

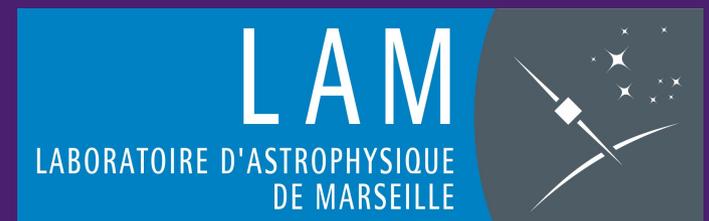
La mission ROSETTA

Premiers résultats

Laurent Jorda

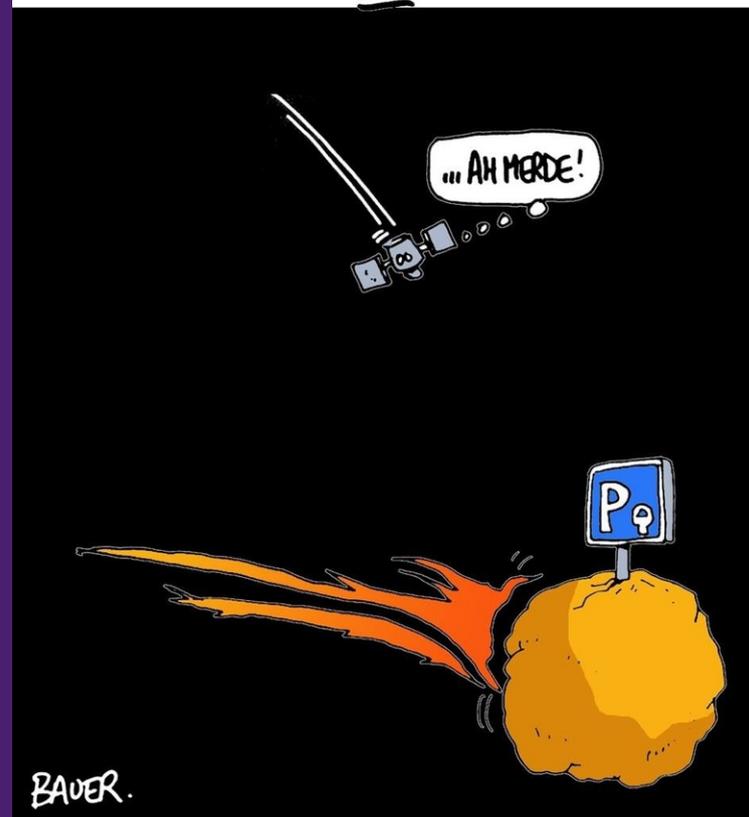
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Université Aix-Marseille

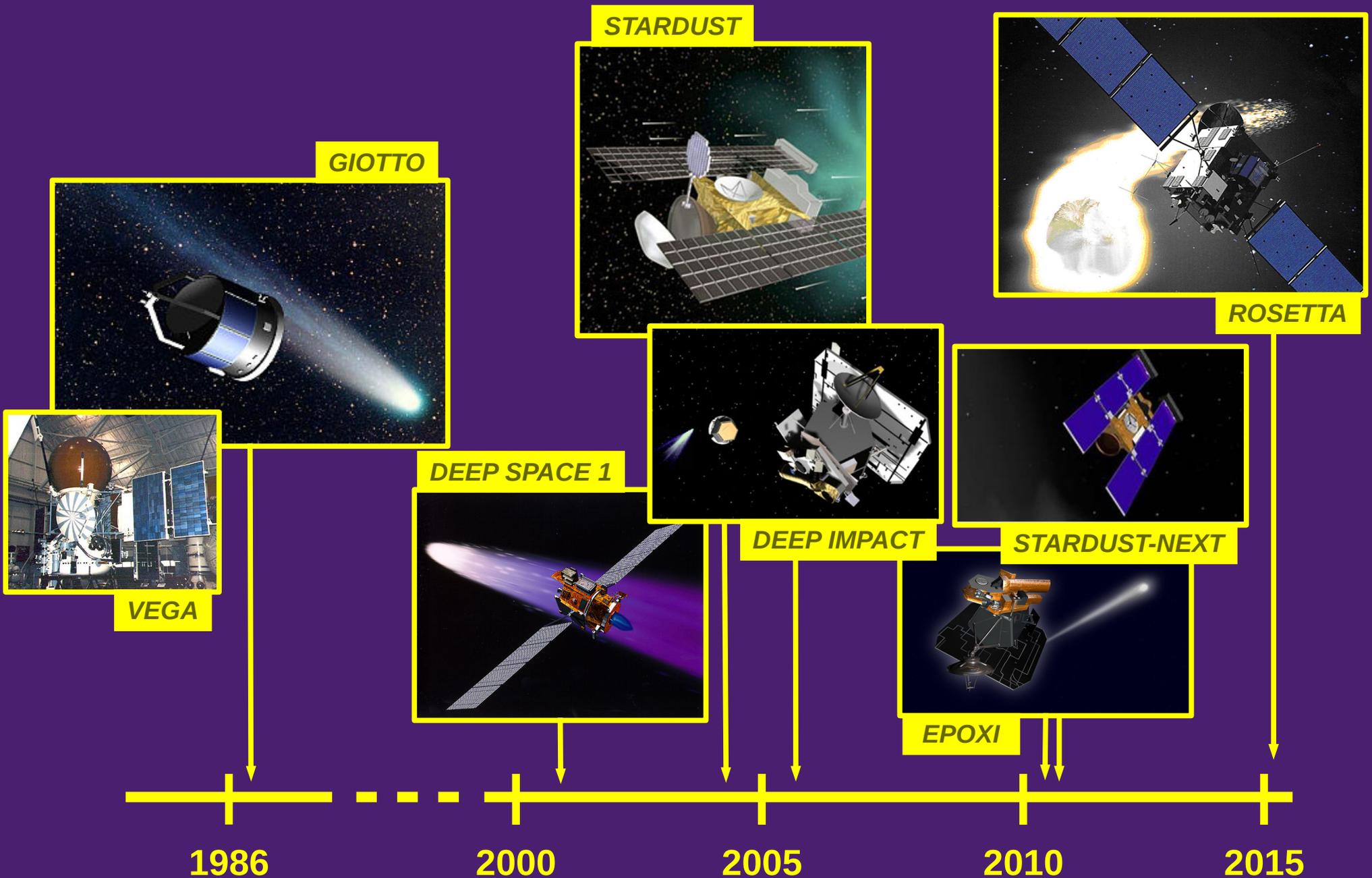


LA MISSION ROSETTA

APRES UN VOYAGE DE 10 ANS, LE
ROBOT PHILAE VA ATERRIR SUR UNE COMÈTE.



LA MISSION ROSETTA



LA MISSION ROSETTA

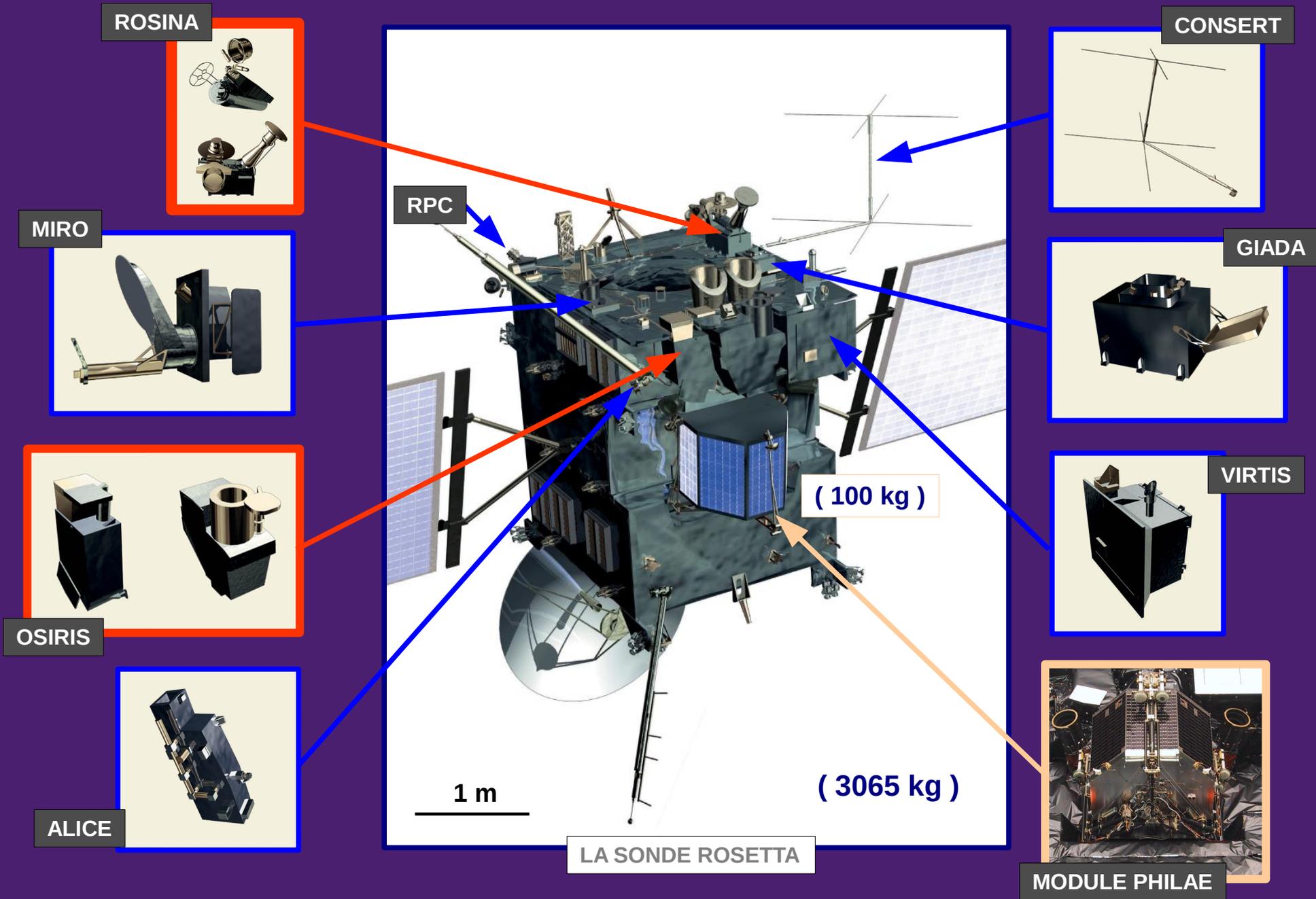
- **Une mission plus ambitieuse ...**

- Mise en orbite autour du noyau → observations continues
- Observations rapprochées → détails de la surface (< 20cm)
- Nombreux instruments → richesse des données collectées
- Language d'un module à la surface → données à la surface

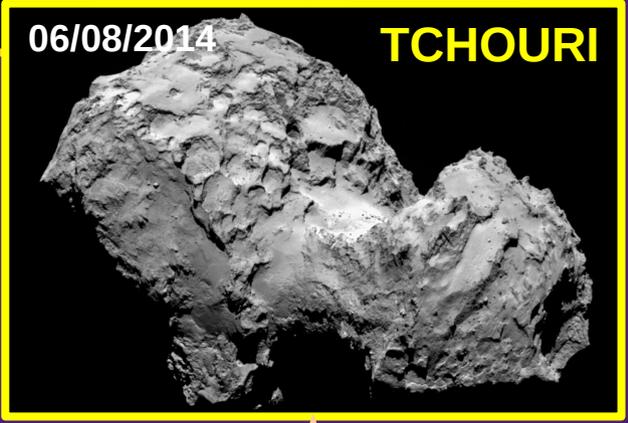
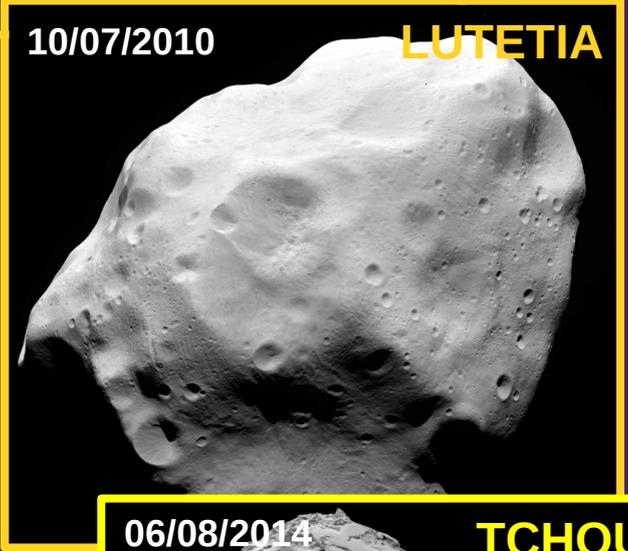
- **... mais très complexe**

- Temps de croisière important pour atteindre la comète (+10 ans)
- Hibernation pendant plus de deux ans (2012-2013)
- Environnement cométaire dangereux (gaz et poussières)
- Opérations de l'orbiteur continues et très complexes

LA MISSION ROSETTA



LA MISSION ROSETTA



10 ans 4 mois ...



LA MISSION ROSETTA

01/07 20 000 km



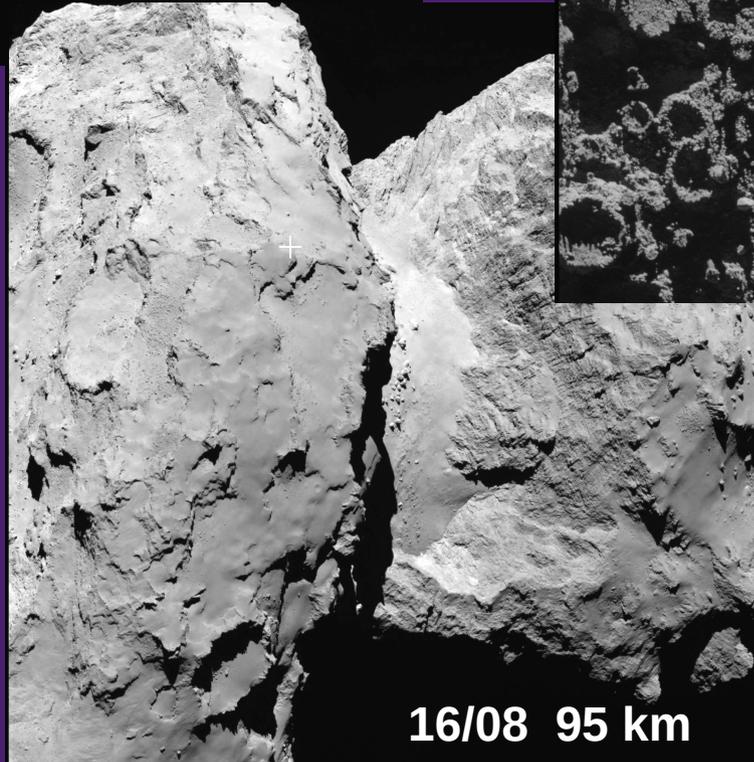
15/07 10 000 km



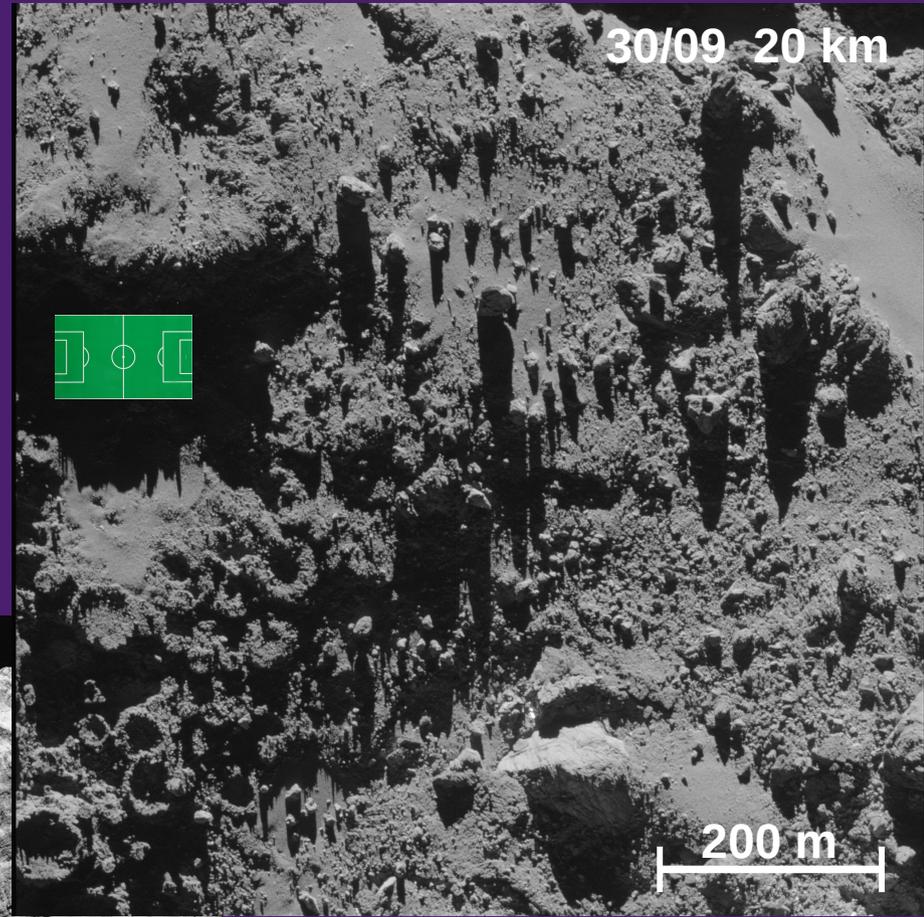
01/08 1 000 km



06/08 120 km



16/08 95 km



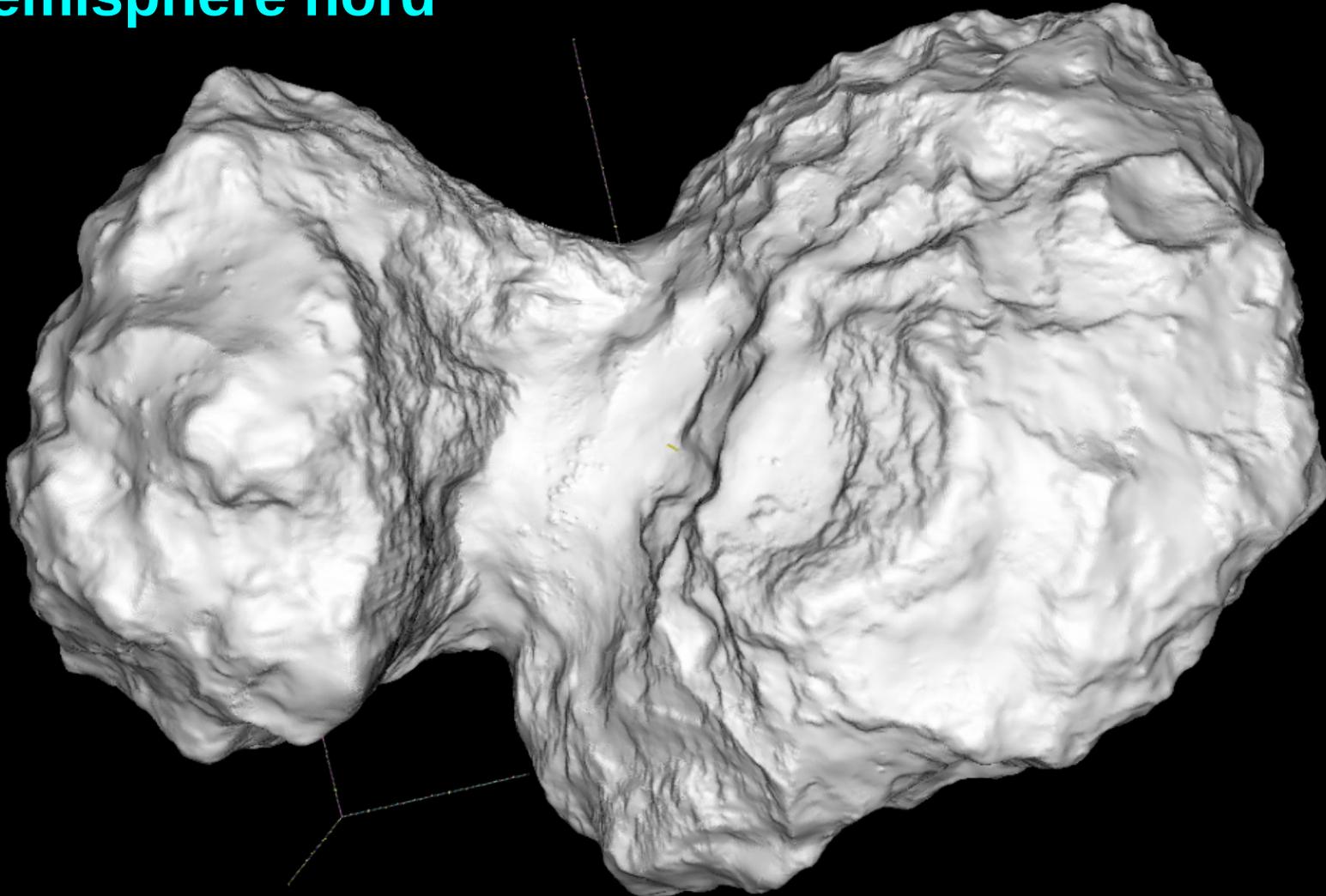
30/09 20 km

200 m

LA MISSION ROSETTA

Modèle 3D du noyau de la comète Tchouri

Hémisphère nord

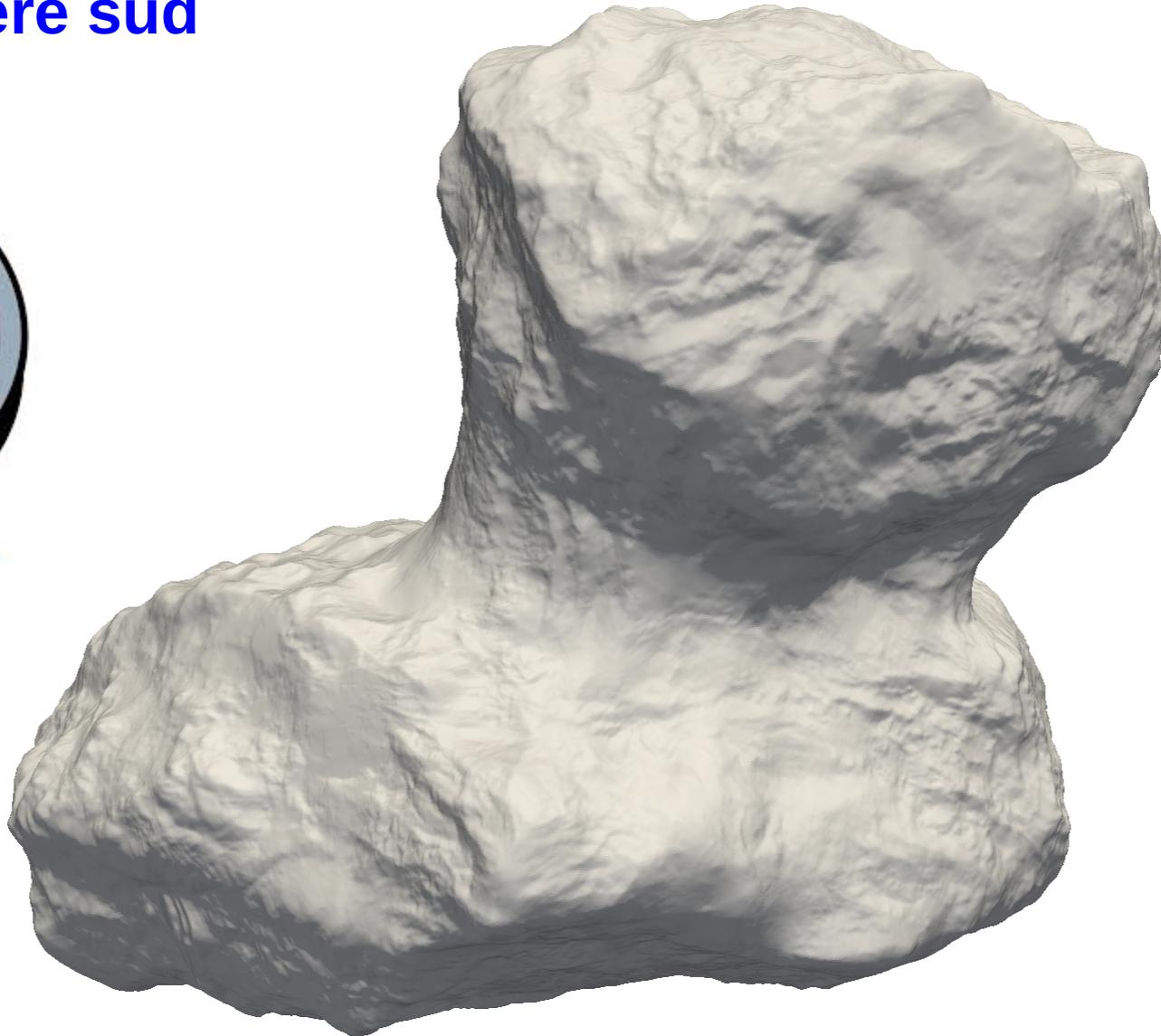


Méthode : stéréo-photoclinométrie (SPC) par R. Gaskell (PSI, USA et LAM)

