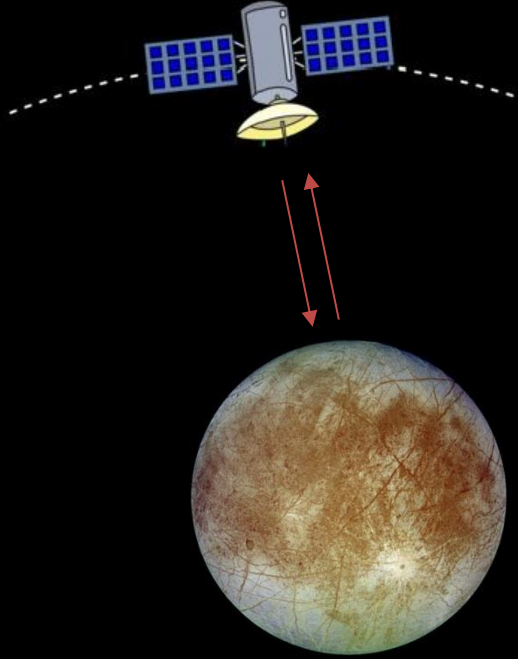


Fig. 3. Geometry of Europa's shell and interior libration (not to scale).

Les marées : Altimétrie



Altimétrie radar ou laser

- Mesure de distance
- Correction d'orbitographie

Estimation de la déformation

- Modèle temporel de déformation
 - Amplitude et phase de marée
- => Rhéologie de la glace

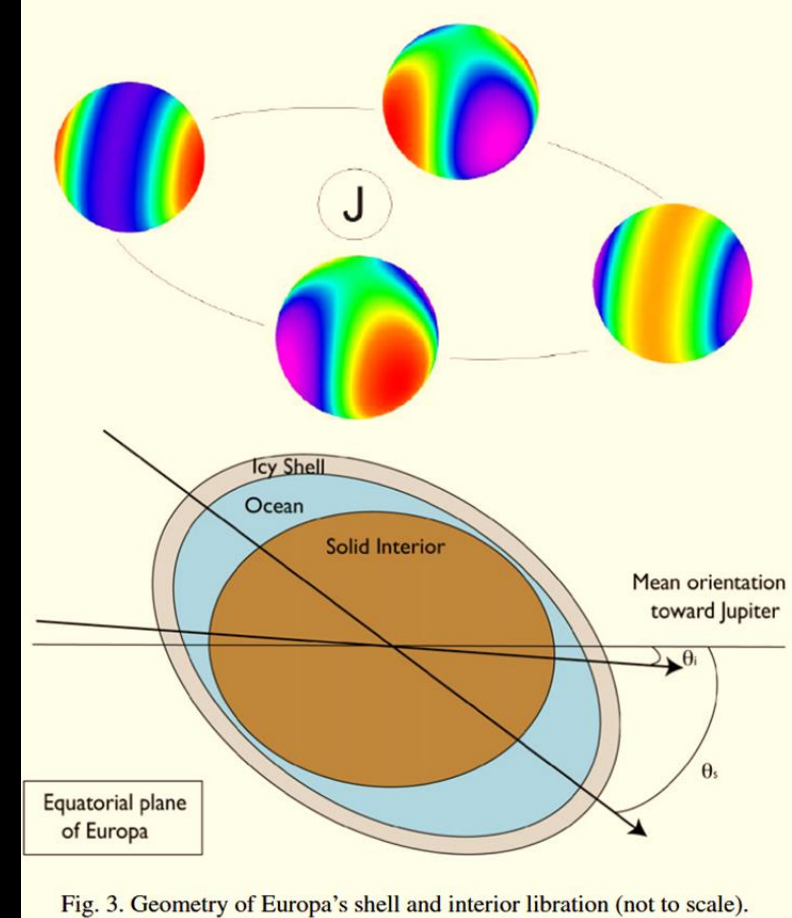


Fig. 3. Geometry of Europa's shell and interior libration (not to scale).

