

SYSTÈME SOLAIRE

FORMATION DES PLANÈTES

Astronomie- Club Randonneurs des étoiles

Alain LIGAIRE – rév. 2 / 2025

SOMMAIRE

- Formation des planètes du système solaire

Nébuleuse primitive



Protoétoile & Disque protoplanétaire



Planètes

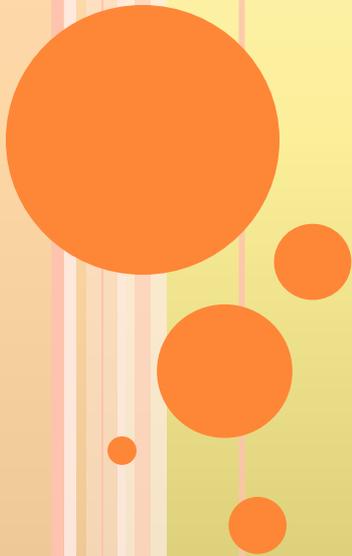
- géantes gazeuses
- telluriques
- Atmosphères des planètes
 - Formation – Maintien
 - Vitesse de libération des gaz
- Complément : Scénario Modèle de Nice
- Illustration de l'exploration du système planétaire par des sondes spatiales :
 - 'New Horizons' : Pluton et la ceinture de Kuiper



‘ MODÈLE DE LA NÉBULEUSE SOLAIRE ‘

LES GRANDES LIGNES

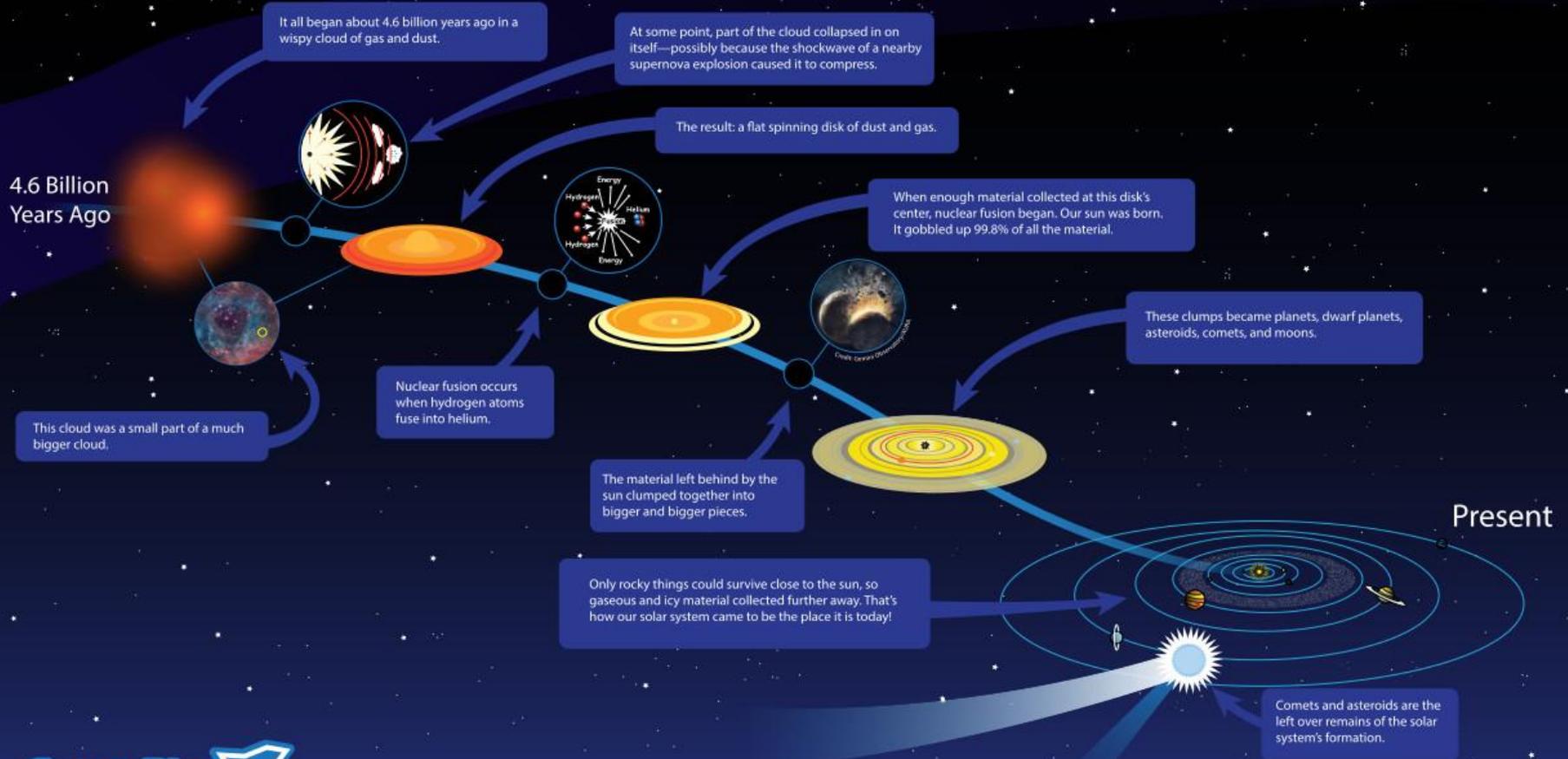
Une histoire qui a démarré il y 4,6 milliards d’années



ETAPES DE LA FORMATION DU SYSTÈME PLANÉTAIRE

How did our solar system come to be?

National Aeronautics and
Space Administration



Timing formation système planétaire cf ' a timeline for planet formation - spacemath.gsfc.nasa.gov 2015 '

Ère	Temps (années)	Description
Ère Nébuleuse pré-solaire	0	Effondrement nuage moléculaire pour former un disque
Ère Astéroïde	3 millions	Formation de grands astéroïdes jusqu'à 200 km de long
Ère Géante gazeuse	10 millions	Formation rapide et complète de Jupiter et Saturne
Ère naissance Soleil	50 millions	Les réactions thermonucléaires démarrent au cœur du Soleil
Ère planétésimaux	51 millions	Formation de nombreux corps taille petite planète
Ère T-Tauri	80 millions	Les vents solaires arasent les atmosphères primitives du système interne
Ère Géante glacée	90 millions	Formation d'Uranus et de Neptune
Ère planète tellurique	100 millions	Formation des planètes telluriques par accrétion des 50-100 petits corps
Ère Grand Bombardement Tardif	600 millions	La migration de Jupiter perturbe la ceinture d'astéroïdes envoyant nombre d'entre eux impacter les planètes internes
Ère Océan	600 millions	Le GBT transportent des comètes riches en eau sur Terre pour former des océans
Ère Vie	800 millions	Premières traces de vie trouvées sur des fossiles sur Terre

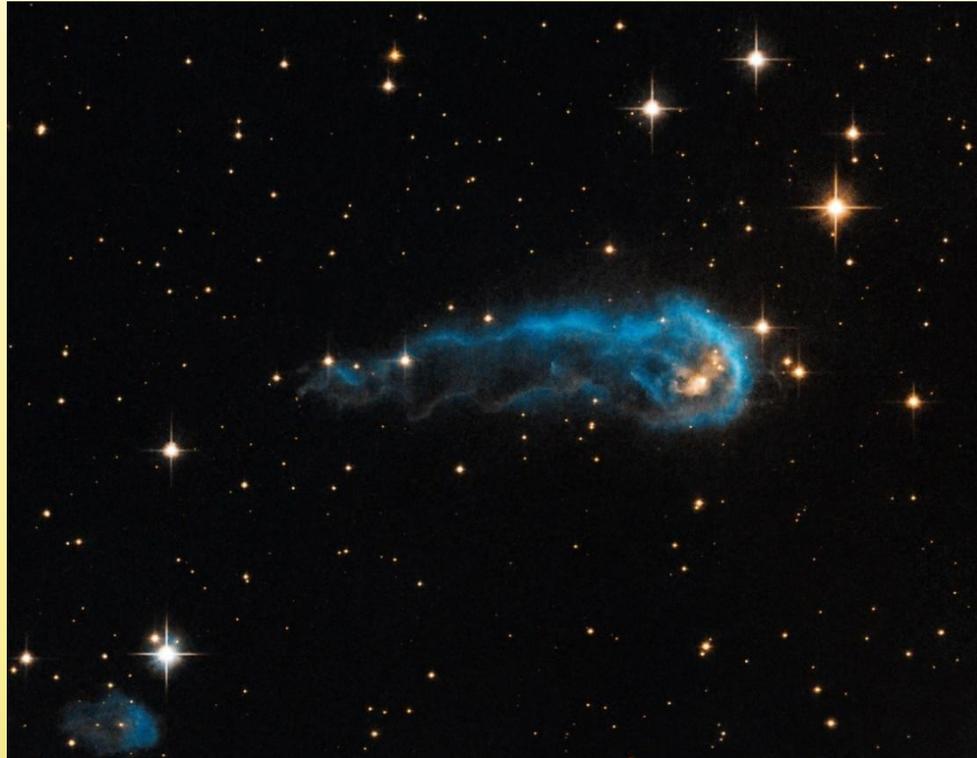


LA NÉBULEUSE PRIMITIVE IL Y A 4,6 MILLIARDS D'ANNÉE

Le système solaire est né au sein d'une nébuleuse interstellaire (*) : comprenant essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium mais aussi qq % d'éléments lourds (carbone, azote, oxygène, métaux, ..) issus de supernovae antérieures .

Dimension de la nébuleuse pré-solaire :
7000 à 20 000 UA

(rappel distance Soleil Pluton 40 ua)

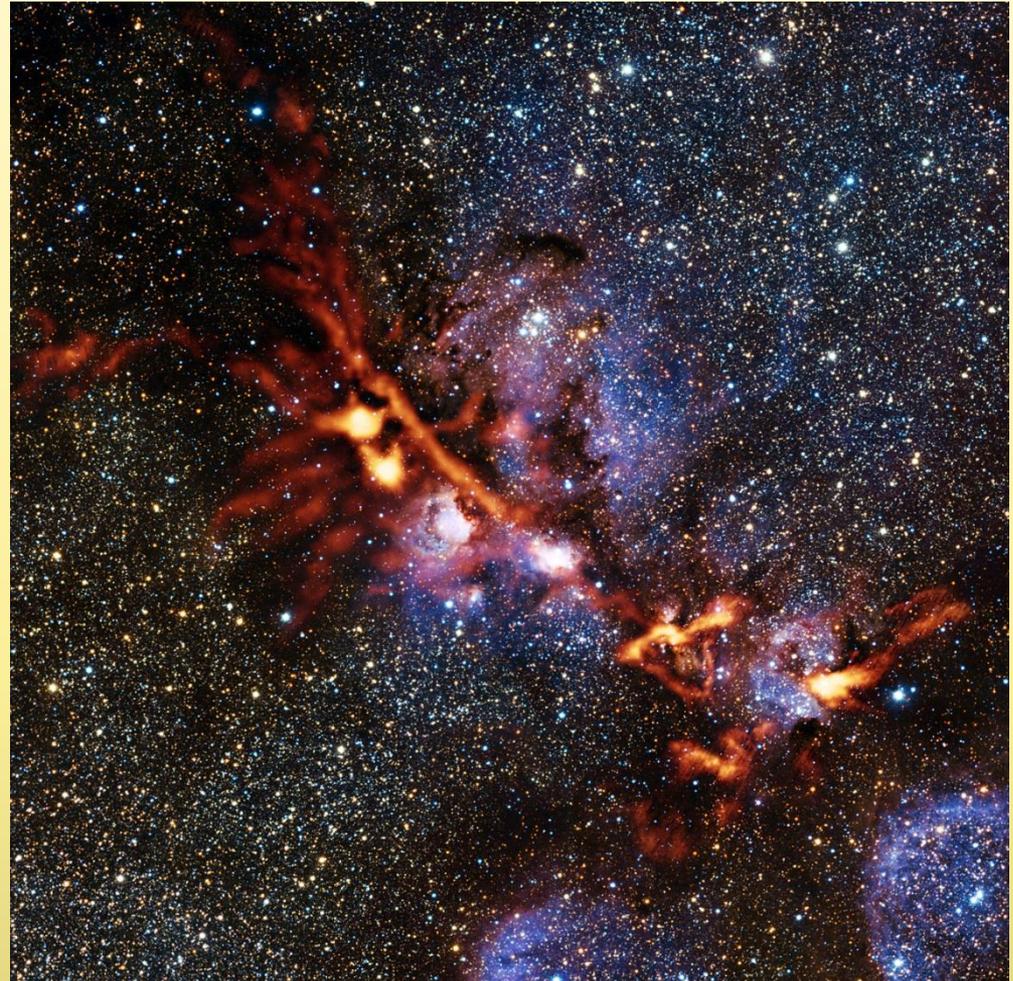


Exemple de Protoétoile dans une étape primaire de formation : The cosmic caterpillar, " IRAS 20324+4057", elle est encore dans le process de collecter la matière d'une enveloppe de gaz qui l'entoure.
Longueur : 1 année lumière . Photo août 2013 Hubble

(*) appelée aussi nuage moléculaire

NÉBULEUSE PRIMITIVE

Dans les zones de densité plus forte, les force de gravité s'intensifient, les molécules de la nébuleuse s'attirent les uns les autres et se concentrent. La pression augmente provoquant une hausse de la température. Ce phénomène se poursuit en **effondrement gravitationnel**

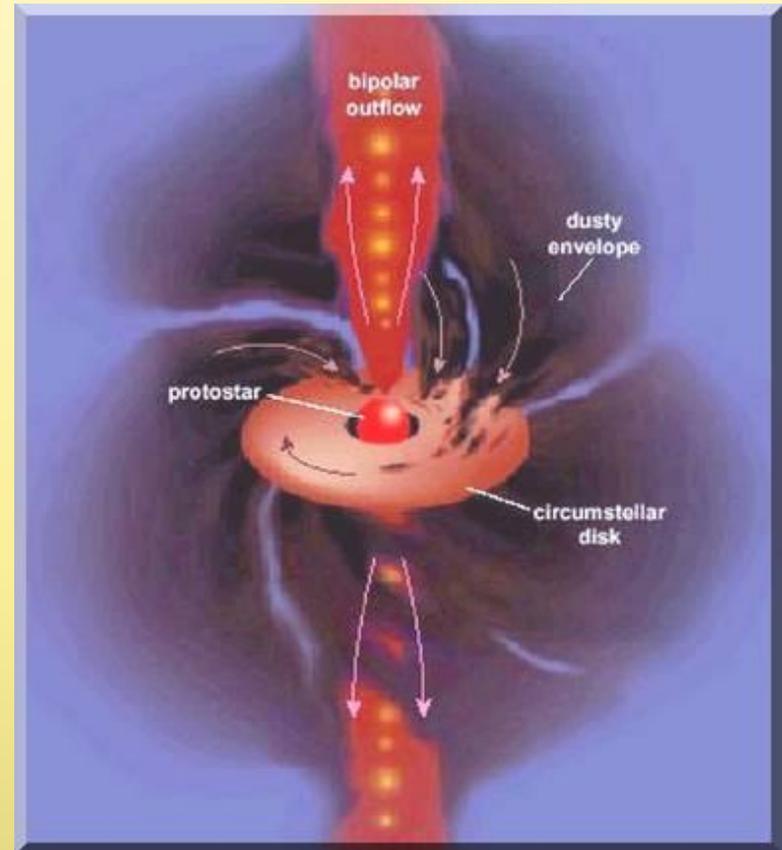


Nébuleuse de la Patte de Chat, une région de formation d'étoiles
Photo Artemis /APEX