LA MISSION ROSETTA

Modèle 3D du noyau de la comète Tchouri

Hémisphère sud

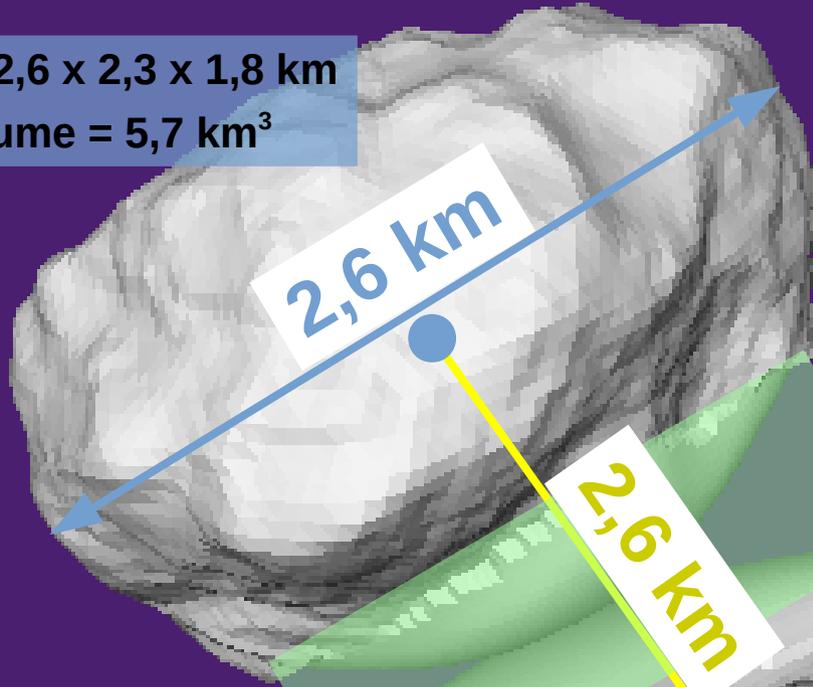


▲
Méthode : stéréo-photoclinométrie (SPC) par R. Gaskell (PSI, USA et LAM)

LA MISSION ROSETTA

Structure binaire du noyau de la comète Tchouri

Taille: 2,6 x 2,3 x 1,8 km
Volume = 5,7 km³



$$M = 9,98 \cdot 10^{12} \text{ kg}$$

$$\rho = 532 \pm 7 \text{ kg / m}^3$$

Porosité = 70 à 75 %

Volume \approx 1,5 km³

2,6 km

4,1 km

Taille: 4,1 x 3,3 x 1,8 km
Volume = 12,8 km³

LA MISSION ROSETTA

Structure de type « binaire consolidée » :

- **Origine des deux lobes :**

- 1 - Formation séparée de deux « planétésimaux » dans le disque
- 2 - Collision à faible vitesse (< 40 km/h) dans la nébuleuse primitive
- 3 - Erosion progressive des deux fragments (couche qqes 100m)
+ Remplissage de la zone intermédiaire (zone du cou)

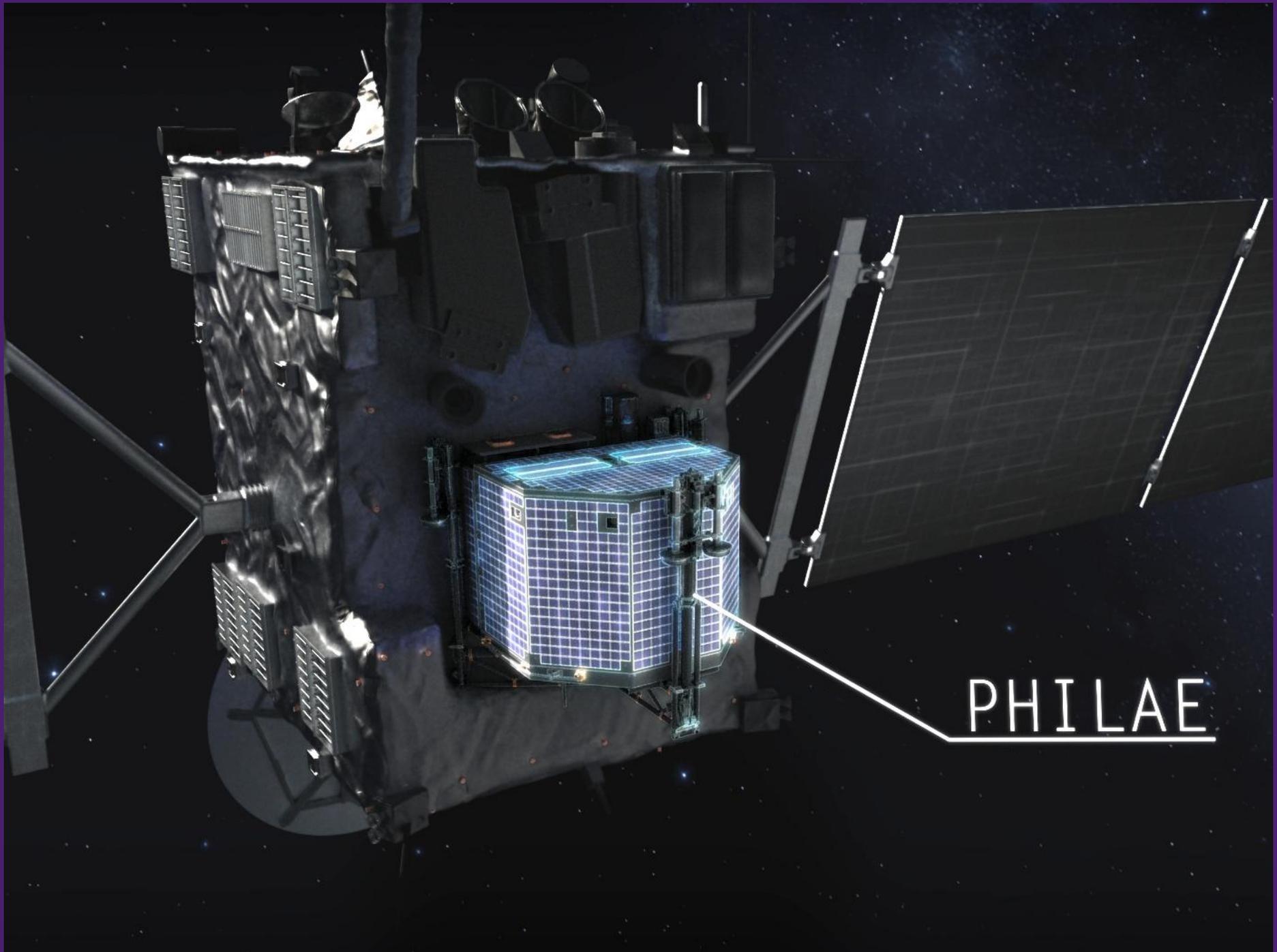
- **Remarques complémentaires :**

- Autre hypothèse : une érosion dûe à l'activité est improbable
- Très fréquent pour les noyaux cométaires (~ 30-50 %)
- Faible surdensité attendue au niveau du cou ?

L'ATTERRISSEUR PHILAE



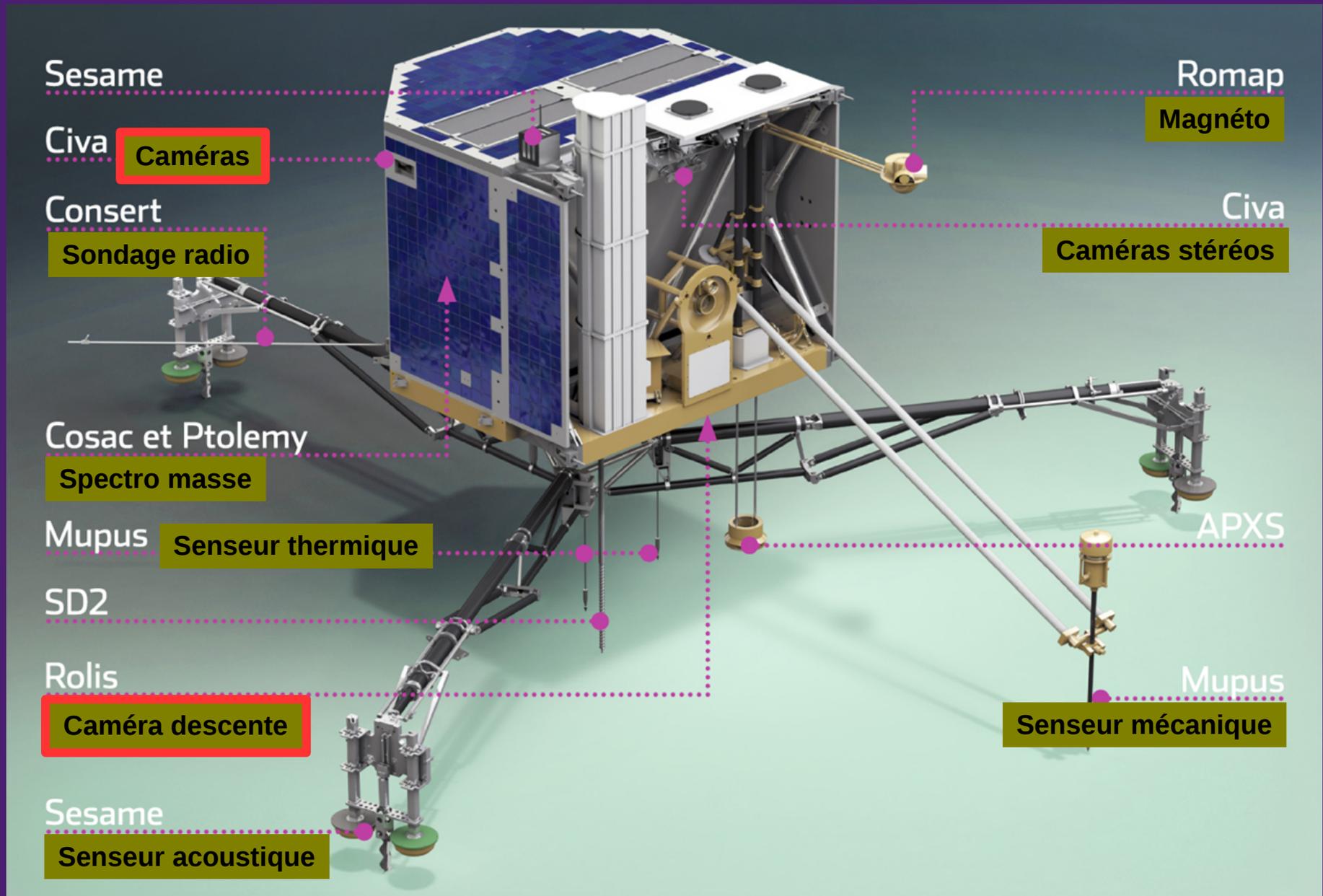
LE MODULE PHILAE



PHILAE

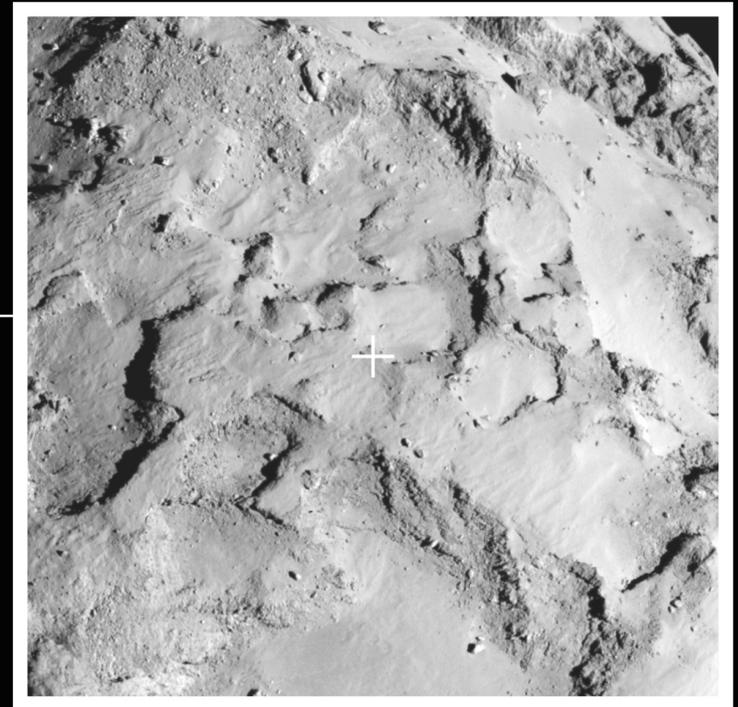
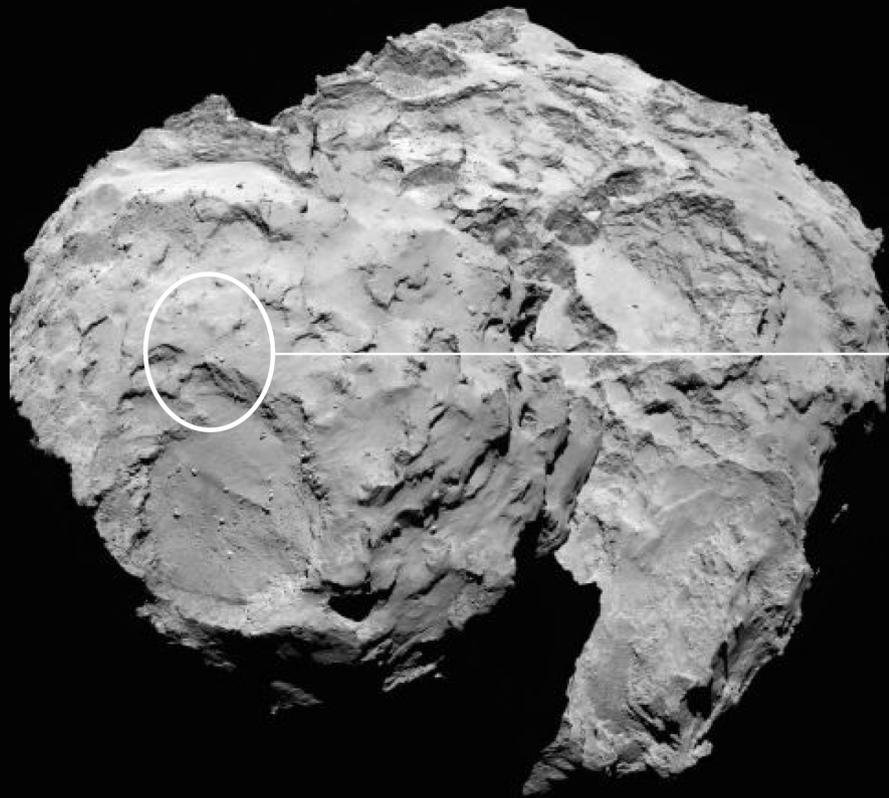
LE MODULE PHILAE

Instruments à bord du module PHILAE

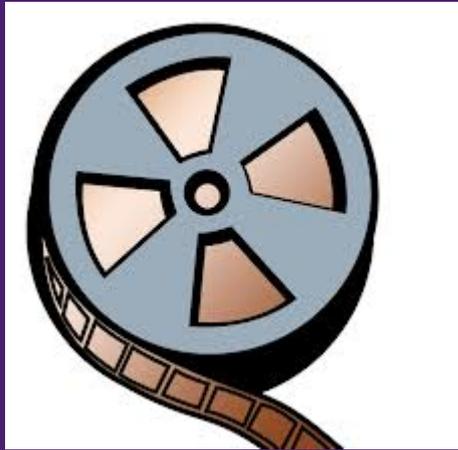


LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage prévu du module PHILAE



LE MODULE PHILAE



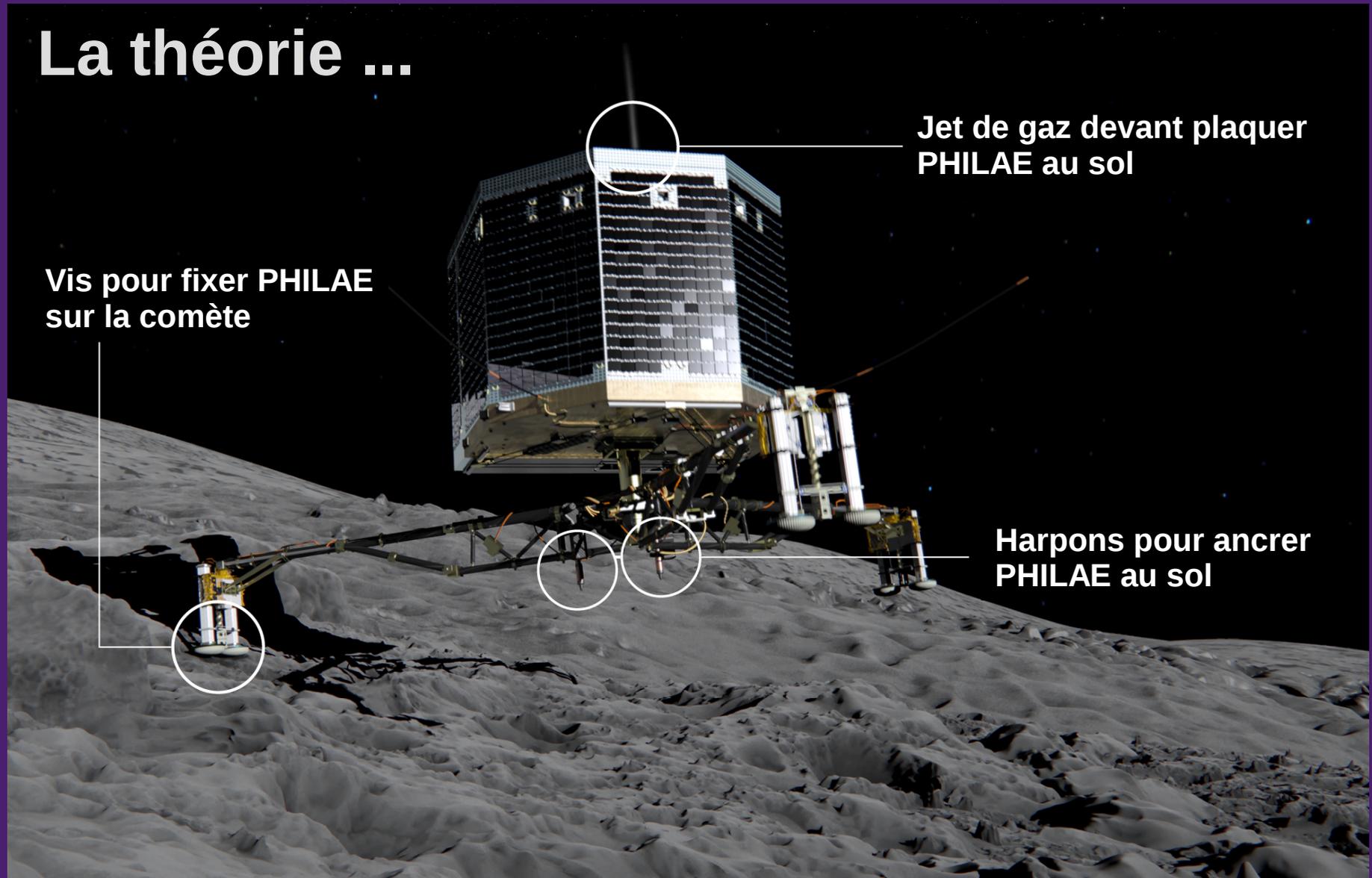
**Film montrant la descente
du module PHILAE.**

*Images prises depuis la
sonde ROSETTA*

LE MODULE PHILAE

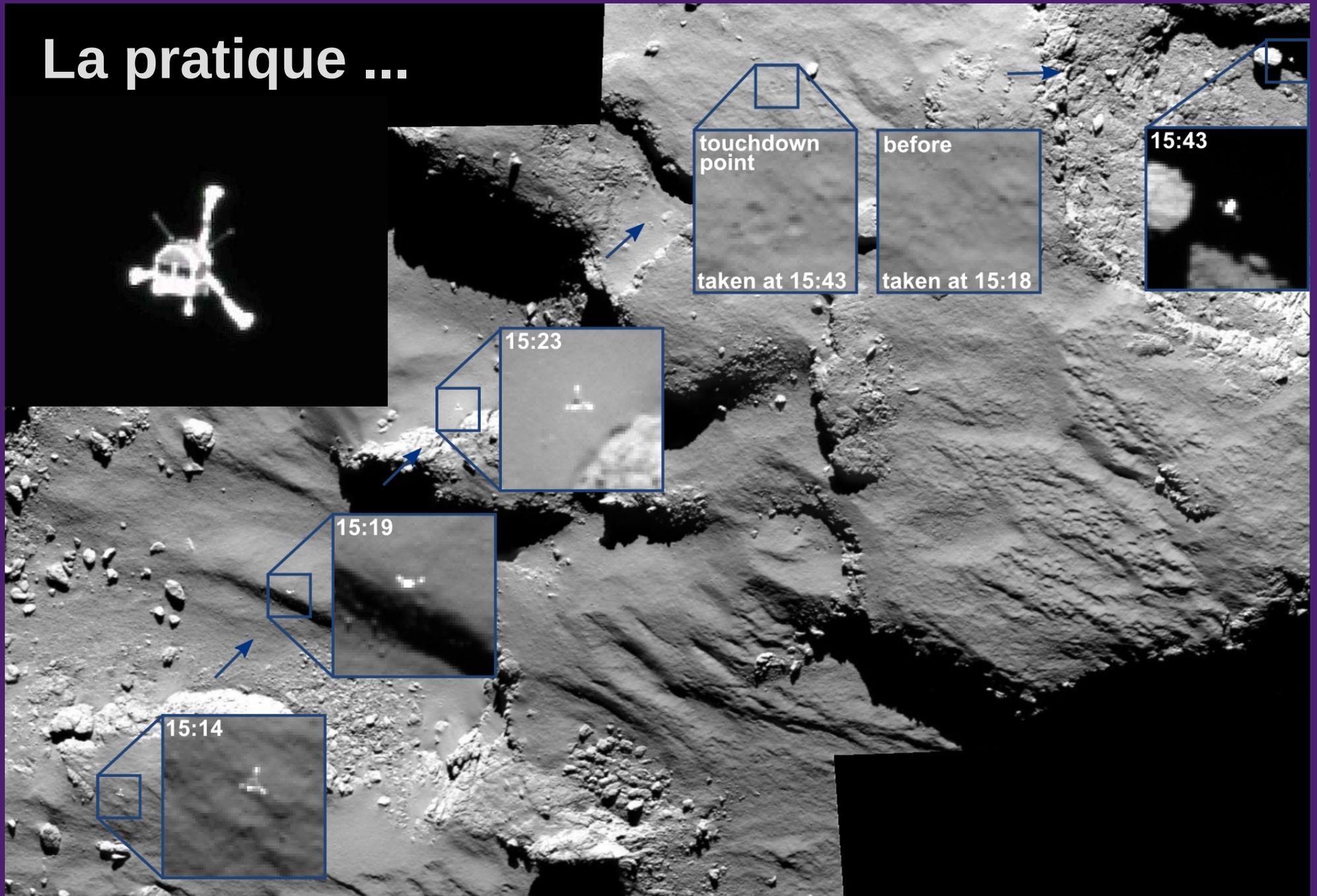
Systemes d'arrimage du module PHILAE

La théorie ...



