

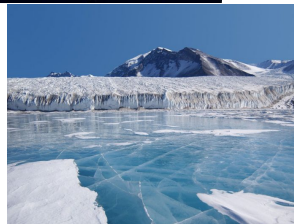
# Mesures en géosciences

Albane Saintenoy, maîtresse de conférence  
Géosciences Paris Saclay, Bâtiment 504

[albane.saintenoy@universite-paris-saclay.fr](mailto:albane.saintenoy@universite-paris-saclay.fr)

# Déroulement du cours

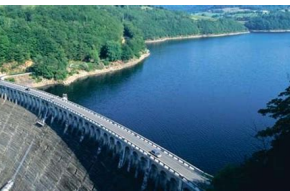
- ▶ 3 cours d'introduction :
  - ▶ Prospection géophysique
  - ▶ Dynamique fluviale
  - ▶ Outils en géochimie (Cécile Quantin)
- ▶ 7 TD/TP :
  - ▶ Topométrie
  - ▶ Planimétrie
  - ▶ Radar de sol
  - ▶ Porosité des sols granulaires
  - ▶ Dynamique fluviale
  - ▶ Granulométrie
  - ▶ Chimie des eaux



# La Terre = objet complexe d'étude

Dynamique complexe aux mécanismes physiques multiples:

- ▶ milieux hétérogènes,
- ▶ écoulements multi-phasiques,
- ▶ matériaux aux propriétés mécaniques multiples (déformation ou rupture),
- ▶ soumis à des conditions climatiques plus ou moins extrêmes, ...

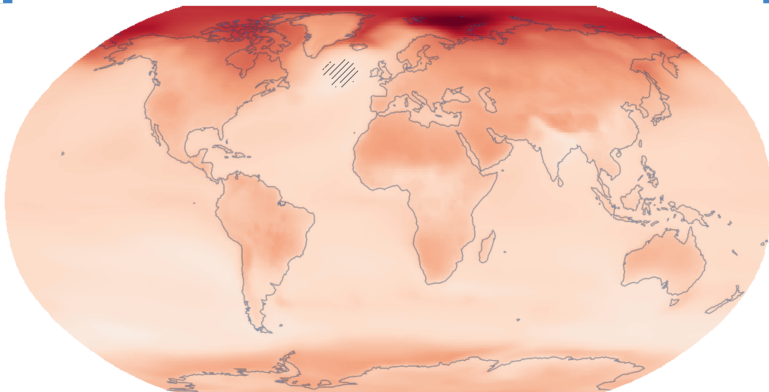


# Nombreux enjeux sociétaux

- ▶ Ressources: eau, hydrocarbure, métaux rares, minerais, ...
- ▶ Phénomènes naturels: séismes, volcans, glissements de terrain, ...
- ▶ Objets anthropiques: pollution, fondations, stockages, ouvrages d'art, archéologie



# Et comprendre les conséquences de ça...

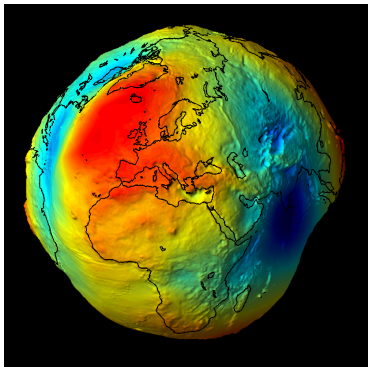


Mean temperature (T) - Change (deg C)  
Warming 1.5°C (SSP5-8.5) (rel. to 1850-1900)  
CMIP6 - Annual (34 models)

□ High agreement  
▨ Low agreement



## Différentes échelles spatiales et ...

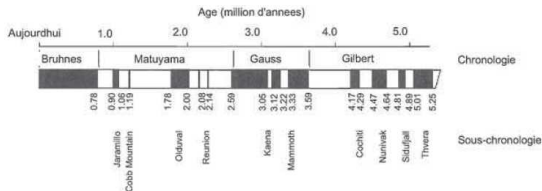


Géoiide (équipotentielle du champ de pesanteur)



Sol

# Différentes échelles temporelles



Du million d'années à la minute

## Différentes approches

- ▶ terrain
- ▶ laboratoire
- ▶ aéroporté et drone
- ▶ mesures satellites

But global:

Mesurer des paramètres physiques permettant de remonter à la caractérisation/compréhension/quantification/évolution d'un phénomène naturel ou anthropique.

