

La mission Rosetta et l'exploration des comètes

Thérèse et Pierre Encrenaz

Nuit des Etoiles

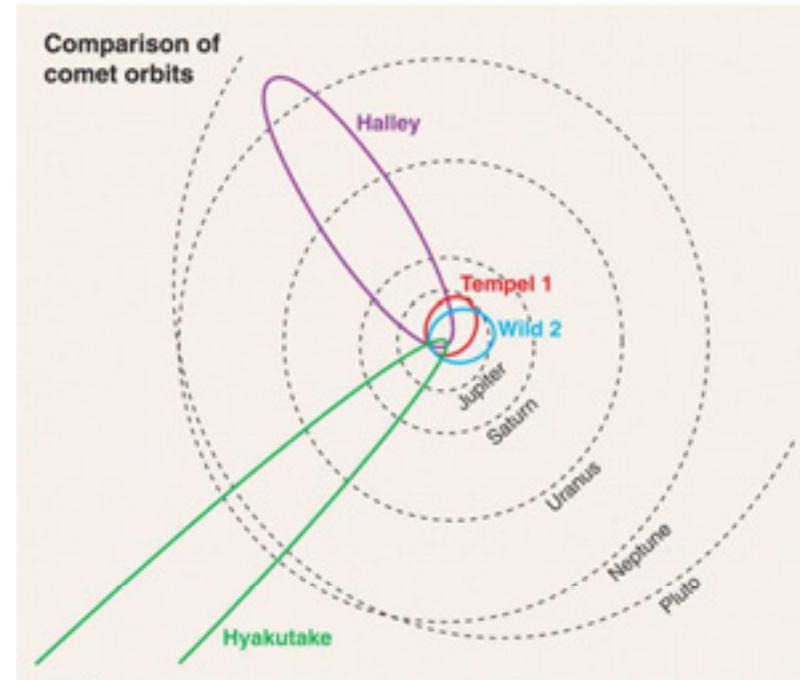
Ouessant, 8 Août 2015

Plan de l'exposé

- Qu'est-ce qu'une comète? Que peuvent-elles nous apprendre?
- **La mission Rosetta**
 - Historique
 - Le lancement (2 Mars 2004)
 - Le réveil de la sonde (20 Janvier 2014)
 - La descente de Philae (12 Novembre 2014)
 - Le réveil de Philae (13 Juin 2015)
 - Le passage au plus près du Soleil (13 Août 2015)
- Qu'avons-nous appris?

Qu'est-ce qu'une comète?

- Un **petit objet** (<10 km) formé de glace d'eau et de roche
- Voyage **du près au plus loin** du Soleil sur une orbite très elliptique
- Quand il s'approche du Soleil, la glace se sublime et provoque **l'éjection de gaz et de poussières**
- -> Difficulté d'observer le noyau (caché derrière la coma)



Comète McNaught, 2006

Les comètes et l'Histoire

- Longtemps à l'origine de terreur et de superstitions



Passage de
1066,
Tapisserie de
Bayeux

- Origine comprise par Edmund Halley qui prédit le retour de « sa » comète pour 1758 (arrivée le 13 mars 1759)

Pourquoi étudier les comètes?

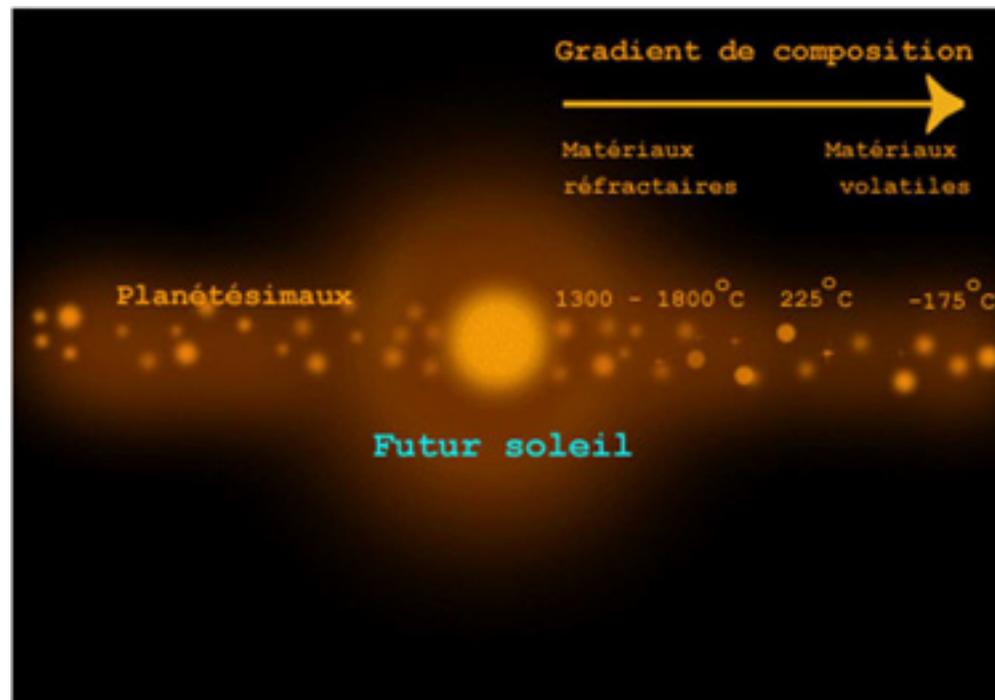
- Des témoins privilégiés des conditions de formation des planètes du système solaire



- La source possible de l'eau des océans terrestres
- La source possible des molécules prébiotiques qui ont donné naissance à la vie sur la Terre

Comment les comètes se sont-elles formées?

- Les objets du système solaire se sont formés par **agglomération de petites particules solides**

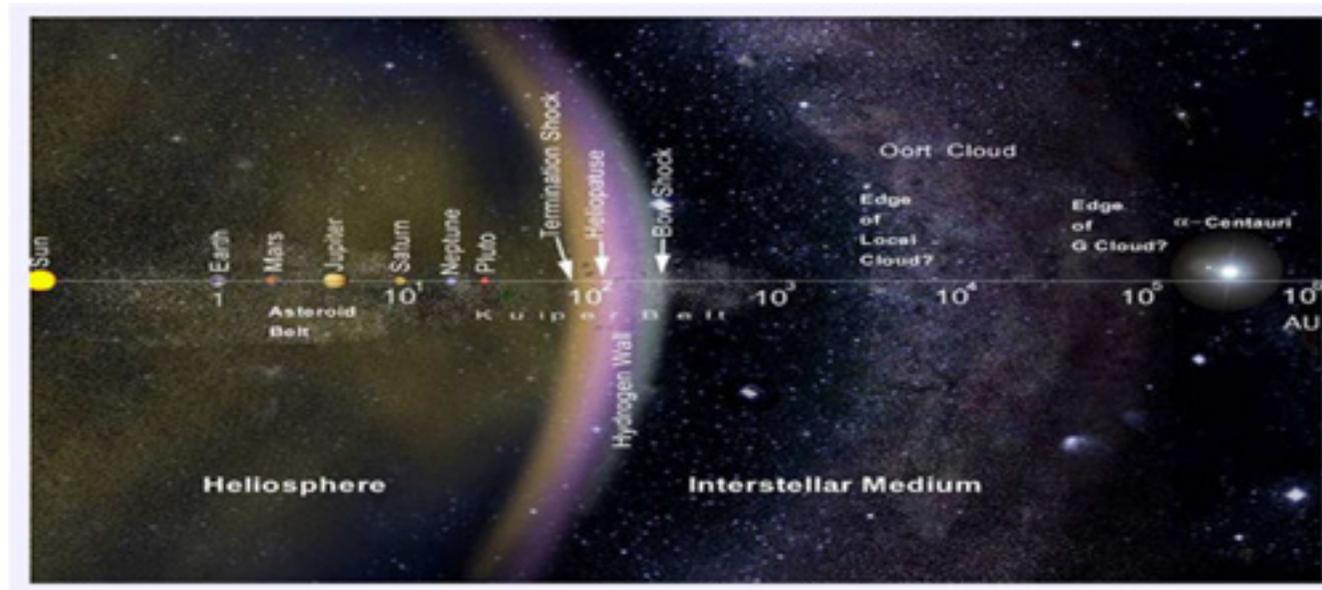


- Les **comètes**, formées à plus de 3 UA, sont surtout constituées de **glace d'eau**

Deux origines possibles pour les comètes

Nuage de Oort (>40000 UA):

- Comètes nouvelles et brillantes, à longue période
- Comète de Halley, Hyakutake, Hale-Bopp...
- Ejectées de la région Uranus-Neptune (20-30 UA)



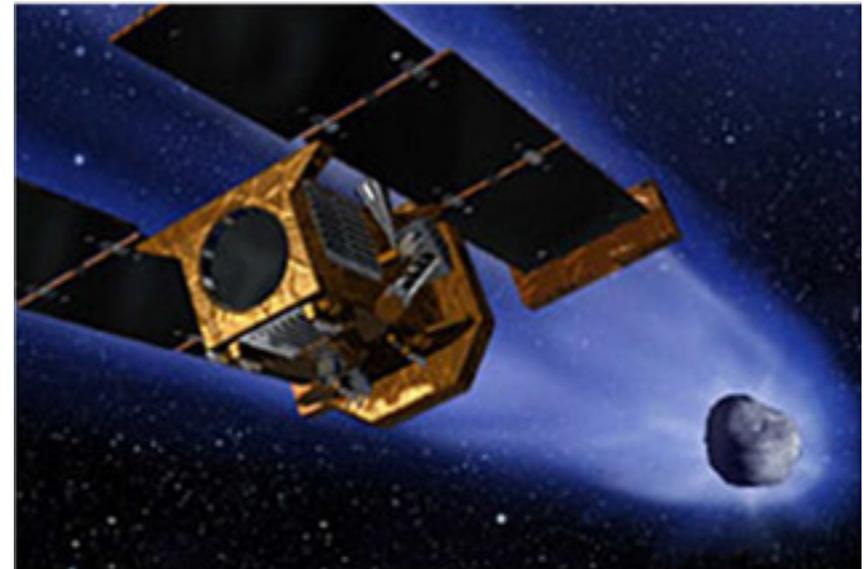
Ceinture de Kuiper Nuage de Oort

Ceinture de Kuiper (30 - 60 UA):

- Comètes peu actives et à courte période
- Comète de Encke, Wirtanen,
- Churyumov-Gerasimenko (Chury)
- Formées sur place à > 30 UA

Que cherche-t-on à comprendre?