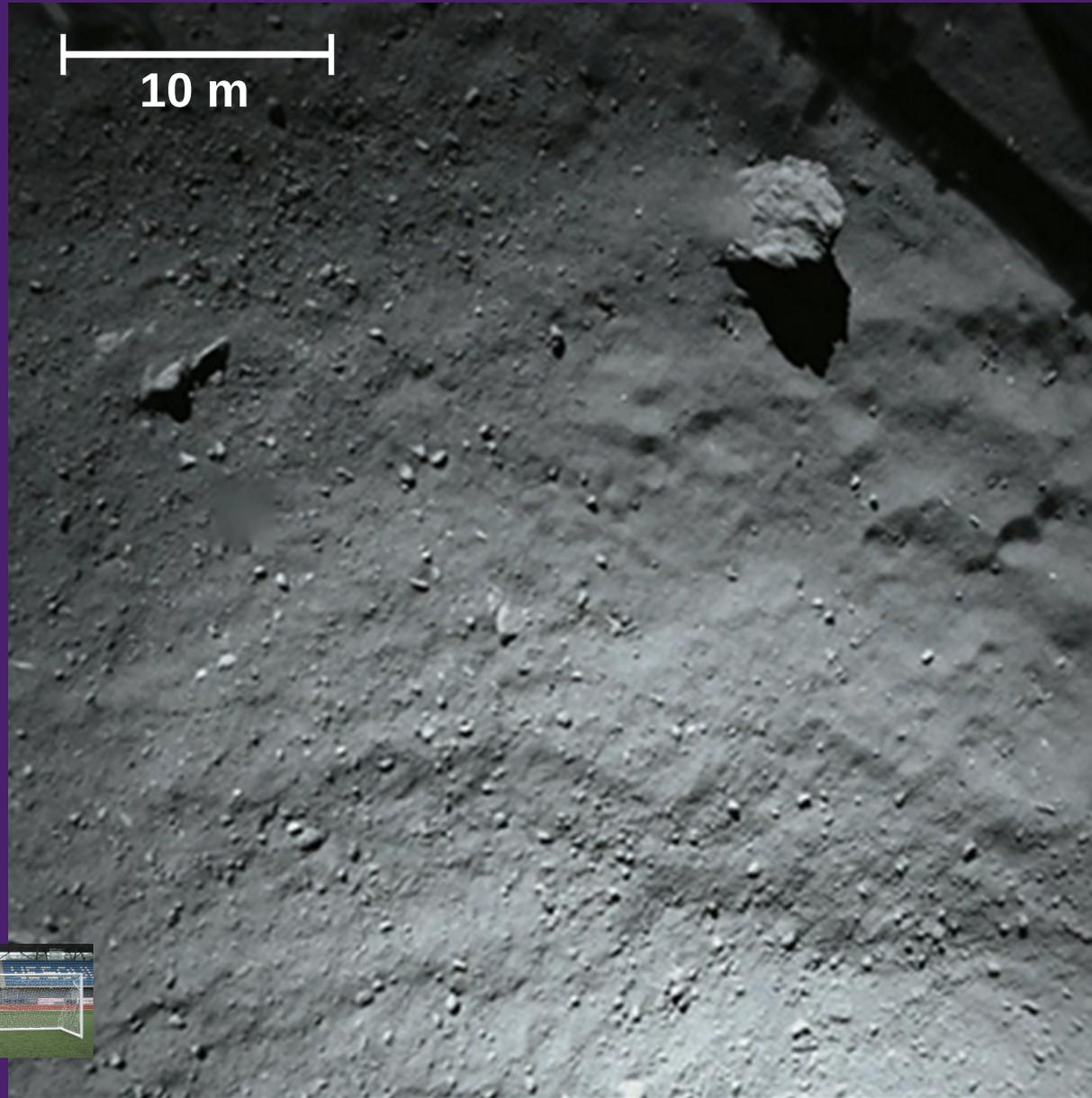
LE MODULE PHILAE

La pratique ...



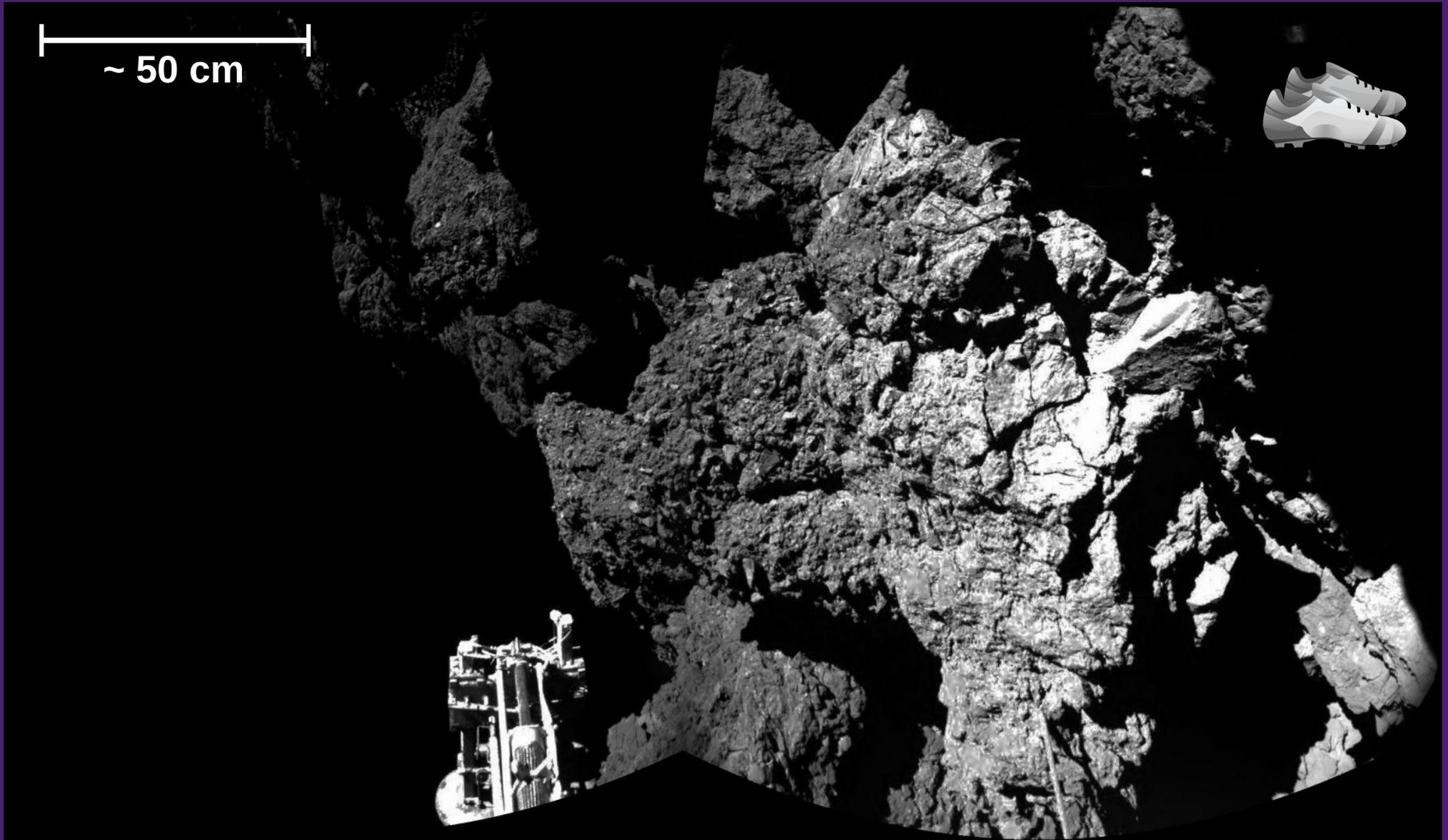
LE MODULE PHILAE

Image du site J prise par la caméra de descente ROLIS



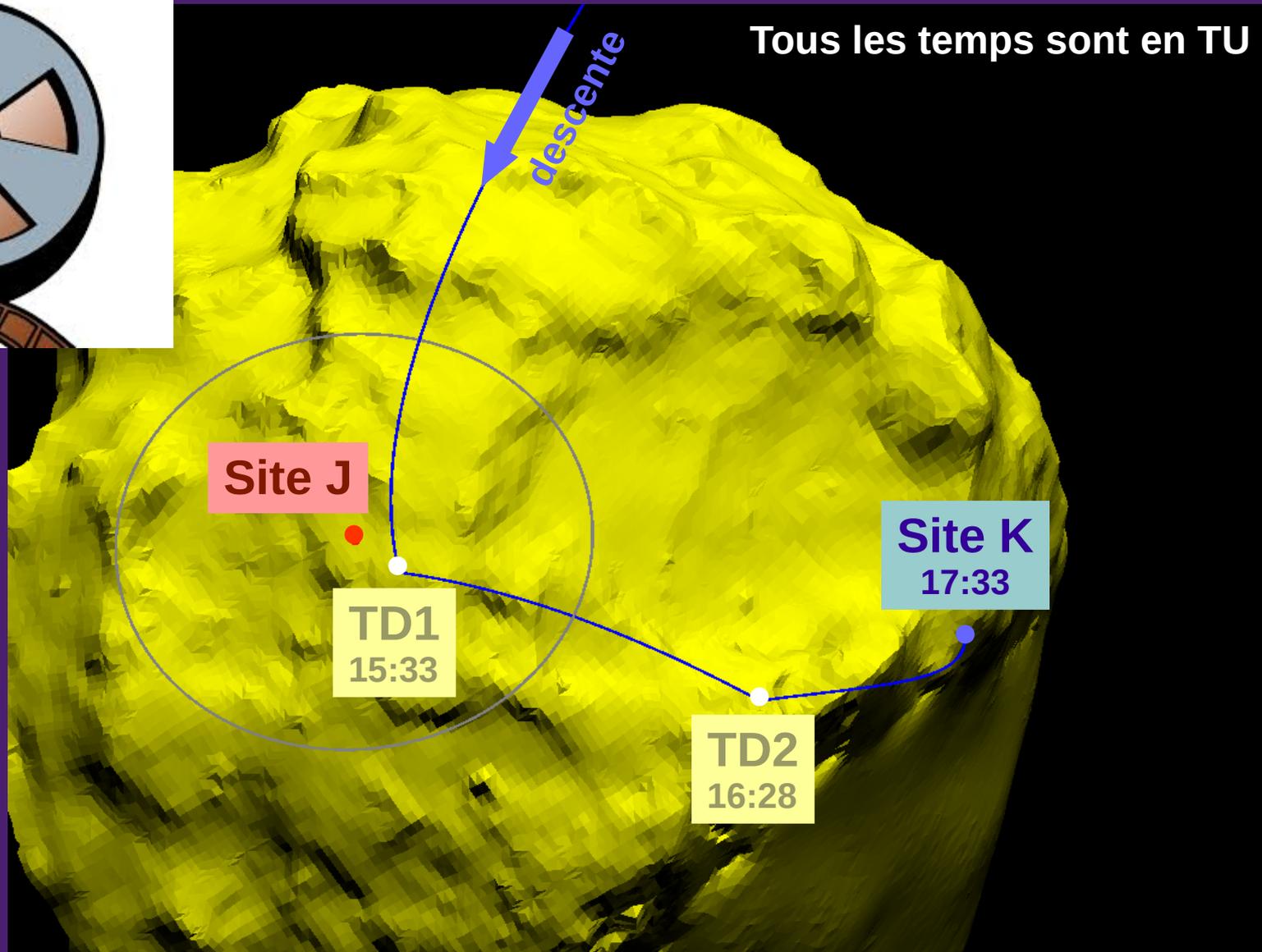
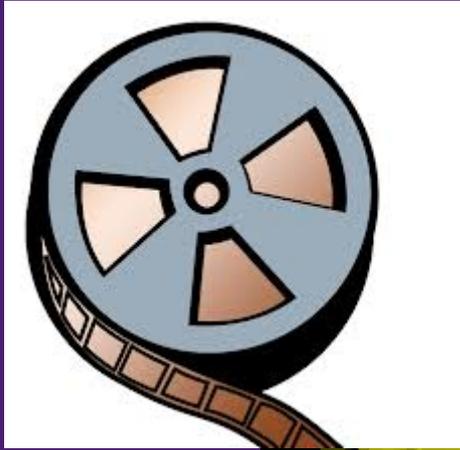
LE MODULE PHILAE

Panorama du site K obtenu par les caméras CIVA de PHILAE



LE MODULE PHILAE

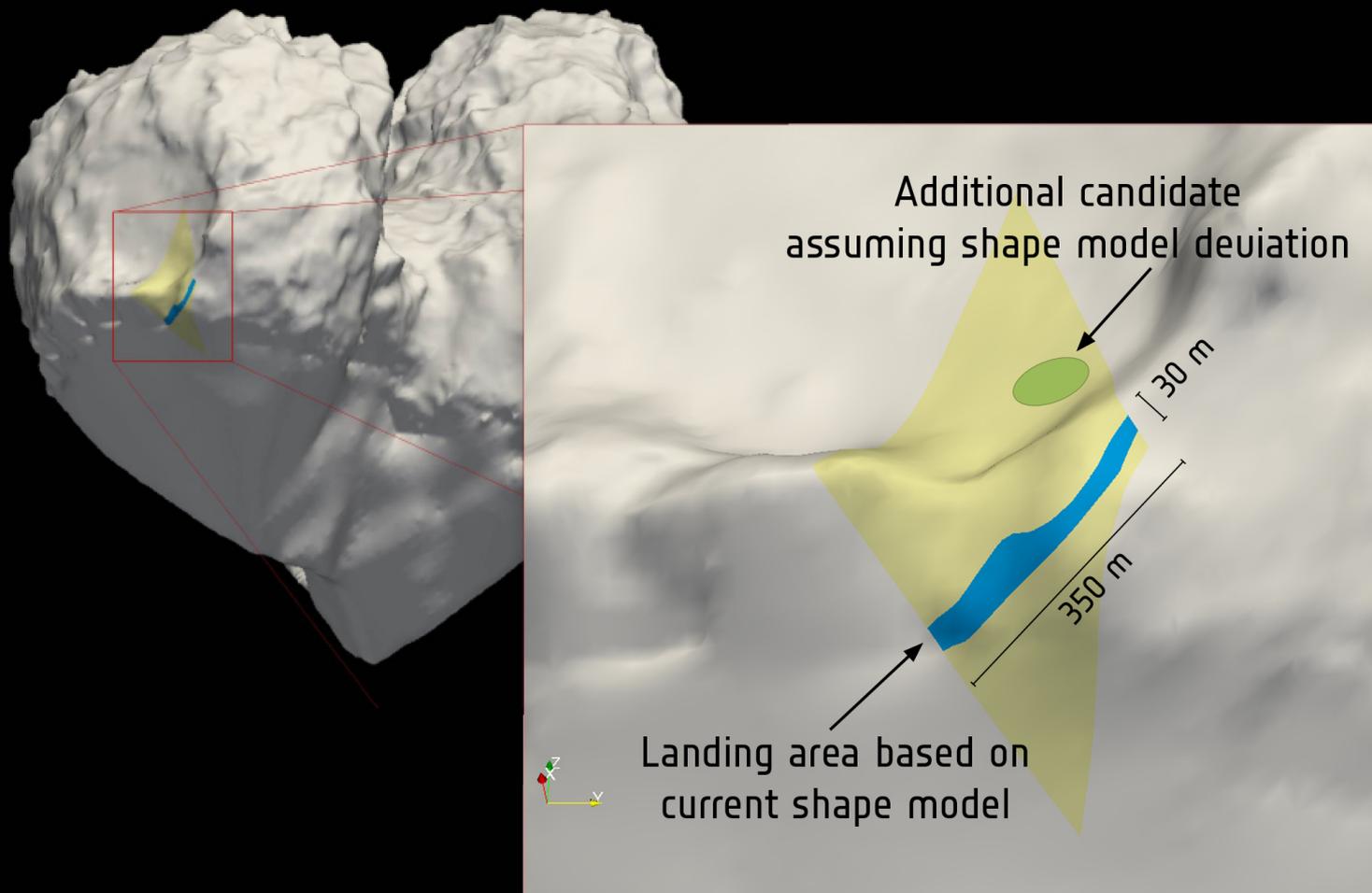
Trajectoire reconstruite du module PHILAE



LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage final du module PHILAE

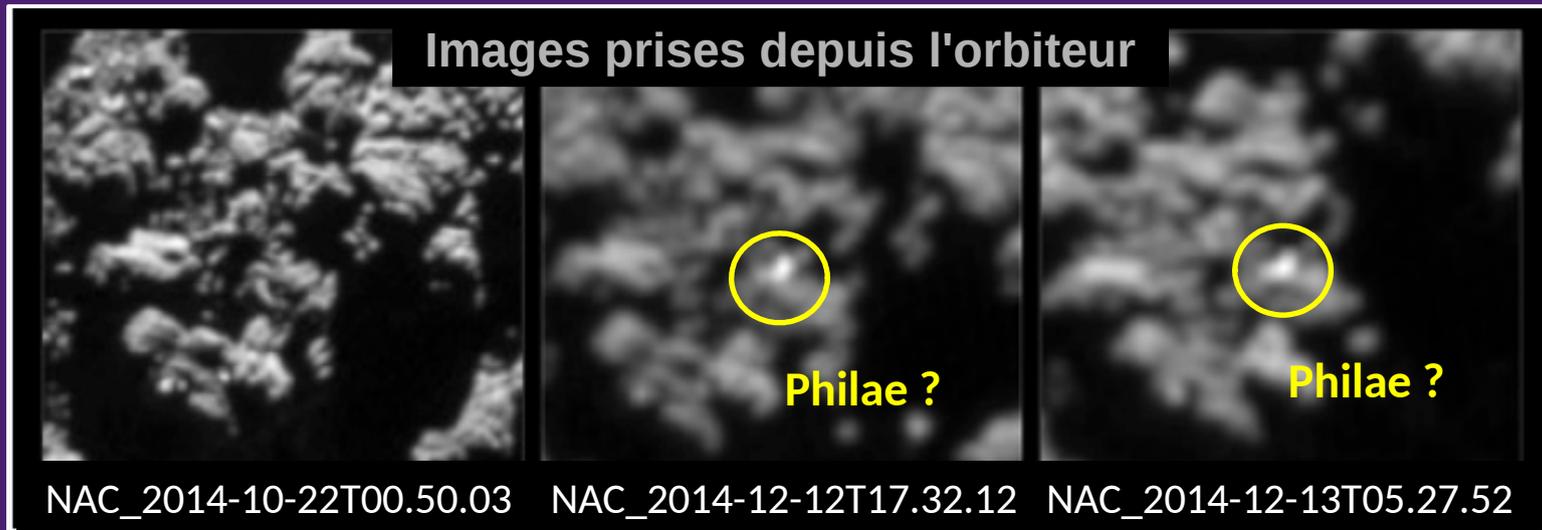
Localisation de la zone d'atterrissage finale basée sur les mesures de distance de l'instrument CONSERT



LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage final du module PHILAE

- Identification du site d'atterrissage (OSIRIS/LAM) :



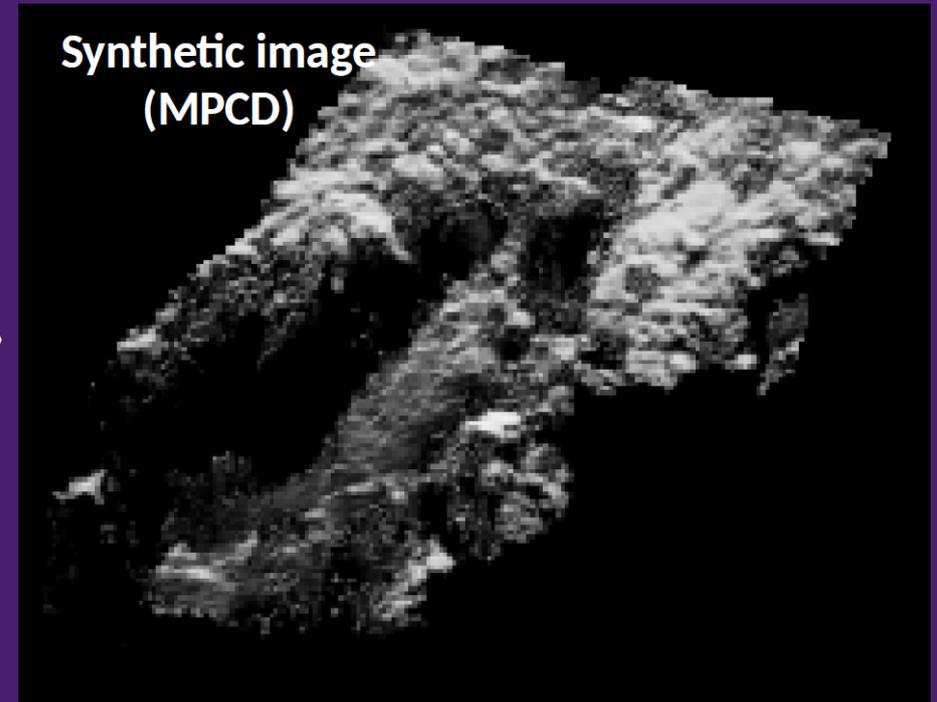
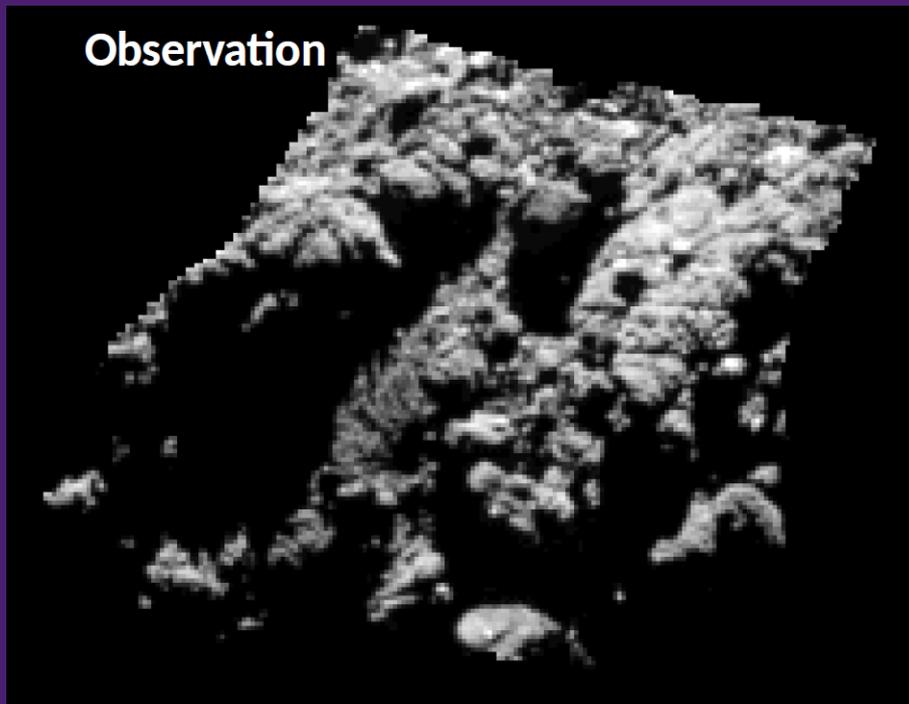
- Etat des contacts avec PHILAE :