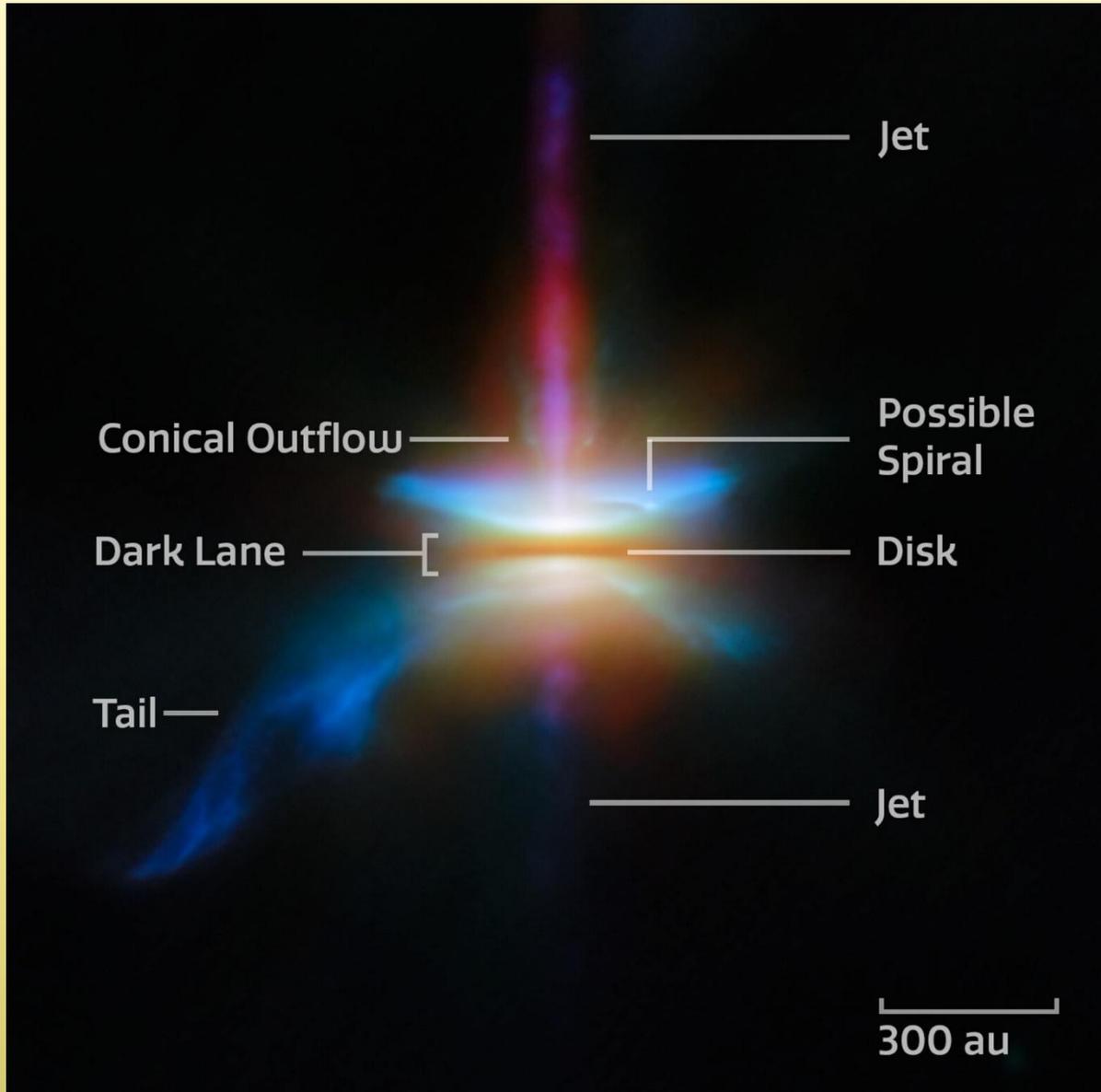


PROTO-ÉTOILE ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

- Au centre de cet effondrement, se forme une **proto-étoile**, qui réchauffe le gaz orbitant autour d'elle.
- La rotation de l'ensemble s'accélère avec sa contraction (moment cinétique).
- la nébuleuse s'aplatit et forme un disque autour de l'étoile naissante.



PROTO-ÉTOILE ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE / PHOTO JWST 04/02/2025

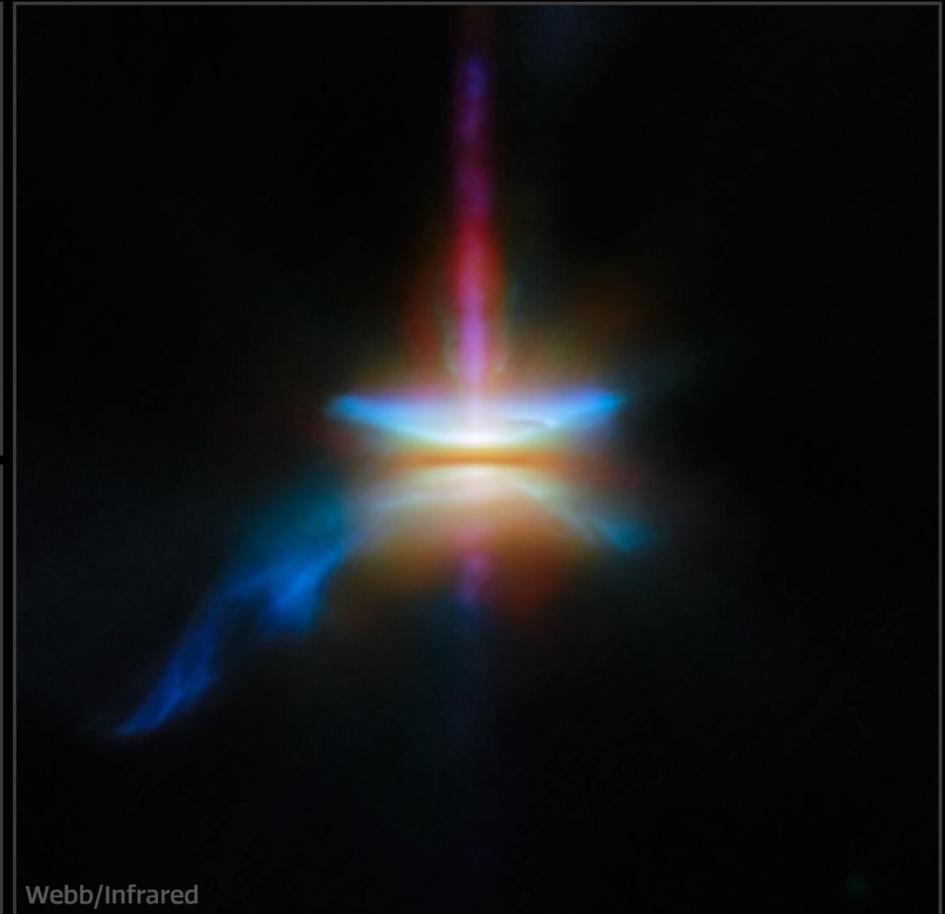
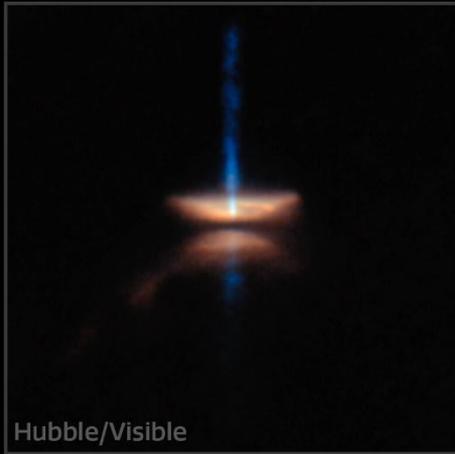


Février 2025

This new NASA/ESA/CSA [James Webb Space Telescope](#) Picture of the Month presents HH 30 in unprecedented resolution. This target is an edge-on **protoplanetary disc** that is surrounded by jets and a disc wind and is located in the dark cloud LDN 1551 in the Taurus Molecular Cloud.



DÉTAILS COMPOSITION PHOTO DU DISQUE

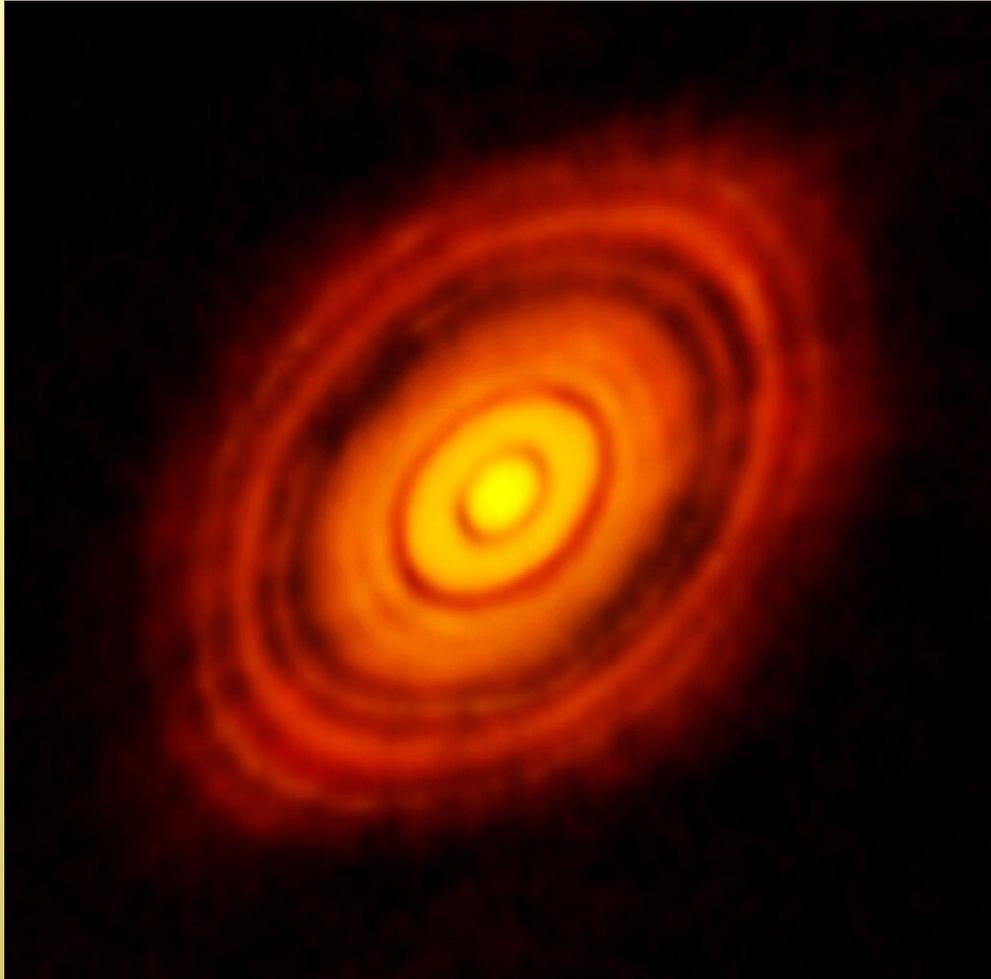


https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Webb/Webb_investigates_a_dusty_and_dynamic_disc



PROTOÉTOILE ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

- La protoétoile continue de se contracter et sa température augmente rapidement. Finalement, les réactions nucléaires de fusion se mettent en route, la proto étoile se transforme en étoile : le Soleil



Disque protoplanétaire de l'étoile HL Tauri à 450 al – image prise par ALMA en 2014