Les marées : Radio science et optique

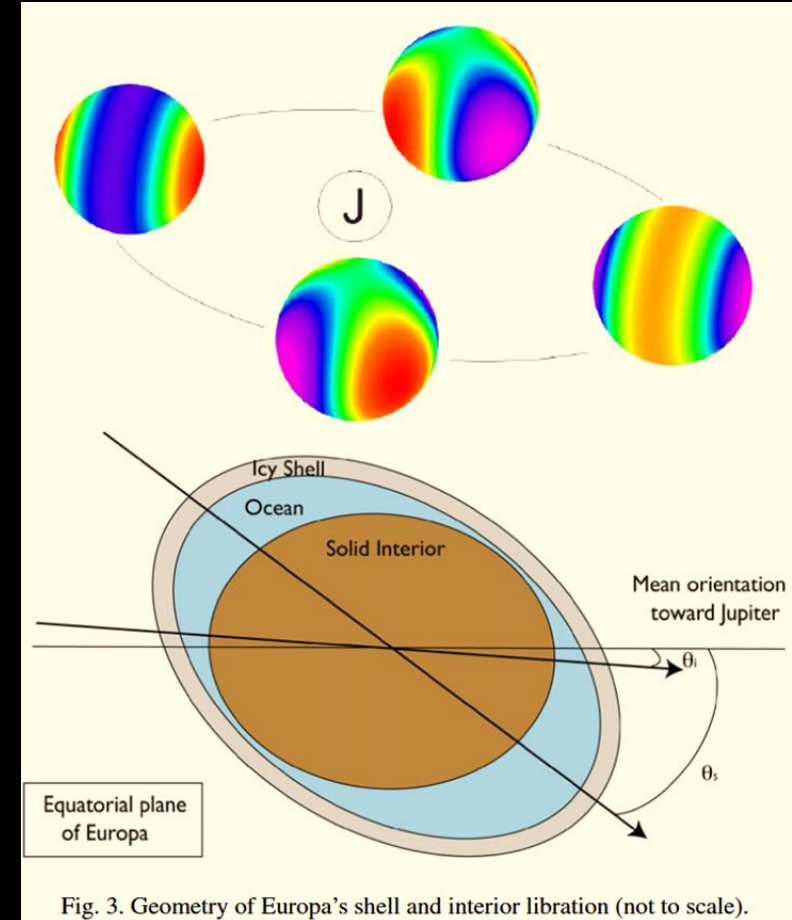
Mesure de la variation tidale du champ de gravité

- Suivit Doppler depuis la terre
- Reconstruction de l'orbite et champ gravité
- Modélisation de la composante variable du champ