- Première reprise de contact le 19 juin 2015
- Nombreux contacts avec un bon signal, mais brefs (env. 10 min)
- Aucune opération des instruments, pas de nouvelles données
- Dernier contact le 9 juillet 2015, rien depuis
- Nouvelles tentatives dans les semaines à venir

LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage final du module PHILAE

- Modèle 3D du site d'atterrissage (LAM) :

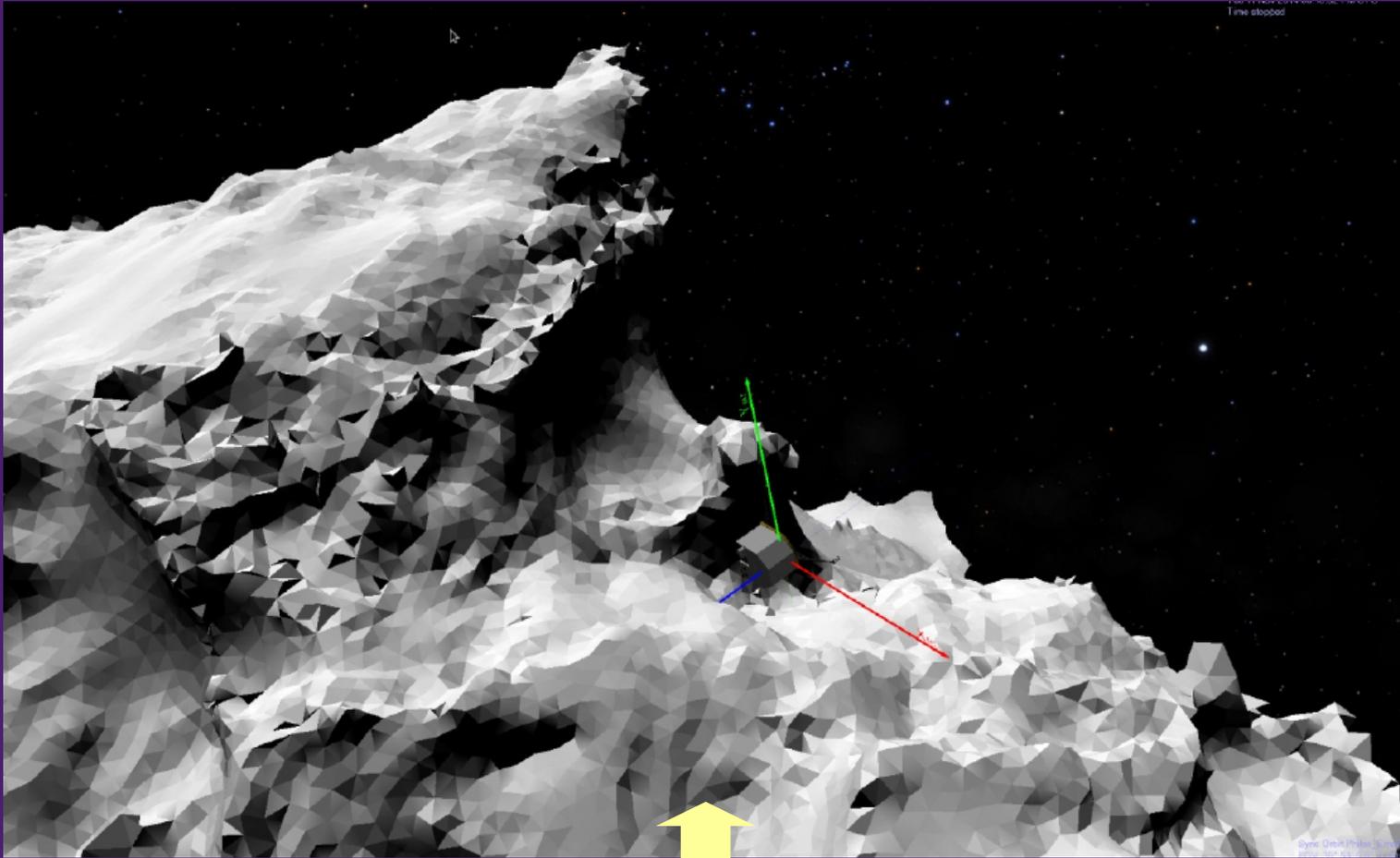


Reconstruction 3D (MPCD)

LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage final du module PHILAE

- Modèle 3D du site d'atterrissage (LAM) :

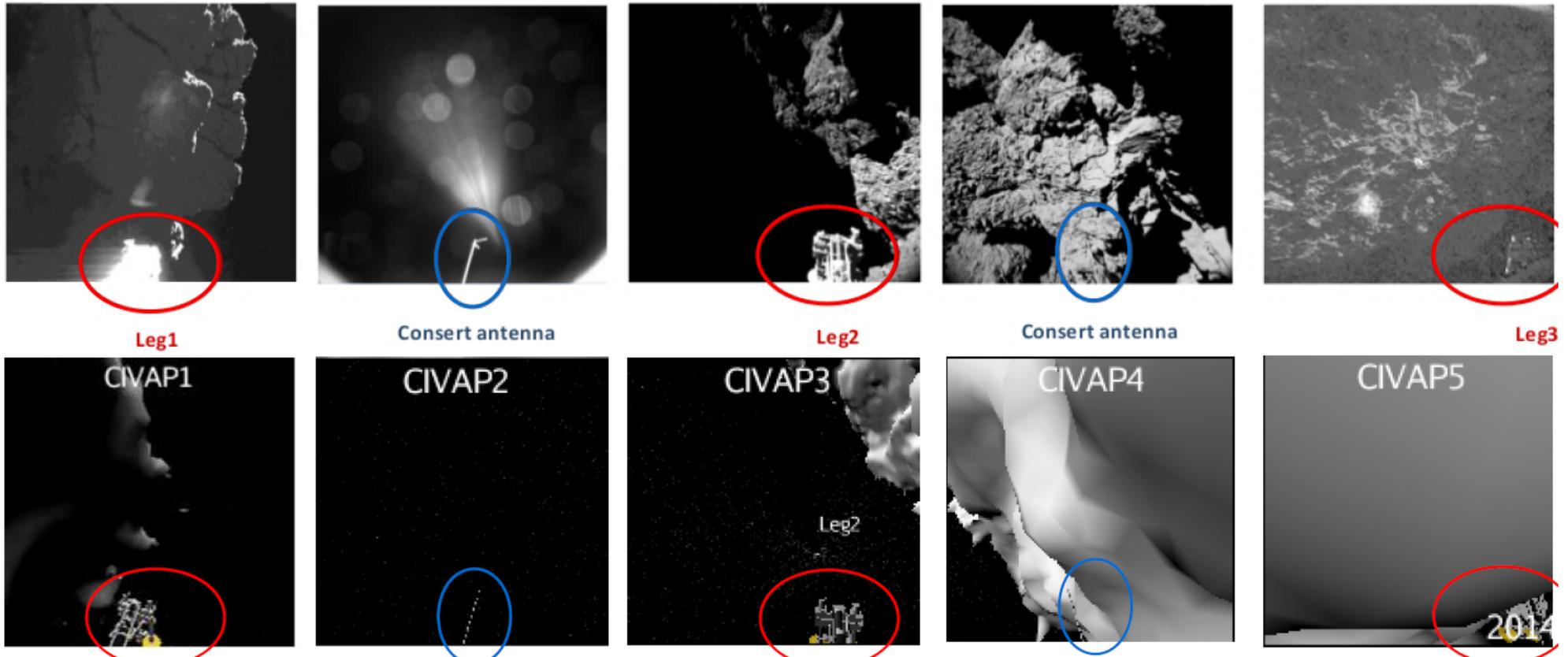


Reconstruction 3D (MPCD)

LE MODULE PHILAE

Site d'atterrissage final du module PHILAE

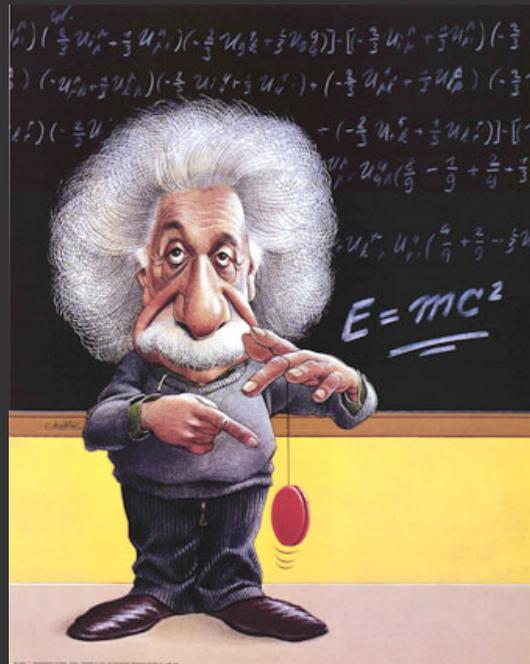
- Modèle 3D du site d'atterrissage (LAM) :



Reconstruction 3D (MPCD)

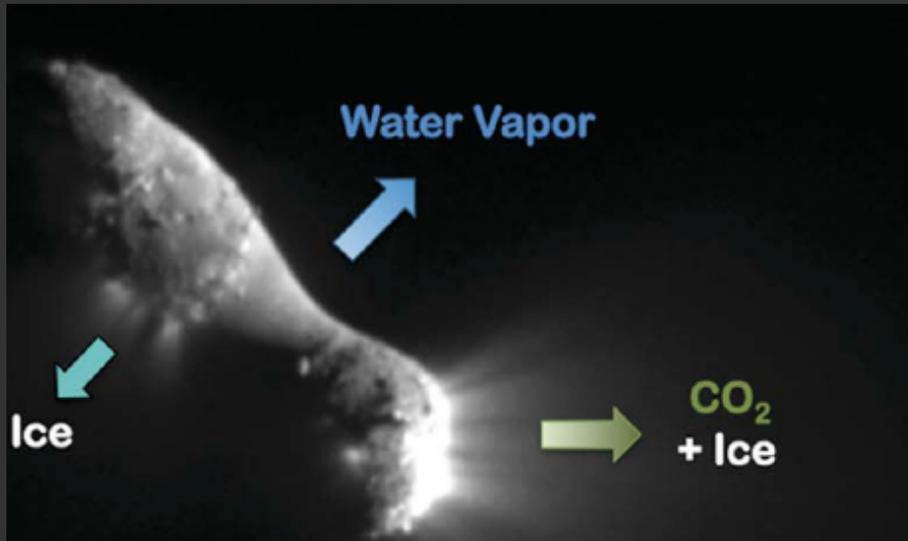
QUELS RÉSULTATS ?

Sélection de travaux ...

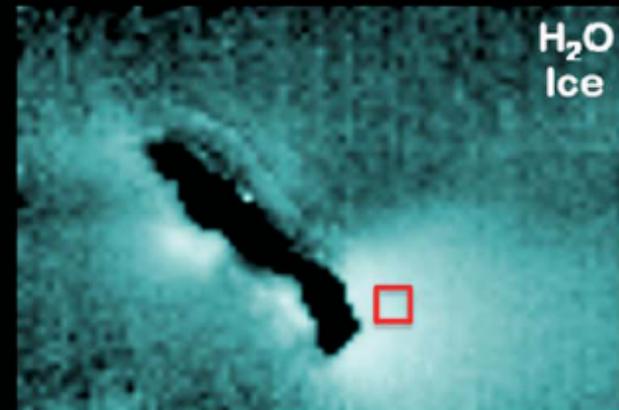
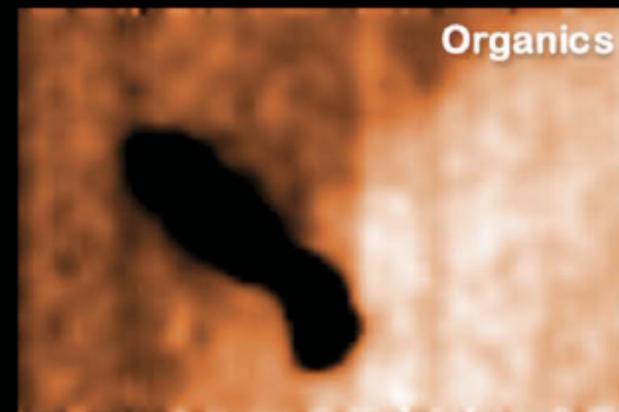


COMPOSITION DU NOYAU

Hétérogénéité de composition

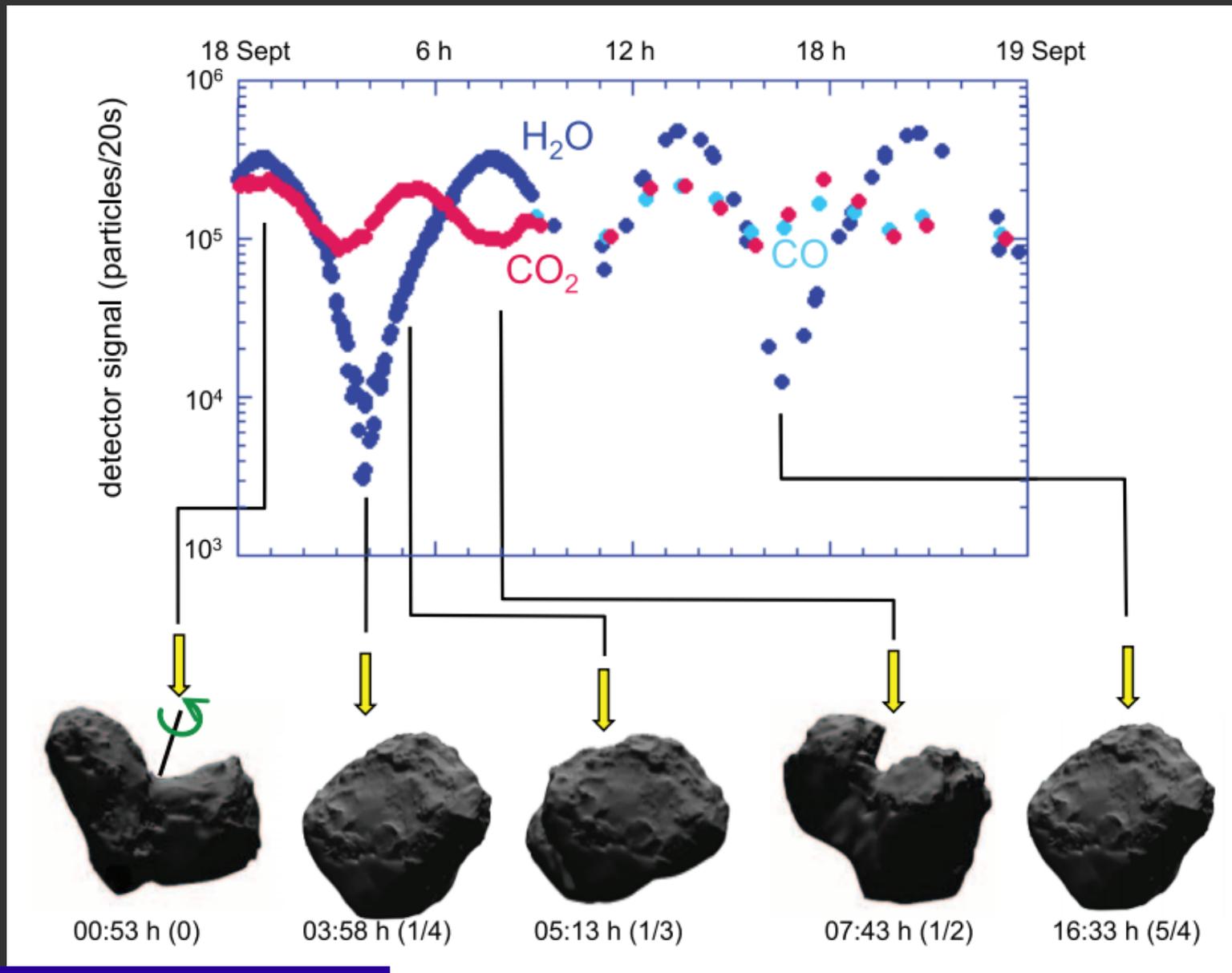


Comet 102P/Hartley 2
(mission EPOXI)



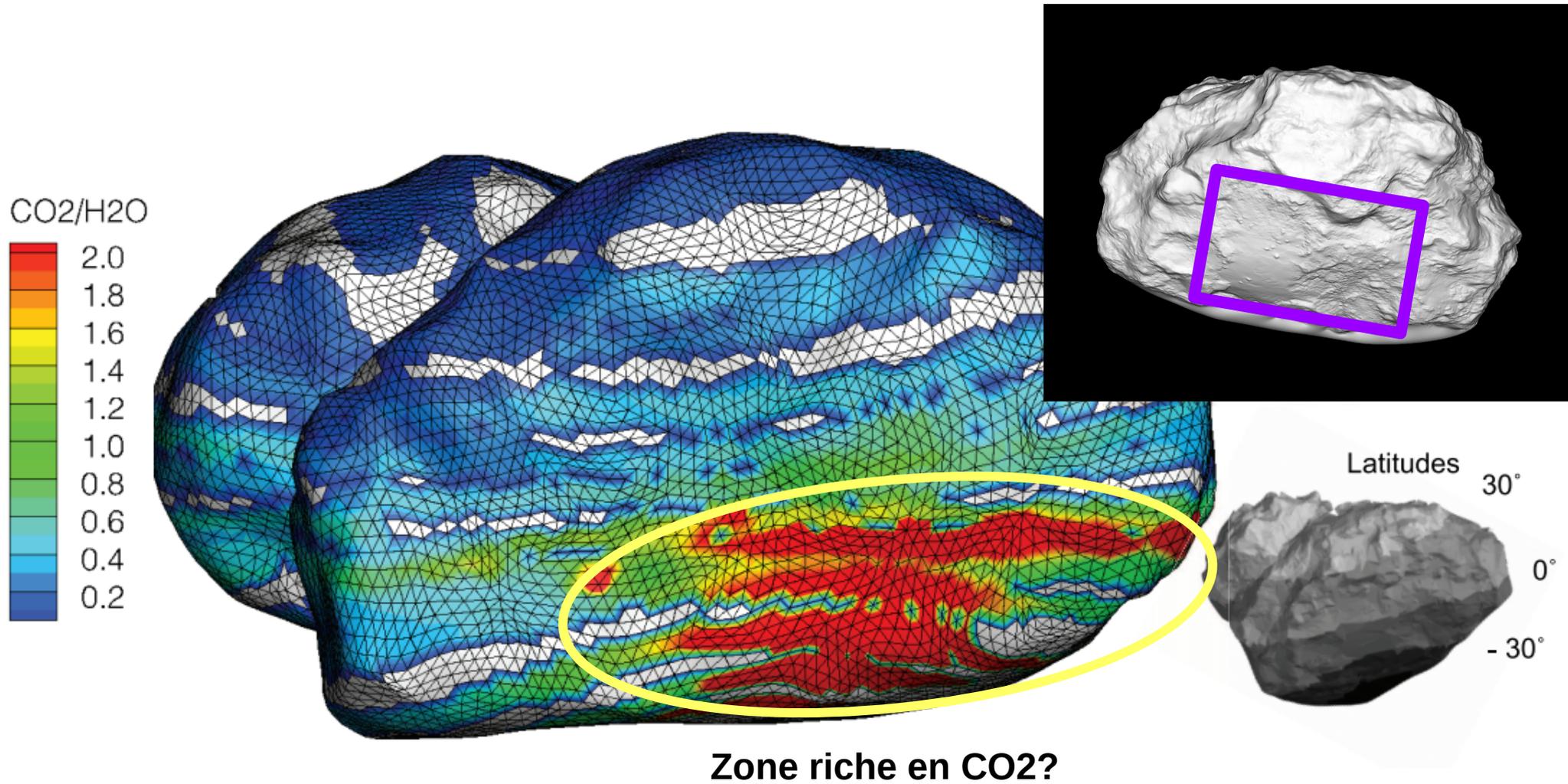
COMPOSITION DU NOYAU

Hétérogénéité de composition



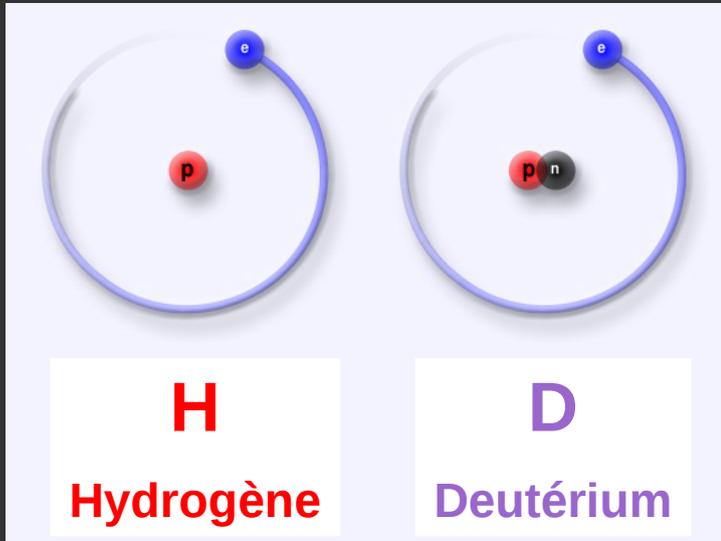
COMPOSITION DU NOYAU

Hétérogénéité de composition



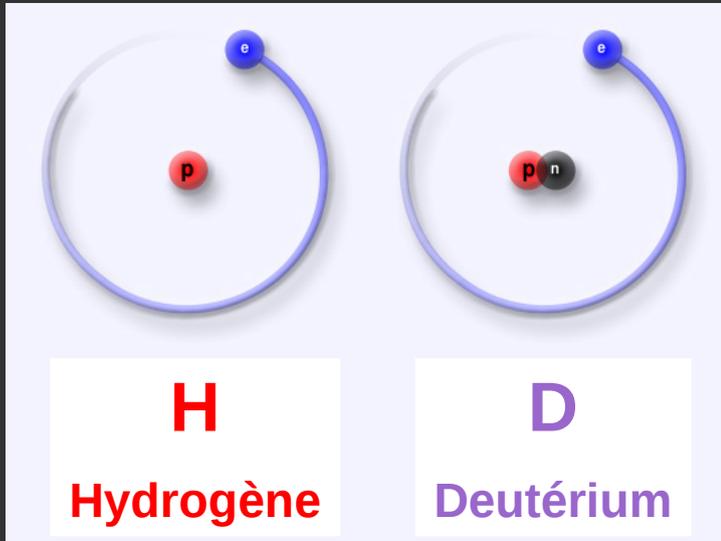
COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H



COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

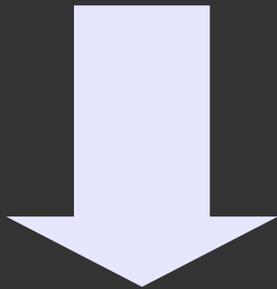
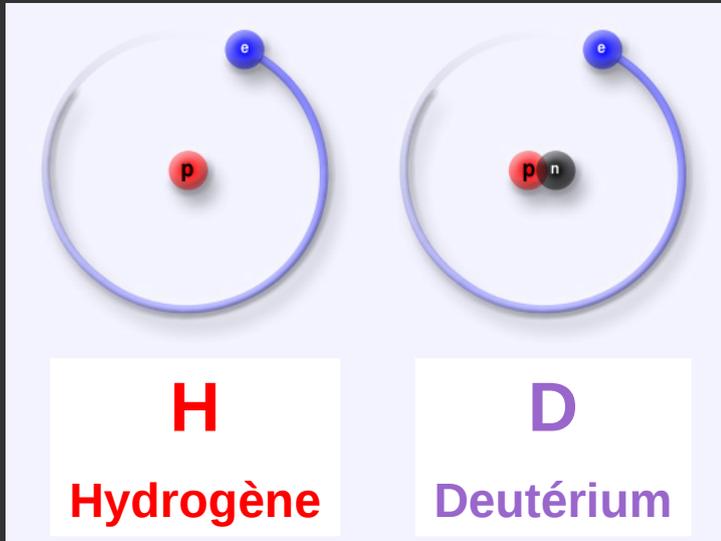


BIG BANG



COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H



Molécules H_2 et HD



Milieu interstellaire | Nébuleuse primitive

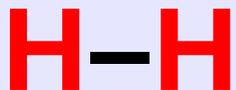
COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

$$1 / 100\ 000 = 10^{-5}$$

Rapport D : H

Molécules H_2 et HD

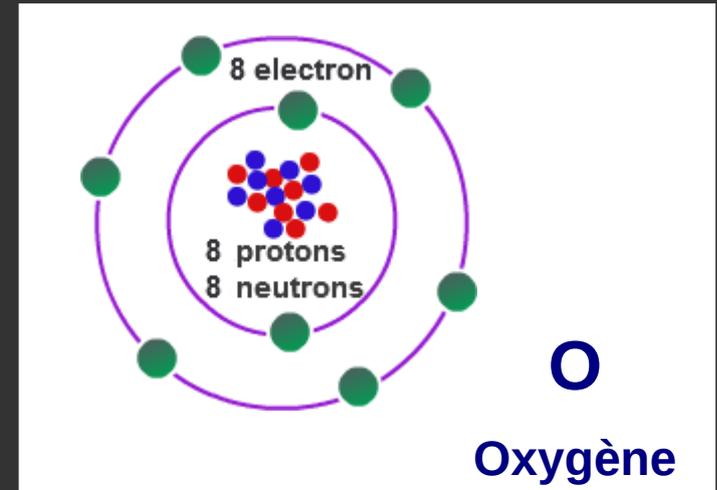
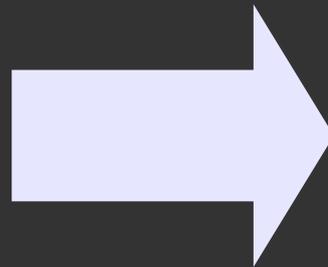


Milieu interstellaire | Nébuleuse primitive

COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

ÉTOILES



$$1 / 100\ 000 = 10^{-5}$$

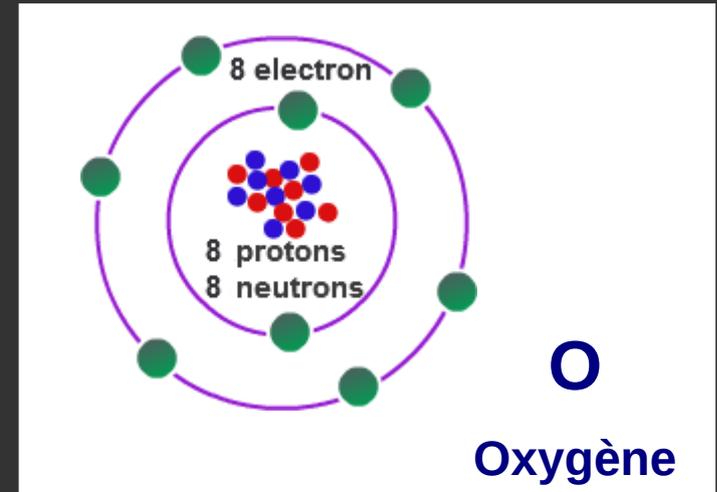
Molécules H_2 et HD



Milieu interstellaire | Nébuleuse primitive

COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

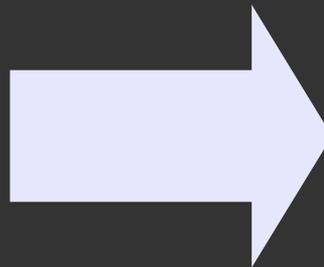


$$1 / 100\ 000 = 10^{-5}$$

Molécules H_2 et HD



Milieu interstellaire | Nébuleuse primitive



Molécules H_2O et HDO



Planètes | Comètes | Astéroïdes

COMPOSITION DU NOYAU

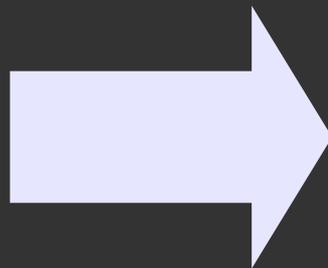
Mesure du rapport D/H

$$1 / 100\ 000 = 10^{-5}$$

Molécules H_2 et HD



Milieu interstellaire | Nébuleuse primitive



$$1 / 10\ 000 = 10^{-4}$$

Molécules H_2O et HDO

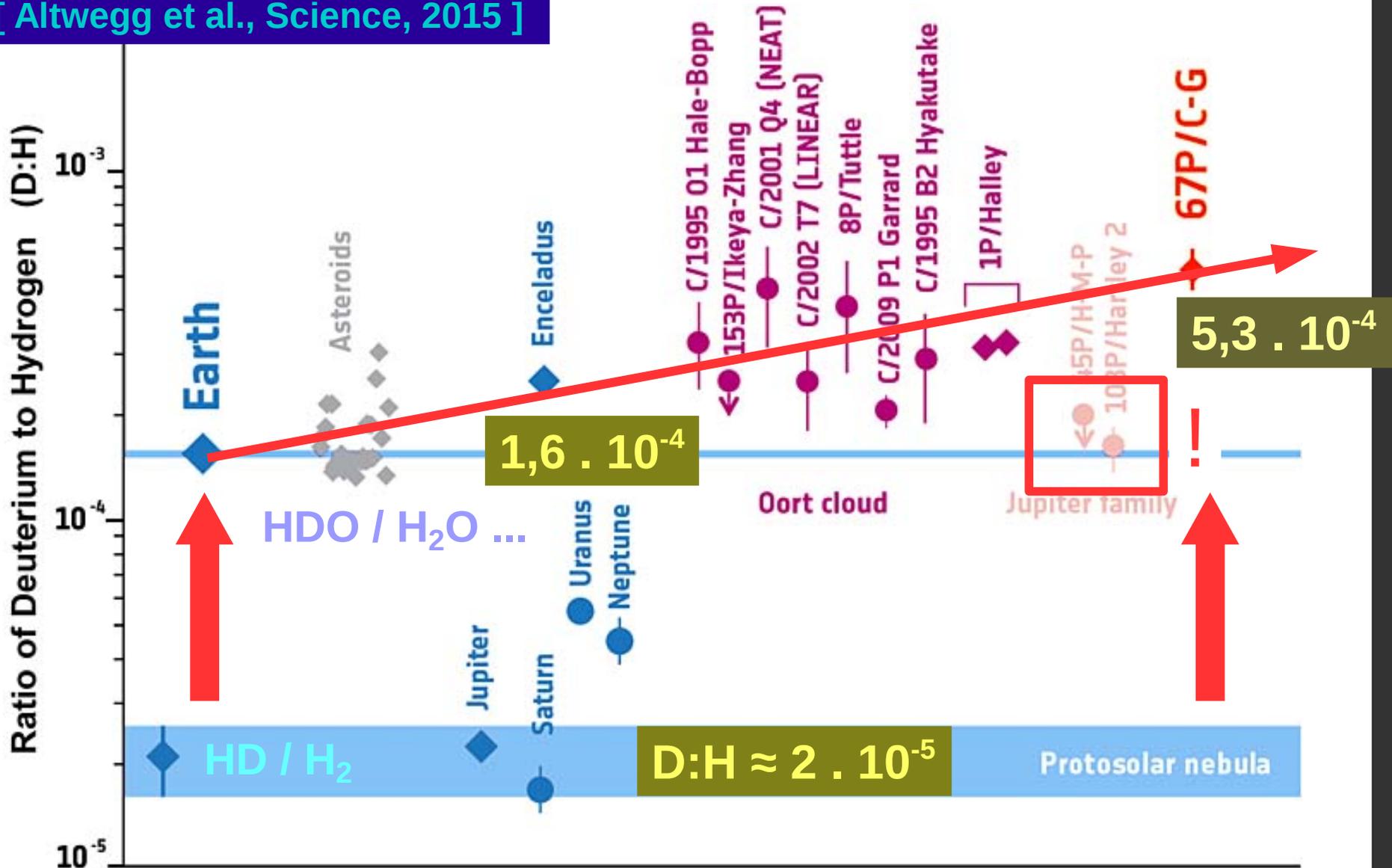


Terre | Comètes | Astéroïdes

COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

[Altwegg et al., Science, 2015]



COMPOSITION DU NOYAU

Mesure du rapport D/H

Mesure du rapport D / H :

Instrument ROSINA = spectromètre de masse

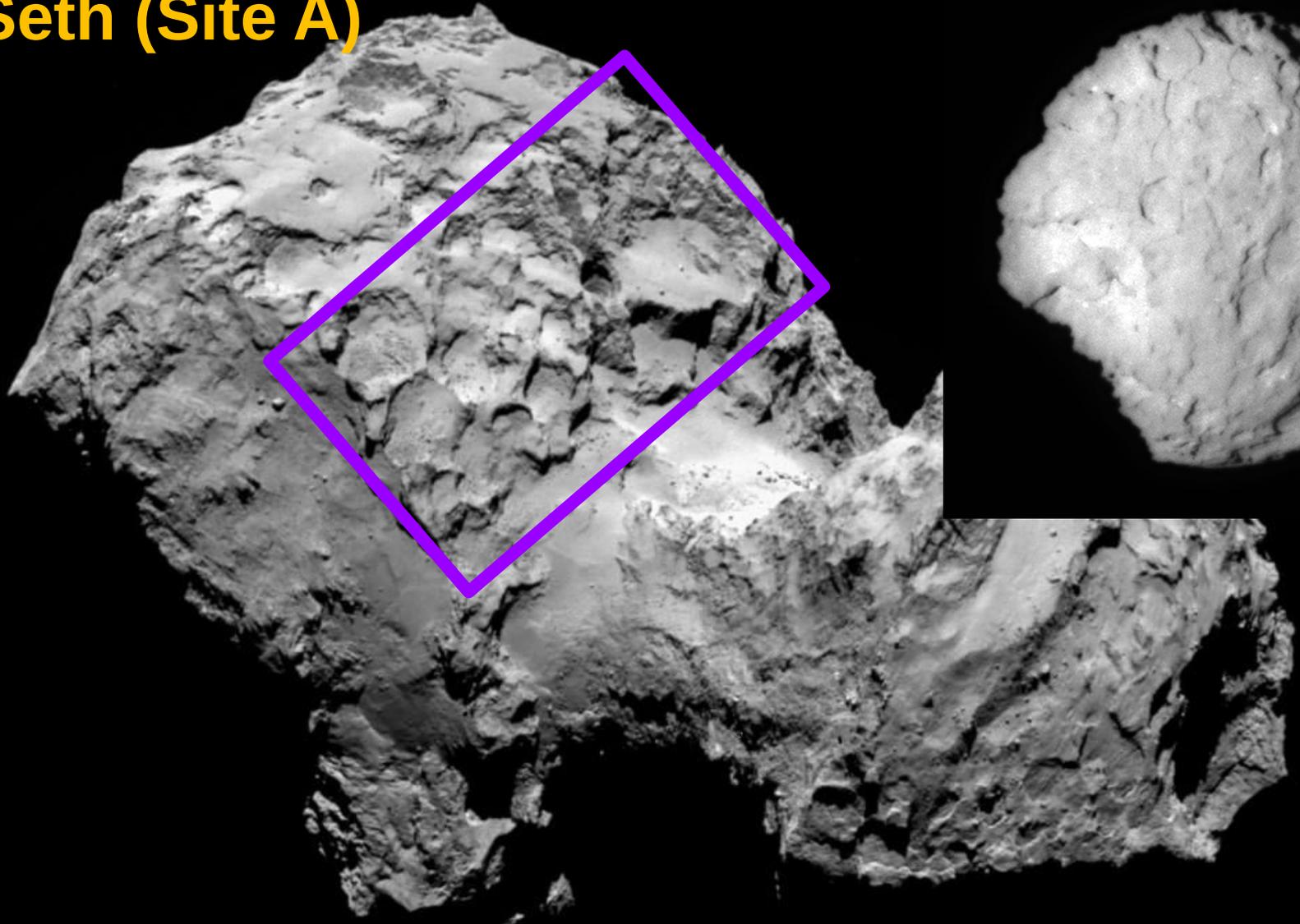
Mesure *fiable et très précise* (comptage des molécules H₂O et HDO)

- **Origine de l'eau des océans terrestres :**
 - Pas de contribution significative des comètes
 - Contribution d'astéroïdes hydratés ?
 - Mesure incompatible avec celle de P/Hartley 2 ...
- **Gradient positif vers l'extérieur du système solaire :**
 - Mécanismes chimiques d'enrichissement en deutérium
 - Dans le milieu interstellaire = chimie neutres-ions : x 10-100
 - Dans la nébuleuse primitive = chimie neutres-neutres : x 3

STRUCTURE INTERNE

Structures en terrasses

Seth (Site A)

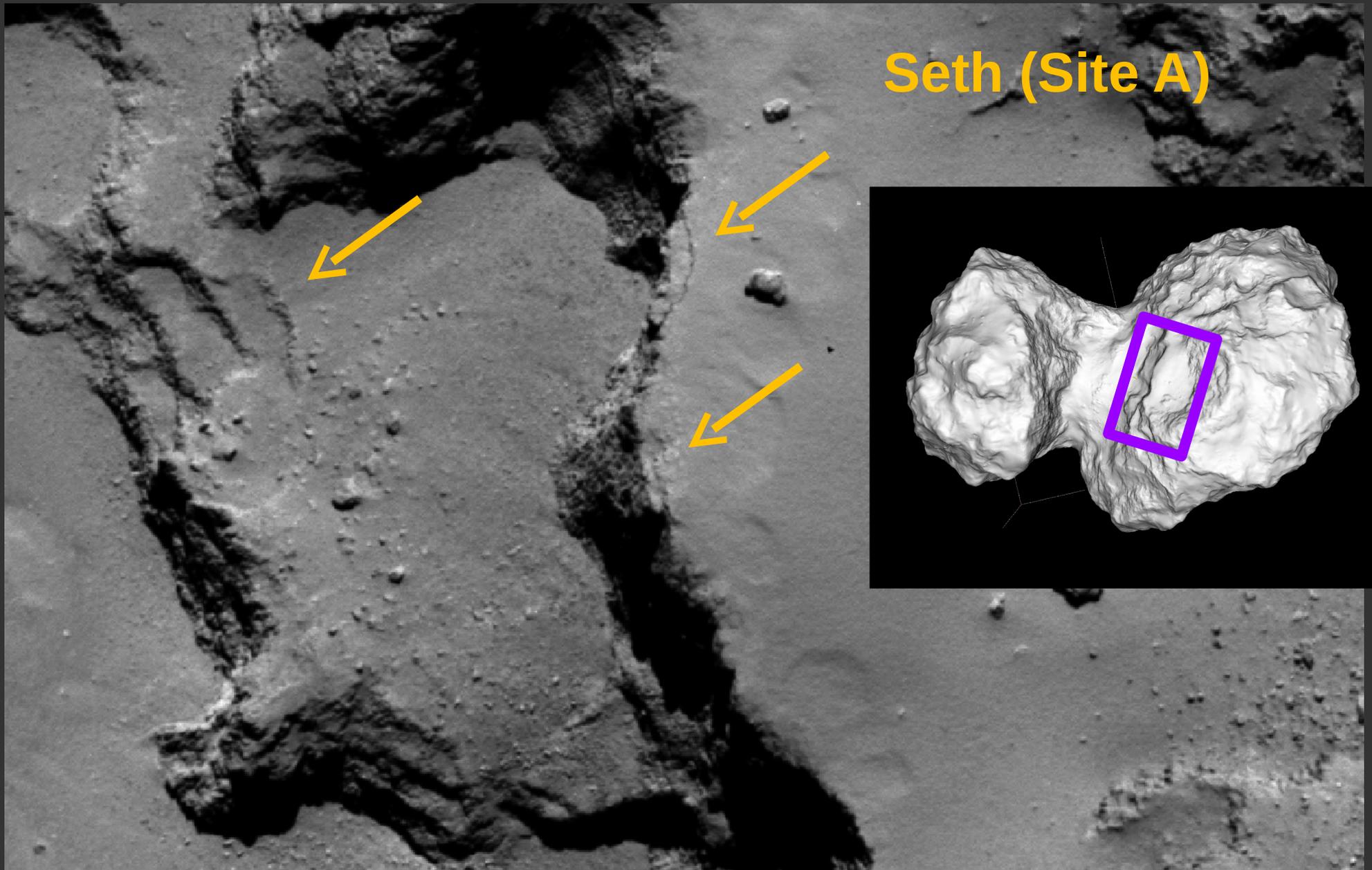


Comète P/Wild 2



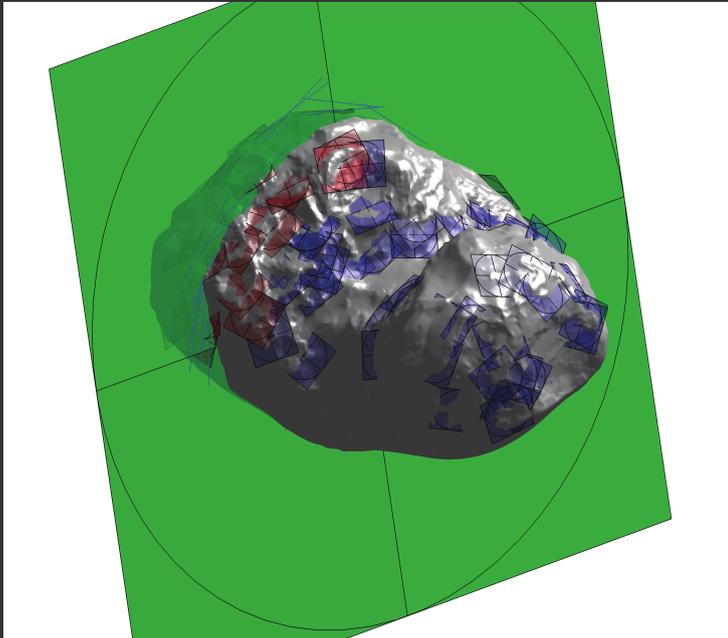
STRUCTURE INTERNE

Structures en terrasses



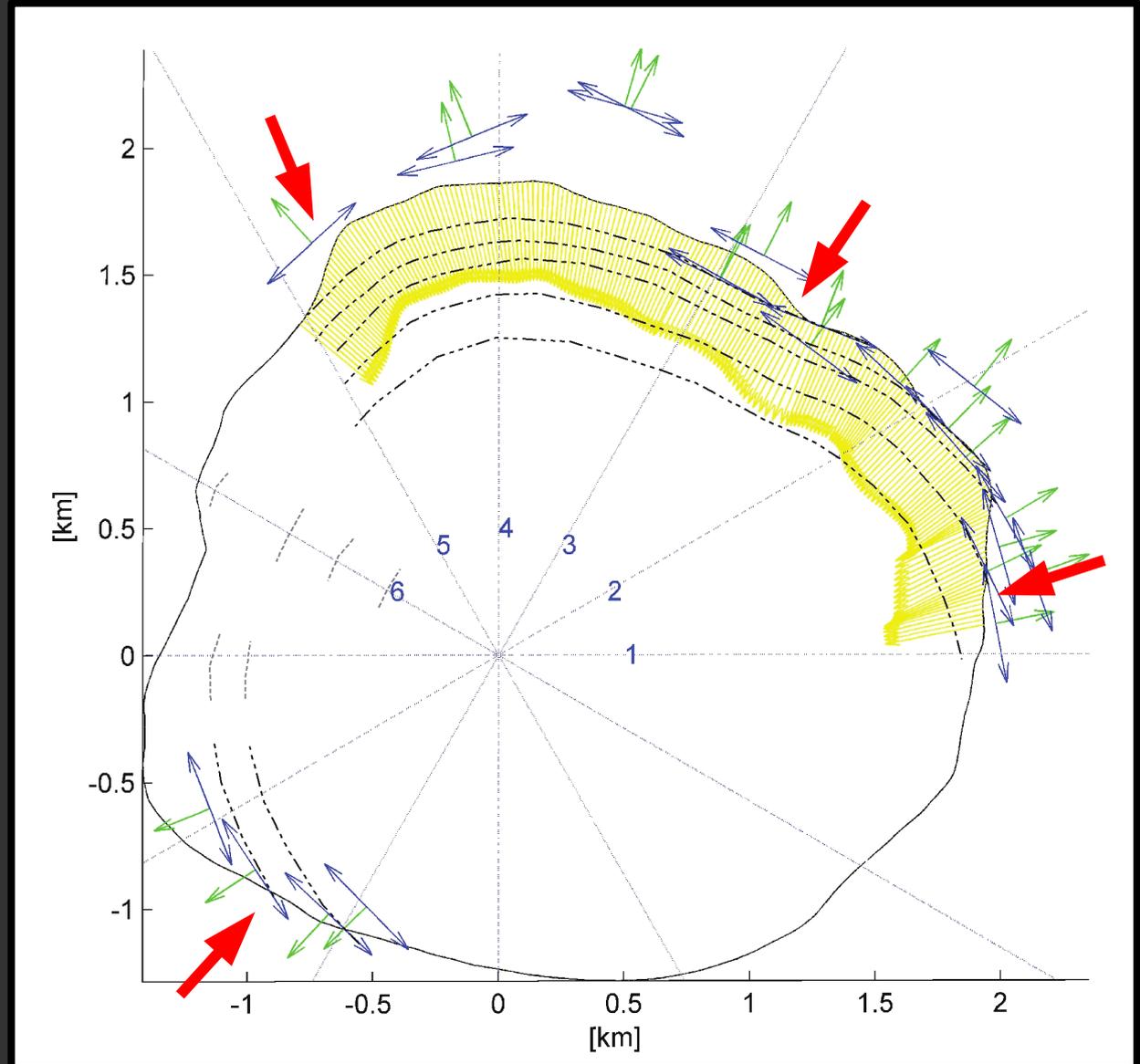
STRUCTURE INTERNE

Stratification du noyau



Structure en oignon :