La possible position des planètes dans les portions sombres du disque

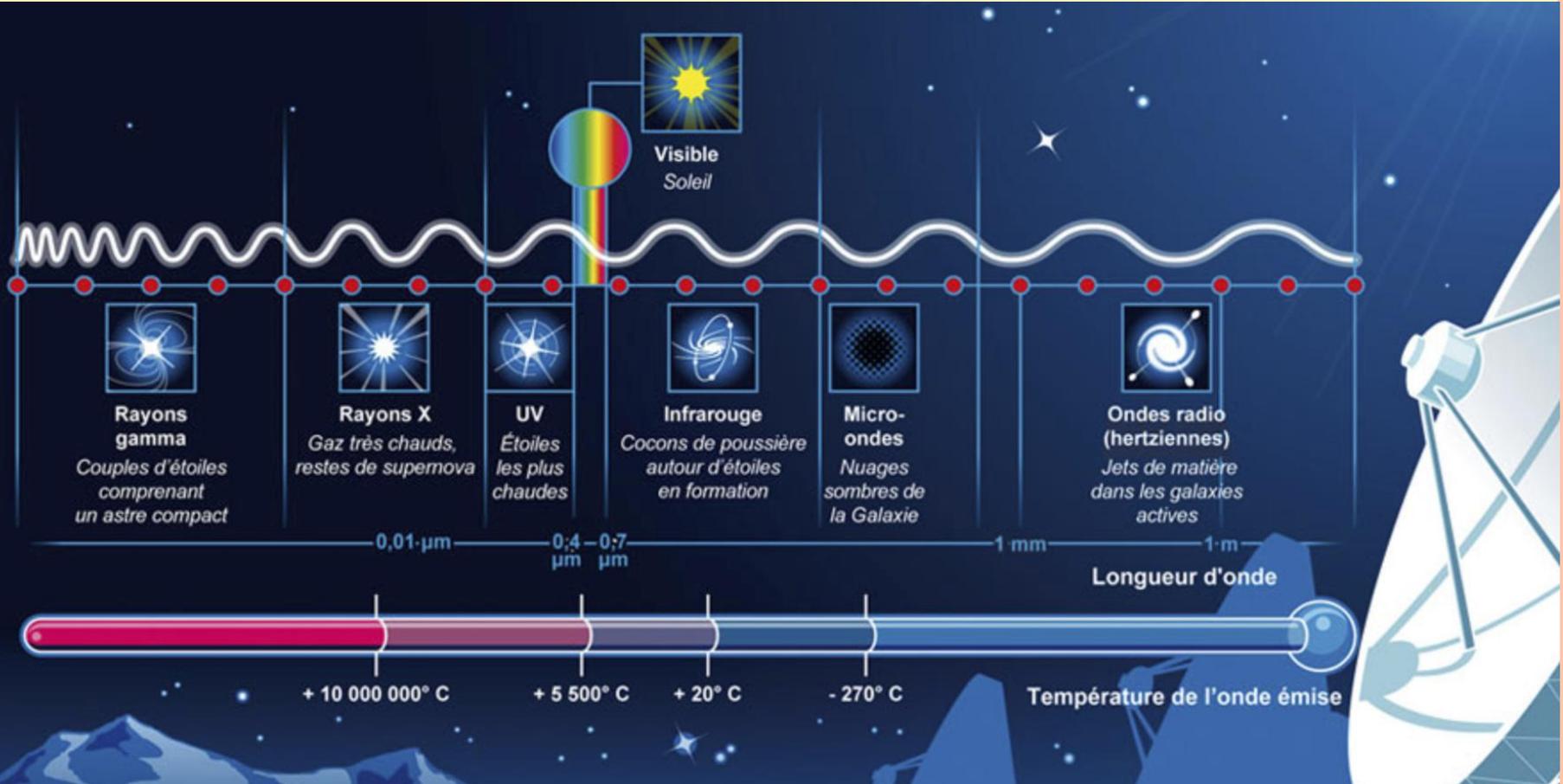


ALMA : ATACAMA LARGE MILLIMETER ARRAY

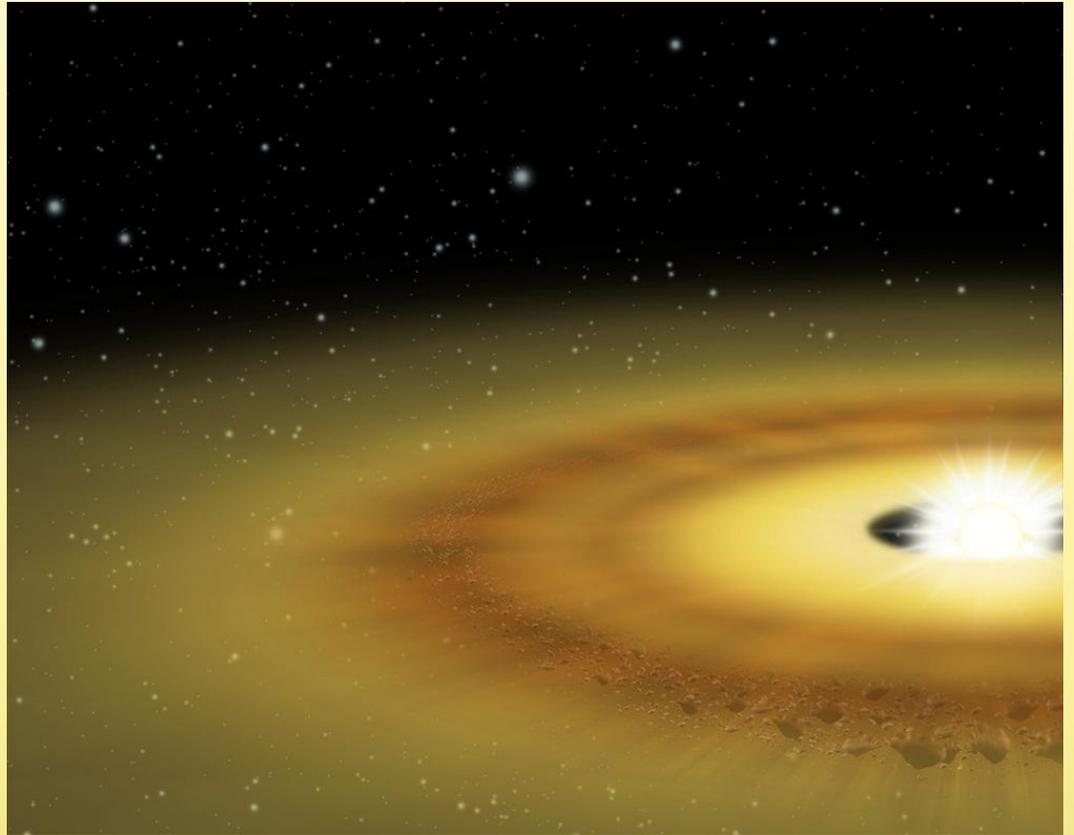
ALMA , réseau de 66 antennes, est l'instrument le plus performant existant pour l'observation des nuages moléculaires dans lesquels naissent les étoiles



RAPPEL : GAMME DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES



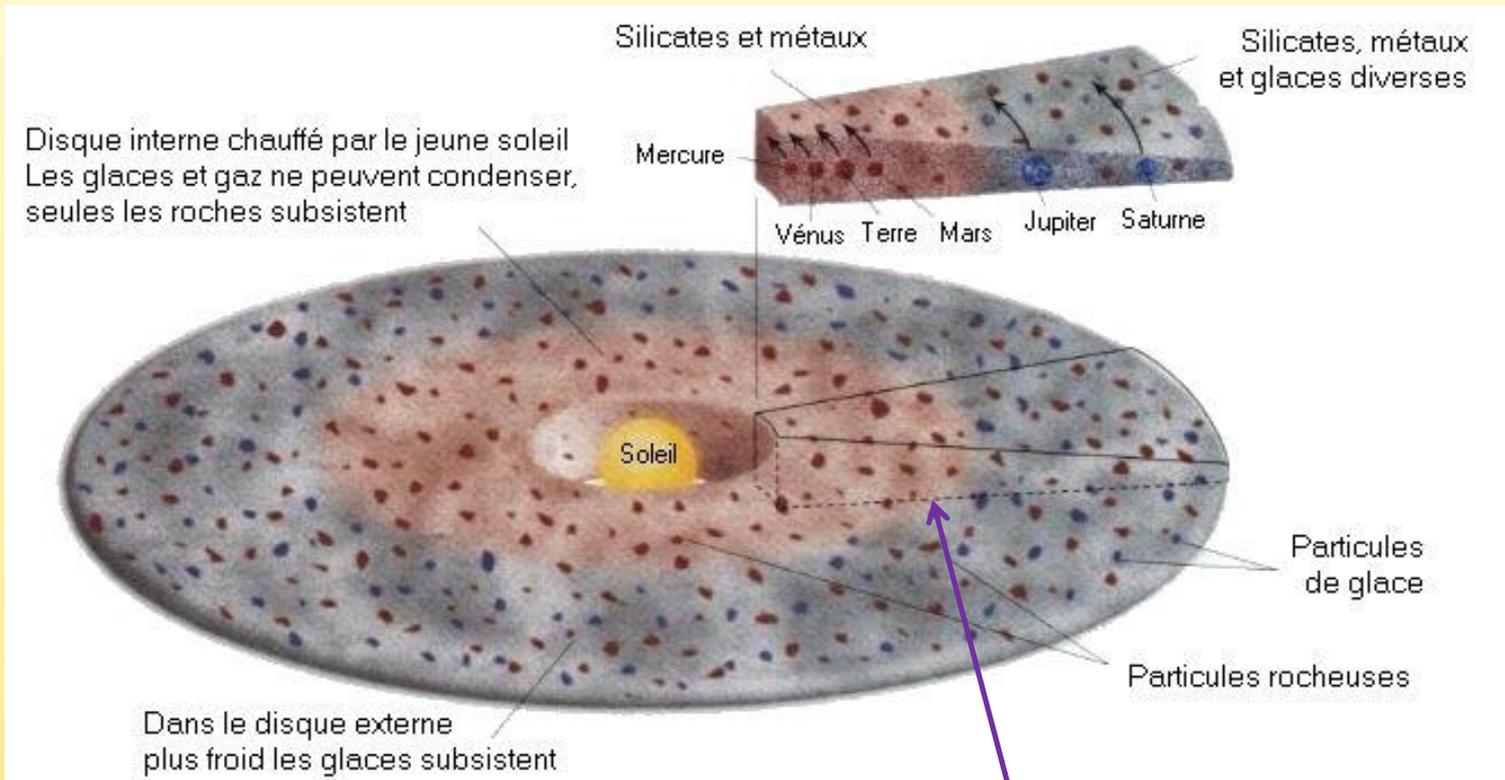
Autour de la
protoétoile,
examinons
maintenant les
0,04% restant !
à savoir le disque
protoplanétaire



Vue d'artiste du disque de Bêta Pictoris



LA FORMATION DES PLANÈTES : LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE



Ligne de glace : Au-delà l'eau n'existe que sous forme de glace

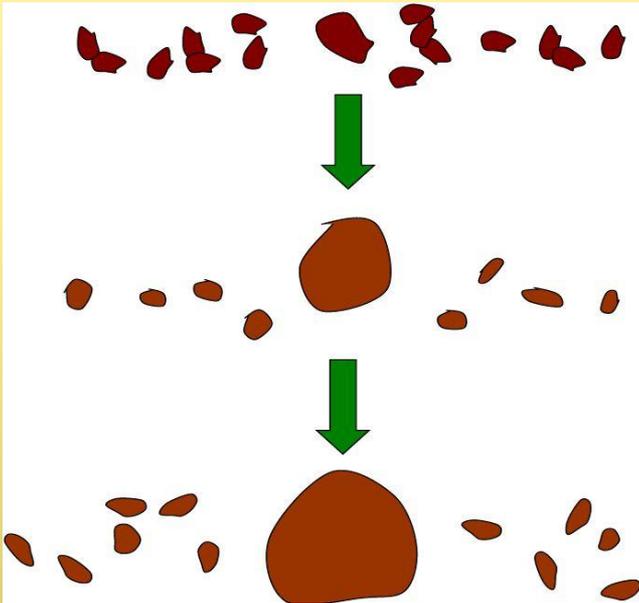
- La jeune étoile nettoie bien vite son environnement proche grâce au vent de particules qu'elle éjecte et à la pression de son rayonnement.
- Autour d'elle en orbite, un 'disque d'accrétion' de grains de poussière et de petits corps le
- En deçà de la ligne de glace, il n'y a moins de 'matériaux disponibles' essentiellement des composants solides (métaux, silicates,..) pour la formation des planètes



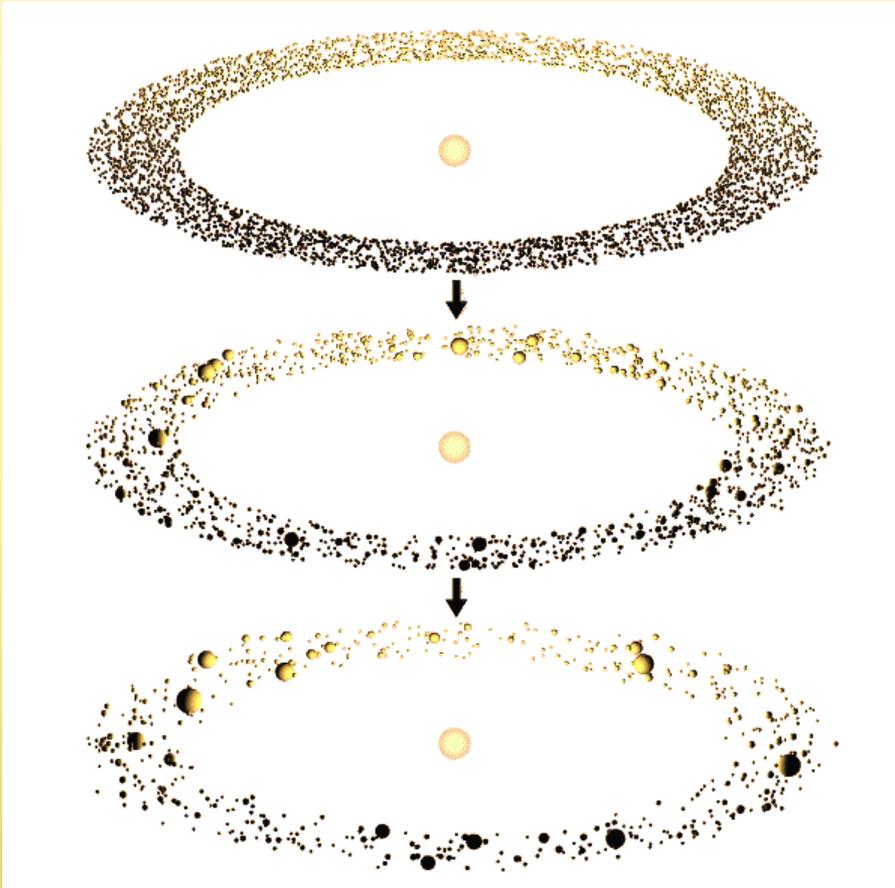


LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

- Grâce à la force de gravité, les petites particules du disque s'attirent, se percutent, certaines sont détruites par l'impact, d'autres grossissent et attirent alors de plus en plus de matière et deviennent des **planétésimaux**
- Ceux-ci vont s'attirer à leur tour pour former des embryons de planètes appelés **protoplanètes** faisant quelques centaines de km



LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE



Les protoplanètes consomment tous les planétésimaux à leur portée. Ils s'accroissent graduellement et chaotiquement, se perturbent entre eux :

- modification orbites,
- nouvelle accrétion ,
- collision (*)

Ils grandissent et finissent par former des planètes

(*) ex. cas de la proto Terre percutée par Théia avec formation de la Terre et de la Lune



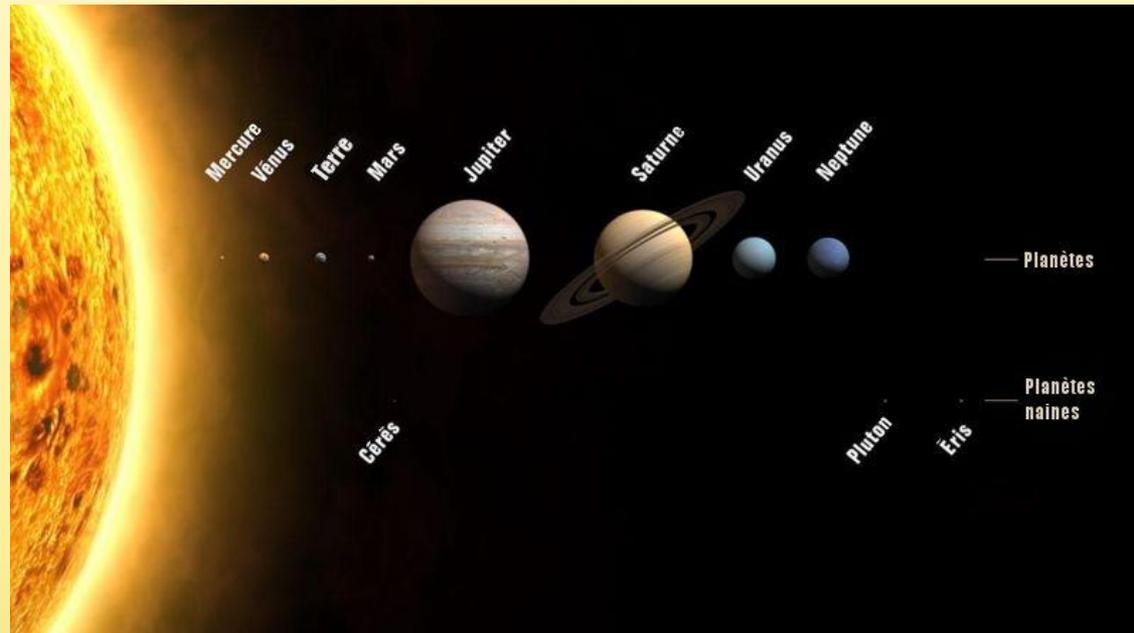
LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE : FORMATION DE LA LUNE



Théia est une protoplanète hypothétique d'une taille semblable à celle de Mars, qui aurait percuté la Terre il y a environ quatre milliards et demi d'années. Cet événement aurait expulsé dans l'espace de grandes quantités de matière, qui se seraient ensuite agglomérées sous l'effet de la gravitation, donnant naissance à la Lune..