# Différentes propriétés physiques

## Différentes propriétés physiques

Grandeur mesurée	Paramètres physiques	Méthode
Variations spatiales de l'amplitude de champ de gravité terrestre	Densité ( $\rho$ )	Gravimétrie
Variations spatiales de l'amplitude de champ magnétique terrestre	Susceptibilité magnétique ( $\xi$ ) et rémanence	Magnétisme
Temps de parcours d'ondes sismiques	Vitesses $v_p$ et $v_s$	Sismique
Différences de potentiels électriques	Conductivité électrique ( $\sigma$ )	Mesures de résistivité électrique
Intensité d'une composante du champ mag.	Conductivité électrique ( $\sigma$ ) et/ou inductance ( $L$ )	Mesures électromagnétiques par induction
Temps de parcours et atténuation d'ondes EM	Permittivité diélectrique ( $\epsilon$ ) et conductivité électrique	Radar de sol

# Lien masse, masse volumique et densité

$$M_v = \frac{M}{V}$$

$$\rho = \frac{M_v(\text{roche})}{M_v(\text{eau})}$$

$M$  : masse,  $\rho$  : densité,  $M_v$  : masse volumique,  $V$  : volume

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse\\_volumique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique)

# Gravimétrie



Méthode géophysique dérivée de la loi d'attraction universelle de Newton

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{M_a M_B}{d^2}$$

$F_{A/B}$  et  $F_{B/A}$ : forces d'attraction en N,

$M_A$  et  $M_B$ : masses en kg,  $d$  distance en m

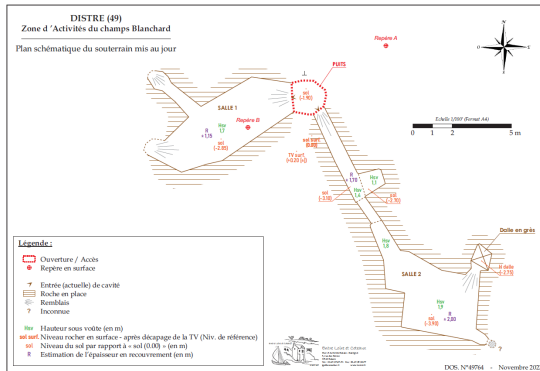
$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup> la constante de gravitation universelle

## Cas d'étude en pays de la Loire



Étude INRAP menée par Benjamin Fores.

## Recherche de grottes souterraines



# Mesures gravimétriques et topographiques

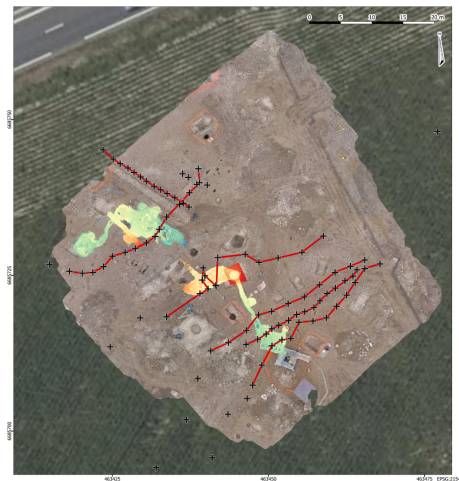


CG-6 Scintrex



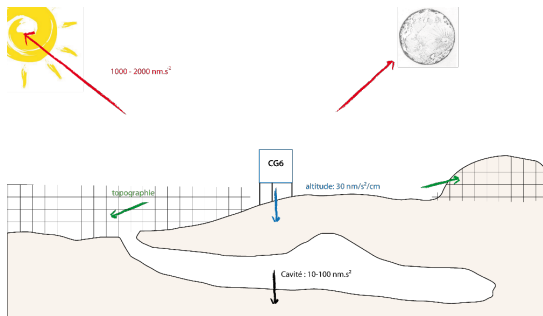
Totale station Trimble S5

Après deux jours d'acquisition...