- Analyse des terrasses
- Epaisseur : 100-300 m
- 5 couches identifiées



STRUCTURE INTERNE

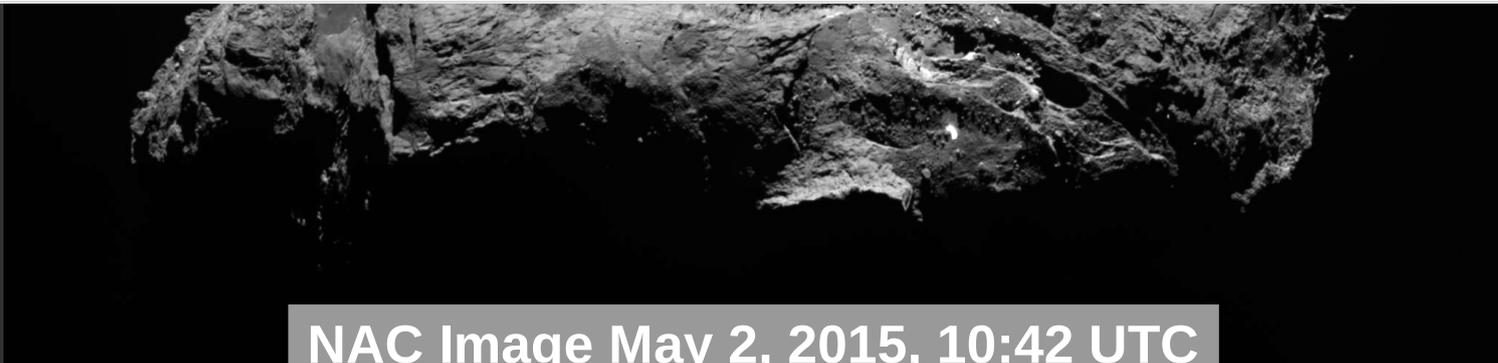
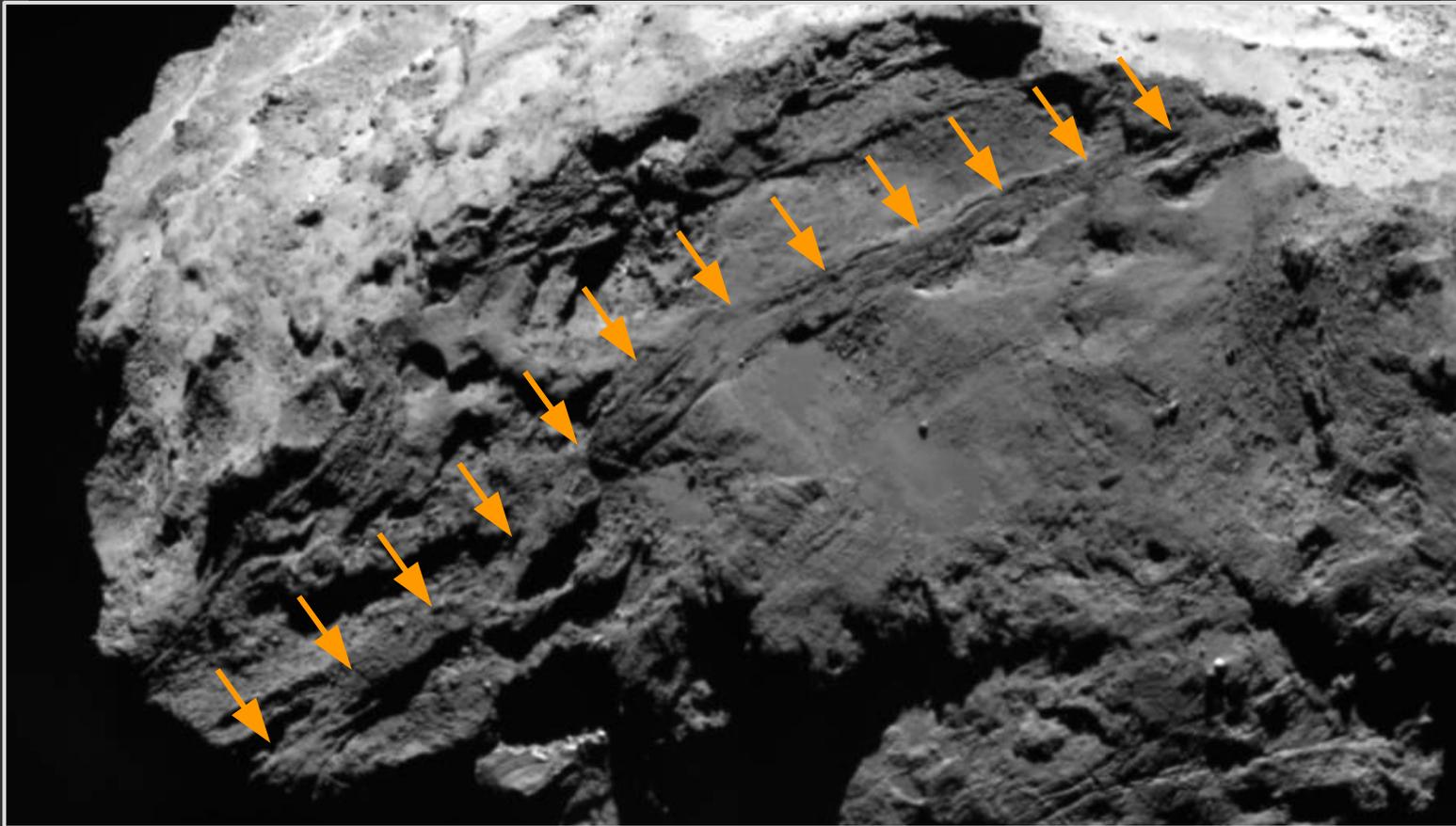
Hémisphère sud de la comète



NAC Image May 2, 10:42 UTC

STRUCTURE INTERNE

Structure en couche ?



NAC Image May 2, 2015, 10:42 UTC

STRUCTURE INTERNE

Structure interne du noyau :

- **Origine de la stratification du noyau :**
 - Accrétion par étapes dans un milieu inhomogène ?
 - Vitesses d'accrétion variables dans le temps ?
 - Lien avec les inhomogénéités de composition / densité ?

- **Densité inhomogène**
 - Fortes indications liées à la rotation du noyau de la comète



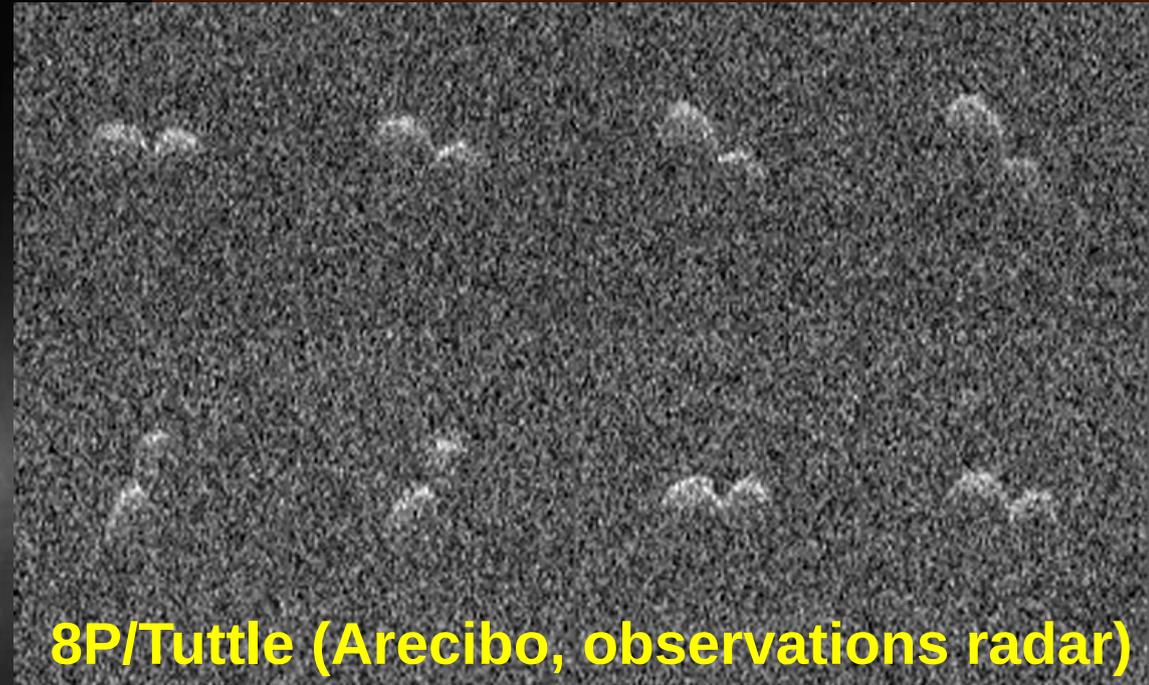
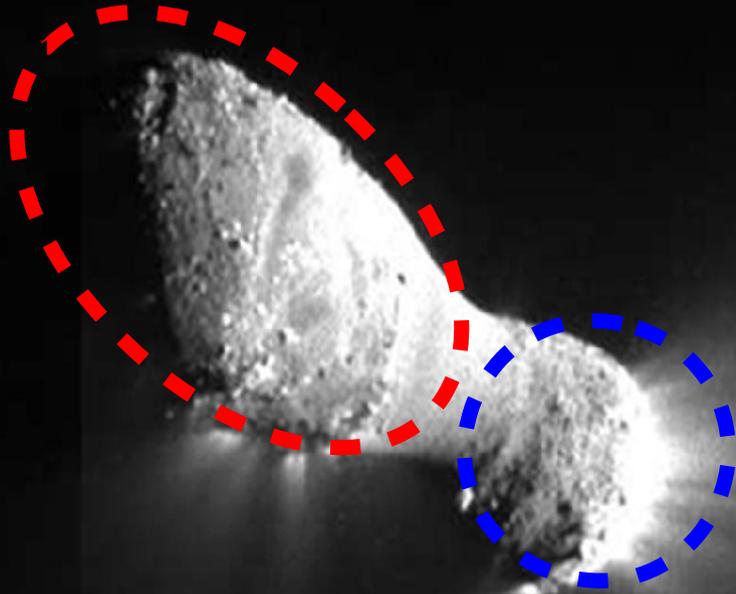
Ruban de soie de la dynastie Han (Chine)
Inventaire des différents aspects de comètes
IVème siècle avant J.C.

Découvert en 1973 à Ma Wang Dui
en Chine (province du Hunan)

FIN

STRUCTURE BINAIRE

103P/Hartley 2 (mission EPOXI)



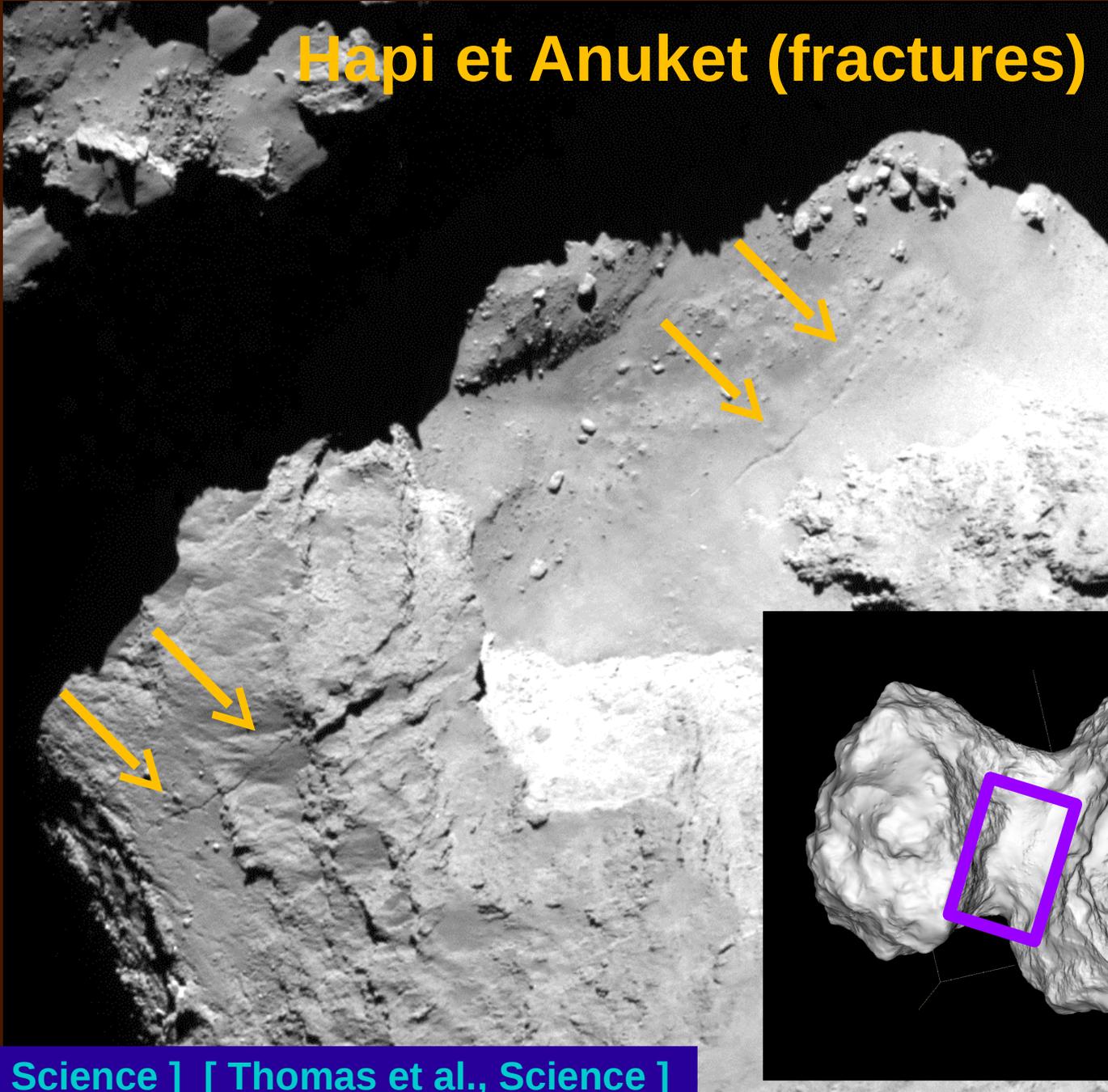
8P/Tuttle (Arecibo, observations radar)

Autres noyaux doubles:

- 8P/Tuttle (Harmon et al.; Lamy et al.)
- 103P/Hartley 2 (Thomas et al.)
- 19P/Borrelly (Oberst et al.) ?

STRUCTURE BINAIRE

Hapi et Anuket (fractures)



COMPOSITION

Inhomogénéités

Mesure de rapports moléculaires :

Instrument ROSINA = spectromètre de masse à haute-résolution

- **Origine des fortes variations mesurées :**

- Inhomogénéités de composition des glaces (cf. P/Hartley 2)
- Enrichissement en CO₂ dans une zone appelée 'Imhotep'
- Jets de gaz de composition différente ?
- Lien avec les couches détectées par OSIRIS ?

COMPOSITION

Rapport gaz/poussière

Mesure du rapport P / G :

- **Poussières :**
 - Prise en compte des grains détectés par GIADA
 - Utilisation des images OSIRIS
- **Gaz :**
 - Densité de colonne mesurée par MIRO

Rapport P / G en masse = 4 ± 2

Porosité = 50-80 %

(valeurs préliminaires)

CONCLUSIONS

Principaux résultats :

- **Structure du noyau à grande échelle**
 - Structure binaire consolidée, deux lobes non-alignés
 - Stratification probable des deux lobes
 - Fracturation en cours au niveau du cou ?
- **Topographie de surface à petite échelle :**
 - Grande variétés de structures
 - Plusieurs structures inattendues : nodules, puits, ...
 - Nombreuses fractures à différentes échelles (mm au m)
- **Processus physiques :**
 - Erosion dûe au dégazage et aux brises latérales
 - Gravité et rotation : chute et transport de matière ?
 - Chocs thermiques : fractures ?

CONCLUSIONS

Quelques questions qui émergent :

- **Structure = binaire consolidée**
 - Lieu de formation des deux composantes ?
 - Date et mécanisme de formation ?
- **Porosité élevée (> 50%)**
 - A quelle échelle ?
 - Faible cohésion du noyau
 - Micro-porosité : faible cohésion à petite échelle.
 - Macro-porosité : présence de fractures, de puits, de cavités
- **Structure inhomogène du noyau**
 - Composition des couches ?
 - Ségrégation dans la nébuleuse primitive (tourbillons ...) ?
 - Origine des débris, certains très gros (> 50 m) ?

CONCLUSIONS

Quelques questions qui émergent :

- **Comment fonctionne le dégazage ?**
 - Presque pas de glace en surface (VIRTIS, moins que P/Tempel 1)
 - Très faible conductivité thermique (MIRO, VIRTIS)
 - Dégazage depuis des régions très étendues
 - Rôle des falaises ?
- **Quelle est la distribution en taille des cométésimaux ?**
 - Les « nodules » sont-ils le produit de l'accrétion ?

PERSPECTIVES

Observations futures :

- **Mission**

- Observations au périhélie (> 200 km)
- Prolongement jusqu'à septembre 2016 (confirmé)
- Fin de vie = descente progressive en spirale vers la surface

- **ROSINA**

- Concentration de l'ammoniaque (rapport N₂ / CO)
- Concentration des gaz rares

- **OSIRIS**

- Processus d'érosion et activité
- Evolution des paramètres rotationnels (effet des FNG)

LA MISSION ROSETTA



FIN

LA MISSION ROSETTA

- **Bilan des opérations de PHILAE**

- **Excellente collecte de données :**

- . forage MUPUS réussi (à confirmer pour COSAC et APX)
- . imagerie réussie (ROLIS, CIVA)
- . bonnes données de sondage radio (CONSERT)
- . certains modes n'ont pas pu être utilisés

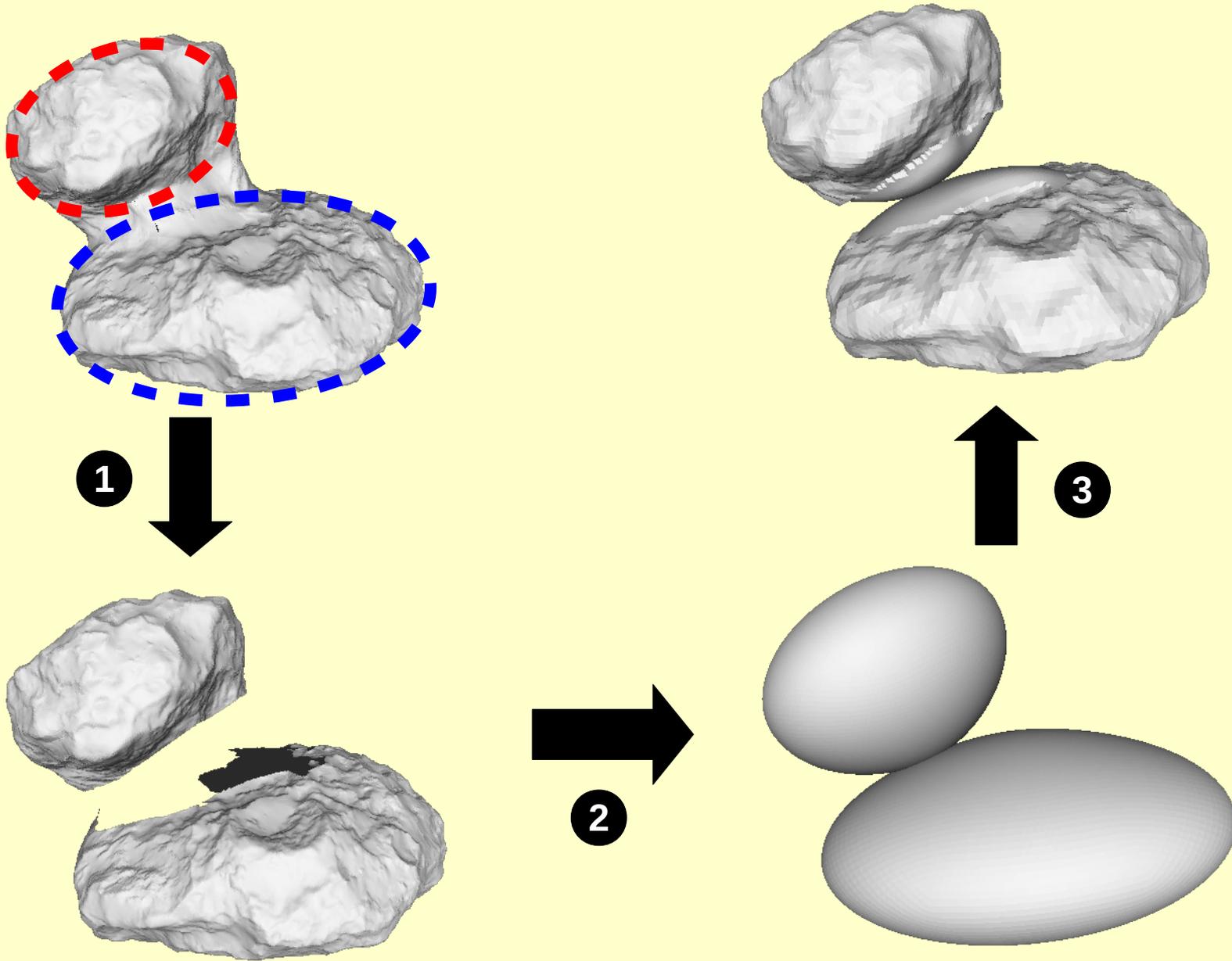
- **Zone d'atterrissage finale intéressante :**

- . petite cavité protégée montrant les matériaux sous la surface

- **Durée d'opération limitée par la batterie :**

- . fonctionnement nominal des batteries
- . peu d'éclairement (1h30)

PROPRIETES DU NOYAU



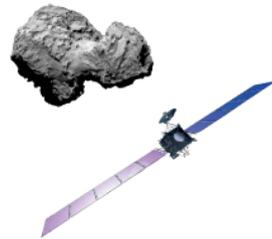
LA MISSION ROSETTA

HOW MUCH DOES IT COST TO LAND ON A COMET?

€1.4bn

Rosetta mission

Land on a comet for the first time in human history



...ABOUT THE SAME PRICE AS...



4.2

Airbus A380 aircraft

Cool engineering, but they won't get you into space...

WHO PAID FOR IT?

WHO PAID FOR IT?