DISTINCTION ENTRE PLANÈTES TELLURIQUES ET PLANÈTES GAZEUSES



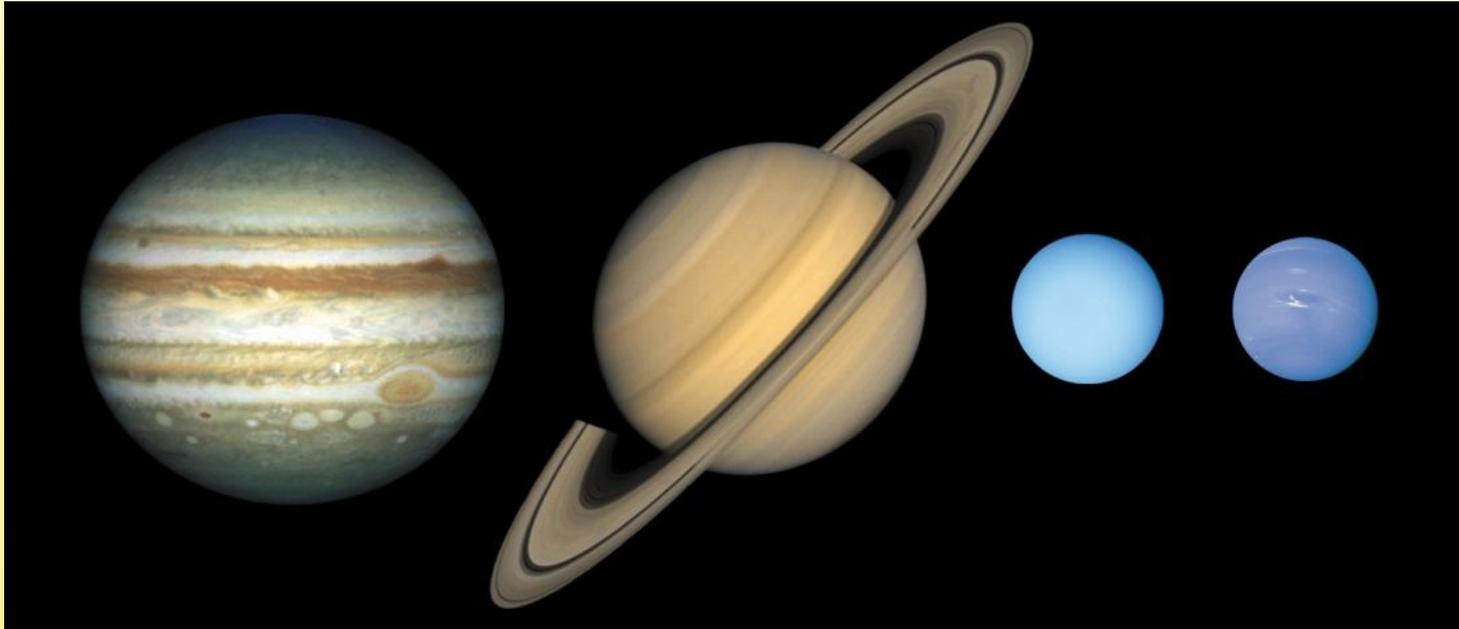
PLANÈTES TELLURIQUES



- Les planètes telluriques se refroidissent progressivement sur de longues échelles de temps (milliards d'années). Elles se différencient : les éléments les plus lourds (tels que les métaux) descendent vers le cœur de la planète pour en former le noyau, alors que les éléments plus légers (les silicates) restent en surface et constituent la croûte.
- Au cours de la phase de refroidissement, les gaz contenus dans les roches sortent du corps de la planète. Si la masse de cette dernière est suffisante, une fine atmosphère se forme.



PLANÈTES GAZEUSES : JUPITER, SATURNE, URANUS ET NEPTUNE



- Les planètes gazeuses géantes se forment à l'extérieur de la 'ligne des glaces' située entre les orbites de Mars et Jupiter.
- En dehors de l'eau, d'autres composés sont aussi condensés : ammoniac, méthane, dioxyde de carbone,.. Elles sont pu ainsi capter beaucoup plus de matières que les planètes internes et retenir de vastes nappes de gaz



CE QU'IL ADVINT DU RESTE DU DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

Cependant, toute la matière n'a pas été agglomérée, des millions de roches de taille variable se promènent dans le Système au sein de 3 grandes zones .

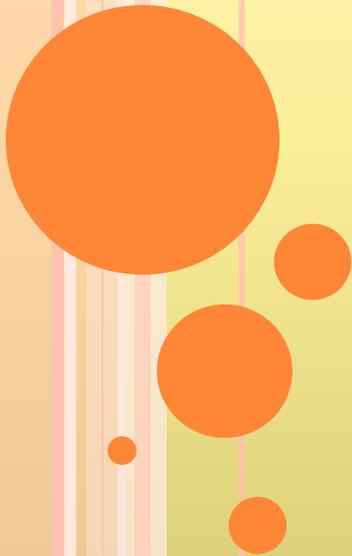


2) La Ceinture de Kuiper est constituée de petits corps glacés, de la taille des astéroïdes, occupant une région en forme d'anneau dans le plan du Système solaire et s'étendant de l'orbite de Neptune (30 UA du Soleil) jusqu'à environ 100 ou 150 UA

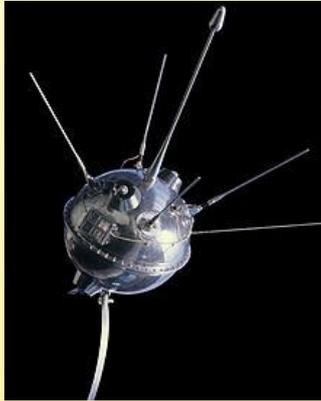
- **1) Ceinture d'astéroïdes** : à environ 400 millions de kilomètres du soleil, entre les orbites de Mars et de Jupiter, certains rochers initiaux ne se sont pas agglomérés pour former une planète car perturbés par la gravité de l'immense Jupiter. Tous ces corps se sont stabilisés et rassemblés pour former la ceinture d'astéroïdes.
- **3) Nuage de Oort** : est un vaste ensemble sphérique aux limites du système solaire au-delà de 20 000 ua et source de la plupart des comètes ..



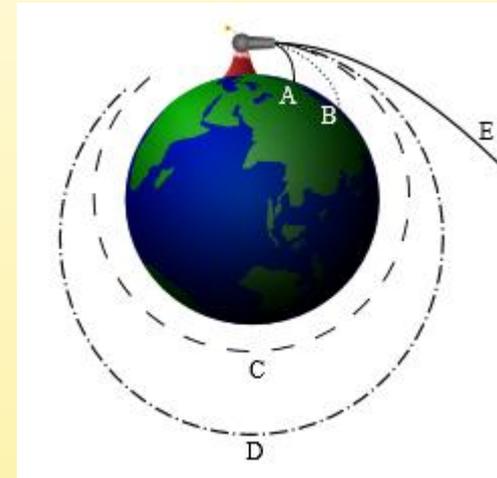
ATMOSPHÈRES DES PLANÈTES FORMATION ET MAINTIEN



ATMOSPÈRE – VITESSE DE LIBÉRATION



Luna, 1959



- Quelle vitesse faut-il communiquer à une sonde spatiale pour qu'elle quitte définitivement l'attraction terrestre ?
 - 11,2 km/s (40 000 km/h) => vitesse de libération
 - La sonde New horizons a décollé avec la vitesse records de 16,2 km/s
- D'une manière plus générale , pour une planète de masse M et de rayon R, on démontre que la vitesse de libération nécessaire à transmettre à un objet posé à sa surface est en m/s :

$$V_L = \sqrt{\left(\frac{2GM}{R}\right)}$$

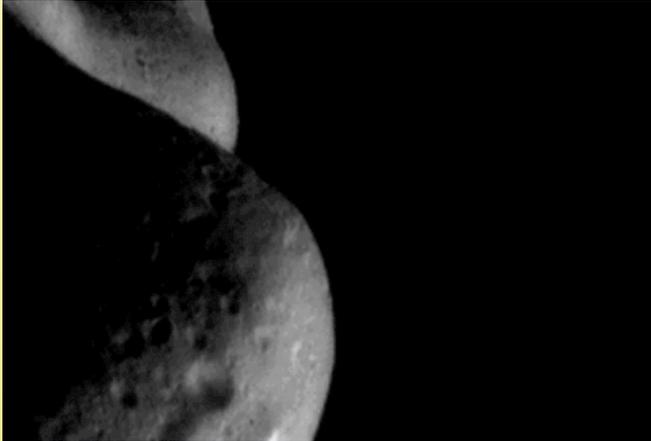
La vitesse de libération d'un astre augmente avec sa masse



VITESSE DE LIBÉRATION DES PLANÈTES

Corps	Masse (Terre=1)	Rayon (km)	Vitesse de libération (km/S)
Mercure	0,055	2440	4,2
Venus	0,815	6050	10,4
Terre	1	6400	11,2
Lune	0,0123	1740	2,4
Mars	0,107	3400	5
Jupiter	317,8	71 400	59,6
Saturne	95,16	60 000	35,5
Titan	0,0225	2400	2,4
Uranus	14,54	25 560	21,3
Neptune	17,15	24 800	23,8

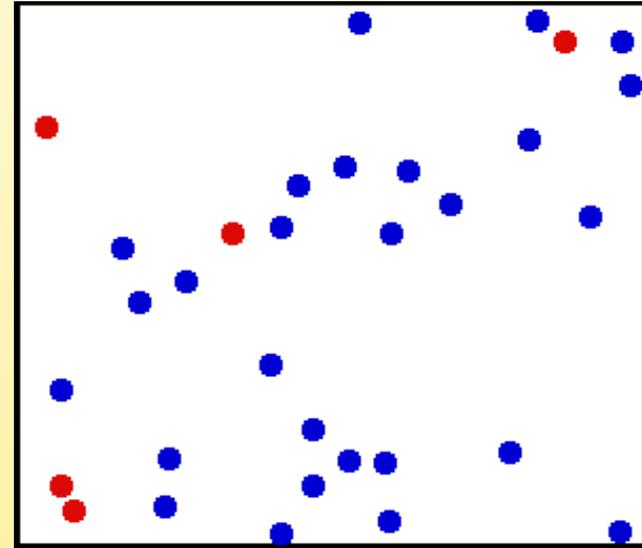
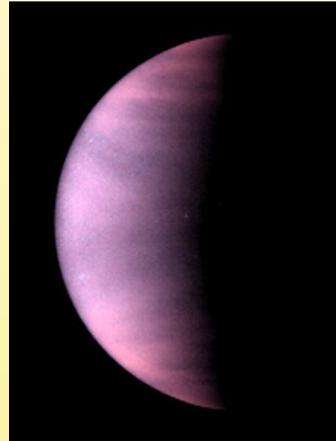
CAS DE L'ASTÉROÏDE EROS : $V_L = 18$ KM/H !



Tournant autour du Soleil sur une orbite comprise entre celles de la Terre et de Mars, l'astéroïde 433 Eros a reçu la visite de la sonde spatiale NEAR_Shoemaker en février 2000.



EVASION DES ATMOSPHÈRES



- L'atmosphère des planètes? :
 - C'est en fait un mélange gazeux. Un gaz est constitué de molécules dispersées, désordonnées et en mouvement permanent.
A quelle vitesse se déplacent les molécules ? => les physiciens déterminent une **vitesse moyenne** pour un gaz donné à une température donnée
- Par ex. à 27°C, la vitesse moyenne des molécules qui constituent l'air (oxygène, azote, ..) qui nous entoure est d'environ **500m/s (1800km/h)**
- Et en comparaison avec la vitesse de libération...?
 - Pour savoir si un gaz peut rester captif sur une planète , on prend en fait un facteur 10 car dans un gaz , une partie des molécules se déplacent beaucoup plus vite que la vitesse moyenne.
- => paramètre de rétention d'un gaz sur une planète : un gaz va s'échapper d'une planète si :

10 x vitesse moyenne du gaz > vitesse de libération de la planète considérée.

EVASION / RÉTENTION DES ATMOSPHÈRES

- Pour les différentes planètes du système solaire, on connaît :
 - D'une part , **les dimensions, les masses** et donc les vitesses de libération
 - D'autre part, **les températures moyenne de surface**, à partir de ces valeurs on peut donc calculer pour chaque type de gaz la vitesse moyenne de ses molécules.
- => On peut déterminer l'aptitude d'une planète à garder dans son atmosphère un gaz donné



RÉTENTION POTENTIELLE DES GAZ PAR PLANÈTES

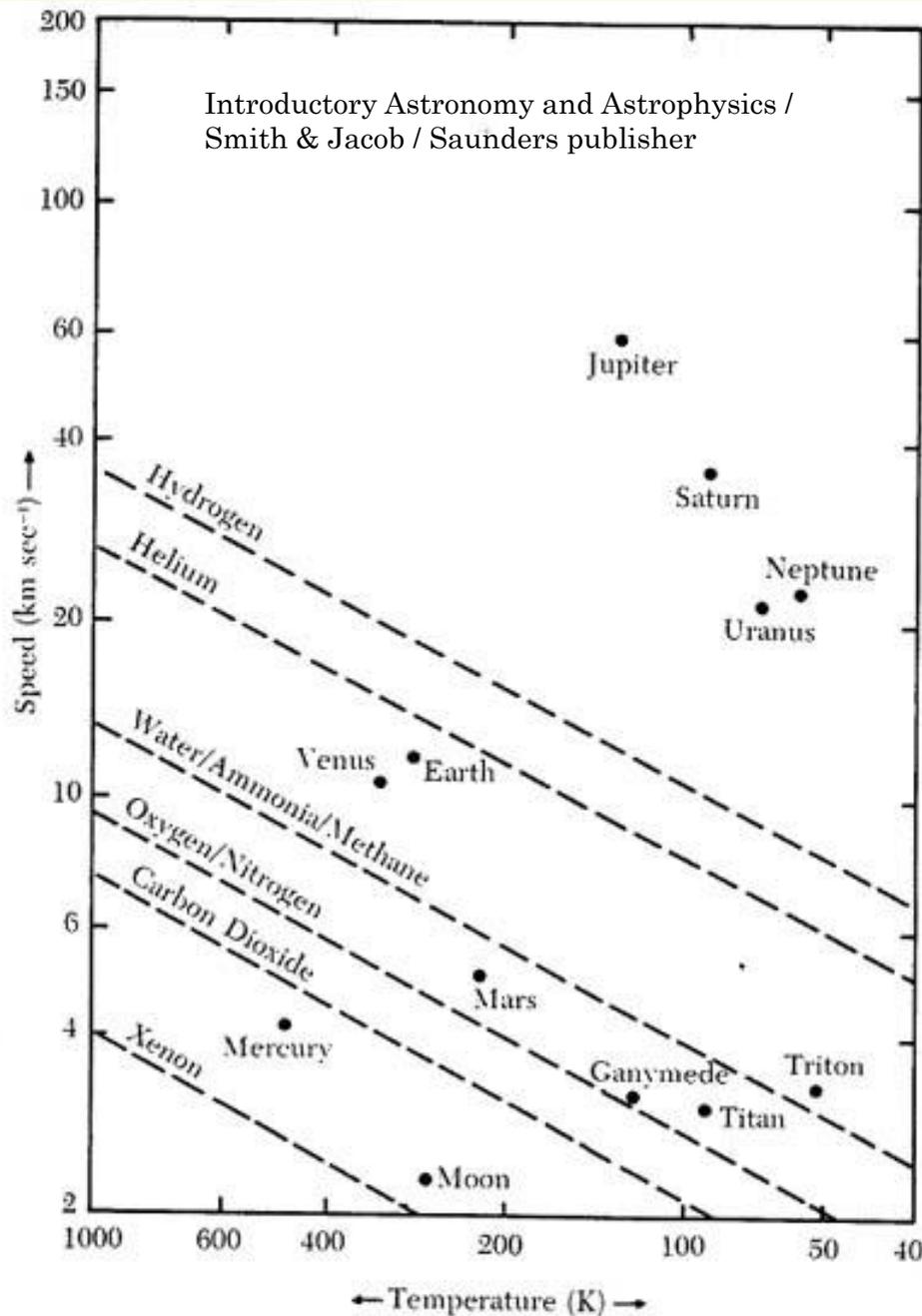


Tableau représentant la rétention des différents gaz (vitesse moléculaire x10) en fonction de la Température de surface pour différents astres



RÉTENTION DE L'ATMOSPHÈRE DES PLANÈTES

- On voit immédiatement que la Lune et Mercure sont situées au-dessous de tous les gaz listés
 - => Elles ne peuvent pas avoir d'atmosphère significative.
- Mars, Ganymède (*satellite de Jupiter, et le plus grand satellite du système solaire*), Titan (*satellite de Saturne*) et Triton (*satellite de Neptune*) ont potentiellement la possibilité d'avoir une atmosphère de CO₂, d'oxygène ou d'azote; Triton peut même avoir du Méthane ou de l'Ammoniaque.