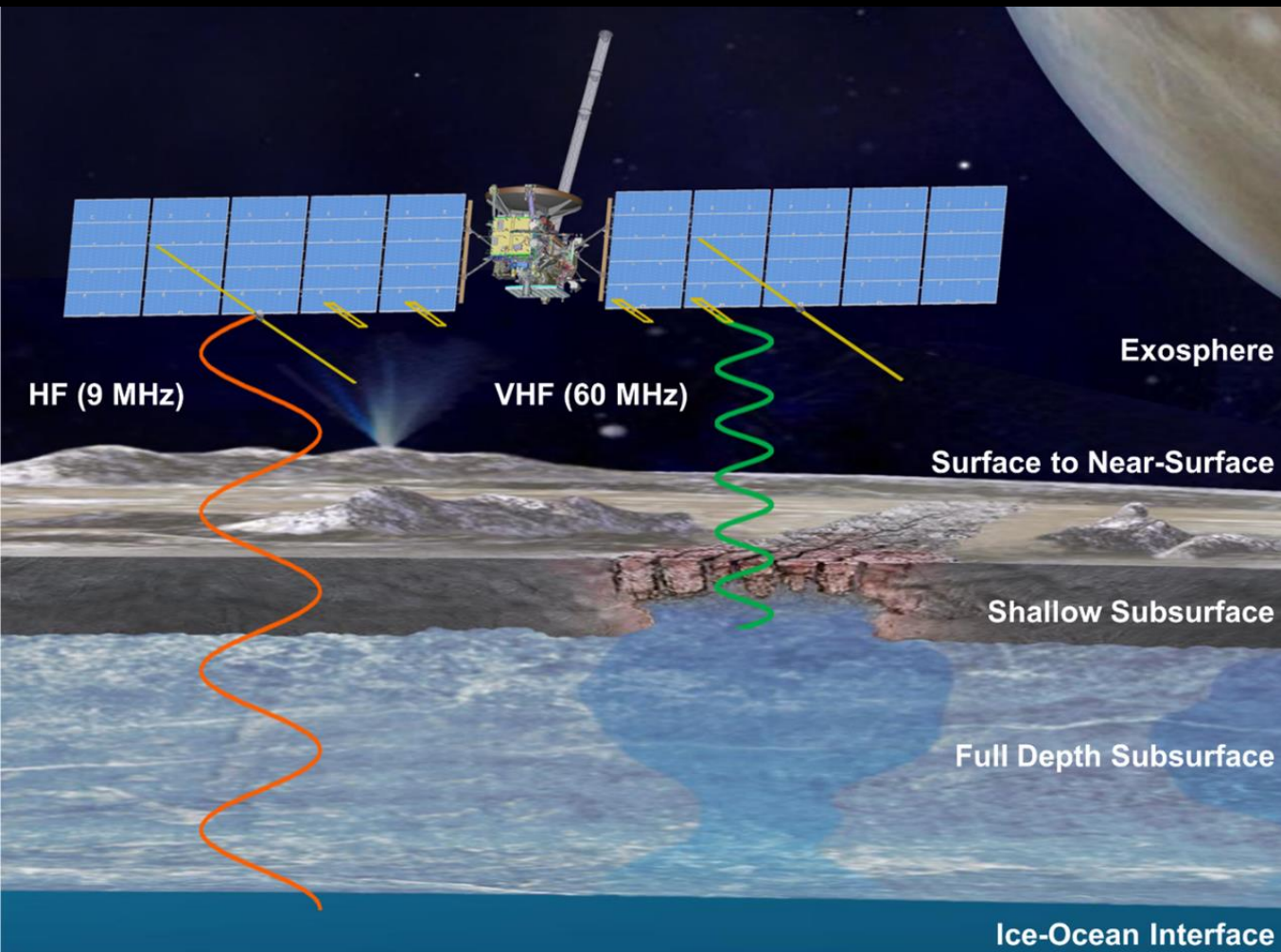
Suivit de la libration induite par le décalage enveloppe / cœur