€3.50

cost per European citizen

(from 1996–2015, so

€0.20/person/year)



Cost of Rosetta
per person

■ **€3.50**

Cost of a cinema ticket
to see *Interstellar*

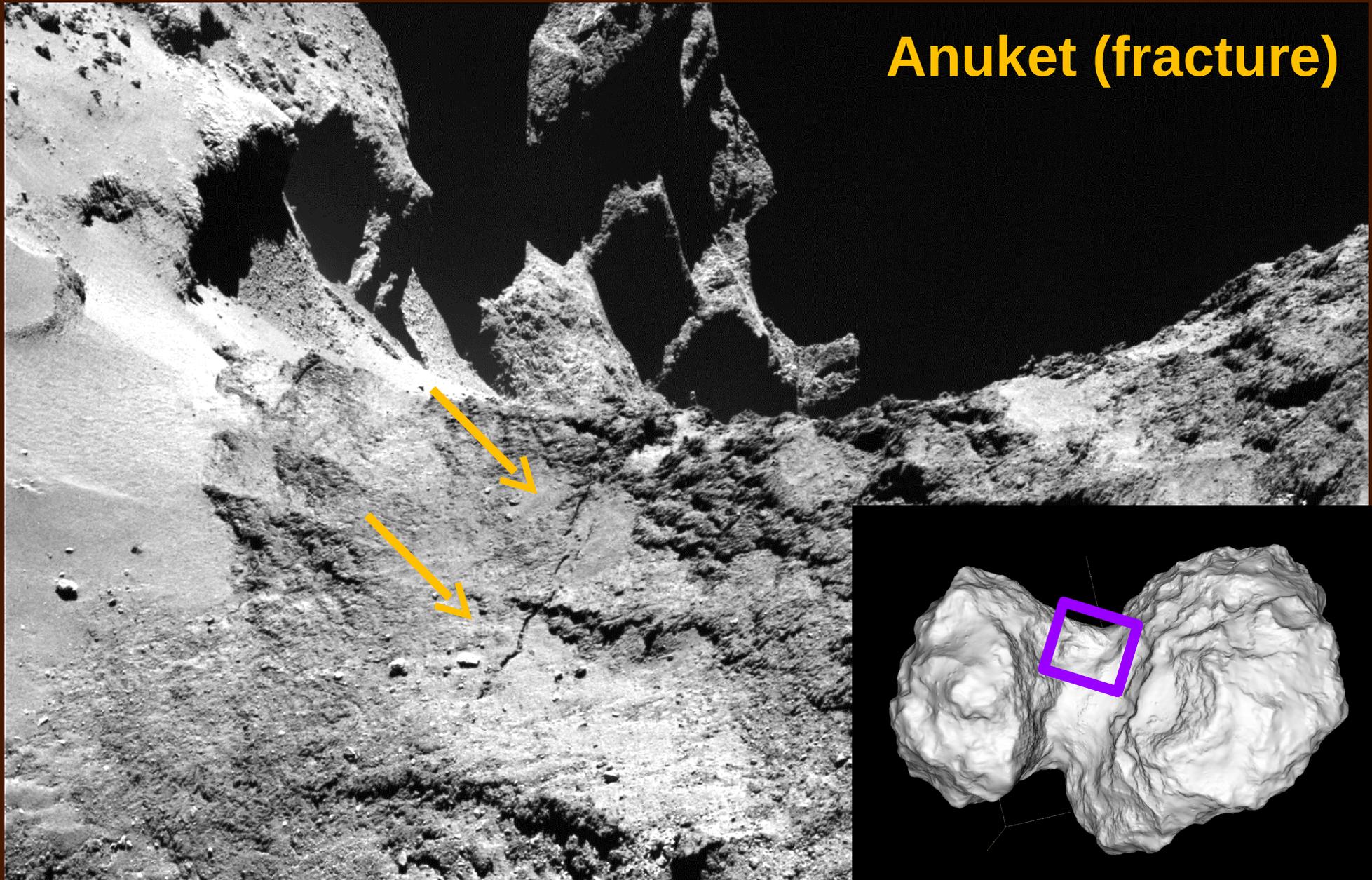
■ **€8.50**

scienceogram.org

Rosetta/Comet images: ESA; data from ESA, Airbus, UK average cinema ticket price
For full data and sources visit scienceogram.org



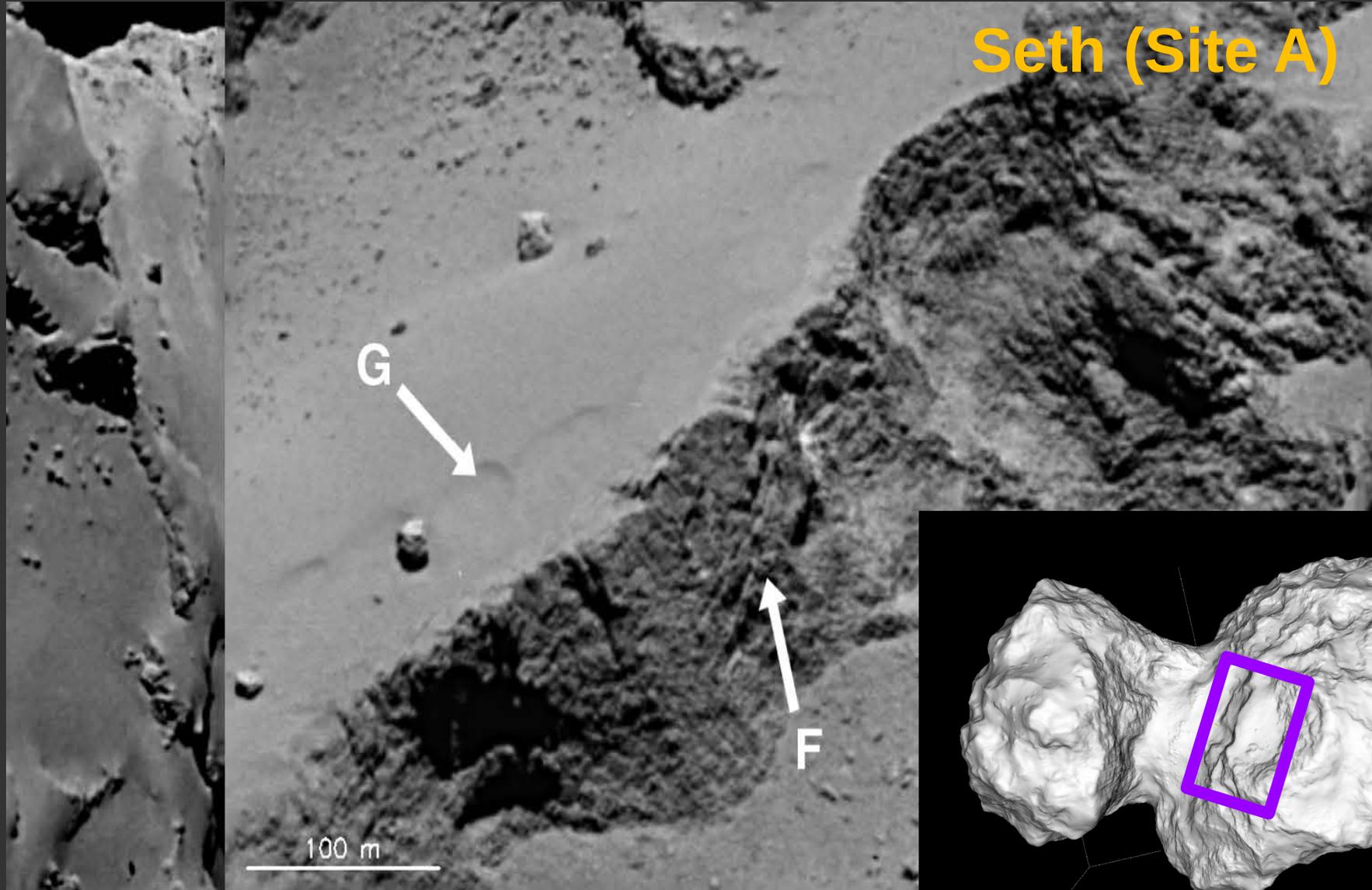
PROPRIETES DU NOYAU



[Sierks et al., Science] [Thomas et al., Science]

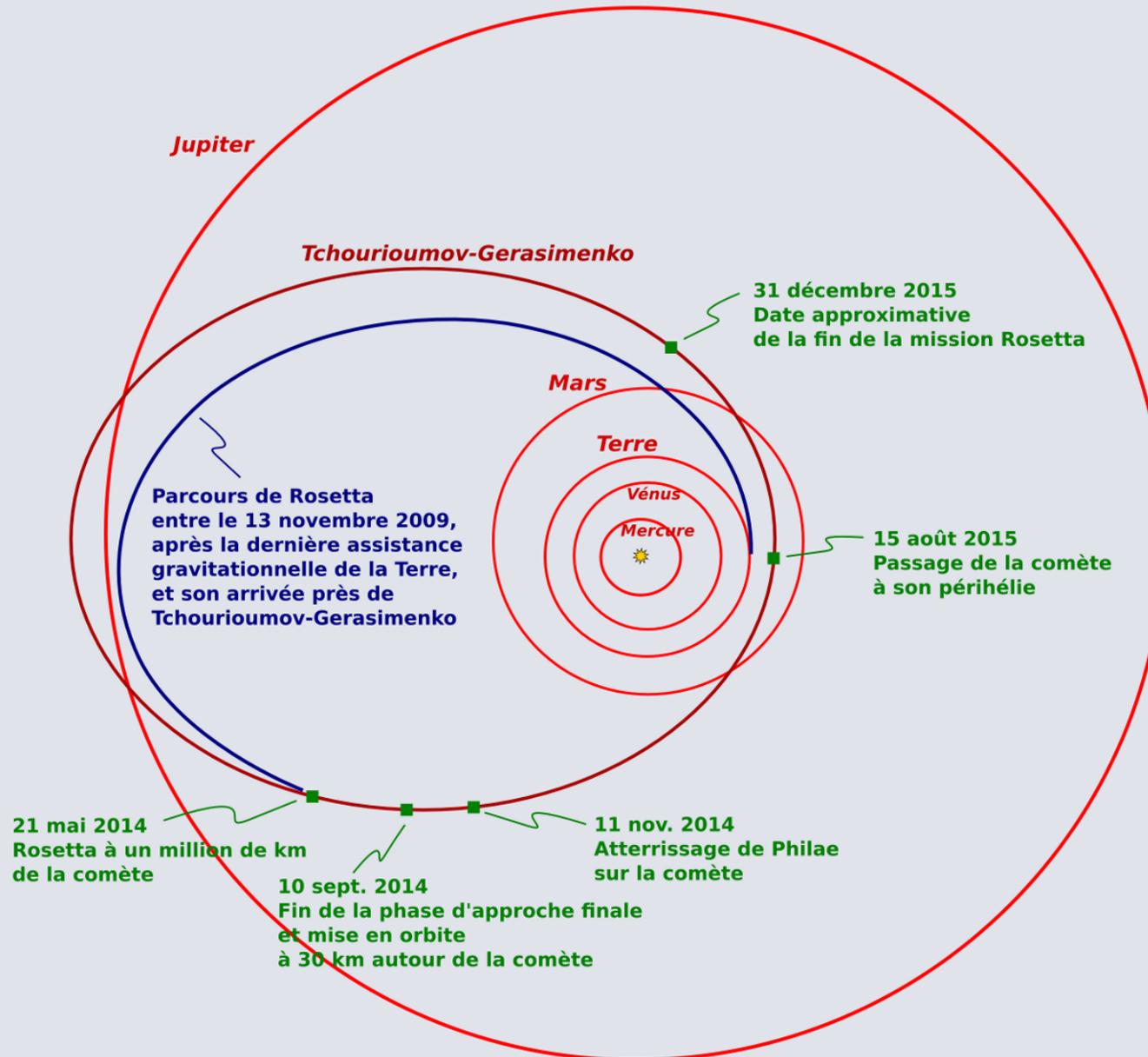
STRUCTURE INTERNE

Structures en terrasses



LA MISSION ROSETTA

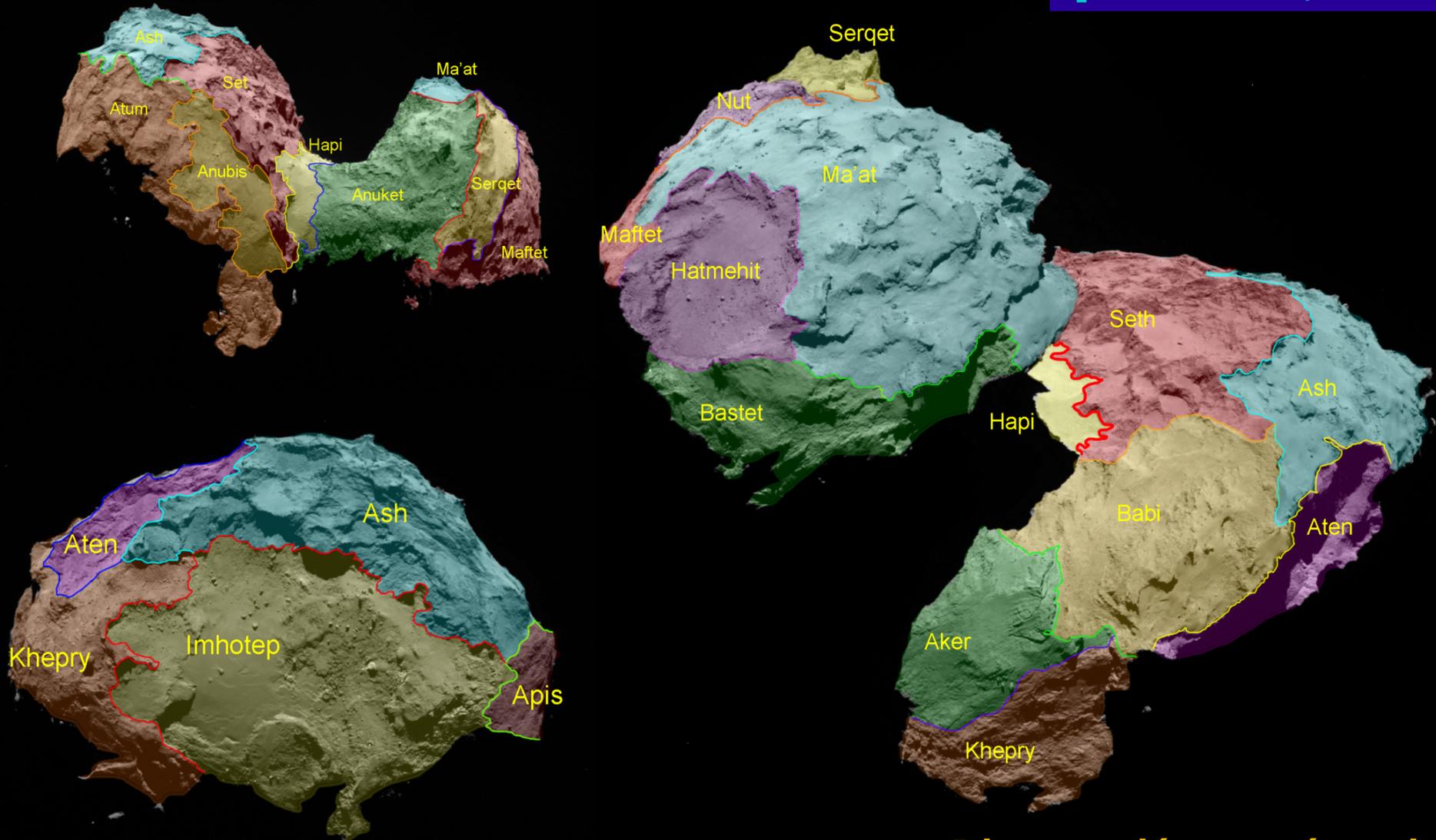
Le voyage de Rosetta



GEOMORPHOLOGIE

Unités géologiques

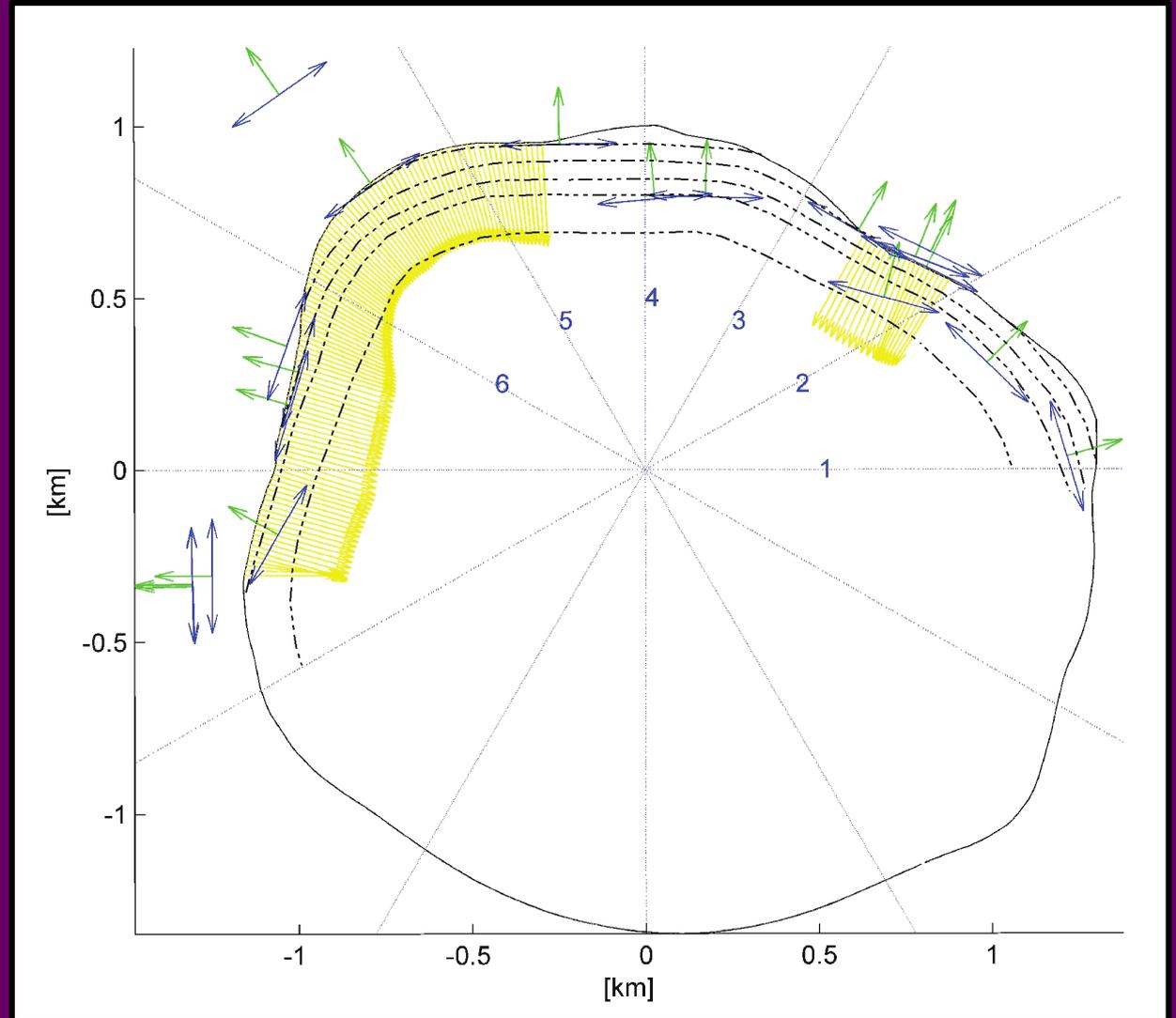
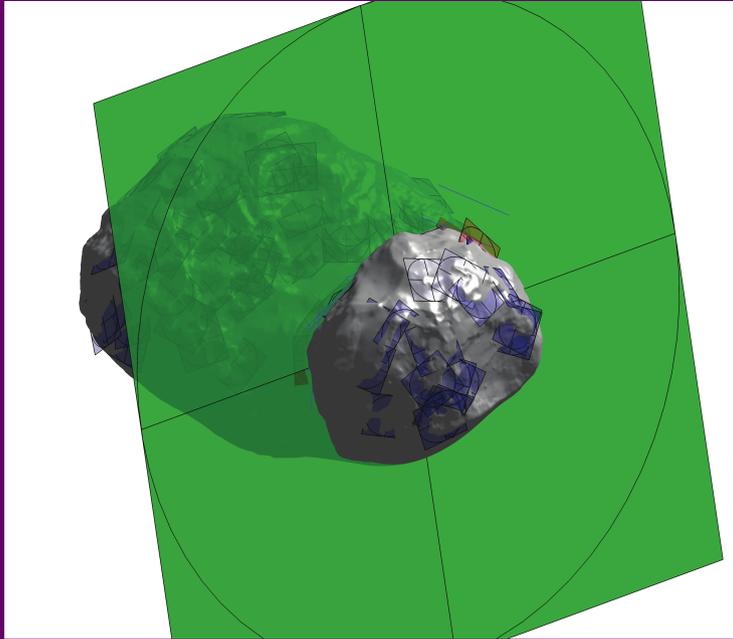
[Sierks et al., Science]



Dieux et déesses égyptiennes

GEOMORPHOLOGIE

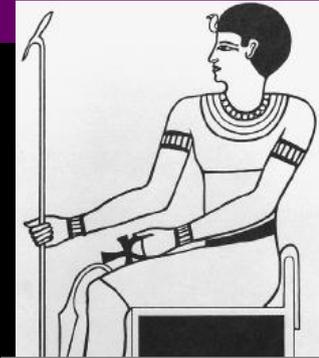
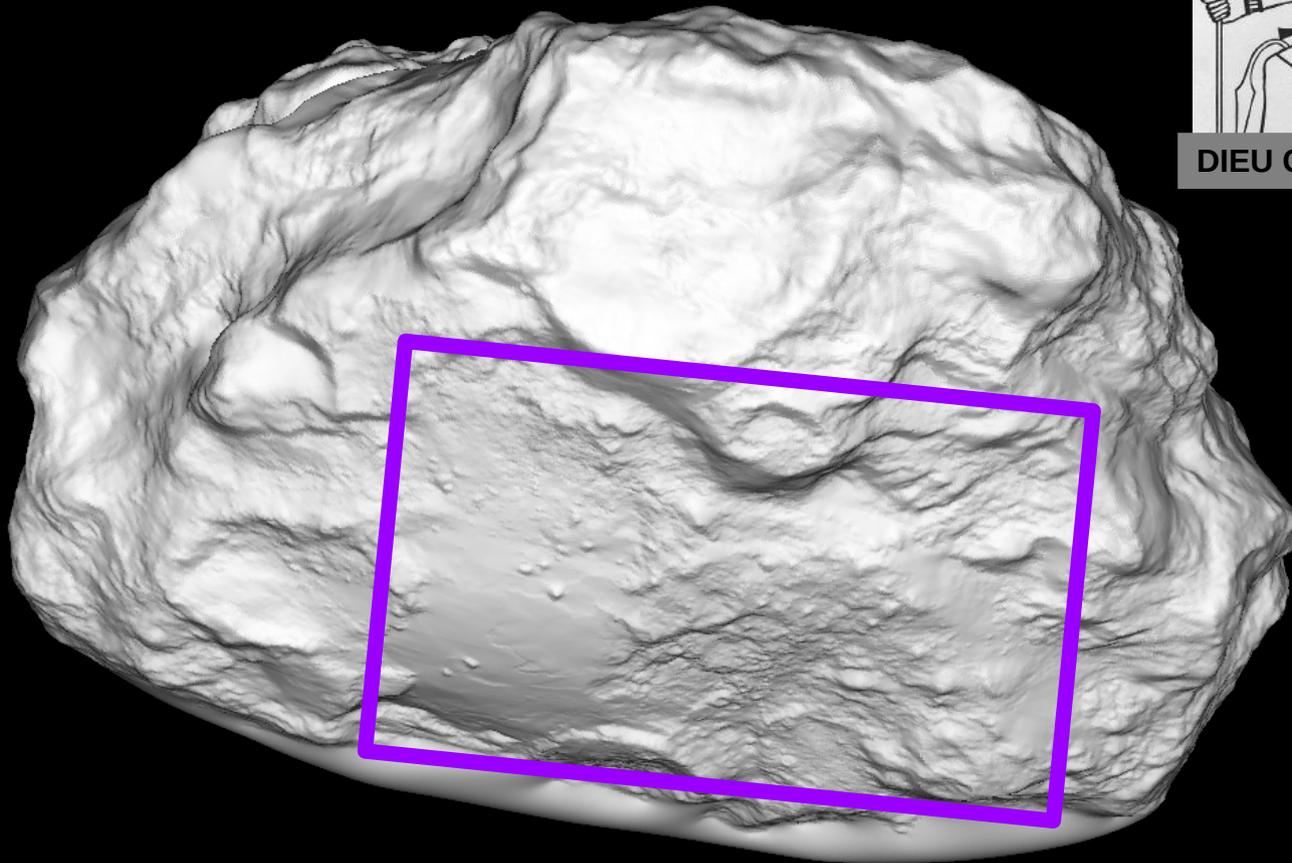
Structure en couche



GEOMORPHOLOGIE

Zones de bassins

Imhotep



DIEU GUÉRISSEUR

LA MISSION ROSETTA

- **Origine :**

- D'où vient sa forme particulière ?
- Pourquoi les comètes sont-elles si poreuses ?
- Sont-elles formées de couches successives ?
- Sont-elles homogènes ?
- Peut-on identifier les cométésimaux ?