Comparaison taille Terre,
Ganymède et Lune

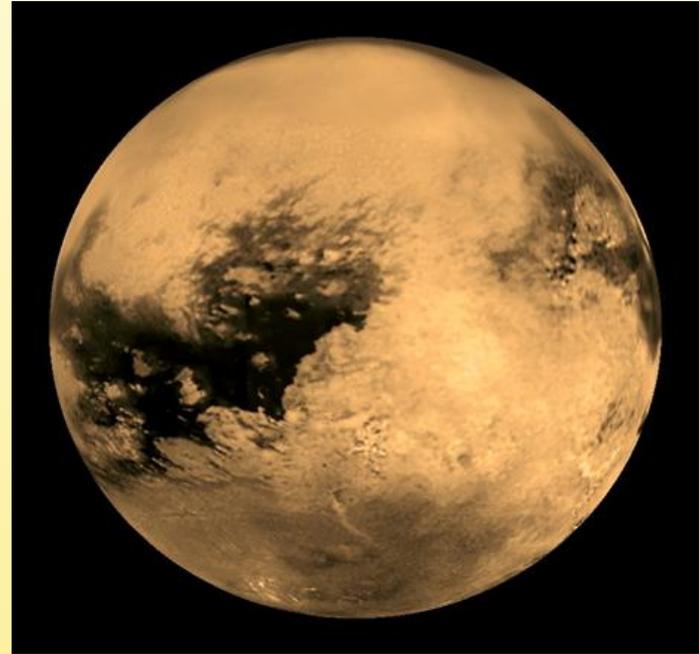
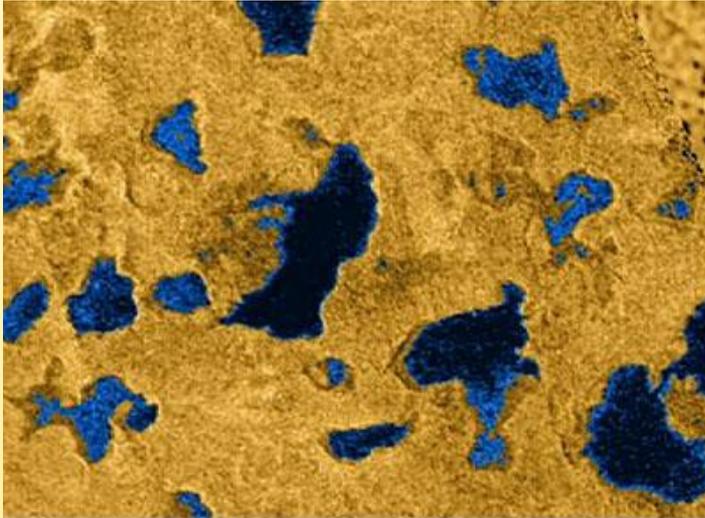


ATMOSPHÈRE PLANÈTES TELLURIQUES- CRÉATION

- Les atmosphères de **Vénus**, **Mars** et de la **Terre** trouvent leur origine dans le même phénomène, le dégazage volcanique, par lequel les gaz emprisonnés dans les roches lors de la formation de la planète se sont progressivement libérés . Le bombardement ultérieur de comètes et météorites a enrichi ces atmosphères.
- . Mais bien que ces 3 atmosphères soient nées du même mécanisme, elles ont rapidement divergé et donné naissance à des conditions très différentes,
 - un enfer de CO₂ à une température de 460 degrés sur Vénus,
 - une atmosphère de CO₂ très tenue sur Mars, (610 Pa)
 - et un environnement sur Terre marqué par la présence de la vie.



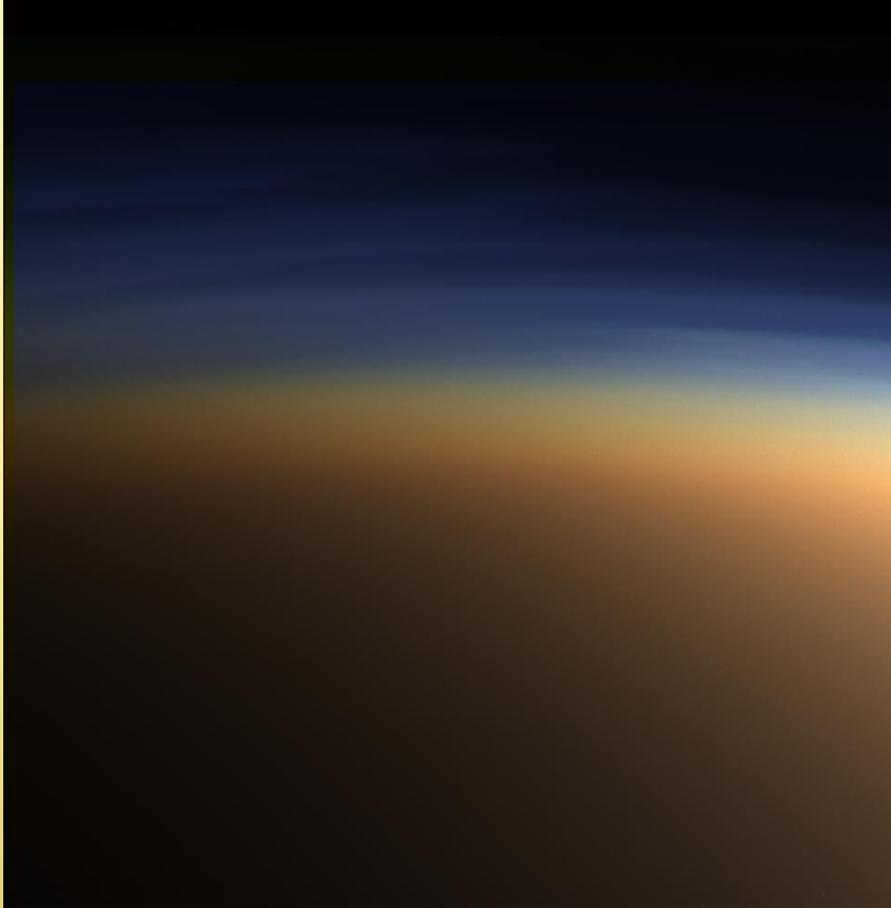
UN CAS UNIQUE : TITAN



- Titan est le plus grand satellite de Saturne, et le 2^{ème} plus grand du système solaire
- A part Vénus, la Terre, Mars et les planètes géantes, c'est le seul corps solide du système solaire à posséder une atmosphère significative.
- Celle-ci est principalement constituée d'azote (98,4%), avec également du méthane, et d'autres gaz..
- Titan dispose de lacs d'hydrocarbure mis en évidence par les sondes Cassini-Huygens.



ATMOSPHÈRE DE TITAN



- La taille de l'atmosphère de Titan serait comprise entre 200 km et 880 km
- (sur Terre, 99,999 % de la masse de l'atmosphère réside en dessous de 100 km d'altitude).

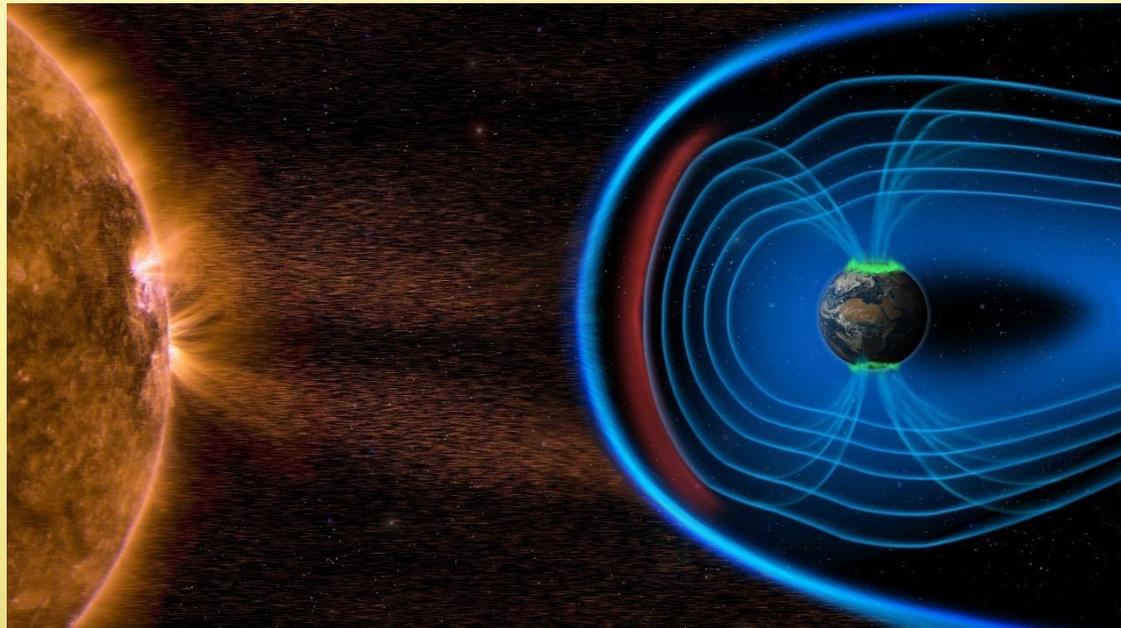
Photo de l'atmosphère de TITAN
- sonde Cassini - 2005



ATMOSPHÈRES DES PLANÈTES

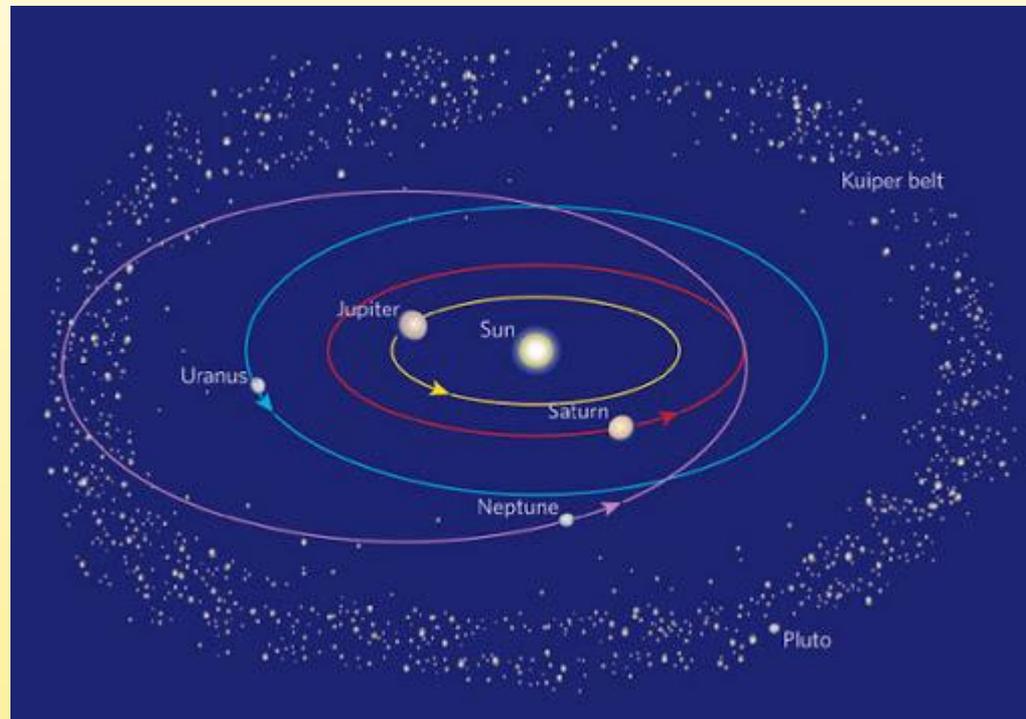
- En dehors de la gravité, pour le maintien des atmosphères sur les planètes , il faut tenir compte du **champ magnétique** de celles-ci qui peut ou pas protéger de l'érosion provoquée par le vent solaire. Or :

Mercure, Vénus et Mars n'ont pas de champs magnétiques notables



- Mercure : $1/100^{\text{ème}}$ de la Terre
- Vénus : pas de champ magnétique mesurable
- Mars : pas de champ magnétique global. Le vent solaire est le principal responsable de l'érosion atmosphérique de Mars selon le résultat de la sonde MAVEN (NASA). Geophysical Research letters / 06 11 2015

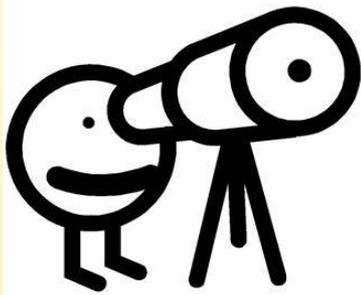




COMPLÉMENT MODÈLE DE NICE / GRAND TACK

Depuis plus de 20 ans, la théorie selon laquelle le système solaire se serait formé uniquement par condensation uniforme de la nébuleuse solaire est abandonnée.

Il existe encore de nombreuses zones d'ombre, tout n'est pas expliqué, et des éléments nouveaux apparaissent ...