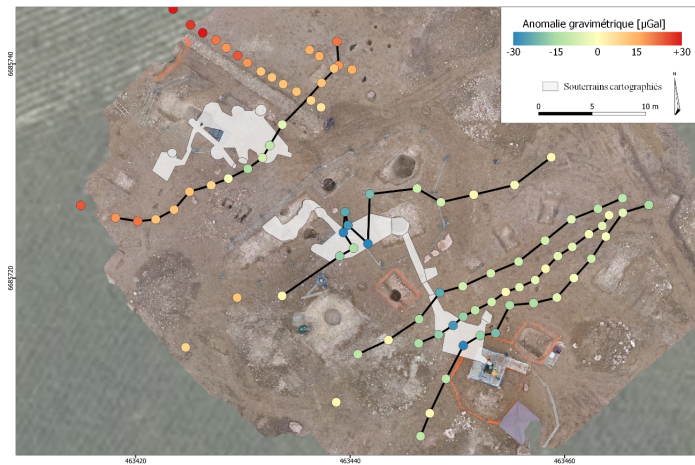
105 points le long de 6 profils

# Corrections

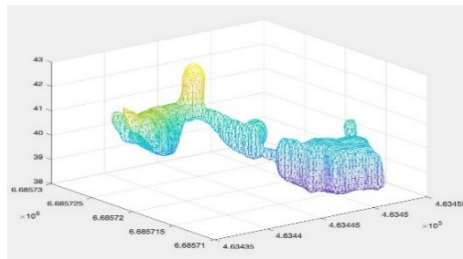
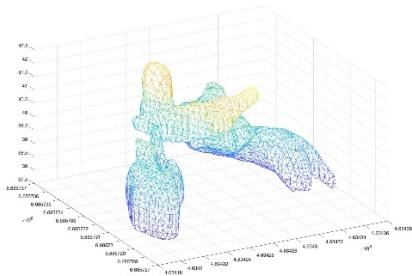


- ▶ Corrections temporelles :
  - ▶ Dérive instrumentale ( 0-10  $\mu\text{Gal} / \text{h}$  )
  - ▶ Marées (10-100  $\mu\text{Gal} / \text{h}$  )
- ▶ Corrections spatiales :
  - ▶ Altitude ( 3.086  $\mu\text{gal}/\text{cm}$  )
  - ▶ Latitude ( -0.8  $\mu\text{Gal}$  northing )
  - ▶ Terrain
  - ▶ Correction de Bouguer
  - ▶ ...

## Résultats



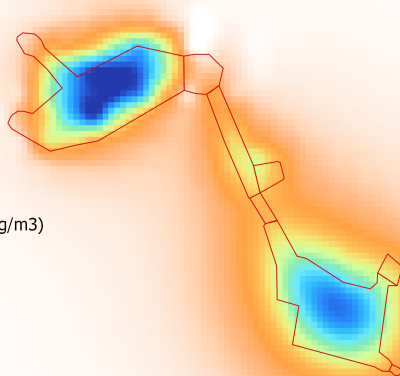
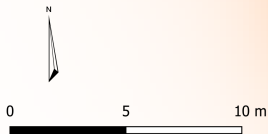
# Photogrammétrie des grottes



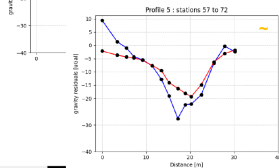
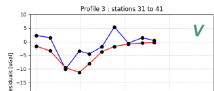
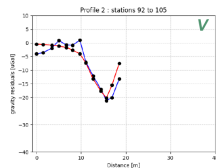
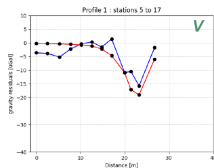
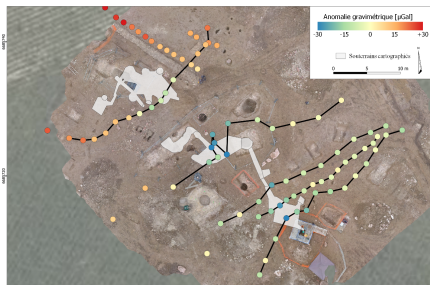
# Modélisation numérique

□ souterrain modélisé

gz (uGal, rho = -1700 kg/m<sup>3</sup>)



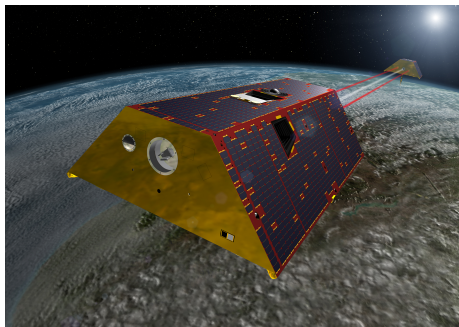
# Données simulées versus mesurées



## Conclusions sur le site de Distré

- ▶ Les données simulées en prenant en compte les deux grottes découvertes par la prospection explique très bien les données acquises sur le sol
- ▶ Il n'y a pas d'autres cavités aux alentours

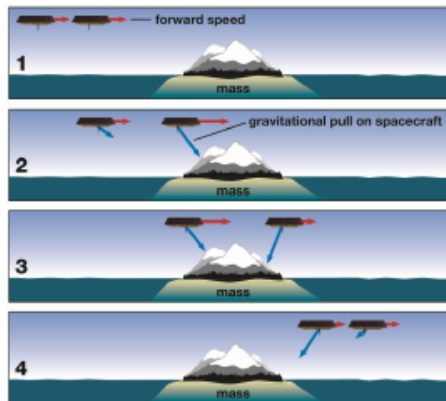
# Projet GRACE



*Gravity Recovery And Climate Experiment* Les positions relatives des deux satellites et les variations de leurs orbites sont exploitées pour mesurer l'évolution du champ gravitationnel dans la région survolée.