- Déplacement horizontal de la surface
- Mesure optique et laser

Estimation de la déformation du noyau / surface

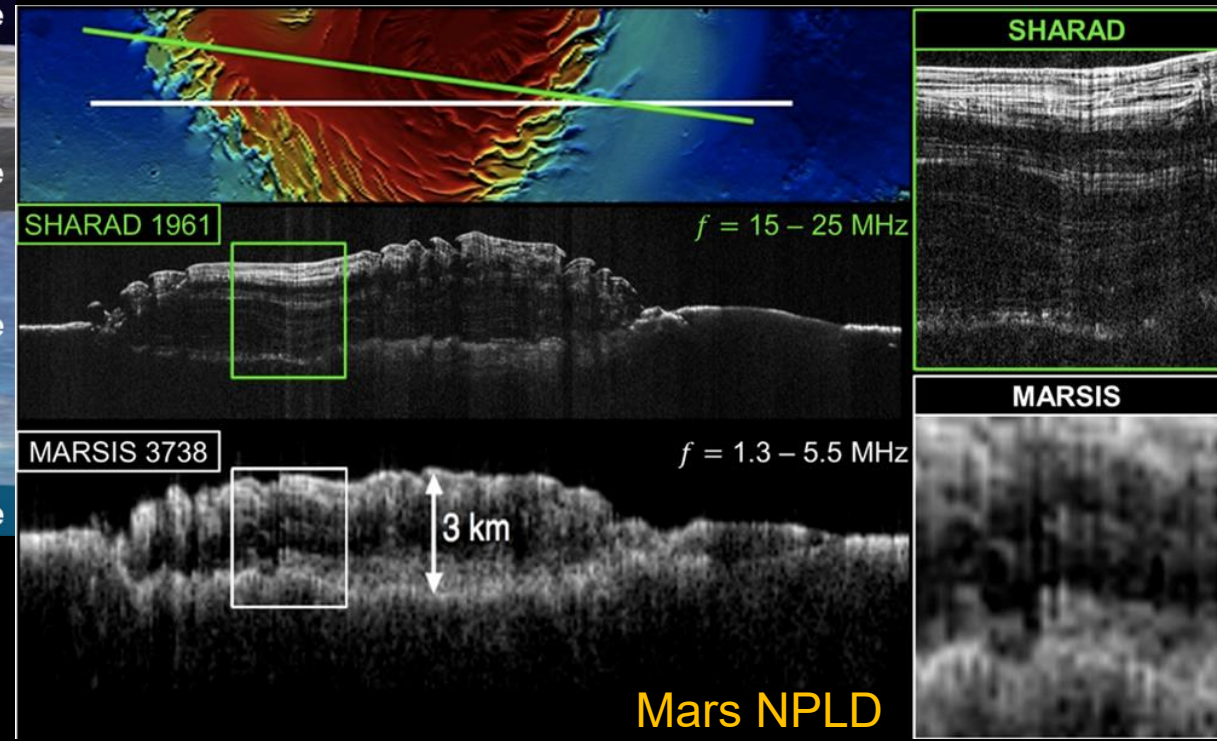


Détection directe: Radar

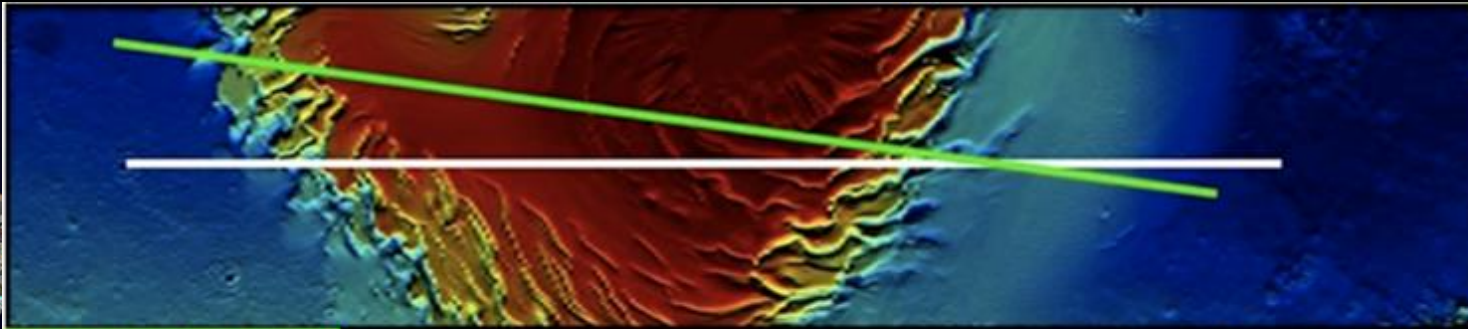
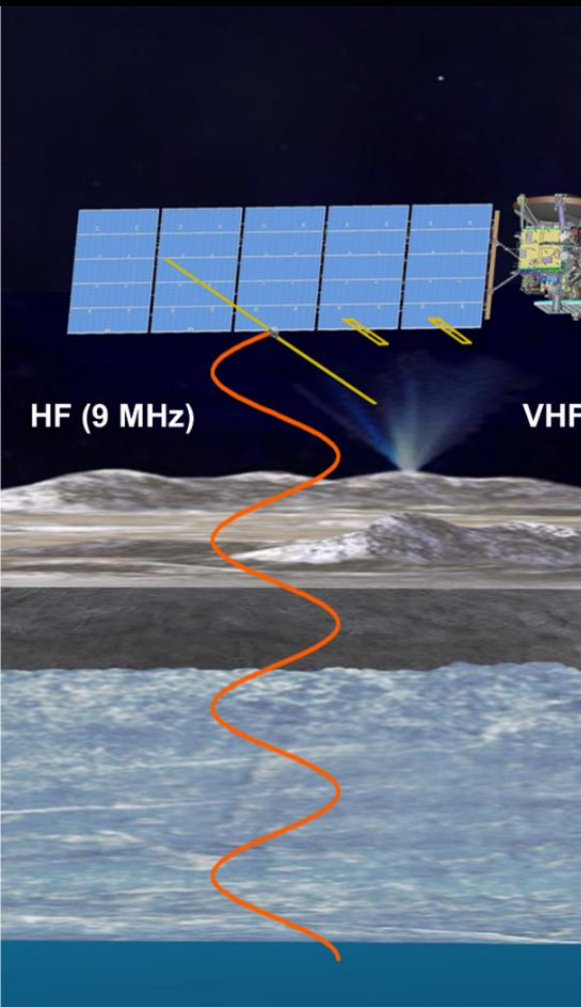