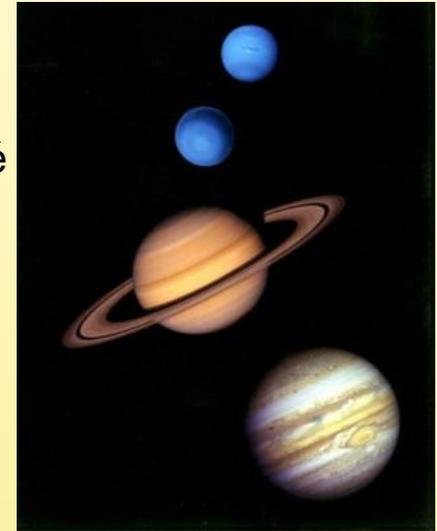
DES ÉLÉMENTS NOUVEAUX ...

- **Examen surface de la lune**
 - Mission Sonde NASA GRAIL : trace d'un grand bombardement météoritiques (non visible sur terre : la tectonique des plaques effacent tout dans le temps)
- **Résultat de captation de poussières de comètes :**
 - Ex;: Mission de la sonde spatiale Stardust : échantillon de la comète 81P/Wild :
 - Dans le domaine froid derrière Neptune, les matériaux disponibles pour faire des comètes aurait dû être un mélange de glace et de poussières riches en carbone. Mais pas des grains sombres de minéraux exotiques : morceaux durs de roches et de métaux tels que tungsten, nitrure de titane qui aurait pu seulement être formés près du soleil naissant , à une température de plus de 1700 ° C. Des process violents doivent les avoir propulsés à l'extérieur du système solaire
- Dans les modélisations, Importance croissante de l'interréaction de la gravité des planètes entre elles dont la résonance orbitale
- **Exoplanètes**
 - Plus de 5300 découvertes en 2023 avec caractéristiques : tailles, distance à leur étoile, répartition et orbites **très** variées ... Des Jupiters chaudes...
 - => grandes variétés de scénarios de formation des exoplanètes. Le système solaire est atypique.
- Etc.



MODÈLE DE NICE

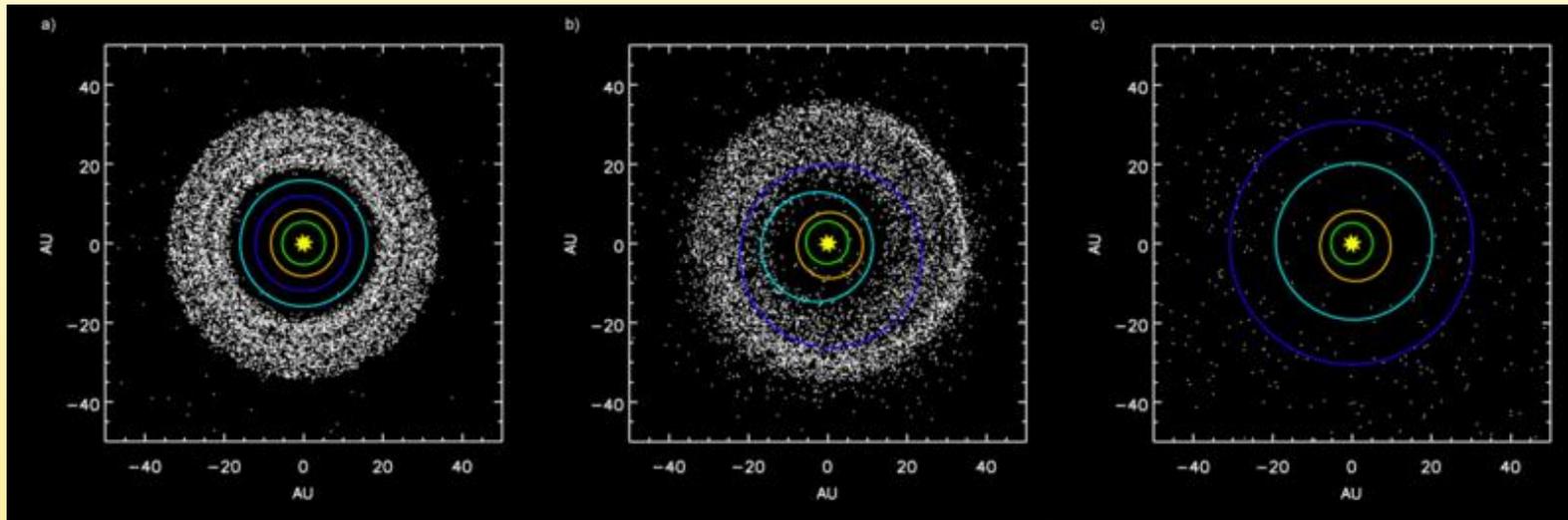
- Le modèle de Nice est nommé ainsi car il fut initialement développé à l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, en France avant de faire l'objet d'une coopération internationale (2005)
- Il propose un scénario convaincant selon lequel, qq centaines de millions d'années après la naissance du système solaire, les planètes géantes ont migré depuis une configuration initiale plus compacte (*) vers leurs positions actuelles, impliquant des événements tels que :
 - le **bombardement massif tardif** du Système solaire interne, (date 3,9 milliards d'années)
 - la formation du **nuage d'Oort**
 - l'existence des populations de petits corps du Système solaire incluant **la ceinture de Kuiper**,
 - **les astéroïdes troyens de Jupiter et de Neptune**,
- Il est basé sur des simulations dynamiques sur ordinateur (où l'on fait varier entre autres les conditions initiales)



C'est un résumé, le scénario initial détaillé est évidemment plus long (comme tous les scénarios alternatifs ultérieurs). Saturne situé après Jupiter est plus près du soleil qu'actuellement. Jupiter est un peu plus loin qu'actuellement. Jupiter et Saturne ne sont pas en résonance orbitale 2:1. Neptune est situé avant Uranus et toutes 2 plus proches du soleil, respectivement 12 et 14 ua au lieu de 30 et 19 ua



RÉSUMÉ



Une des simulations montrant les planètes extérieures et la ceinture planétésimale :

a) configuration initiale, avant que Jupiter et Saturne n'atteignent la résonance 2:1

b) Éparpillement des planétésimaux dans le Système solaire après le changement de l'orbite de Neptune (bleu foncé) et d'Uranus (bleu clair).

c) éjection de planétésimaux par les planètes (*)

(*) Certains de ces planétésimaux sont jetés dans le Système solaire interne, produisant un soudain afflux d'impacts sur les planètes telluriques : **le bombardement massif tardif**.



BOMBARDEMENT TARDIF

- Ce bombardement cataclysmique d'impacts météoriques, tardif par rapport à la formation du système solaire n'est envisageable que s'il existe un réservoir de petits corps restés stables pendant env. 600 millions d'années, avant d'être déstabilisés par un élément déclencheur => une modification dans la structure orbitale des planètes géantes (*expliqué par le Modèle de Nice*)
- Il concerne les planètes telluriques et la Lune

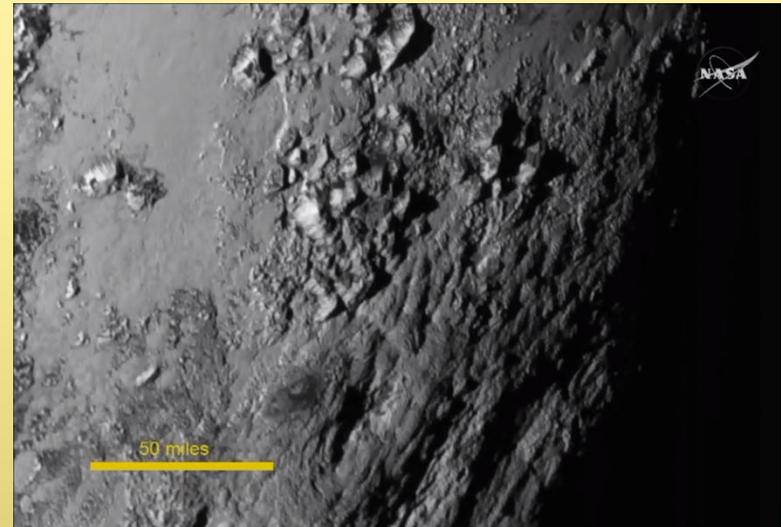


NASA Image d'artiste. La jeune Terre bombardée par des astéroïdes. Les scientifiques pensent qu'ils ont apporté des molécules carbonées et de l'eau .



CAS DE PLUTON

- 1^{ère} planète naine en taille du système solaire
- Selon le scénario du modèle de Nice, Pluton et Charon sont formés par accrétion en même temps que d'autres corps, et auraient été ensuite chassés au-delà de l'orbite de Neptune par l'influence gravitationnelle des planètes géantes.



NASA : photos de Pluton prises par New Horizon (voir ci-après)

MODÈLE DE NICE

- Le modèle de Nice reste une hypothèse. Elle parvient à expliquer nombre des situations observées au sein du Système solaire. Elle est aujourd'hui assez largement acceptée par les planétologues comme un modèle réaliste pour expliquer l'évolution du Système solaire.
- depuis 2005, ce modèle fait l'objet d'actualisations régulières . Exemple récent publication dans Astronomy et Astrophysics - août 2024 par la doctorante Philippine Griveaud /Doctorante Observatoire Côte d'Azur

*Allesandro MORBDELLI, concepteur du Modèle de Nice :
« Si notre système solaire n'est pas typique, c'est
peut-être qu'aucun système planétaire ne l'est »*

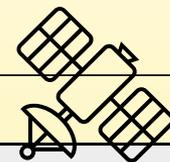


EXPLORATION



Dans le but de recueillir des informations sur les débuts du système solaire, depuis la fin des années 1990, des missions ont été conçues pour étudier les objets mineurs : astéroïdes, comètes, planètes naines





Amélioration de la connaissance de la formation du système solaire : liste des sondes spatiales après 1985
Exploration des objets mineurs, planètes naines, astéroïdes, comètes, objets transneptuniens, ceinture de Kuiper, etc

Date lancement	Noms	Nations	Cibles	Date arrivée	Fin mission	Remarques/ objectif principal
1985	Giotto	Europe	Comètes Halley & 6P/Grig-Skellerup	1985	1992	1ère mission d'exploration du système solaire lancée par L'Europe et la 1ère à s'approcher d'une comète (Halley 536km). Analyse des matériaux éjectés: présence de composés organiques. Autres sondes plus éloignées Suisei (Japon), Vega 1 (USA)
1996	Near Shoemaker	USA	Astéroïde géocroiseur Eros	2000	2001	1ère sonde à se mettre en orbite autour d'un astéroïde. Sur le trajet a photographié l'astéroïde Mathilde. Fin de mission non programmée : photographies rapprochées en se posant à 7km/h sur sa surface
1998	Deep Space 1	USA	astéroïde 1992KD Braille comète Borelly	1999	2001	Test moteur ionique.
1999	Stardust	USA	Queue de la comète 81P/Wild	2004	2011	Peit engin spatial de 400kg, a recueilli plus de 10 000 particules >1micron dans la queue de la comète.
2003	Hayabusa 1	Japon	Astéroïde Itokawa	2005	2010	1ère prise d'échantillon sur un astéroïde : 1500 particules de < 1 micron
2004	Rosetta	Europe	Comète 67P/Tchouri	2014	2016	1ère sonde à se placer en orbite autour d'une comète. Objectif : processus formation du système solaire. Proportion de matière organique mesurée 40%
2005	Deep Impact	USA	Comète Tempel 1 & Hartley	2005	2013	Largage d'un impacteur de 400kg sur Tempel 1, création d'un cratère de 30m, et recueil des données des poussières éjectées. Survol de Hartley 2 en 2010
2006	New Horizons	USA	Pluton ceinture de Kuiper	2015	2023	1ère sonde spatiale à explorer cette région du système solaire : les transneptuniens
2007	Dawn	USA	Vesta et Ceres	2011	2018	Ceinture principale d'astéroïdes : les 2 principaux corps sont Ceres (planète naine) et Vesta (astéroïde) et sont considérés comme des protoplanètes
2014	Hayabusa 2	Japon	Astéroïde Ryugu	2018	2020	prise d'échantillon : 5,4 g
2016	Osiris Rex	USA	Astéroïde géocroiseur Benu	2018	/	Intérêt astéroïde ayant peu évolué depuis la formation du système solaire. Prise échantillon Bénou. Mission étendu 2029 : survol astéroïde géocroiseur Apophis (l'un des plus menaçants)
2021	Dart	USA	Impact astéroïde Dimorphos	2022	2022	tester méthode pour dévier un astéroïde. Impact réussi le 26 septembre 2022 :sonde de 550kg lancée à 6,58km/s. Dimorphos, diam. 160 m, est un satellite de Didymos
2021	Lucy	USA	Astéroïdes troyens de Jupiter	2027	/	Survol de 2 astéroïdes de la ceinture principale et 5 astéroïdes troyens situés auparavant dans diverses paries du système solaire dont certains dans la ceinture de Kuiper (Modèle de Nice)
2024	Hera	Europe	Astéroïde Dimorphos	fin 2026	/	Hera est chargé de mesurer l'impact créé par la sonde Dart sur Dimorphos (forme, morphologie, qu de mouvement acquise)

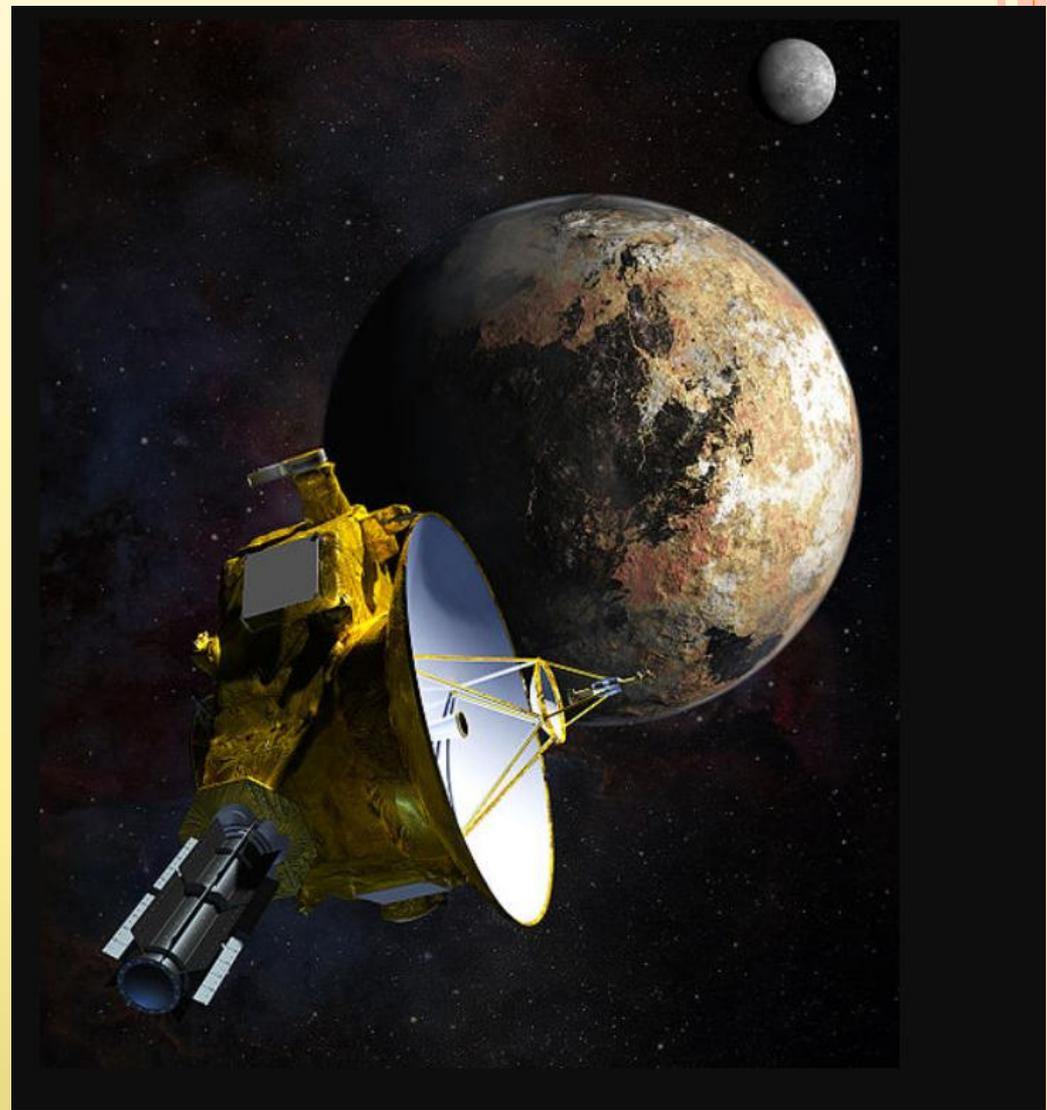
- Un exemple d'exploration pour améliorer notre compréhension du système solaire et de sa formation :