- La nature des gaz issus de la comète (molécules-mères)
 - Analyse du rayonnement (obs. sol, observatoires spatiaux)
- La nature et la composition de la surface (glaces, silicates, organiques)
 - Analyse in situ (missions spatiales dédiées)
- La composition des grains cométaires
 - Collecte de grains de P/Wild2 par la mission Stardust
- L'intérieur du noyau
 - Expérience radar sur la mission Rosetta

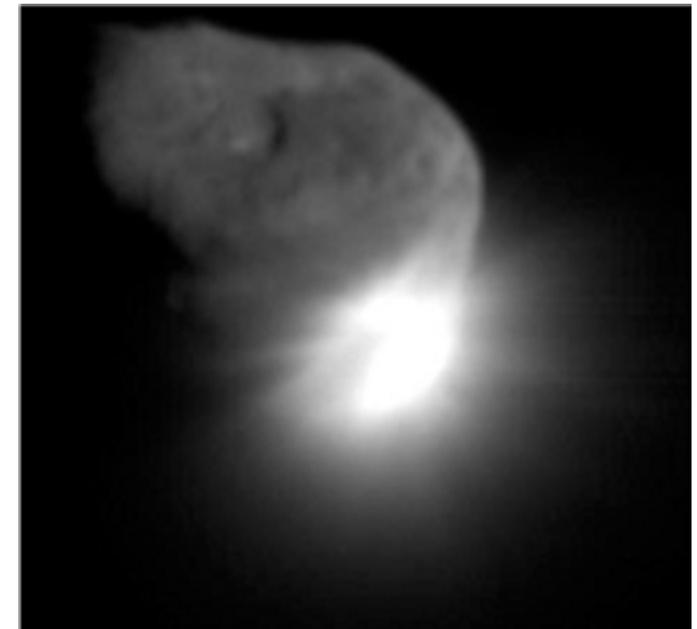


Les missions spatiales cométaires

- 1986: **Comète de Halley** (Giotto, Vega) - survol
- 2004: **Comète P/Wild2** (Stardust)- collecte de grains
- 2005: **Comète Tempel 1** (Deep Impact) - impacteur
- 2010: **Comète Hartley 2** (Deep Impact -> EPOXI) - survol
- 2011: **Tempel 1** (Stardust-Next) - survol
- 2014: **P/Churyumov-Gerasimenko** (Rosetta) –
dépose module



Giotto



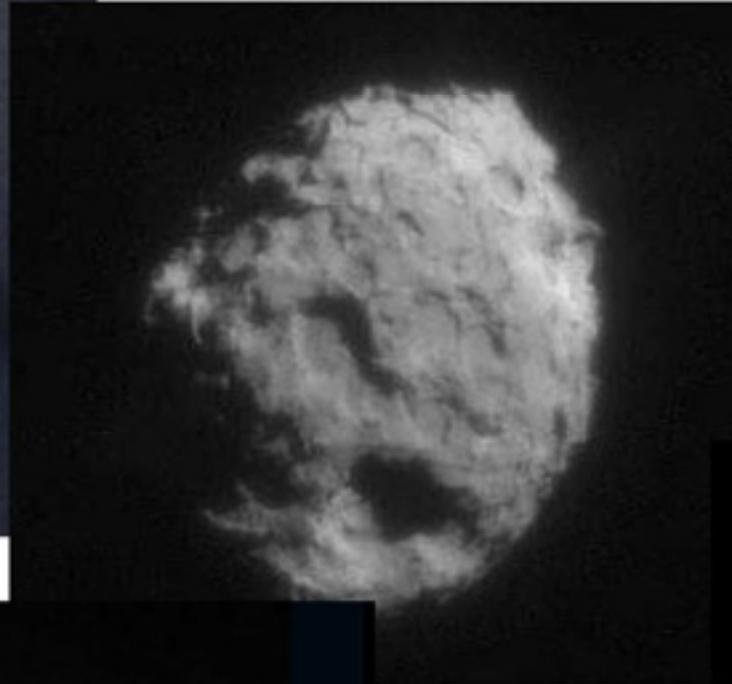
Deep Impact/Tempel 1)

P/Halley

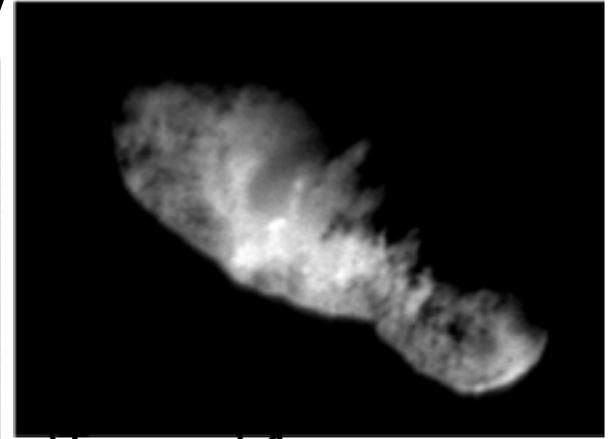


Les noyaux cométaires vus par les sondes spatiales

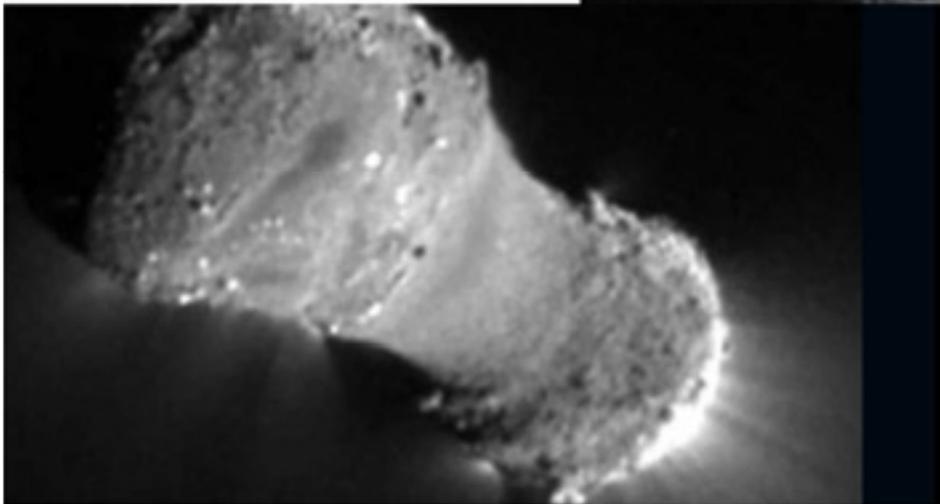
P/Wild2



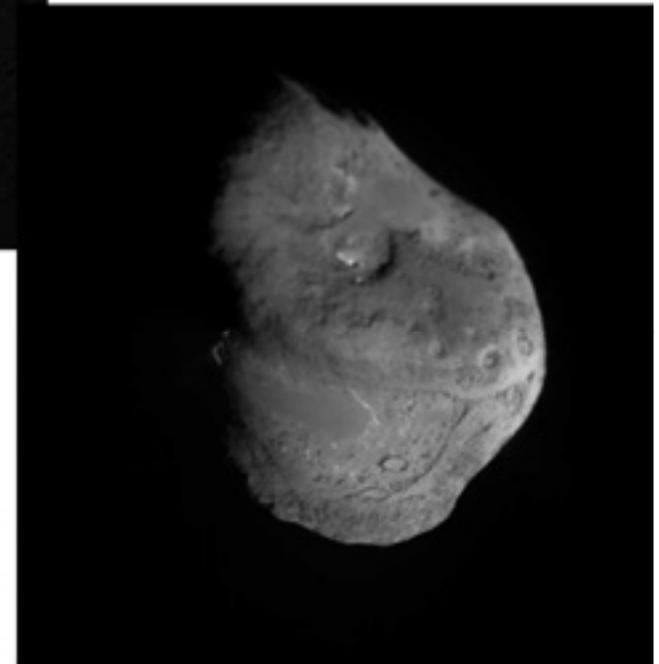
P/Borrelly



101601 / Tempel 1



P/Hartley 2

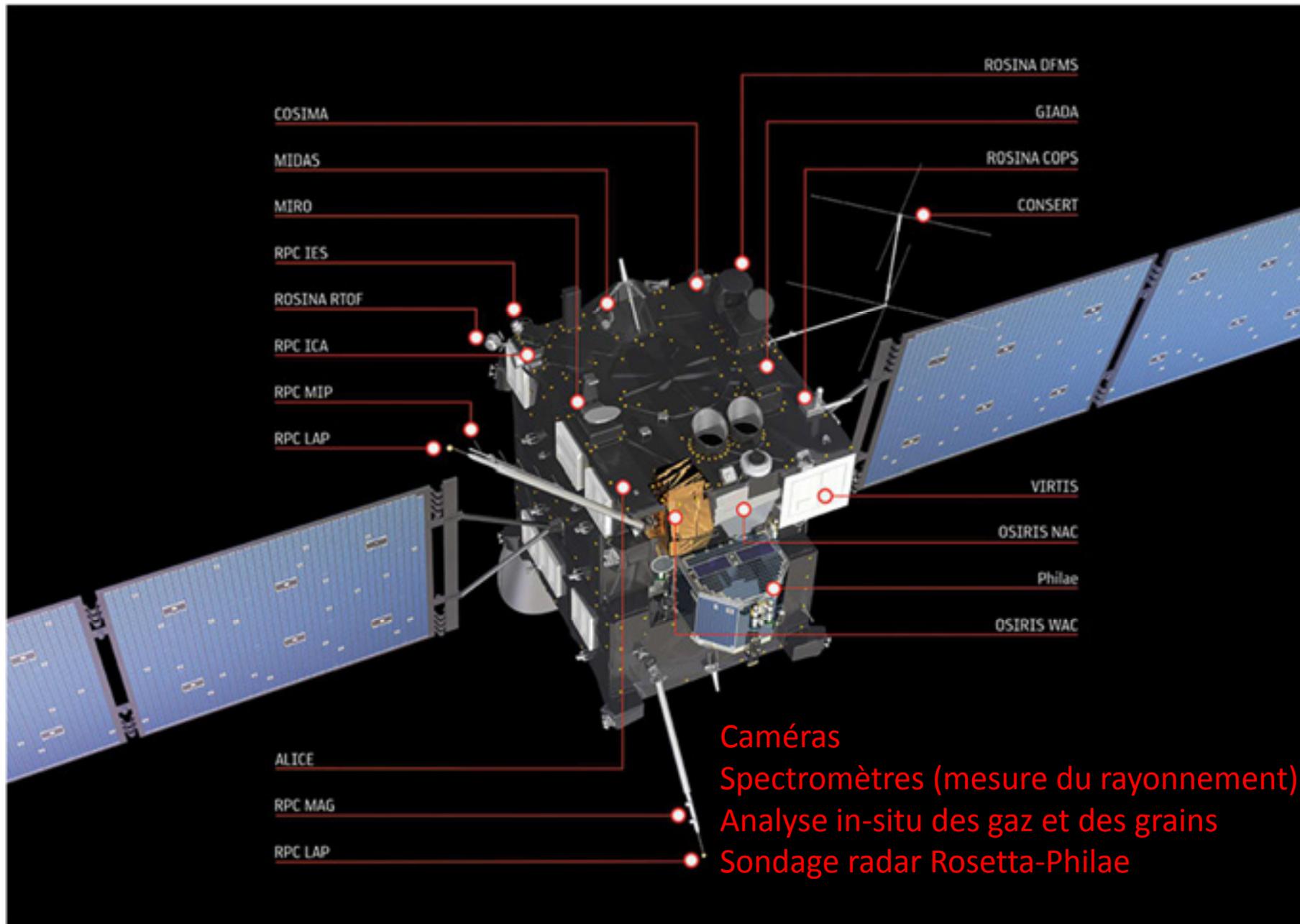


La mission Rosetta

- **Mission « Pierre Angulaire »** du programme « Horizons 2000 » de l'Agence Spatiale Européenne (1985)
- **Objectif:** Exploration in situ d'un noyau cométaire + retour d'échantillon
- **Redéfinition** en 1994: Orbiter + module de surface (Philae)
- **2003:** Lancement différé d'un an suite à l'échec d'Ariane 5G
 - Changement de cible: Wirtanen -> 67P/Churyumov-Gerasimenko (Chury)
- **Lancement** le 2 mars 2004 depuis Kourou (Guyane)