Sondage radar au nadir

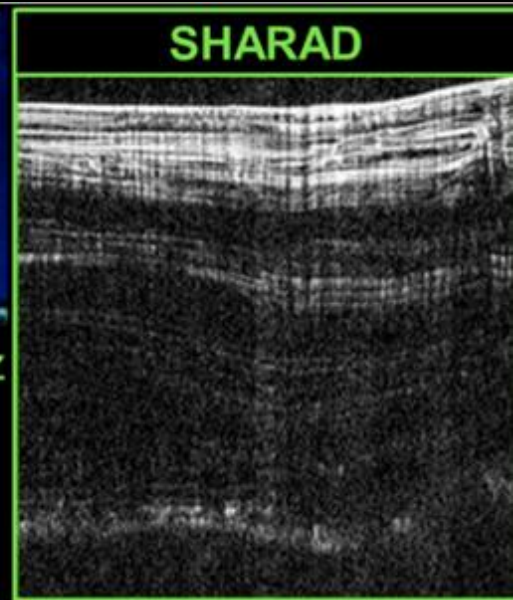
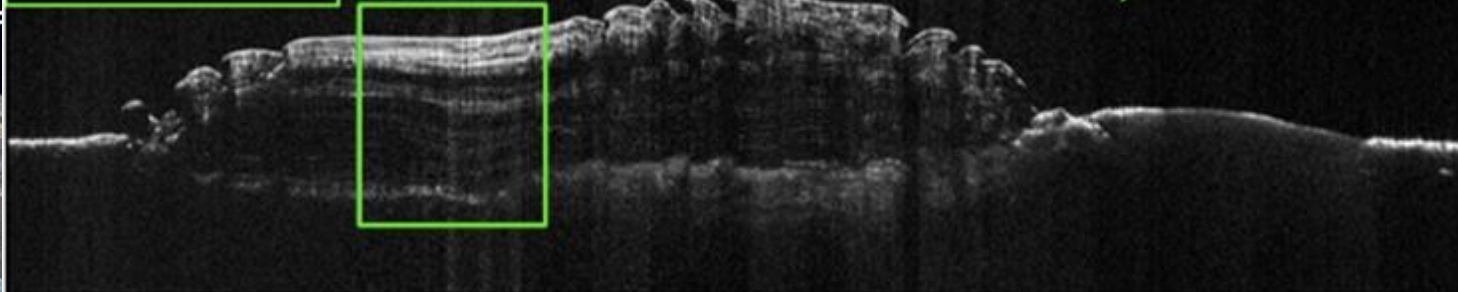
- 9 MHz
- Pénétration ~10km
- Dépend de la salinité, profil de température ...