**Sonde spatiale 'New Horizons' :
Pluton et la ceinture de Kuiper**



NEW HORIZONS

- ***New Horizons***, lancée le 19 janvier 2006, est la 1ère sonde spatiale à visiter Pluton qu'elle atteint le 14 juillet 2015. Elle emporte à son bord des instruments d'imagerie, de spectrométrie et d'autres appareils de mesure, afin de déterminer les **caractéristiques géologiques** et morphologiques de **Pluton** et de sa lune Charon.
- Sa mission a été poursuivie pour atteindre un objet de la ceinture de Kuiper : **(486958) Arrokoth**



NEW HORIZONS

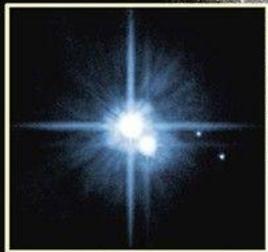
Reconnaissance at the Farthest Frontier

KBOs
2016–2020

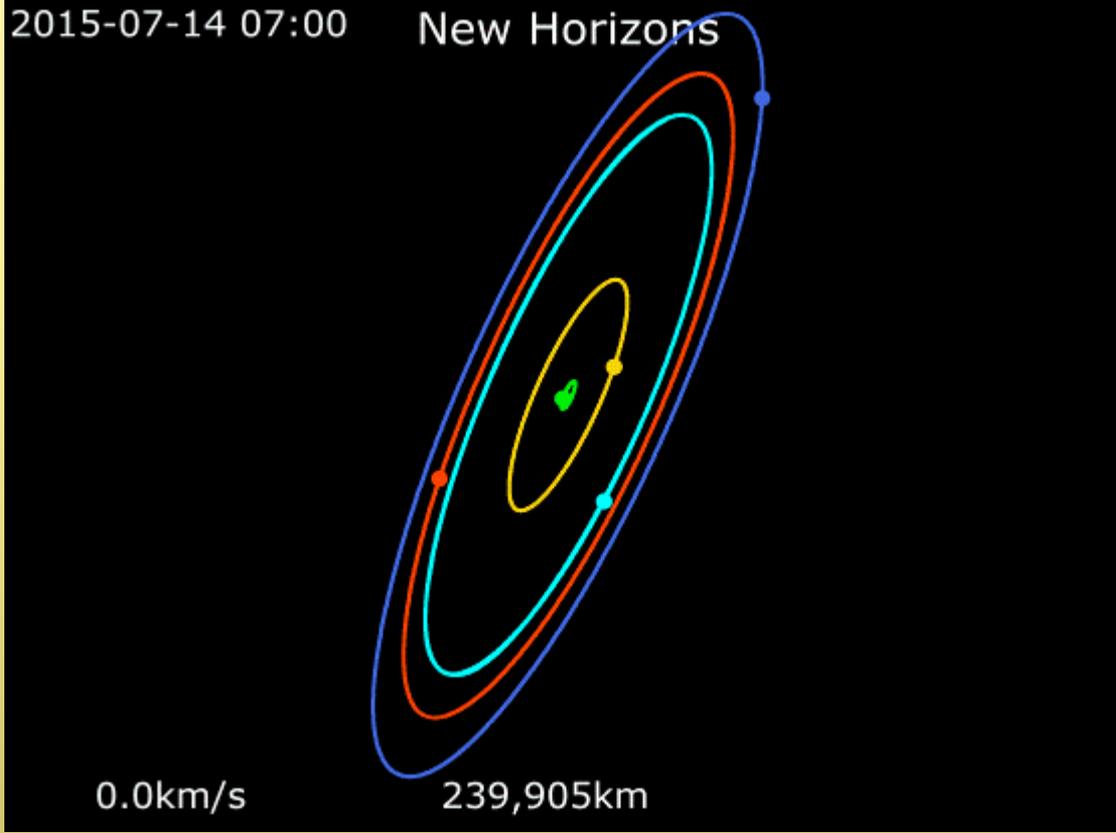
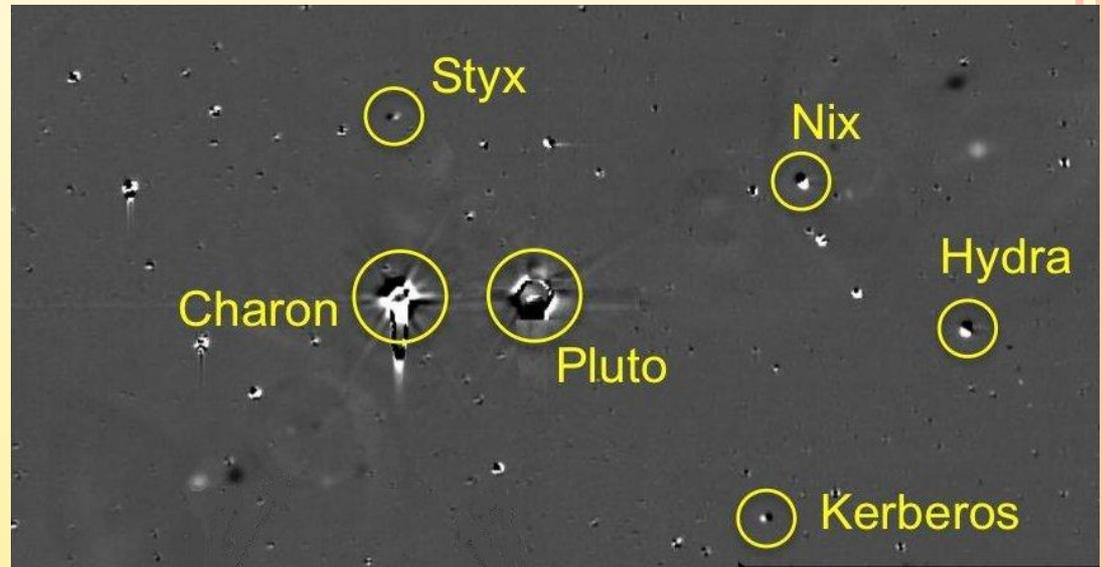
Pluto System
July 2015

Jupiter System
Feb 2007

Launch
Jan 2006



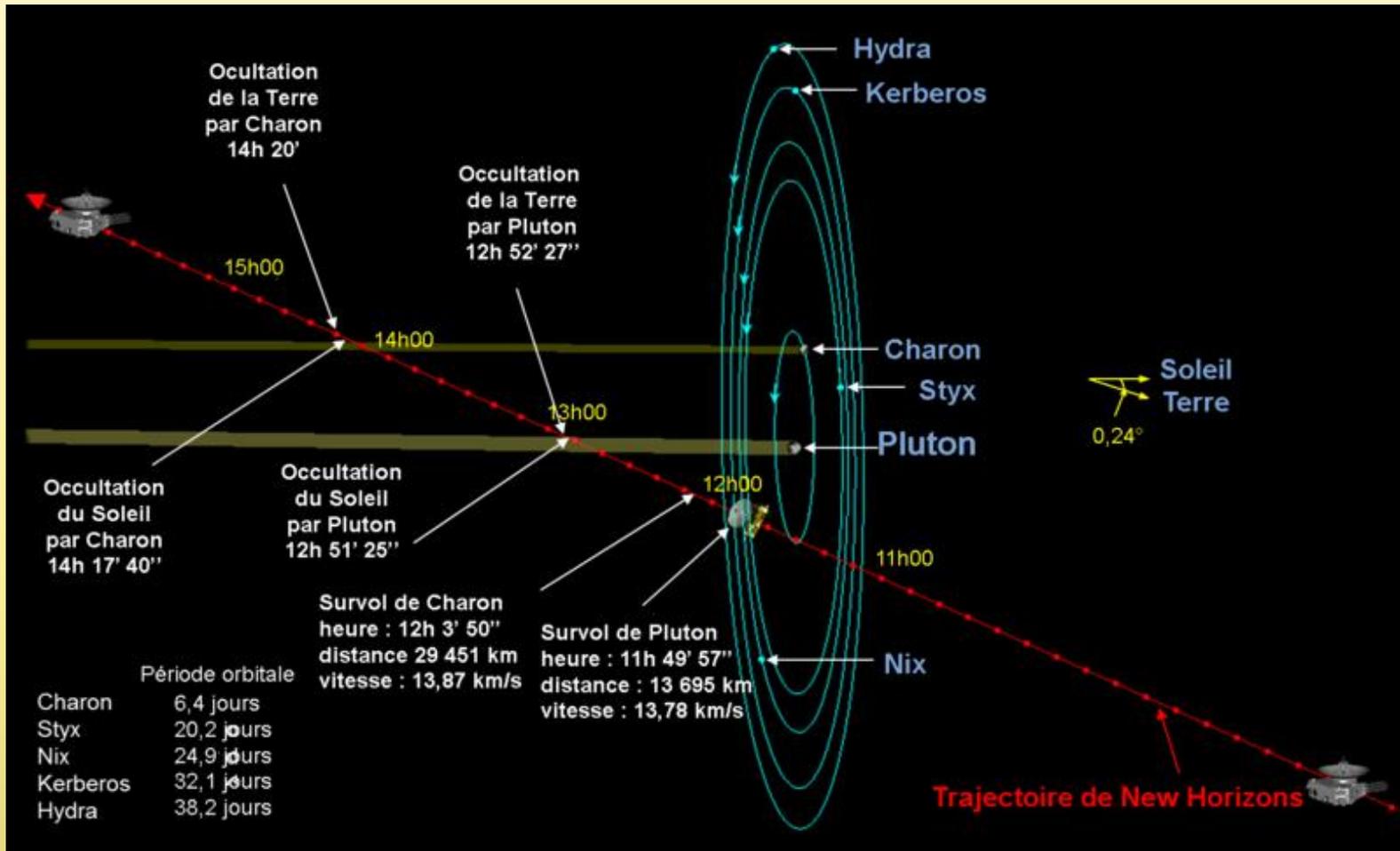
PLUTON ET SES LUNES PHOTO
PRISE LE 26 JUIN 2015



Animation NASA. Le 14 juillet 2015, la sonde traverse à grande vitesse le plan orbital de Pluton (env. 50 000km/h)

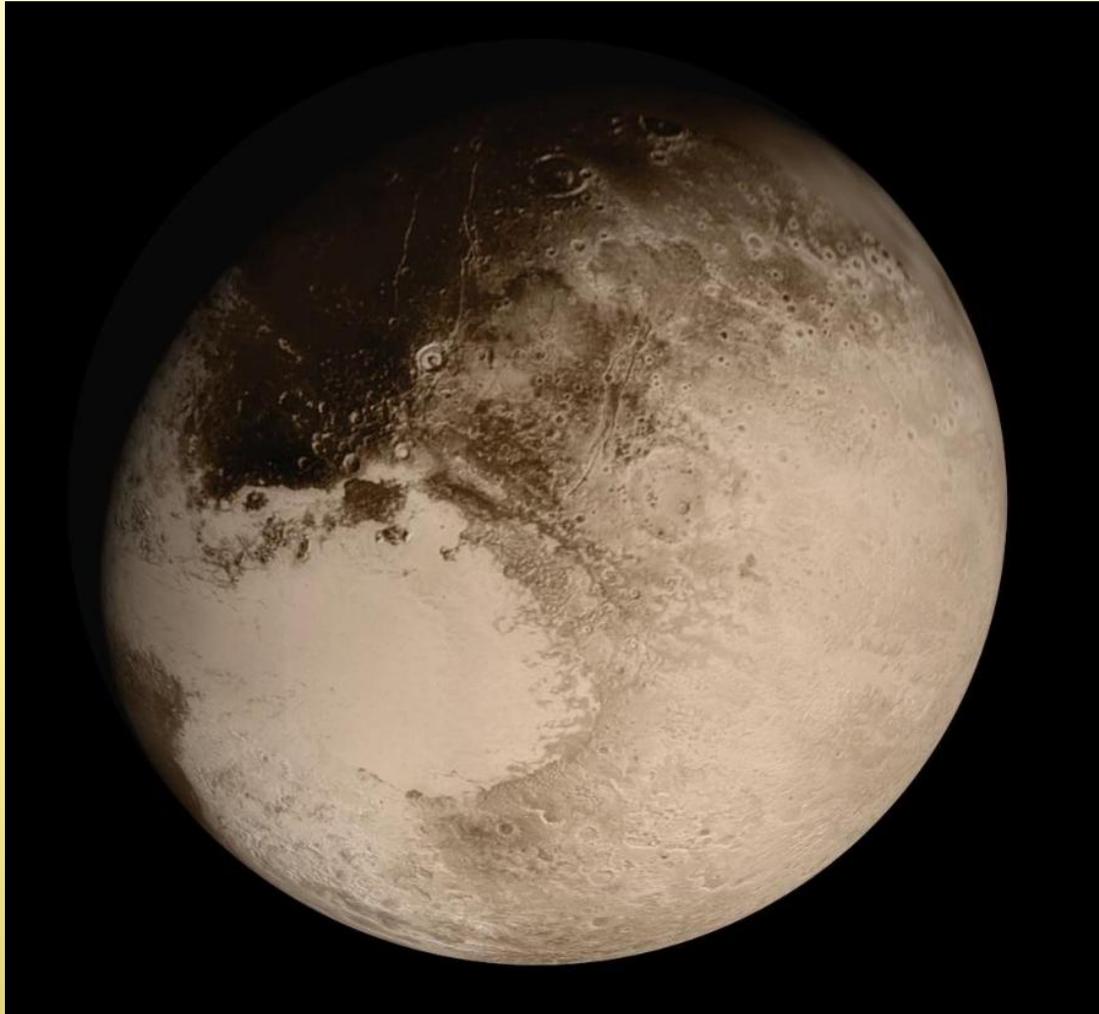


NEW HORIZONS



Les données cumulées par la sonde lors de ce survol seront retransmises vers la Terre pendant 15 mois, débit limité dû à la distance (soit env. 4,5 heures lumière, volume data 6,28 gigabits à un débit de 1 à 2 kilobits par seconde)