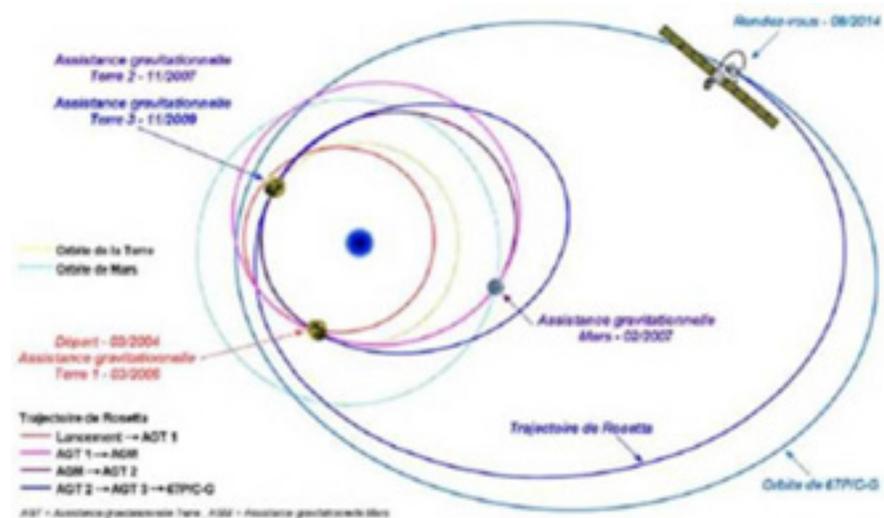


Les instruments de Rosetta



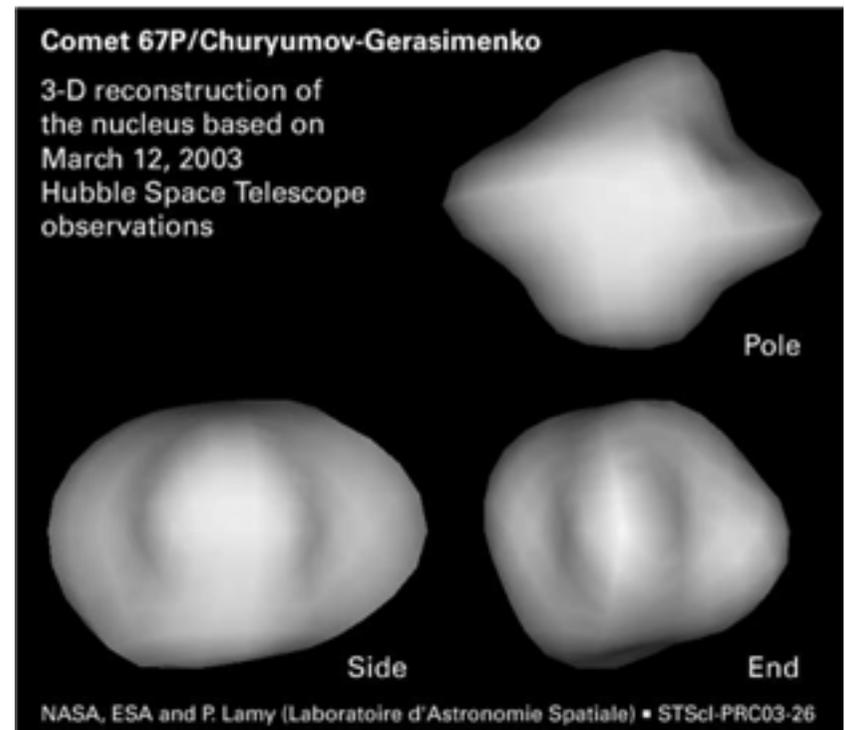
Le déroulement de la mission Rosetta

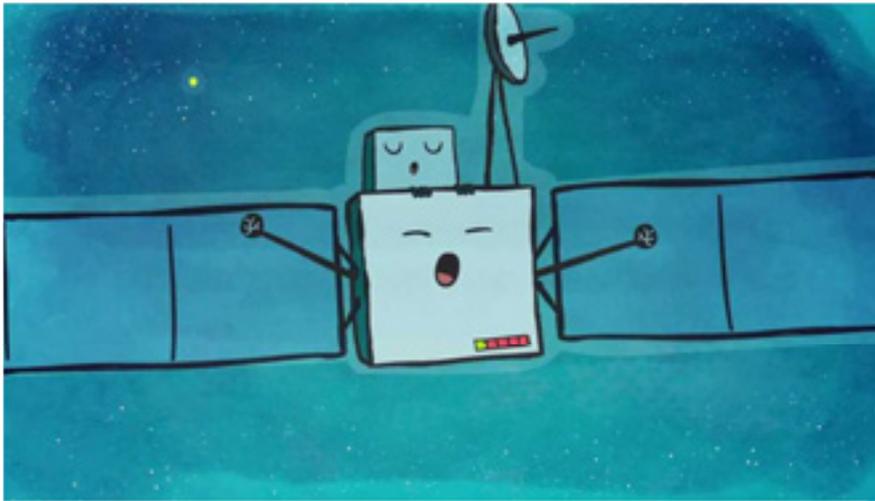
- **Lancement** le 2 mars 2004
- **Survole** de 2 astéroïdes: Steins (2008), Lutetia (2010)
- Mise en **hibernation** de 2011 au 20 janvier 2014 ($R_h > 4$ UA)
- **Approche**: Mars – 6 Août 2014
- **Descente progressive** de 100 à 10 km; choix du site (J)
- **Descente de Philae** (12 nov. 2014)
- **Suivi de la comète** par l'orbiter jusqu'au périhélie (août 2015) et au-delà (printemps 2016)



Que sait-on de Chury lors du réveil de la sonde?

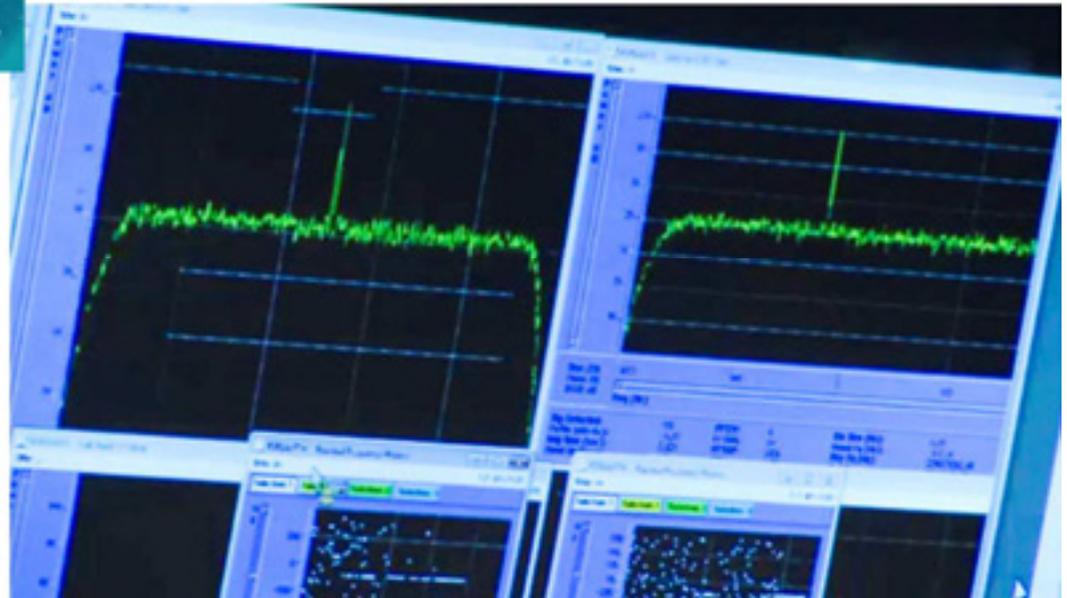
- Comète découverte en **1969**
- Provient de la **ceinture de Kuiper**
- Période 6,5 ans
- Aphélie: 5,7 UA
- Périhélie: 1,3 UA
- Diamètre moyen: 4 km (images Hubble 2003)
- Comète **peu active**: bonne cible pour la sonde Rosetta





Le réveil de la sonde Rosetta 20 janvier 2014, 17:15

- Distance au Soleil:** 4,5 UA
- Distance à la comète:** 9 millions de km (0,06 UA)
- Horloge interne
- Réchauffement des instruments de navigation
- Orientation des panneaux solaires
- Positionnement de l'antenne vers la Terre

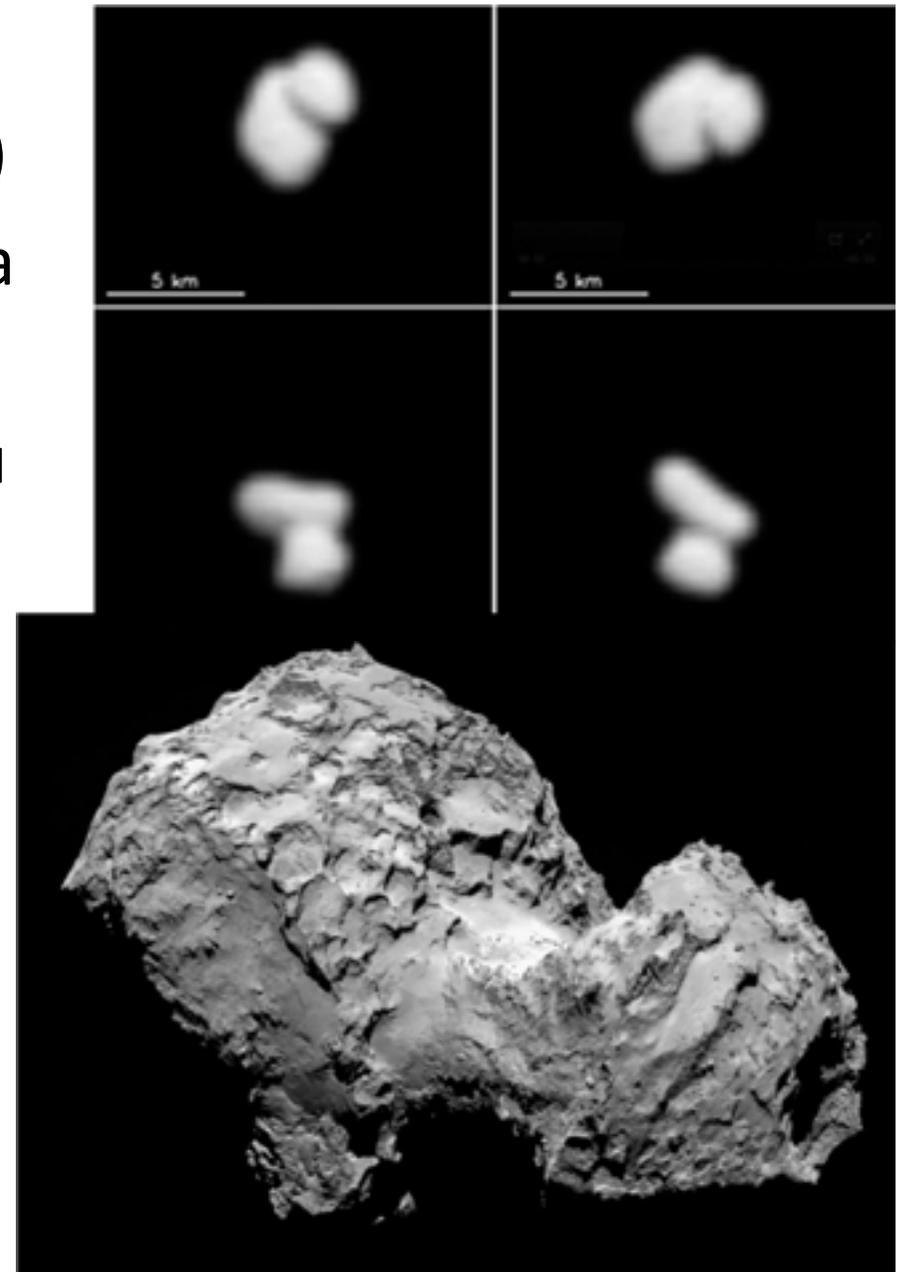


Réception du premier signal avec 45 minutes de retard!