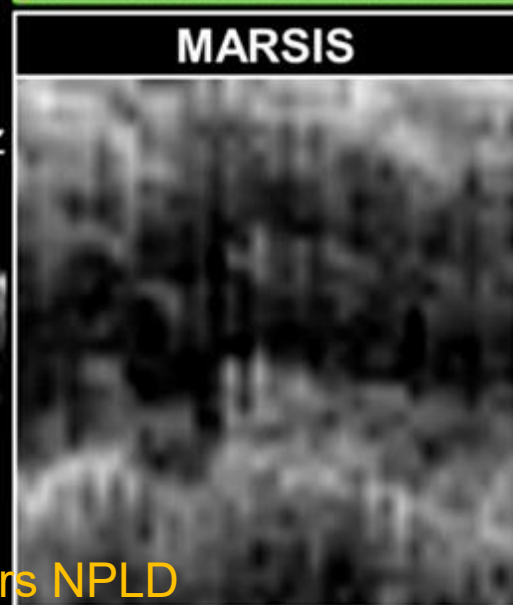
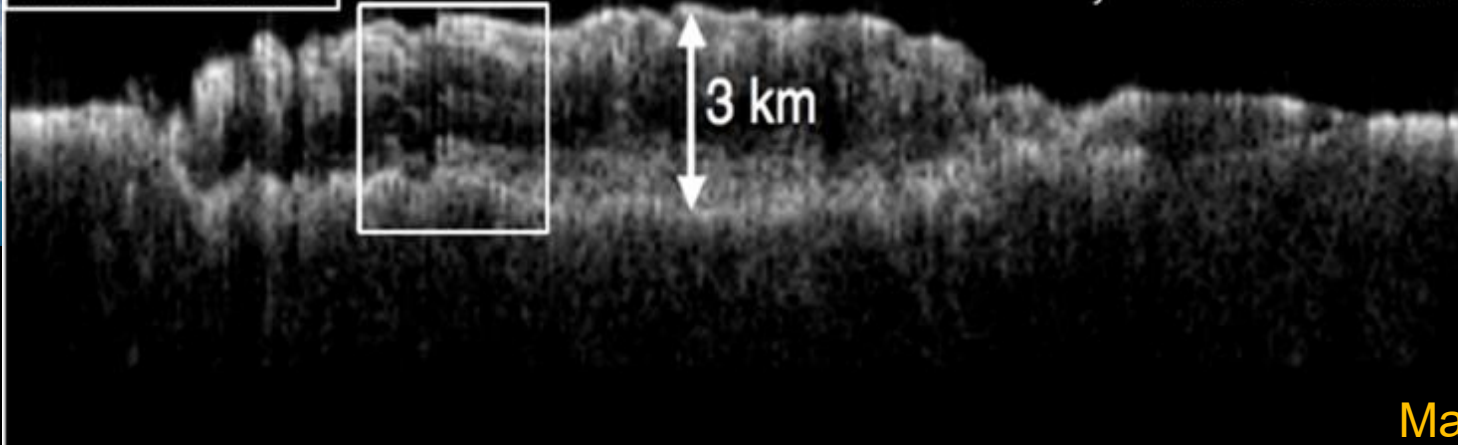
Détection directe: Radar