PHOTO DE PLUTON PRISE LE 14/07/2015



Le survol a permis de préciser la dimension de Pluton : Diamètre 2370 km

<https://science.nasa.gov/mission/new-horizons/>



CHARON : SATELLITE DE PLUTON



PLUTON / NEW HORIZONS



Les canaux gelés du pôle nord de Pluton montrant la diversité géologique de cette planète



NEW HORIZONS : DERNIÈRE PHOTO DE PLUTON

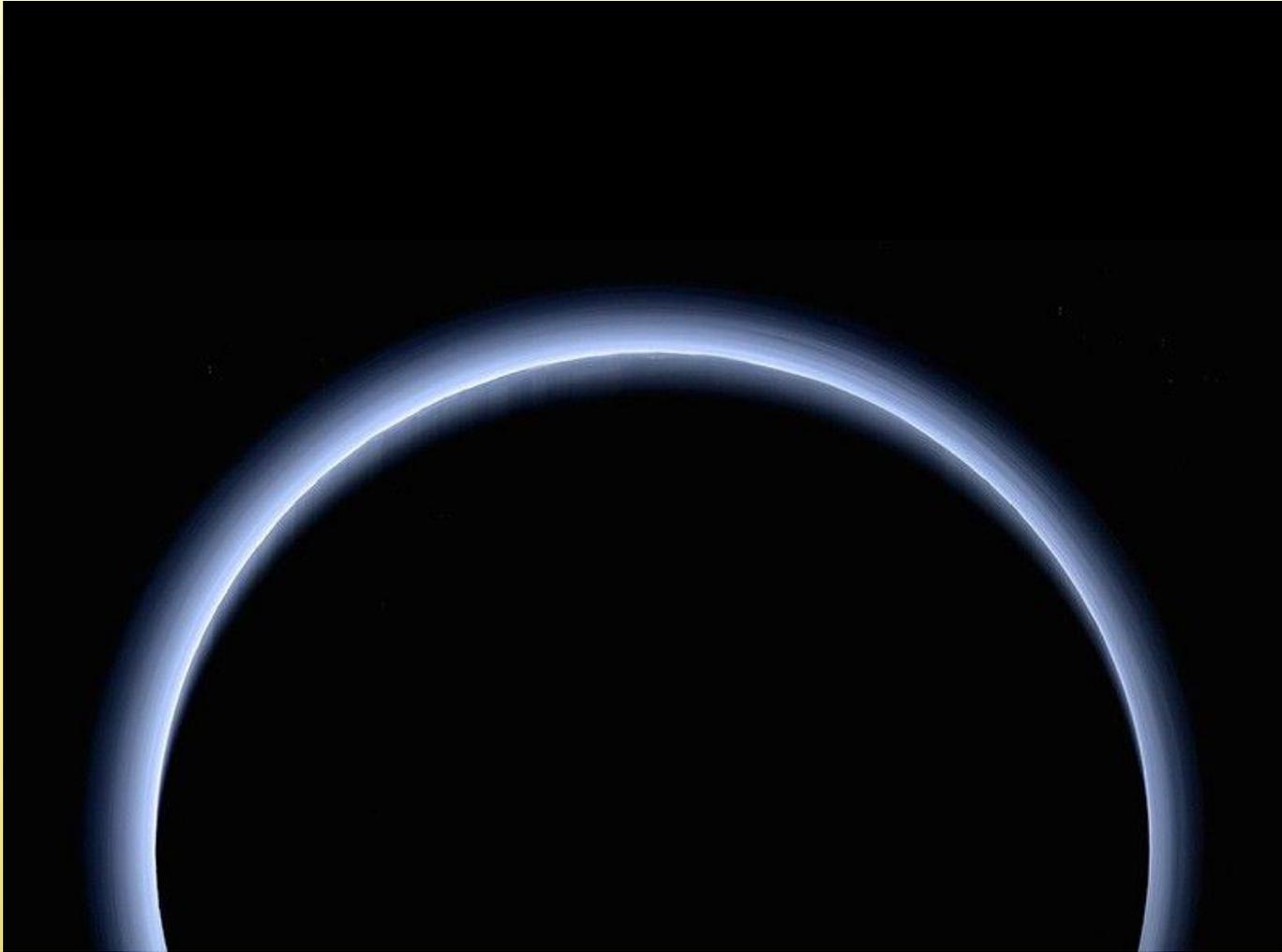


Photo prise à 200 000 km de distance

Une photo prise au moment de l'occultation du Soleil par Pluton a permis de mettre en évidence la présence de brume jusqu'à une altitude de 130km, bien au-dessus de ce qui était attendu (30km)



NEW HORIZONS : ARROKOTH - OBJET DE LA CEINTURE DE KUIPER



Dans la ceinture de Kuiper
situé à 44 ua du soleil,
(486958) Arrokoth, 'petit corps
binaire à contact'. Longueur
maxi 35 km

Photo prise à 6700km le 1^{er}
janvier 2019, soit 3 ans et demi
après le survol de Pluton

Au-delà de 2019 , la NASA n'a pas trouvé de nouvelle cible intéressante sur la trajectoire. En 2023, il est décidé de laisser la sonde continuer en ligne droite.

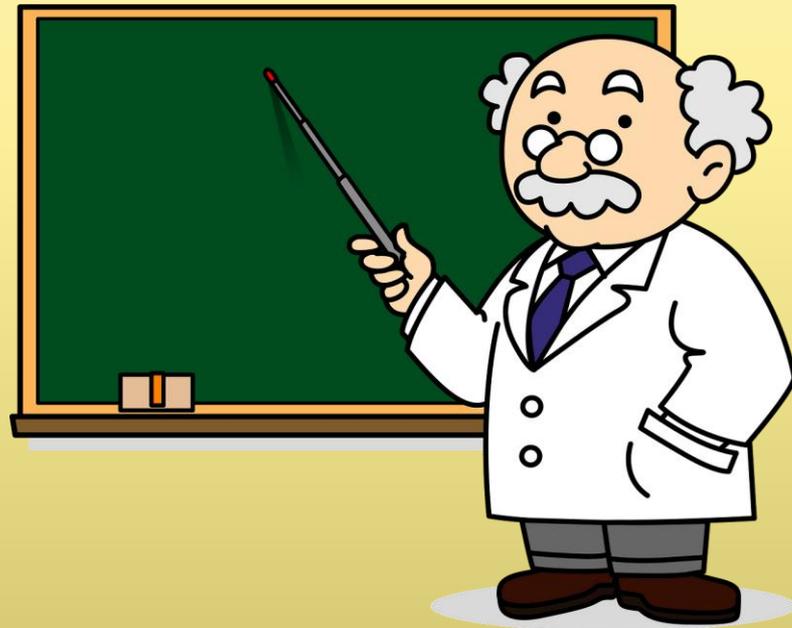


ARROKOTH OBJET DE LA CEINTURE DE KUIPER



Alan Stern, planétologue, responsable projet 'New Horizons'

- *"We've never seen anything like this anywhere in the solar system," said Principal Investigator Dr. Alan Stern, of the Southwest Research Institute in Boulder, Colorado. "It is sending the planetary science community back to the drawing board to understand how planetesimals – the building blocks of the planets – form." Dr. Stern - 2019*



ET APRÈS ...

- Un projet bien avancé prévu pour 2028 : 'DESTINY+' par l'agence japonaise JAXA, cible : astéroïde **(3200) Phaéton**
- Objectif : Examiner les poussières cosmiques qui constituent une source de matière organique pour la Terre. Survol de Phaéton et examen du processus d'éjection de poussières de cet astéroïde qui est accompagné de météores 'les Géminides'

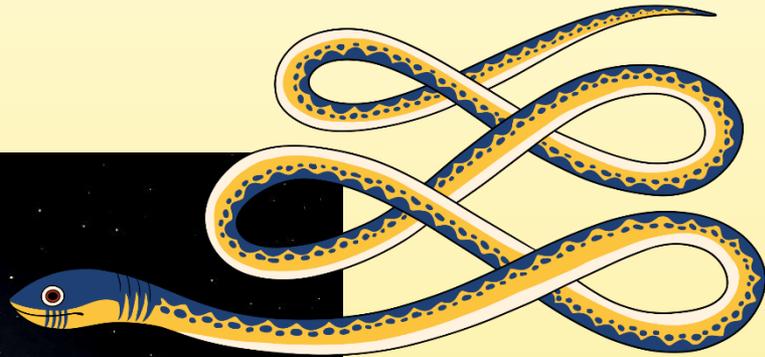


Developing | **Deep Space Exploration Technology
Demonstrator DESTINY+**

DESTINY+ is a science and technology demonstration mission to asteroid (3200) Phaethon, the parent body of the Geminids meteor shower. It will explore the asteroid during a flyby, and conduct scientific observations of cosmic dust, which is considered to be a source of the organic matter on Earth. This mission will demonstrate technologies that will enable future low-cost and high-frequency deep space exploration.



ET SURTOUT UN ASTÉROÏDE GÉOCROISEUR MENAÇANT : (99942) APOPHIS !



Apophis – Dieu égyptien du chaos

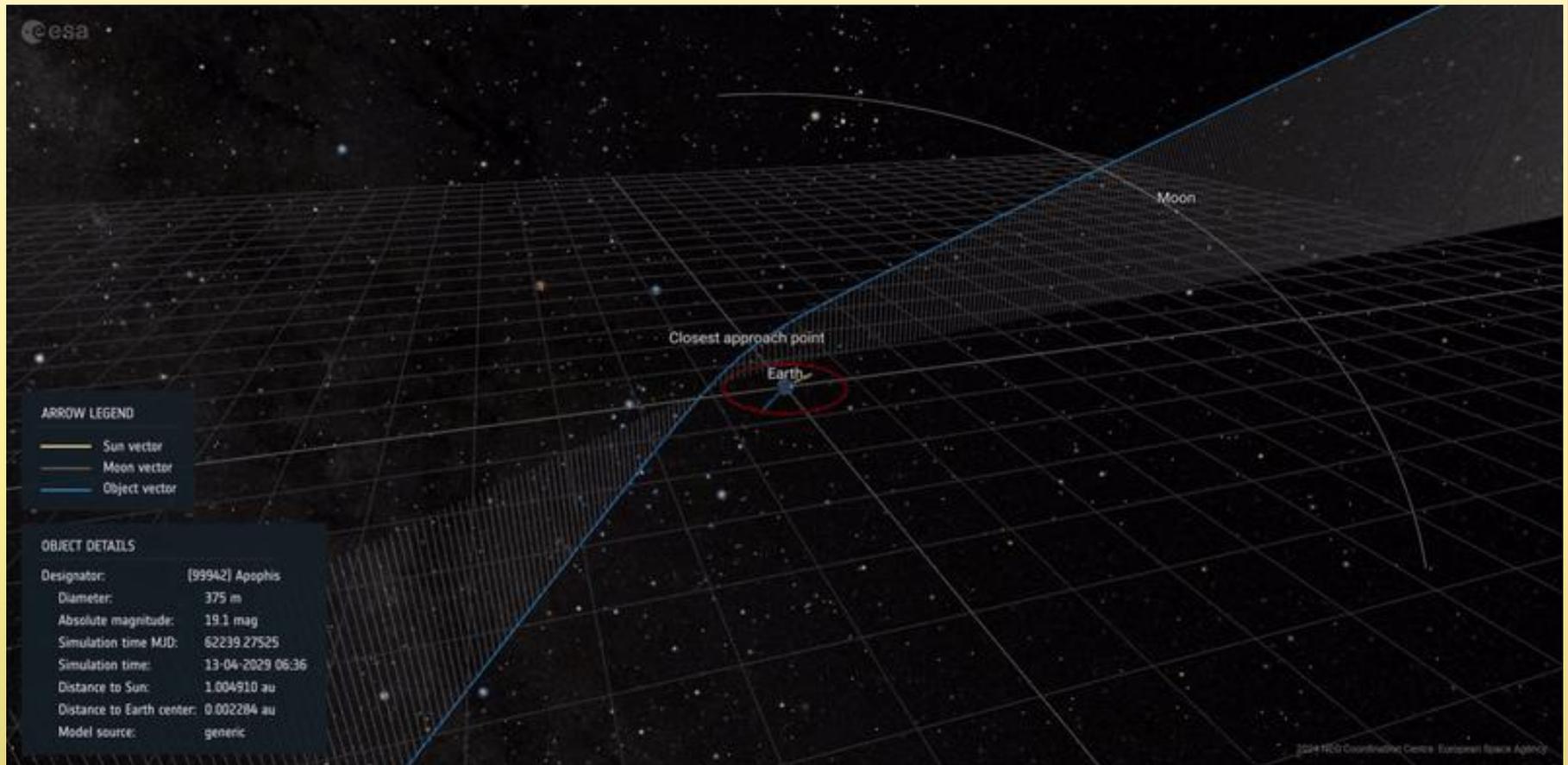
Vue d'artiste d'Apophis.
Dimension 325 m.
Révolution env. 373 jours

Le vendredi 13 avril 2029, **(99942) Apophis**, dans son orbite elliptique autour du soleil, passera à environ 31 600 km de la Terre ! Cette approche va dévier sa trajectoire.

Nota : les satellites géostationnaires sont à une altitude de 36 000km



(99942) APOPHIS : ANIMATION TRAJECTOIRE DU 13 AVRIL 2029



(99942) APOPHIS : MISSIONS SPATIALES

- **NASA** : la sonde OSIRIS REX a visité, prélevé des échantillons de l'astéroïde géocroiseur Bénou en 2020, largué sur Terre ces échantillons en 2023. La quantité d'ergol fut suffisante pour accomplir une nouvelle mission : se placer en orbite autour d'**Apophis** quelques jours après son approche de la Terre.



(99942) APOPHIS : MISSIONS SPATIALES

- **ESA** :Projet RAMSES (Rapid Apophis Mission for Space Safety) en attente d'approbation finale en 2025
 - Lancement d'une sonde début 2028 pour étudier l'astéroïde lors de son passage au plus près de la Terre .
 - Les chercheurs prévoient que les forces de marée terrestres vont modifier l'état de rotation et peut-être déclencher des secousses sur l'astéroïde. La sonde RAMSES pourra examiner ces changements



A dark space background filled with numerous small white stars. A bright, glowing star is positioned in the upper left quadrant, casting a soft, yellowish-green glow across the scene. In the bottom right corner, a portion of a dark, textured celestial body, possibly a planet or moon, is visible. The word "Fin" is centered in a white, serif font.

Fin

Prochain épisode : 'Les Astéroïdes'