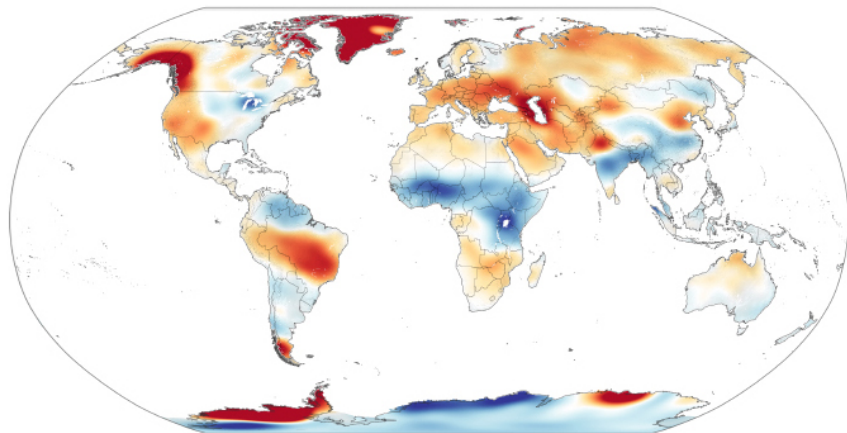
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Gravity\\_Recovery\\_and\\_Climate\\_Experiment](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gravity_Recovery_and_Climate_Experiment)

# Projet GRACE

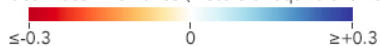


Détecte les anomalies de gravité.

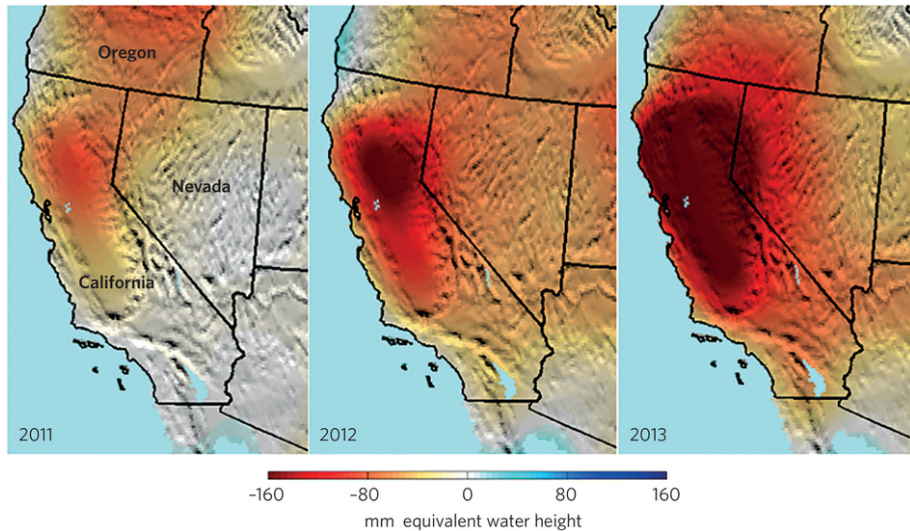
# Projet GRACE



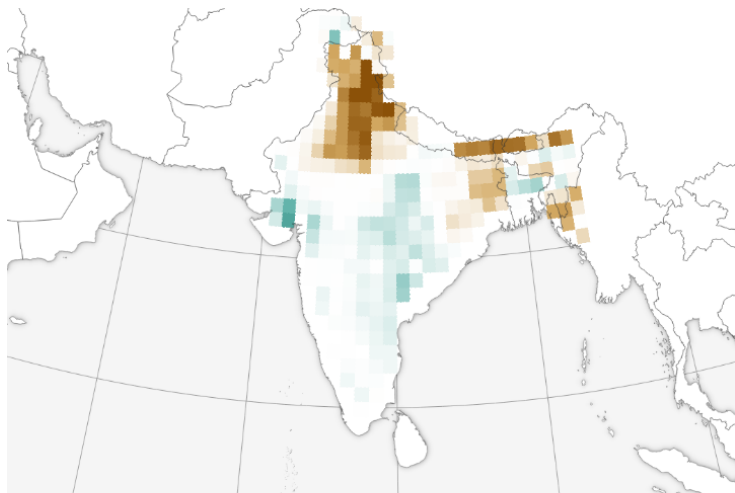
August Surface Mass Anomalies (meters of equivalent water height)