Étapes suivantes: Réveil de Philae (28 mars 2014) puis de tous les instruments (avril – mai 2014)

Les premières images de Chury par Rosetta

- **Avril:** Premières images de la comète avec dégazage (à 4 UA)
- **27 juin:** Premières images de la rotation (D= 86000km)
- **11 juillet:** Premières images du noyau double
- **6 août:** Manoeuvre à 100 km; images du terrain très accidenté
- **10 septembre:** Orbite à 30 km
- **15 octobre:** Orbite à 10 km et cartographie



10 septembre – D = 30 km (NAVCAM)



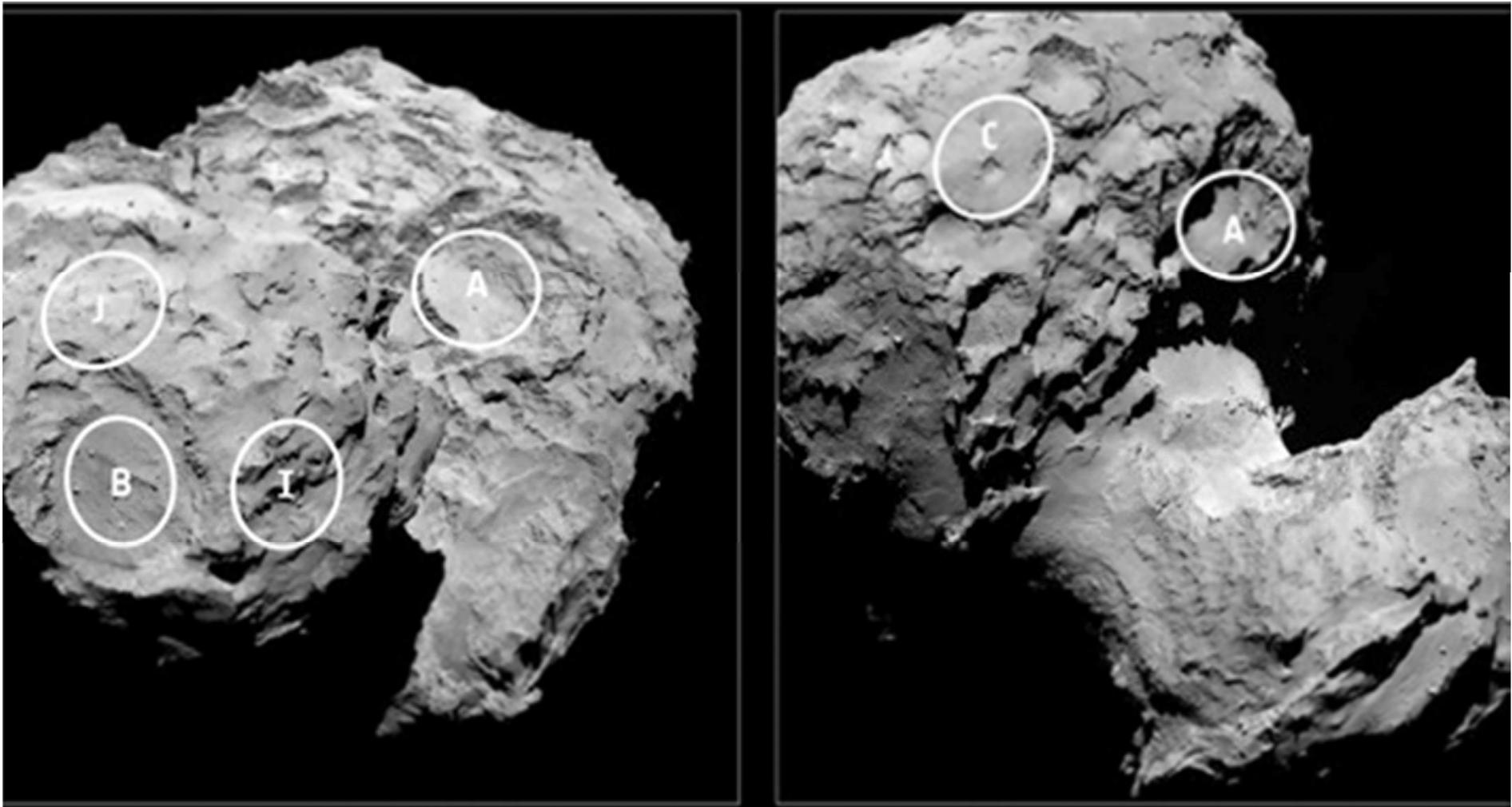
Le noyau (Octobre 2014):
La région centrale (col) est la plus active



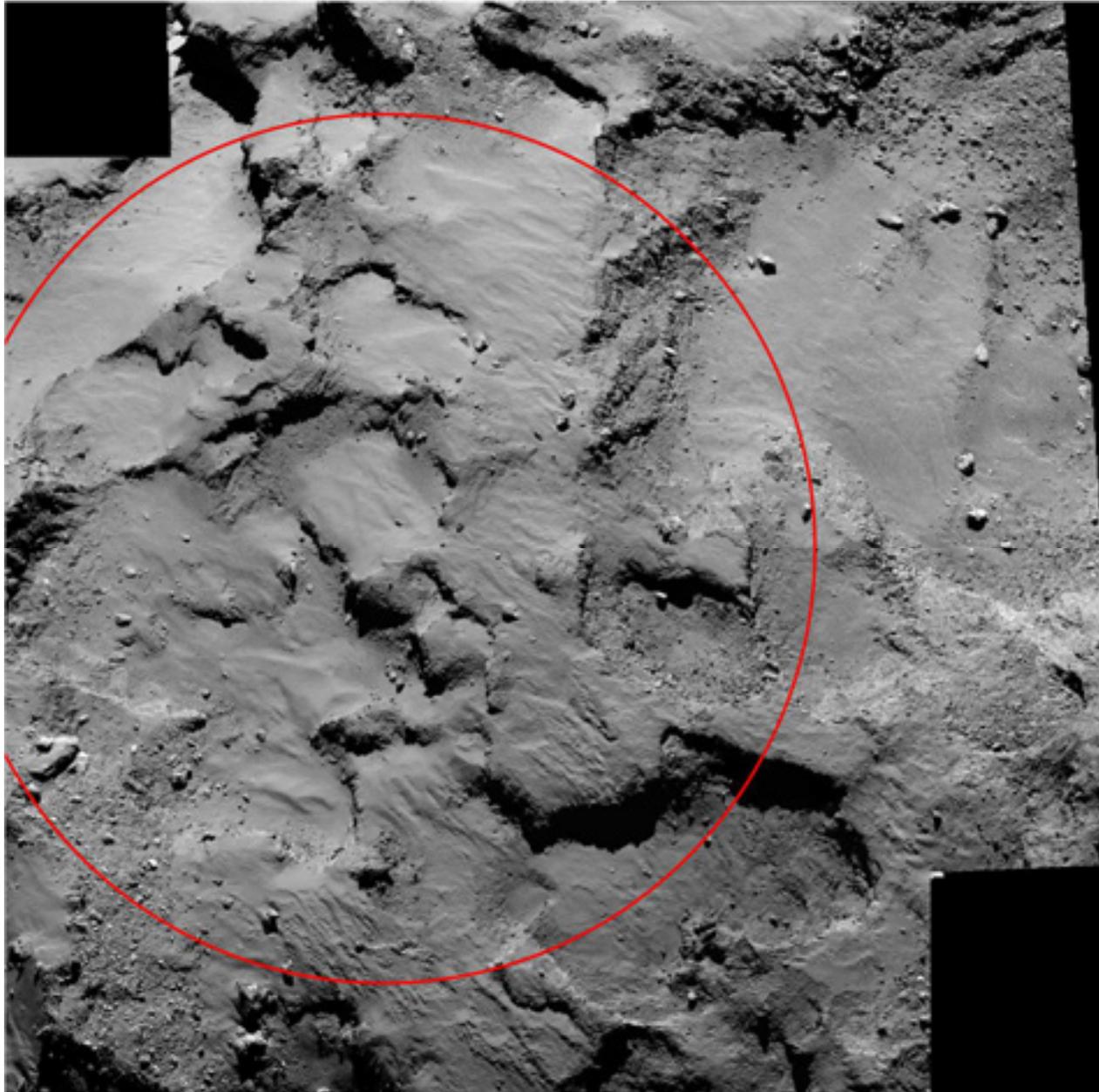
La recherche des sites possibles d'atterrissage

Début septembre: 5 sites (A, B, C, I, J)

15 septembre: Choix du site final (J)



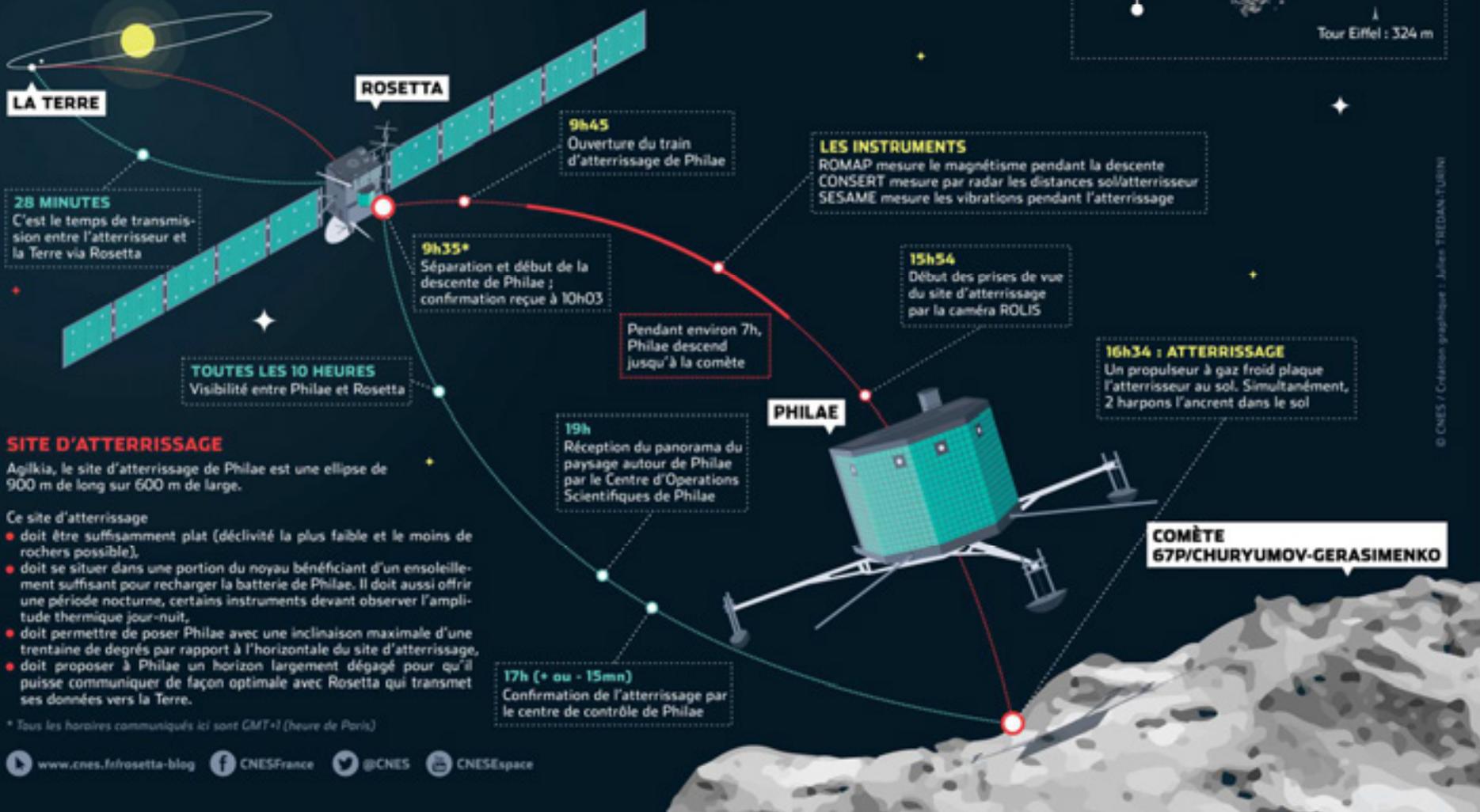
Le site J (Agilkia)



LA DESCENTE DE PHILAE VERS LA COMÈTE

12 novembre 2014

La morphologie de 67P/Churyumov-Gerasimenko



LA TERRE

28 MINUTES
C'est le temps de transmission entre l'atterrisseur et la Terre via Rosetta

TOUTES LES 10 HEURES
Visibilité entre Philae et Rosetta

SITE D'ATERRISSAGE

Agilkia, le site d'atterrissage de Philae est une ellipse de 900 m de long sur 600 m de large.