SHARAD 1961



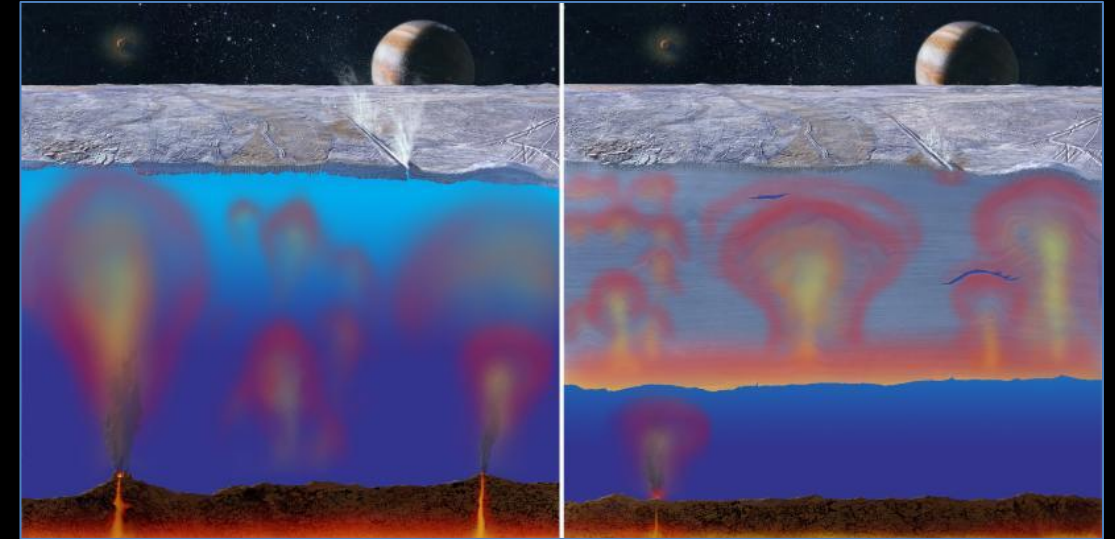
MARSIS 3738



Imagerie du croute: Radar

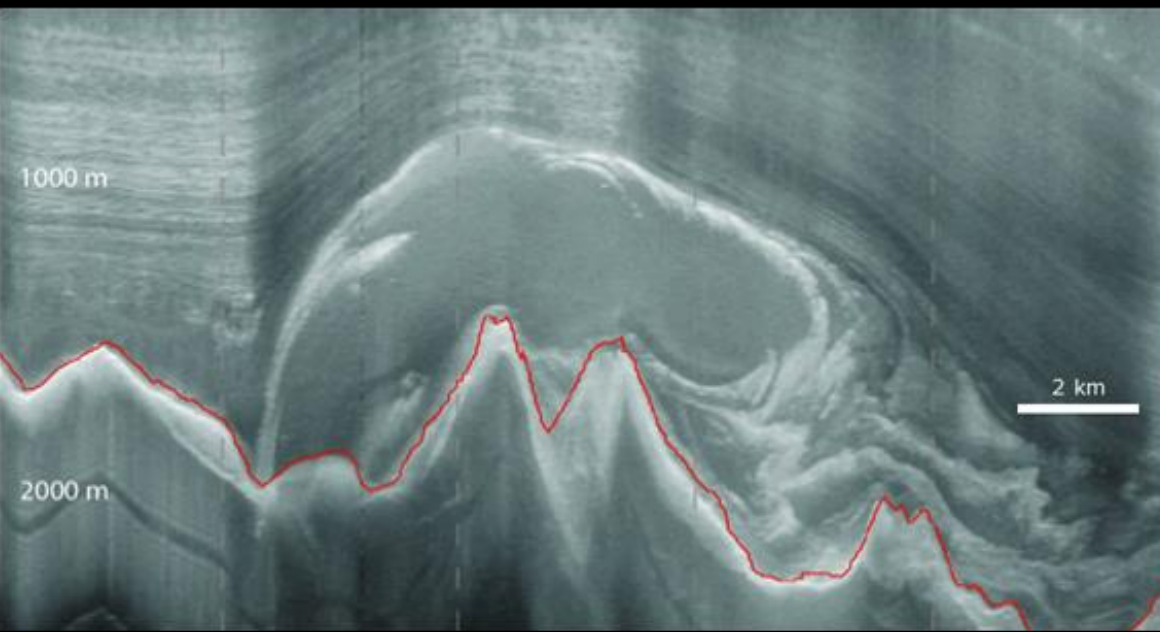
Imagerie des premiers kilomètres

- Reconnexion surface/océan
- Cryovolcanisme et diapirisme
- Régime thermique



thin-conductive ice shell

thick-convecting ice shell



Plume of ice accreted from subglacial melt near Dome A, East Antarctica (Bell et al., 2011). The red line delineates the glacier bed. Layers above the plume are compositional interfaces created by soluble impurities and are distorted by the accreting plume.

Mars NPLD



Mesure magnétique

Le champ dipolaire Jupiter est décalé de $\sim 10^\circ$ par rapport à son axe de rotation de Jupiter => oscillation de sa magnétosphère