- **Evolution :**

- Comment se forment les différents terrains ?
- Comment évoluent-ils ?
- D'où vient l'activité ?
- Comment affecte-t-elle la surface?

COMPOSITION

Rapport D/H

Enrichissement de l'eau en D :

- Mécanismes d'enrichissement :

- Sédimentation préférentielle du HDO dans la NP ?
- Réactions grains-gaz ?
- ...

=> Augmentation du rapport D/H avec la distance au proto-Soleil

- Conclusions

- Accord avec les modèles d'enrichissement en D dans la NP
- Désaccord avec les mesures EPOXI et HERSCHEL

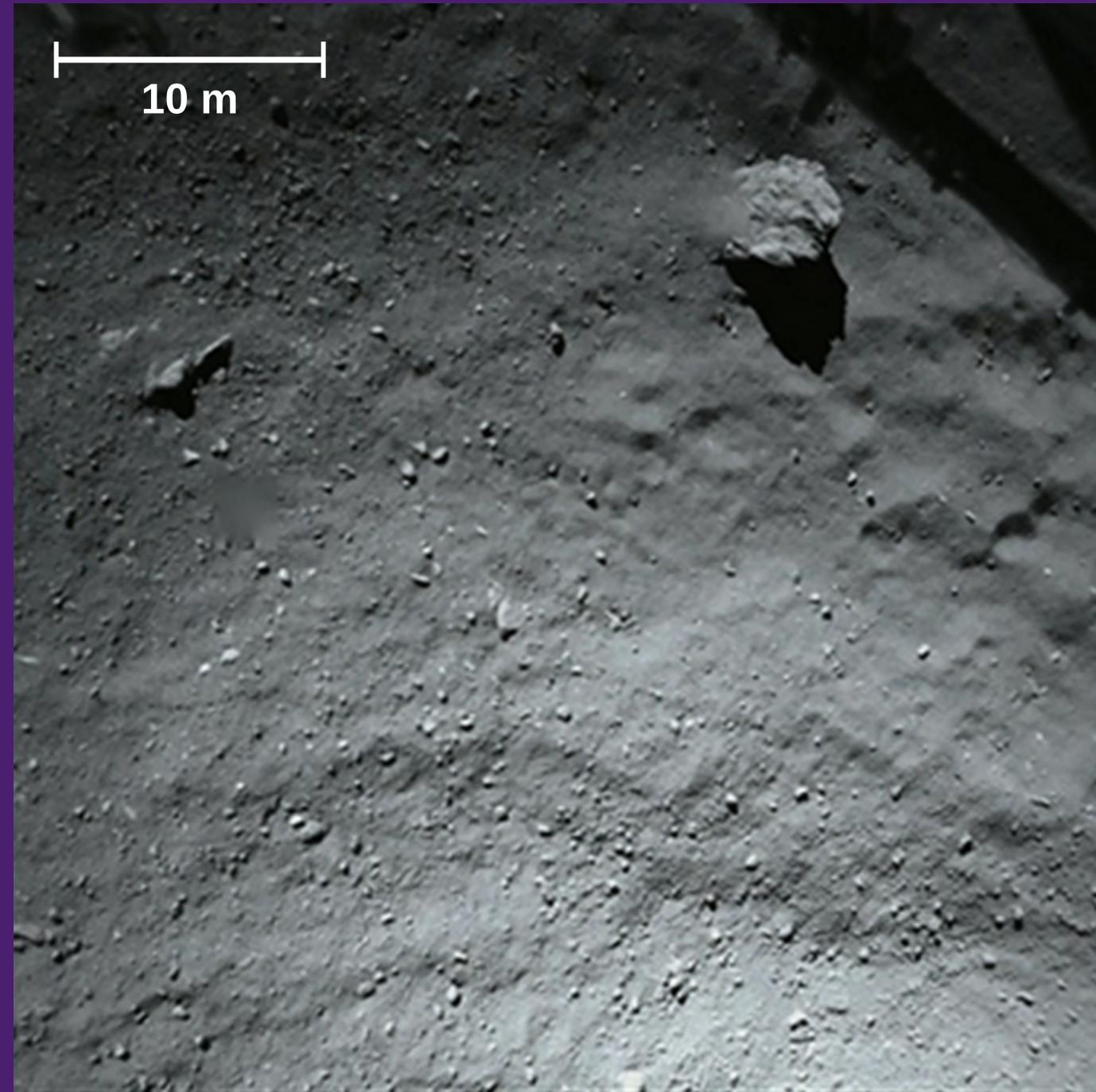
COMPOSITION

Concentration en ammoniacque

Mesure du rapport N_2 / CO :

- **Mesure du rapport N_2 / CO avec ROSINA :**
 - Valeur = 0.2–1.6 %
 - Fort appauvrissement par rapport à la nébuleuse primitive
- **Modélisation :**
 - Formation de clathrates de $CO - N_2$
 - Dépendance
- **Conclusions**
 - Formation des grains cométaires entre 30 et 70 K

LA MISSION ROSETTA



10 m

PHILAE/ROLIS

Date : 12/11/2014

Distance: 40 m

Résolution: 0,04 m/px

LA MISSION ROSETTA

- **Position du lander à la surface**

- **Région approximative connue :**

- . distance en vol grâce à la liaison radio (CONSERT)
- . position sur les images de l'orbiteur (OSIRIS et NAVCAM)
- . reconstruction de trajectoire à l'ESOC

- **Recherche en cours avec la caméra OSIRIS :**

- . imagerie de la zone prévue à partir du 6 décembre

- **Etat actuel du lander**

- **Batteries déchargées et difficiles à recharger :**

- . peu d'éclairement par jour cométaire
- . basse température rendant difficile la recharge

- **Possibilité de réactiver PHILAE plus tard :**

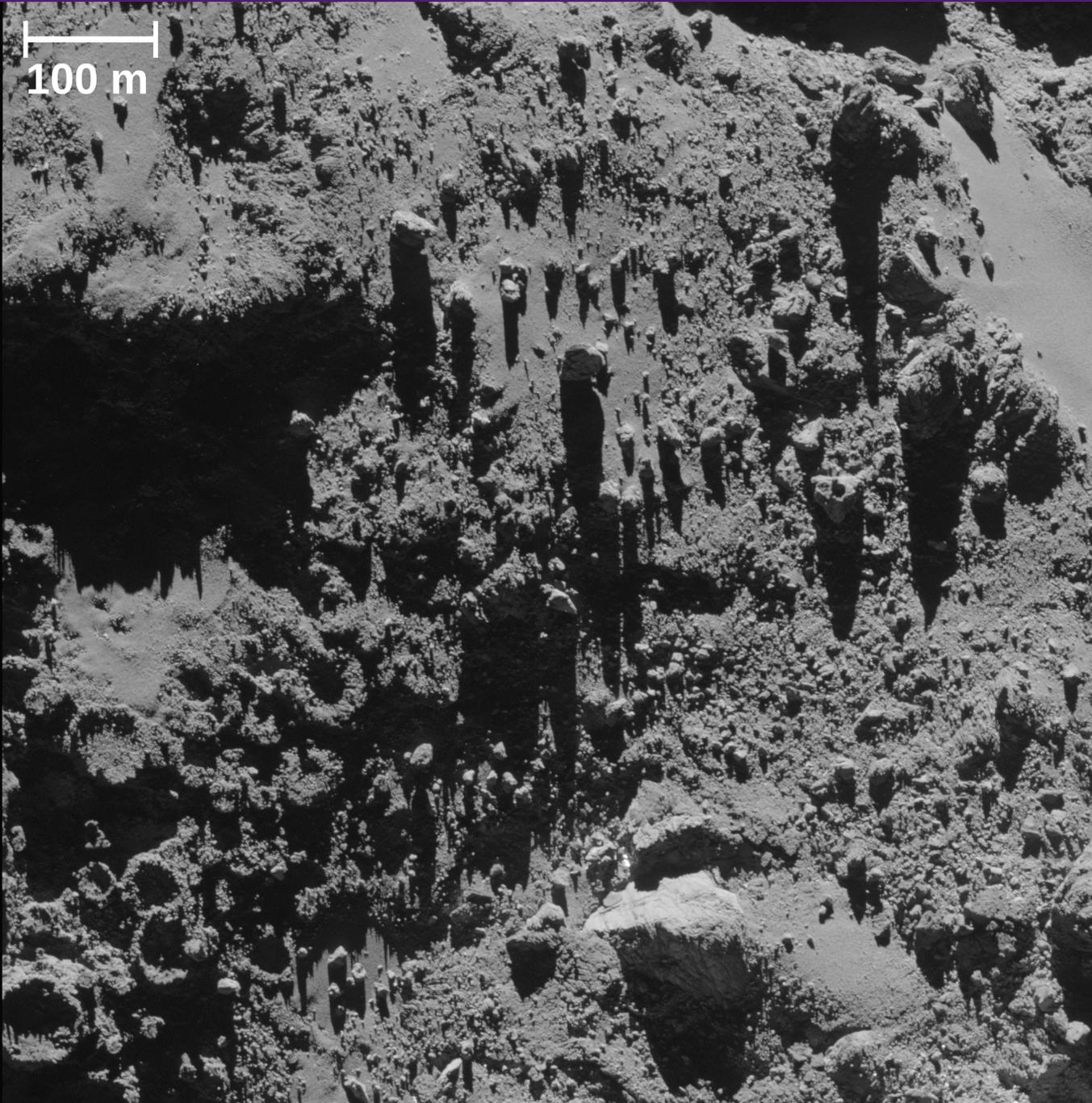
- . meilleures conditions d'éclairement et de température en 2015

PROPRIETES DU NOYAU

[Jorda et al., A&A, in prep.] [Scholten et al., A&A, in prep.]

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
Rayon moyen	1.84 ± 0.05 km
Ellipsoïde	2.42 x 1.58 x 1.43 km
Rayons axes principaux	$(2.28 \pm 0.03) \times (1.36 \pm 0.03) \times (1.41 \pm 0.22)$ km
Surface	47.4 ± 0.8 km ² (Rs = 1.94 km)
Volume	21.4 ± 2.0 km ³ (Rv = 1.72 km)
Densité	470 ± 45 kg / m ³ (avec la masse RSI)
Direction du pôle (RA, Dec)	$(69.4 \pm 0.1^\circ, 64.0 \pm 0.1^\circ)$
Période de rotation	12.4041 hr ($\Omega = 696.543335$ ° / jour)
Moments d'inertie	1:1.04:1.87 (Rayons: 0.99 x 1.32 x 1.35 km)
Accélération à la surface	Moy: 1.6 cm / s ² Domaine: [1.3 : 2.2] cm / s ²

LA MISSION ROSETTA



OSIRIS/NAC

Date : 30/09/2014

Distance: 20 km

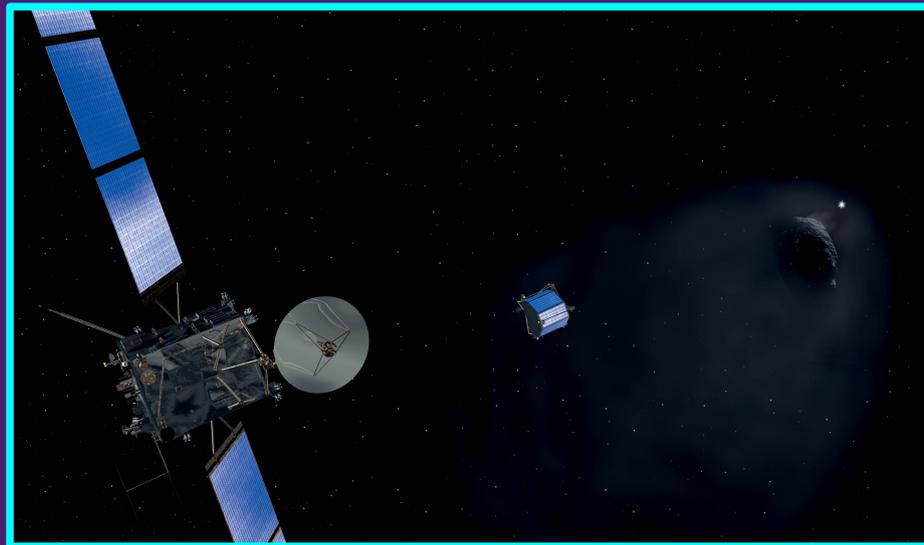
Filtre: ORANGE

Résolution: 0,4 m/px

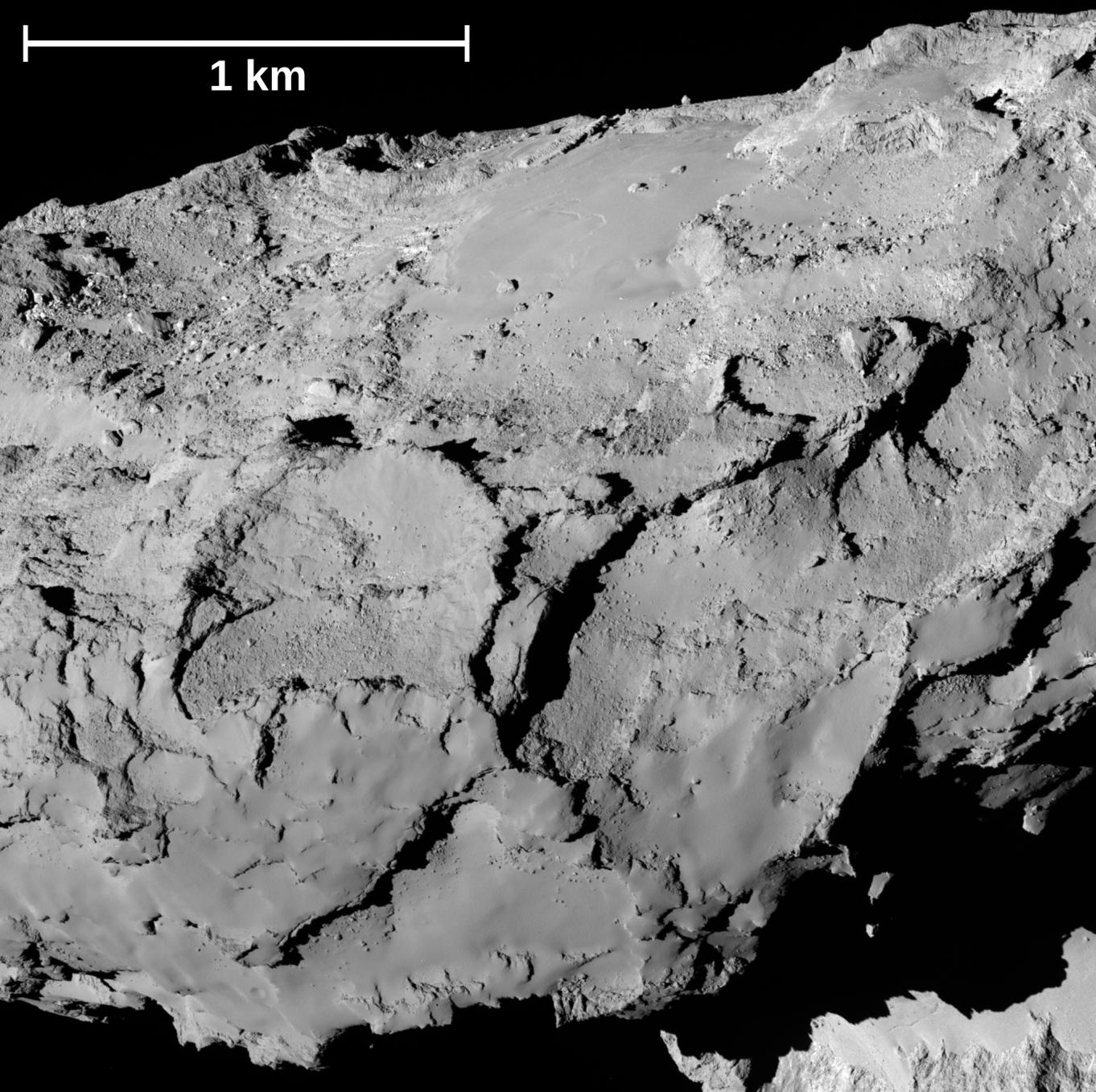
LA MISSION ROSETTA

Choix du site d'atterrissage :

- Critères :
 - Topographie de la zone d'atterrissage
 - Réalisation de l'orbite de langage
 - Durée de vol du module jusqu'à la surface
 - Alimentation électrique des batteries du module
 - Visibilité du module depuis l'orbiteur



IMAGES A HAUTE RESOLUTION



1 km

OSIRIS/NAC

Date : 22/08/2014

Distance: 60 km

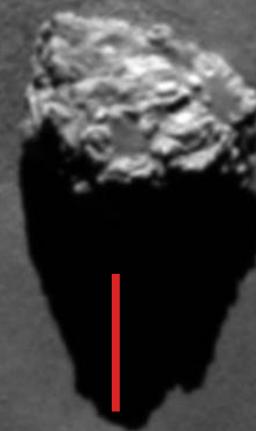
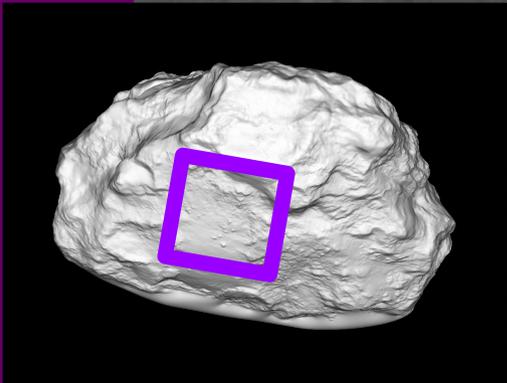
Filtre: ORANGE

Résolution: 1,2 m/px

GEOMORPHOLOGIE

Blocs en surface

Cheops dans Imhotep

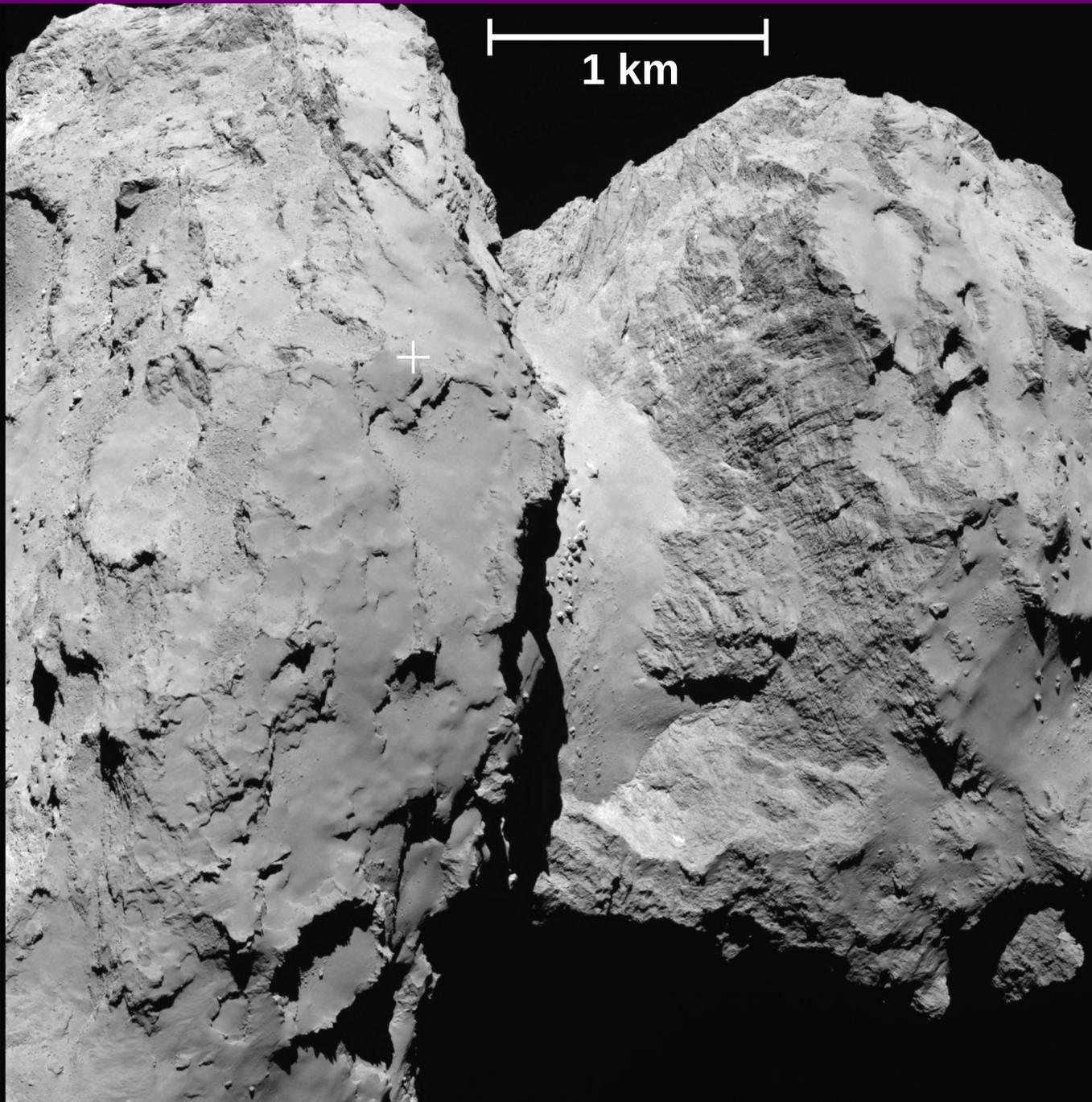


défini le méridien de référence

50 m



IMAGES A HAUTE RESOLUTION



OSIRIS/NAC

Date : 16/08/2014

Distance: 95 km

Filtre: ORANGE

Résolution: 1,91 m/px