- Ce site d'atterrissage
- doit être suffisamment plat (déclivité la plus faible et le moins de rochers possible),
 - doit se situer dans une portion du noyau bénéficiant d'un ensoleillement suffisant pour recharger la batterie de Philae. Il doit aussi offrir une période nocturne, certains instruments devant observer l'amplitude thermique jour-nuit,
 - doit permettre de poser Philae avec une inclinaison maximale d'une trentaine de degrés par rapport à l'horizontale du site d'atterrissage,
 - doit proposer à Philae un horizon largement dégagé pour qu'il puisse communiquer de façon optimale avec Rosetta qui transmet ses données vers la Terre.

* Tous les horaires communiqués ici sont GMT+1 (heure de Paris)

ROSETTA

9h45
Ouverture du train d'atterrissage de Philae

9h35*
Séparation et début de la descente de Philae ; confirmation reçue à 10h03

Pendant environ 7h, Philae descend jusqu'à la comète

LES INSTRUMENTS
ROMAP mesure le magnétisme pendant la descente
CONCERT mesure par radar les distances sol/atterrisseur
SESAME mesure les vibrations pendant l'atterrissage

15h54
Début des prises de vue du site d'atterrissage par la caméra ROLIS

16h34 : ATERRISSAGE
Un propulseur à gaz froid plaque l'atterrisseur au sol. Simultanément, 2 harpons l'ancrent dans le sol

PHILAE

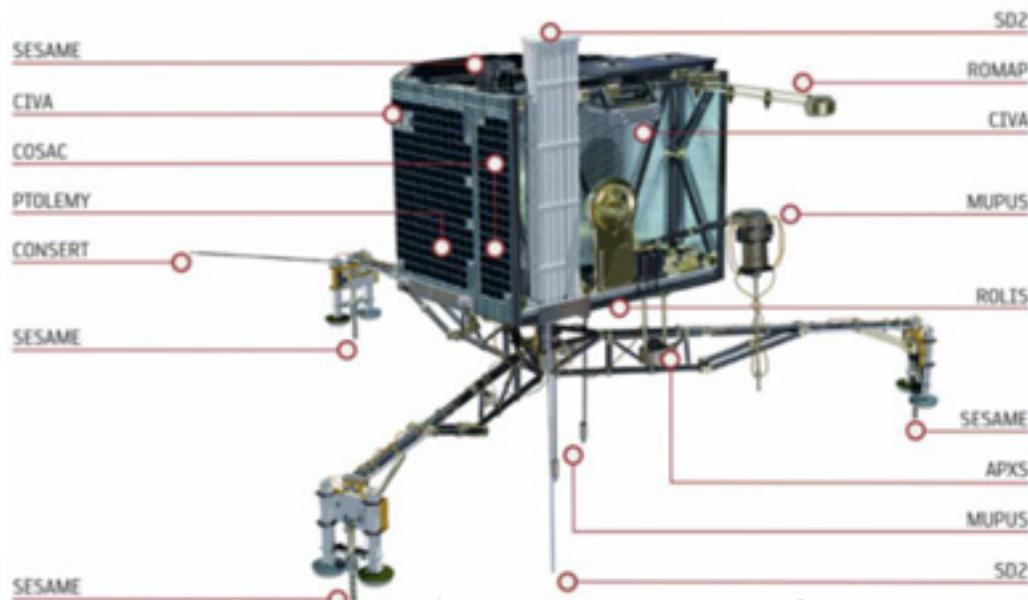
19h
Réception du panorama du paysage autour de Philae par le Centre d'Opérations Scientifiques de Philae

17h (+ ou - 15mn)
Confirmation de l'atterrissage par le centre de contrôle de Philae

**COMÈTE
67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO**

La première séquence d'observation de Philae

(scénario initial)



Temps de transfert des données:

25 minutes

Temps d'autonomie de la pile de bord:

2,5 jours

Recharge des batteries (schéma nominal: 1 semaine pour 1 jour d'utilisation)

Fin attendue de Philae: janv-mars 2015

Stabilisation:

- Maintien au sol par un système de propulsion
- Amortisseur
- Lancement des 2 harpons
- Maintien des trois pieds par vis

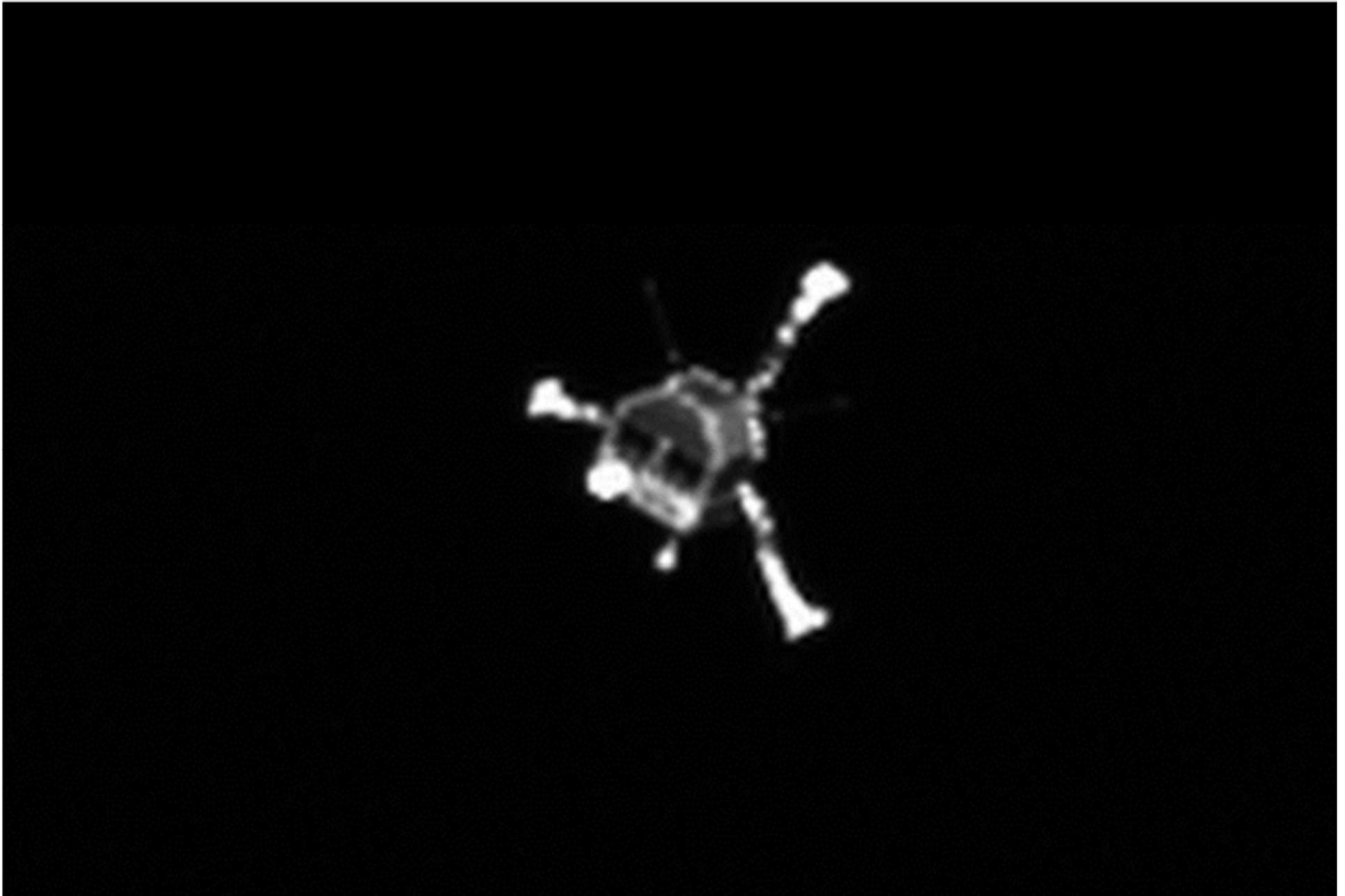
Panorama circulaire par les 6 caméras de CIVA

Activation de la foreuse

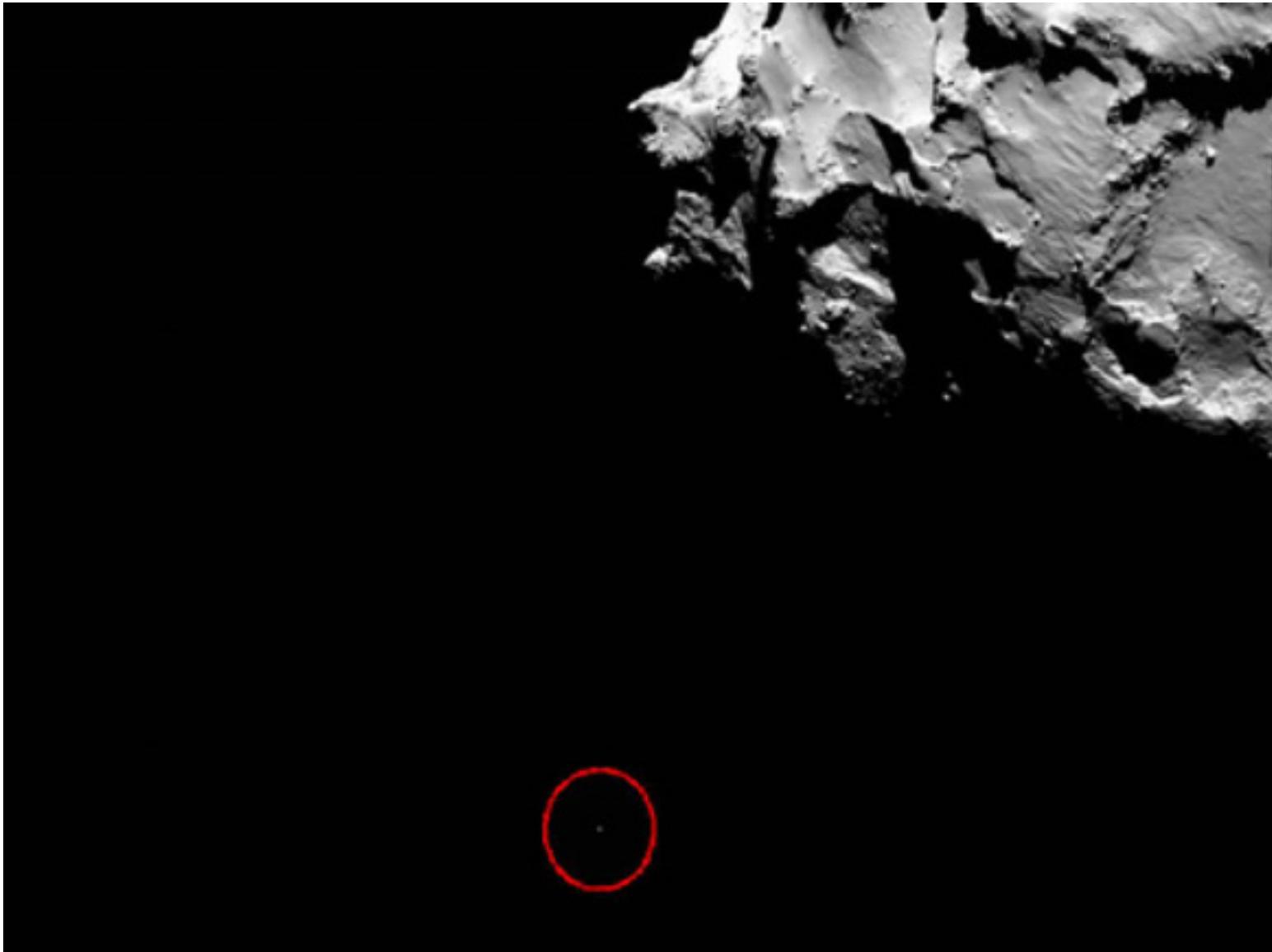
Prélèvement d'un échantillon

Analyse par les spectromètres de masse (COSAC, PTOLEMY)