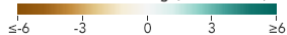
## Projet GRACE



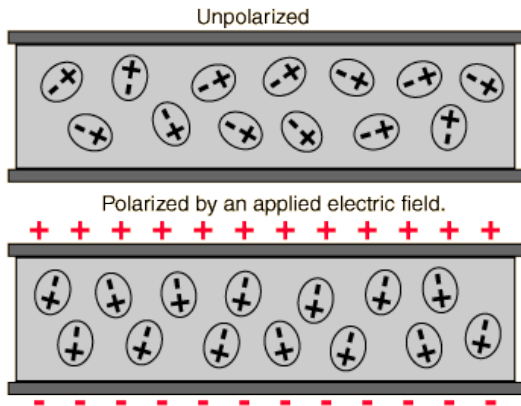
# Projet GRACE



Trend in Groundwater Storage, 2003-2014 (cm/year)



# Permittivité diélectrique

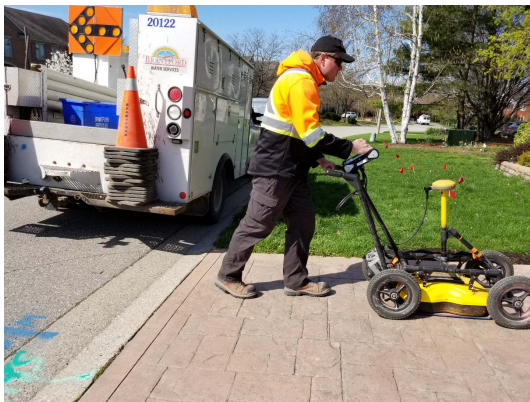


<https://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9>

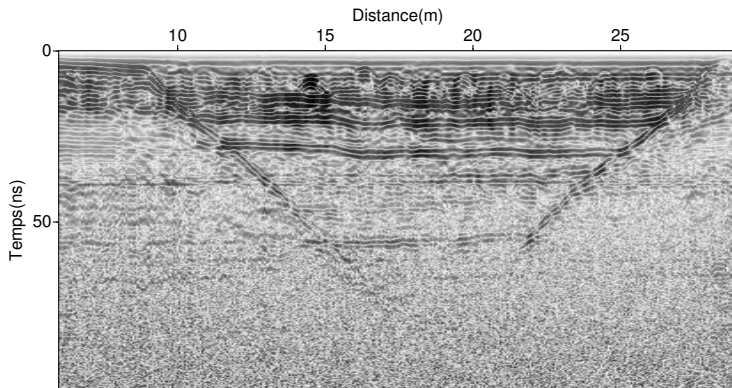
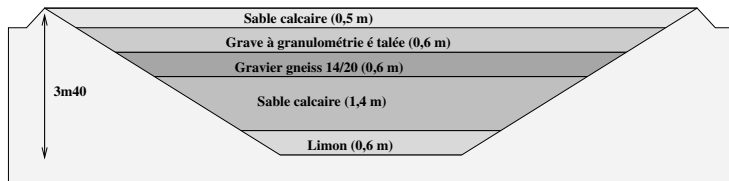
# Principe de la mesure radar de sol



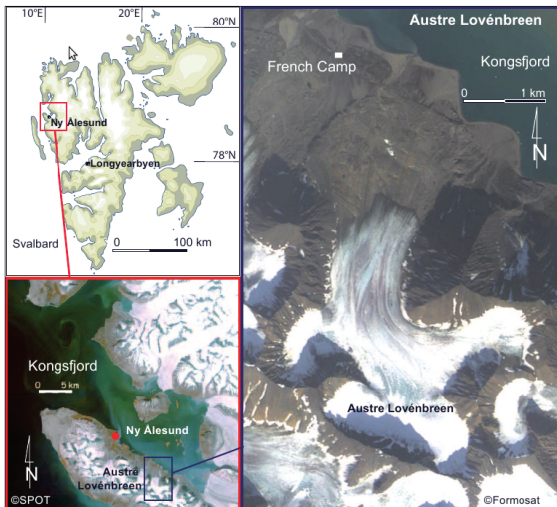
# Principe de la mesure radar de sol



<https://www.youtube.com/watch?v=n7kTl-shfWQ>



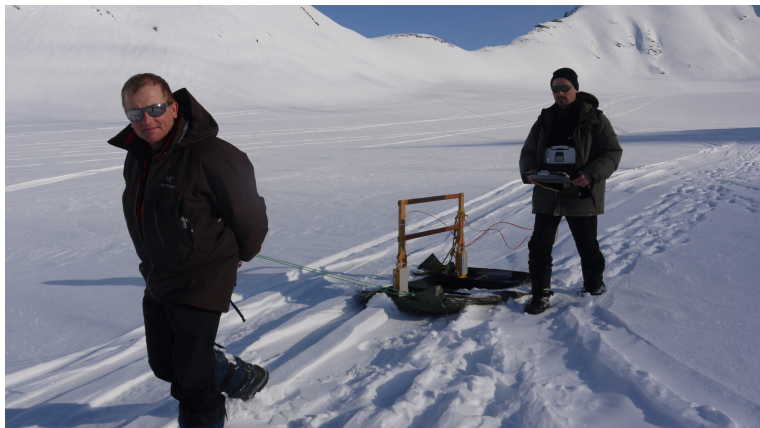
# Austre Lovénbreen: un glacier arctique de 4.6 km<sup>2</sup>