Philae quittant la sonde après le largage (image OSIRIS)



Philae lors de sa descente, à 3 km du noyau
(image OSIRIS)



Première image prise par la caméra ROLIS
de la sonde PHILAE (altitude: 3 km)

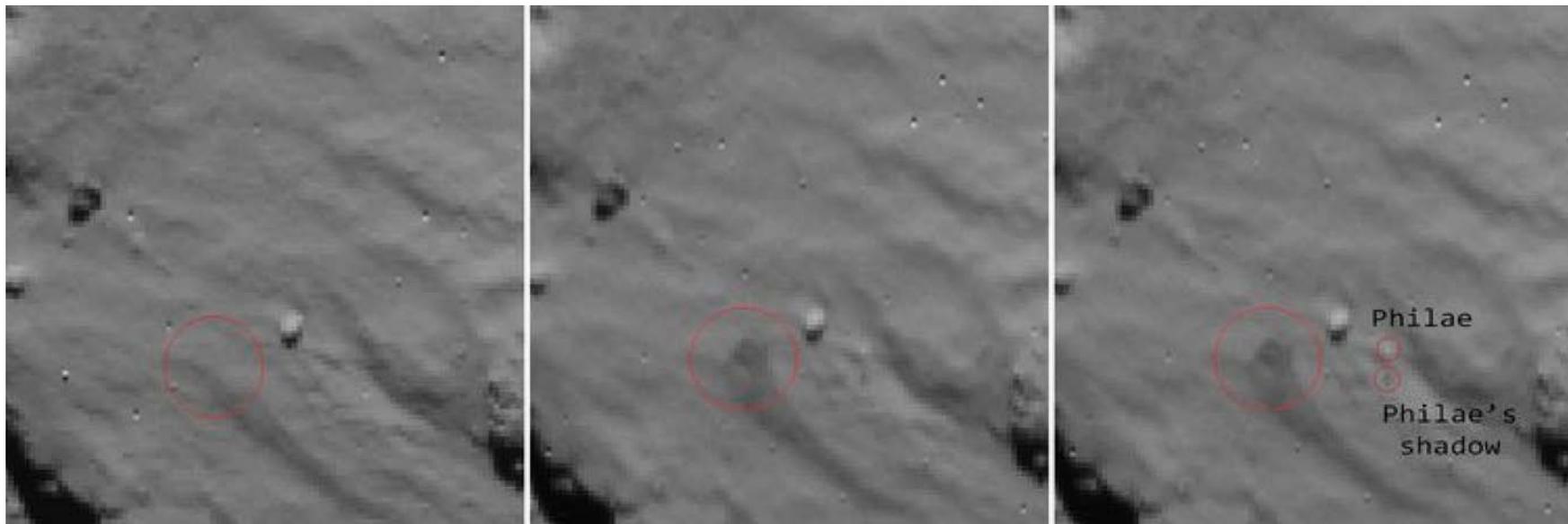


Deuxième image prise par la caméra ROLIS
de la sonde PHILAE (altitude: 40 m)



La vraie séquence de descente de Philae (images Rosetta – NAVCAM)

- Première image (4 minutes avant 1^{er} rebond): 15:30 (TU)
- Deuxième image (1 minute après 1^{er} rebond): 15:35
- Second rebond: 17:25
- Atterrissage final: 17:32 (à > 2 km du site J)



Images fournies par l'Agence spatiale européenne du rebond de Philae sur la comète «Tchouri». (Photo AFP)

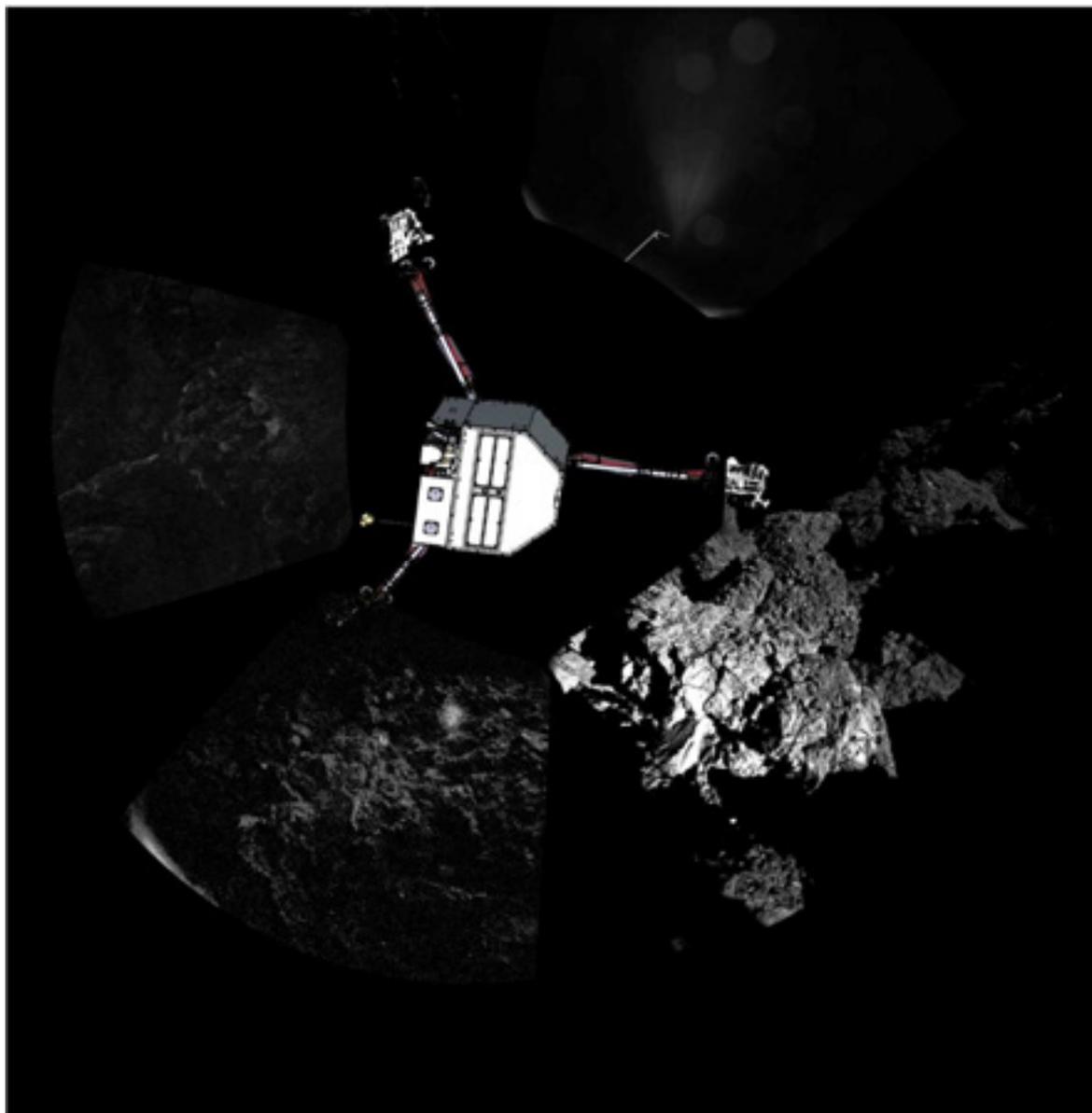
4 min. avant rebond

1 min. après rebond

Première image prise par la caméra CIVA
de la sonde PHILAE juste après l'atterrissage final



Premier panorama pris par la caméra CIVA
de la sonde PHILAE (13 novembre)



Les découvertes de Rosetta: Le noyau (1)

- **Une double comète!**

- Une origine plausible: **collision de deux fragments (peut-être d'une même origine)?**

- > Expliquerait la nature très friable du sol (porosité: 70%)

- > Expliquerait l'aspect moins chaotique du col (accumulation de neige/glace -> région plus active)

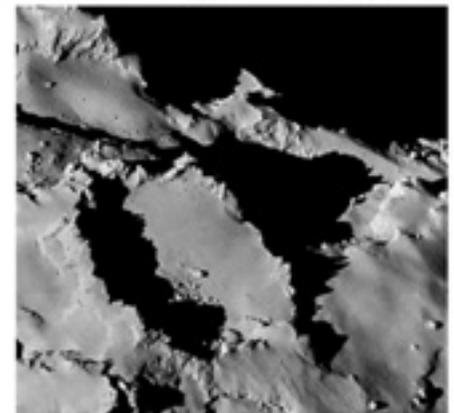
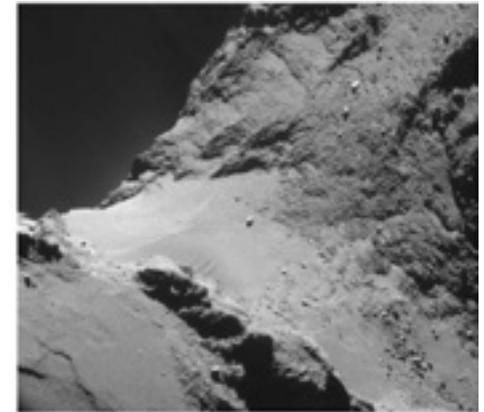
- > Expliquerait la composition très uniforme de la surface

- **Une surface extrêmement tourmentée:**

- falaises abruptes, ravins, cratères

- Éboulis, gravats, blocs de toutes tailles

- > **Les processus de surface sont beaucoup plus importants qu'on ne l'imaginait**



Les découvertes de Rosetta: Le noyau (2)

-**Première émission de gaz** plus tôt que prévu (15 mai), disparaît ensuite (H₂O? CO₂? CO?)

-A partir d'août: Une **activité inhomogène**, concentrée au niveau du col (H₂O)

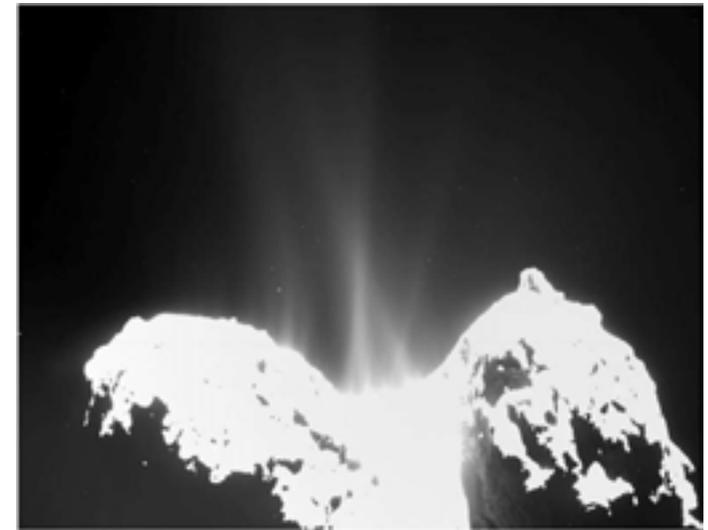
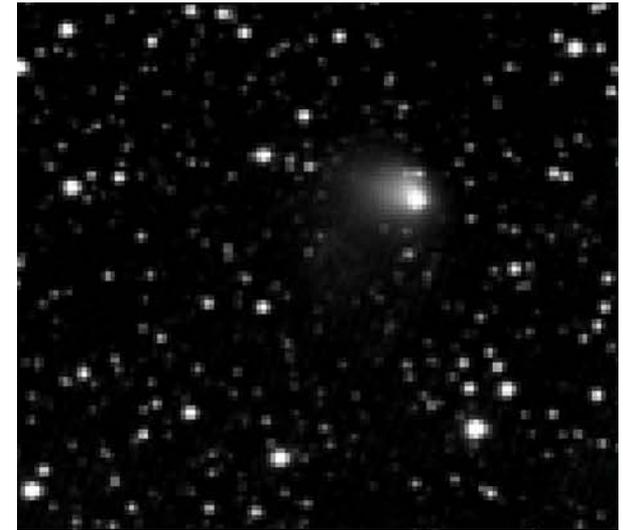
-Deux molécules majoritaires: H₂O, CO₂

-**Température du noyau**

- réaction très rapide au rayonnement solaire (faible inertie thermique)

- la température décroît depuis la surface vers l'intérieur

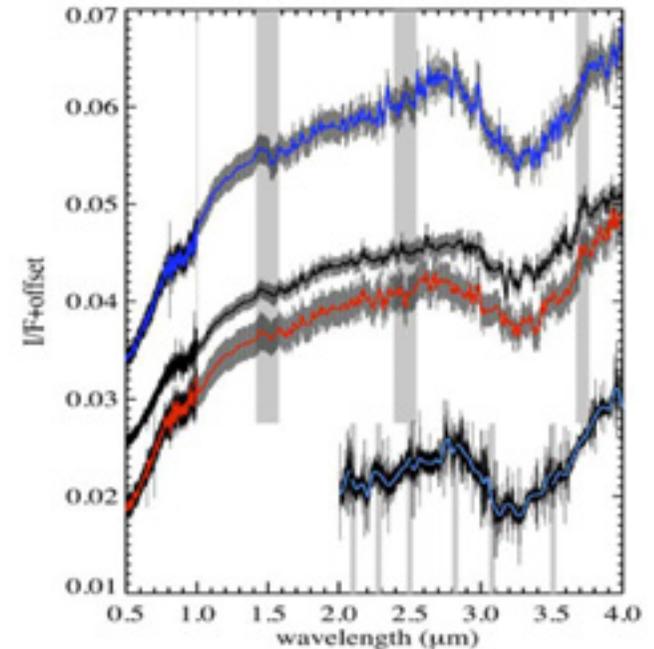
-**Forte porosité** (environ 75%) -> matériau très friable et peu dense en surface



Les découvertes de Rosetta: Le noyau (3)

Détection de molécules organiques complexes à la surface de Chury

- Détection d'une signature infrarouge sur toute la surface (ROSETTA):
 - > Composés organiques complexes (chaînes carbonées + cycles benzéniques)
- Analyse in-situ (PHILAE):
 - Matériau organique complexe réfractaire à la surface
 - Nouveaux composés organiques (à l'origine des acides aminés et des bases de l'ADN): methyl isocyanate, acetone, propionaldehyde, acetamide (Goesmann et al. 2015; Wright et al. 2015)



VIRTIS, Capaccioni et al. 2015

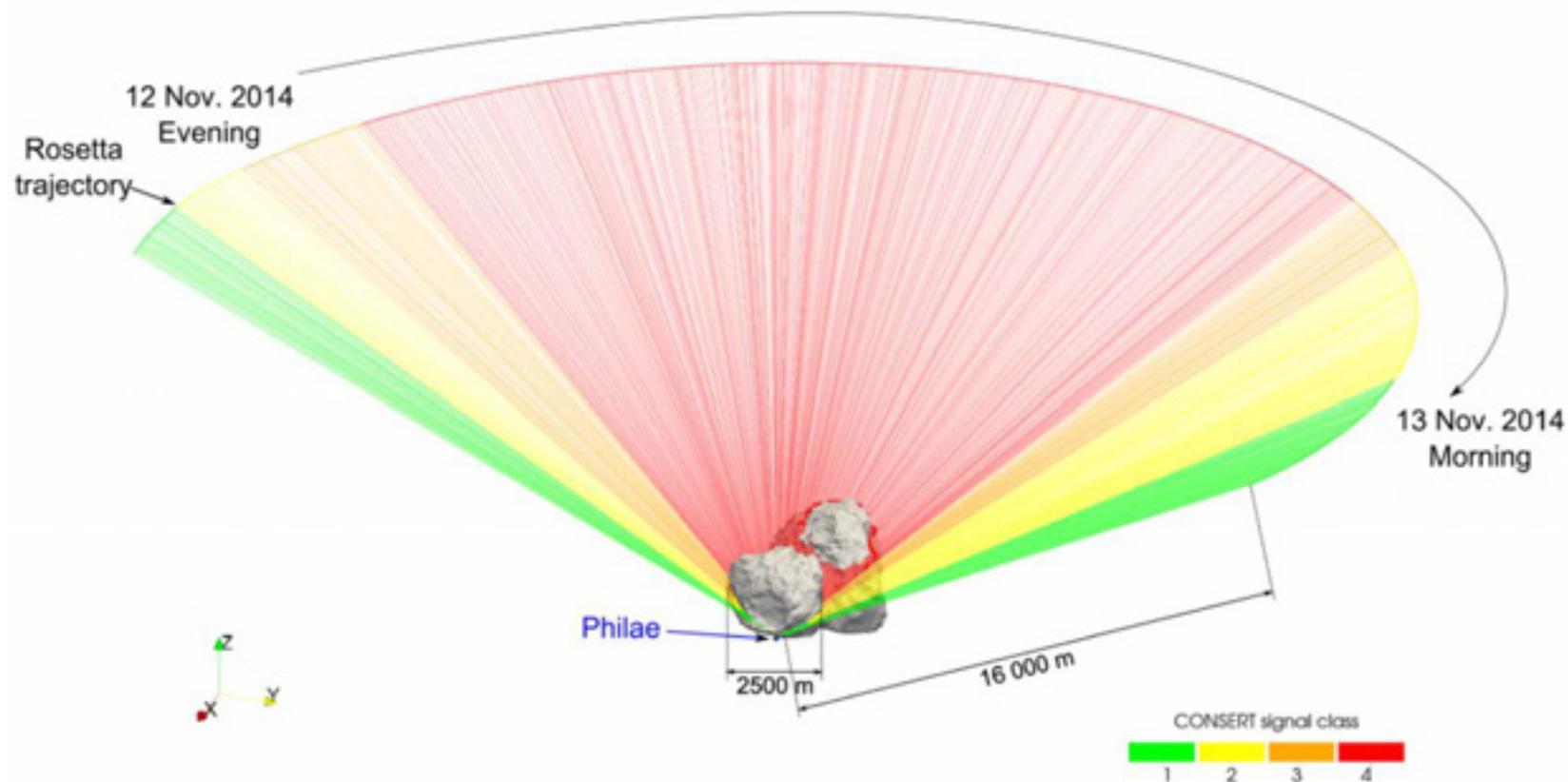


Les découvertes de Rosetta: Le noyau (4)

L'expérience CONSERT (radar entre Rosetta et Philae)

-> Sondage de la structure interne du noyau

Résultat: Près de la surface, le matériau cométaire est très homogène sur qq dizaines de mètres) et très poreux (porosité: 75-85%)



Les comètes et l'origine de l'eau terrestre

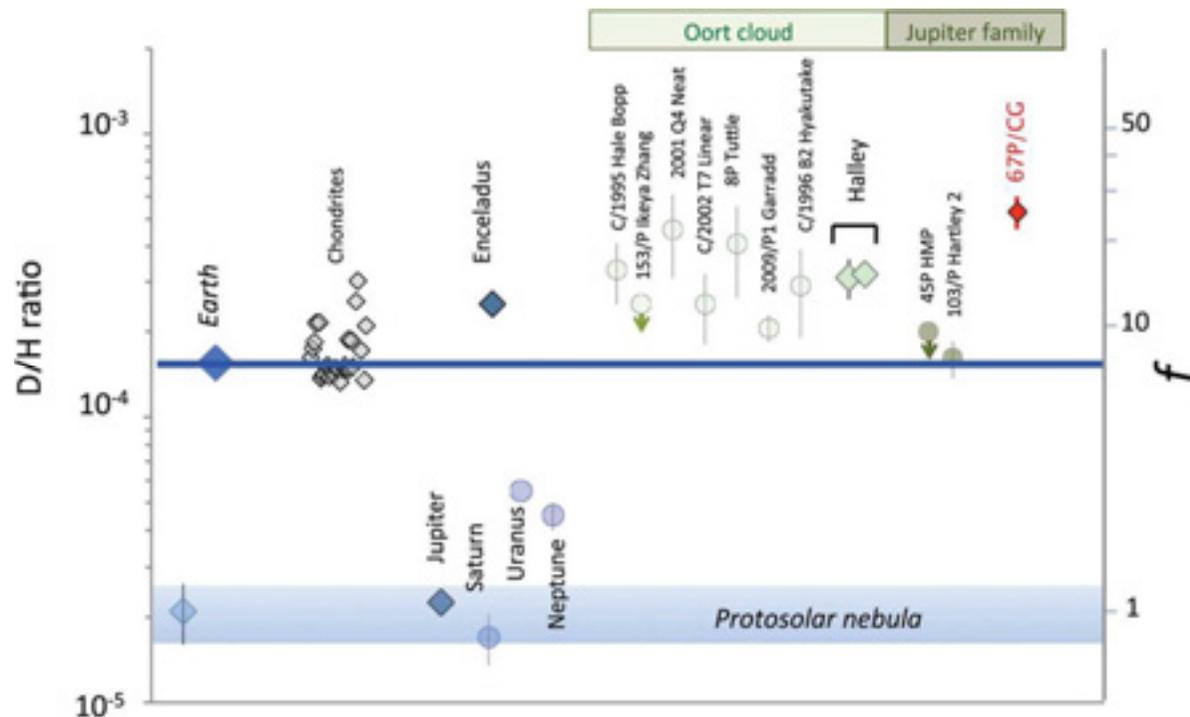
Comment déterminer l'origine des océans terrestres?