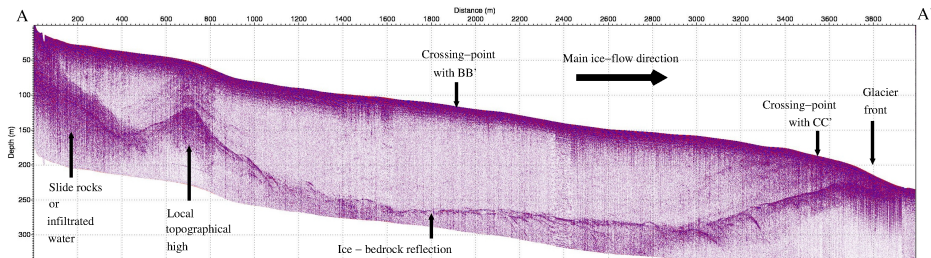
# Paysage



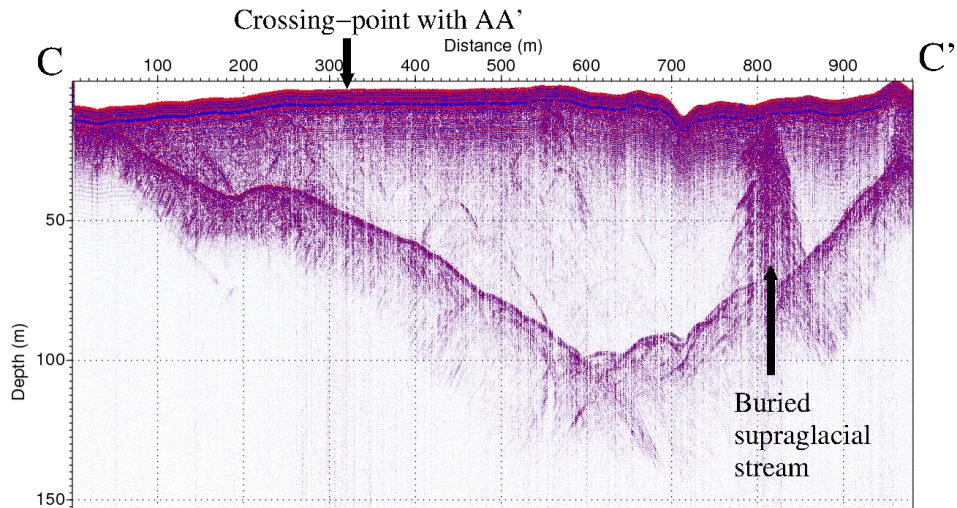
# Acquisition radar 100 MHz sur le glacier



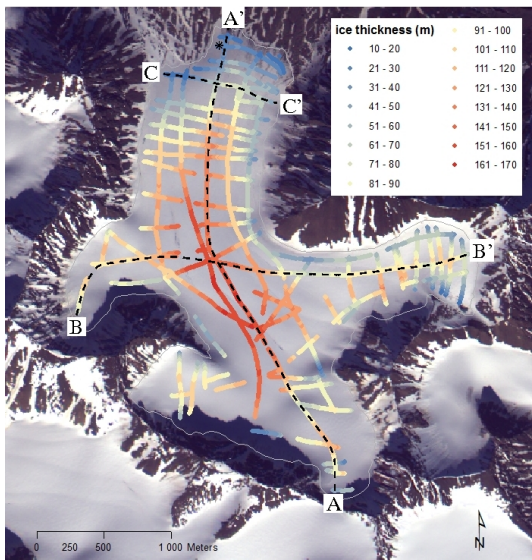
## Radargramme le long du glacier (100 MHz)



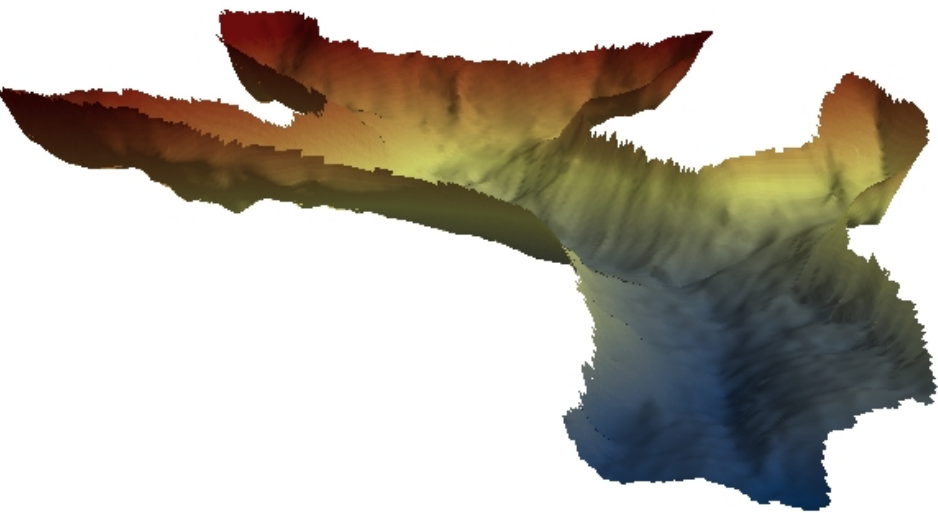
## Radargramme au travers de la langue glaciaire (100 MHz)



## Épaisseurs de glace



# Topographie du substratum en 3D



# Estimation du volume de glace

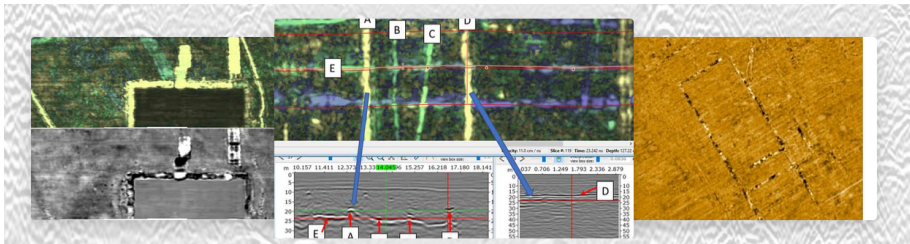
- ▶ Volume calculé:  $0.3487 \pm 0.041 \text{ km}^3$
- ▶ Epaisseur moyenne de glace: 76 m
- ▶ Epaisseur moyenne calculée par une formule empirique (Hagen et al., 1993):  
 $D = 33 \log(A) + 25$  avec  $A = 4.6 \pm 0.28 \text{ km}^2$  soit  $D = 75 \pm 2 \text{ m}$   
i.e. un volume de  $0.345 \pm 0.046 \text{ km}^3$ !

# Système multi-antennes



<https://www.youtube.com/watch?v=egPCb8QP1cY>

# Acquisition de cartes radar

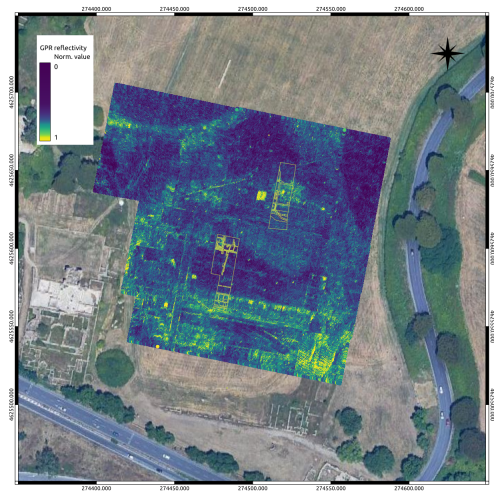


# Site archéologique d'Ostie (Italie)

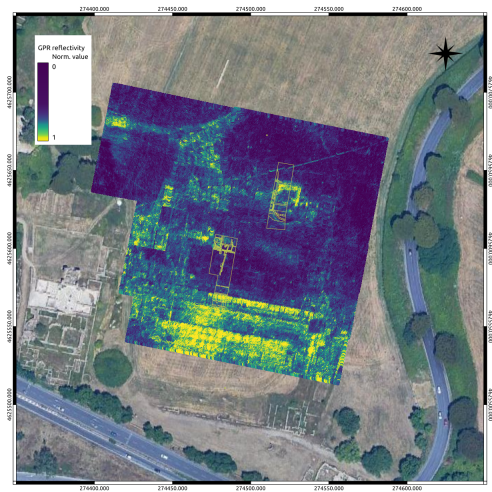
Image satellite



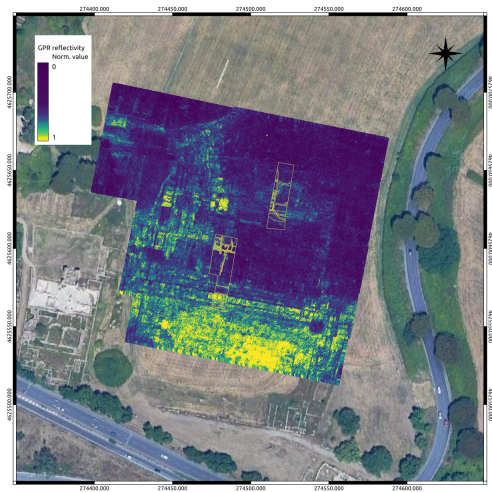
# Carte radar (Ostie)