- Deutérium (D) = Atome d'hydrogène + 1 proton
- Mesure simultanée de HDO (eau lourde) et H₂O -> **D/H**
- D/H dans les glaces augmente avec Rh (T décroît avec Rh); D/H(Oort)=2 x Terre
- -> On attend D/H (Chury) > D/H (Oort)

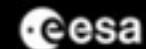
Résultat: Le rapport D/H dans Chury est 3,4 fois la valeur terrestre

-> Les comètes de Kuiper ont des D/H variés

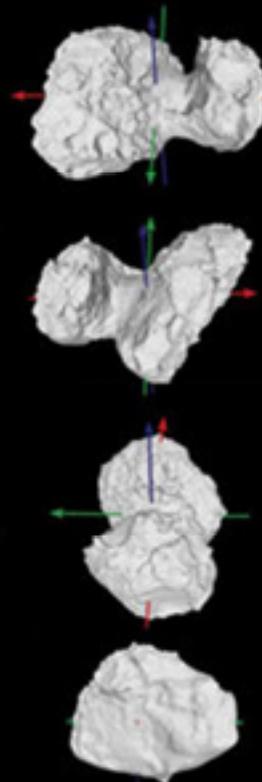
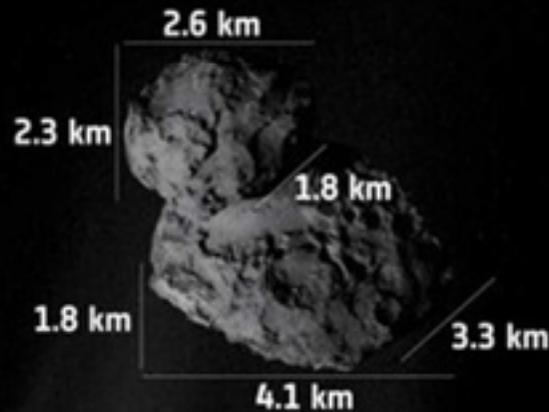
-> L'eau des océans terrestres ne provient pas uniquement des comètes de Kuiper, mais l'essentiel provient de l'extérieur du Système solaire



→ COMET 67P/CHURYUMOV–GERASIMENKO'S VITAL STATISTICS



21.4 km³
Volume
1.0 × 10¹³ kg
Mass
470 kg/m³
Density
70–80%
Porosity



Rotation period
12.4043 hours

Spin axis:
69.3°
Right Ascension

64.1°
Declination

52°
Obliquity of the comet's rotational axis

X, Y Equatorial axes
Z Spin axis

4
Dust/gas ratio

5.3 × 10⁻⁴
D/H ratio

Average water vapour production

300 ml/s → June 2014

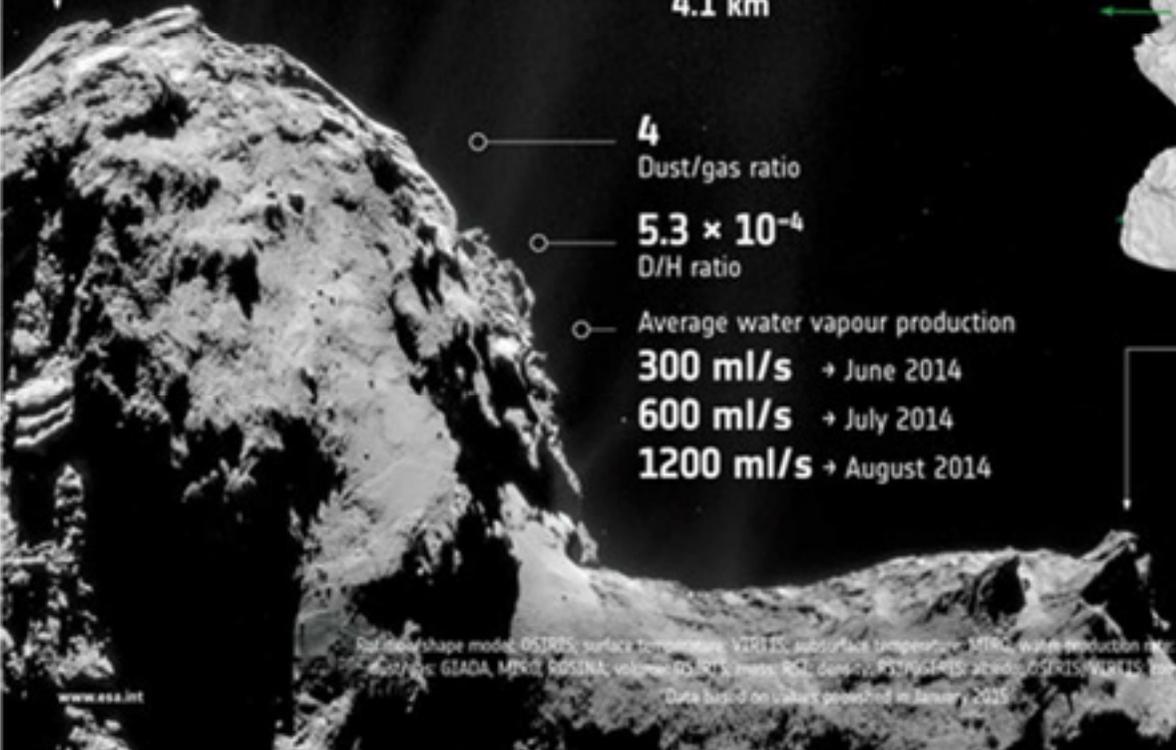
600 ml/s → July 2014

1200 ml/s → August 2014

-93°C to -43°C
Surface temperature

-243°C to -113°C
Subsurface temperature

6%
Average albedo



3D model shape model: OSIRIS; surface temperature: VIRIIS; subsurface temperature: VIRIIS; water production rate: MIRO; D/H: ROSINA; Dust/gas: GIADA; MPO: ROSINA; volume: OSIRIS; mass: ROL; density: OSIRIS/MIRO; albedo: OSIRIS; VIRIIS; comet images: NavCam

Data last 3 on subject processed in January 2025

Le réveil de Philae

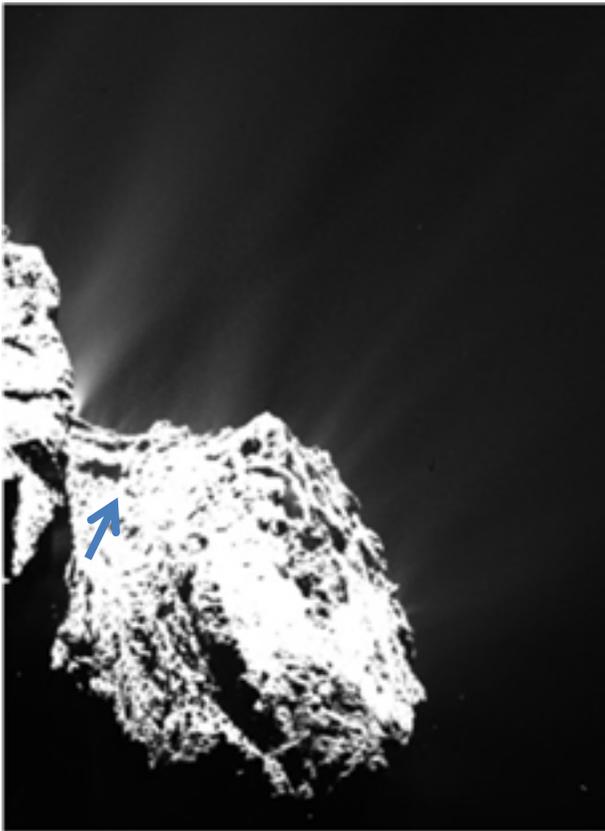
- 13 juin 2015: Premiers signaux reçus!



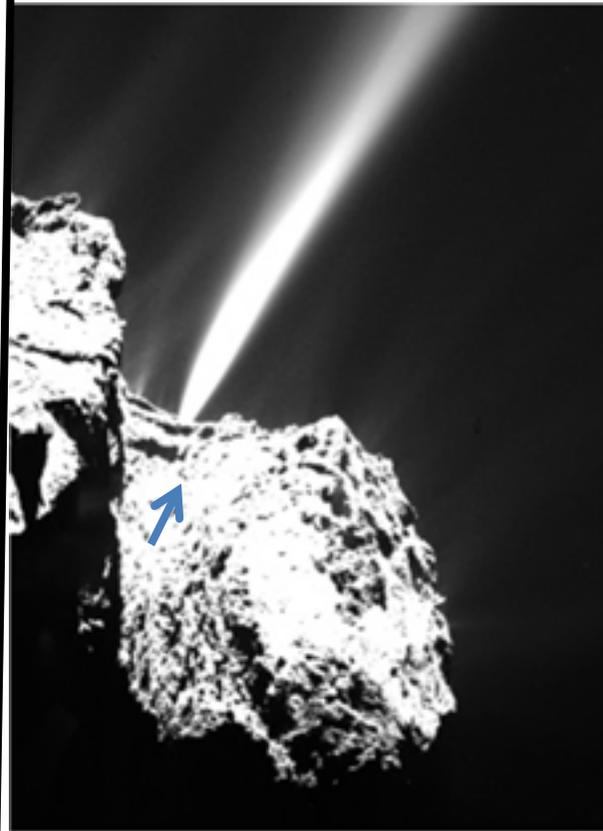
- Nouvelles émissions dans les semaines suivantes, mais problème de transmission (panne d'un émetteur de Philae?)
- Plus de contact depuis le 9 juillet (déplacement possible de Philae?)
- Reprise des essais attendus après le passage près du Soleil (Septembre 2015)

Activité près du Soleil: Ejection d'une poche de gaz, 29 Juillet 2015

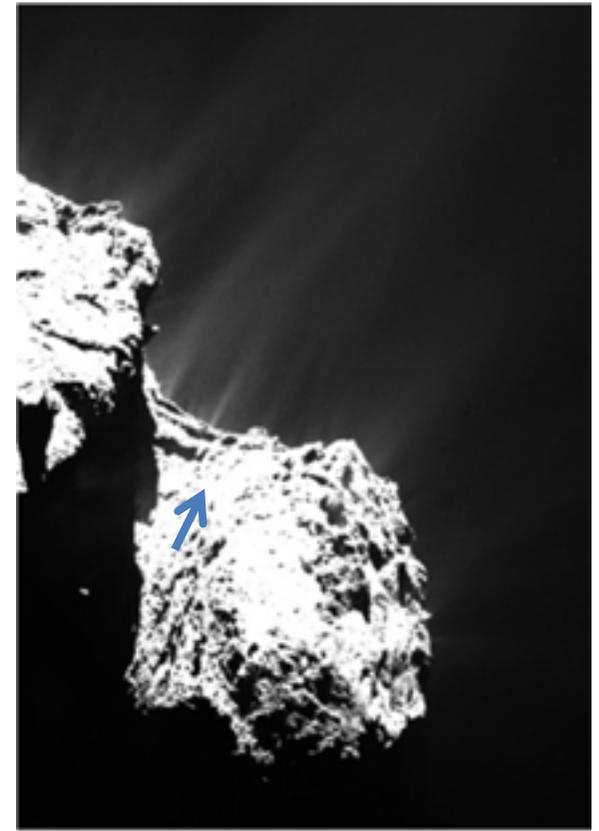
13:06:10



13:24:10



13:42:10



Le bilan...

- **Une nouvelle étape dans la compréhension des origines du système solaire**
 - Une meilleure compréhension de l'origine de l'eau et de la vie sur la Terre
 - Des analyses qui vont durer des dizaines d'années...
- **Un succès technologique exceptionnel**
 - La dépose d'un robot sur un objet de 5 km à une distance de plus de 500 millions de kilomètres!
- **Une aventure humaine extraordinaire**
 - Une collaboration européenne sans précédent
 - Beaucoup de défis, de surprises et d'émotions fortes...
 - Un exemple pour les générations à venir!