## Carte radar (Ostie)



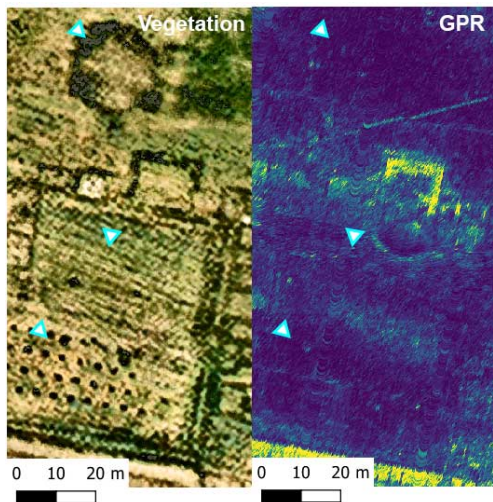
## Carte radar (Ostie)



# Photos fouilles



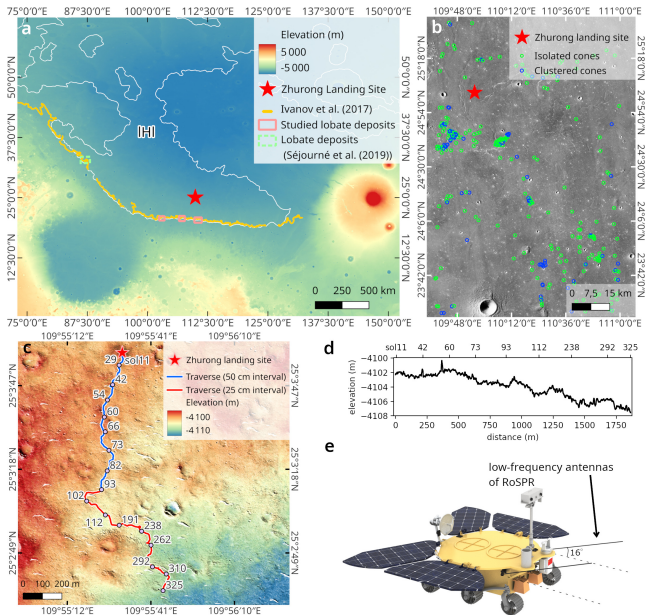
# Synthèse Ostie



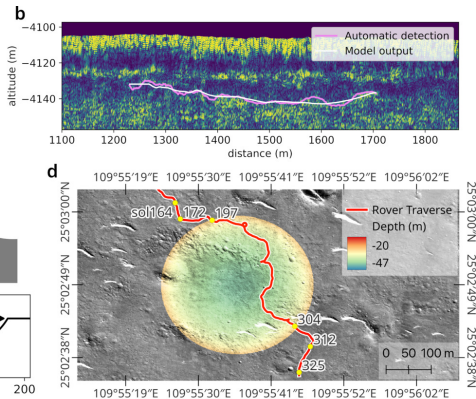
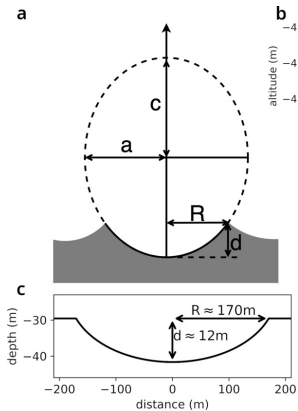
Semicircle (excavation 2022)



## Rover Chinois : Zhurong



## Détection d'un cratère ?



# Rover NASA: RIMFAX



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars\\_2020\\_\(mission\\_spatiale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_2020_(mission_spatiale))

## Récap sur ce cours

- ▶ Focus sur deux méthodes géophysiques: gravimétrie et radar de sol,
- ▶ basées sur deux paramètres: densité et permittivité diélectrique.
- ▶ Quatre TP/TD illustrent ces méthodes:
  - ▶ Topométrie
  - ▶ Planimétrie
  - ▶ Porosité et densité
  - ▶ Détection par radar de sol.
- ▶ Prochain cours: Dynamique fluviale et lien avec le transport des sédiments

Pour réviser: lire et regarder les liens indiqués dans ce cours : densité, GRACE, permittivité, vidéos radar, RIMFAX

Parcourir en préparation du prochain cours :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique\\_fluviale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique_fluviale)