

Déroulement de l'examen

- écrit 30 juin 2025 à 9h15-12h15
- Pas de documents
- A priori: QCM + Questions en images + Exercice de réflexion.
- Importance d'une vision **globale** du sujet
- Développements techniques simplifiés
- On suppose les bases physiques connues

Chapitre 7

Systèmes Solaire et planétaires

-

Propriétés fondamentales des étoiles



Echelles non respectées !

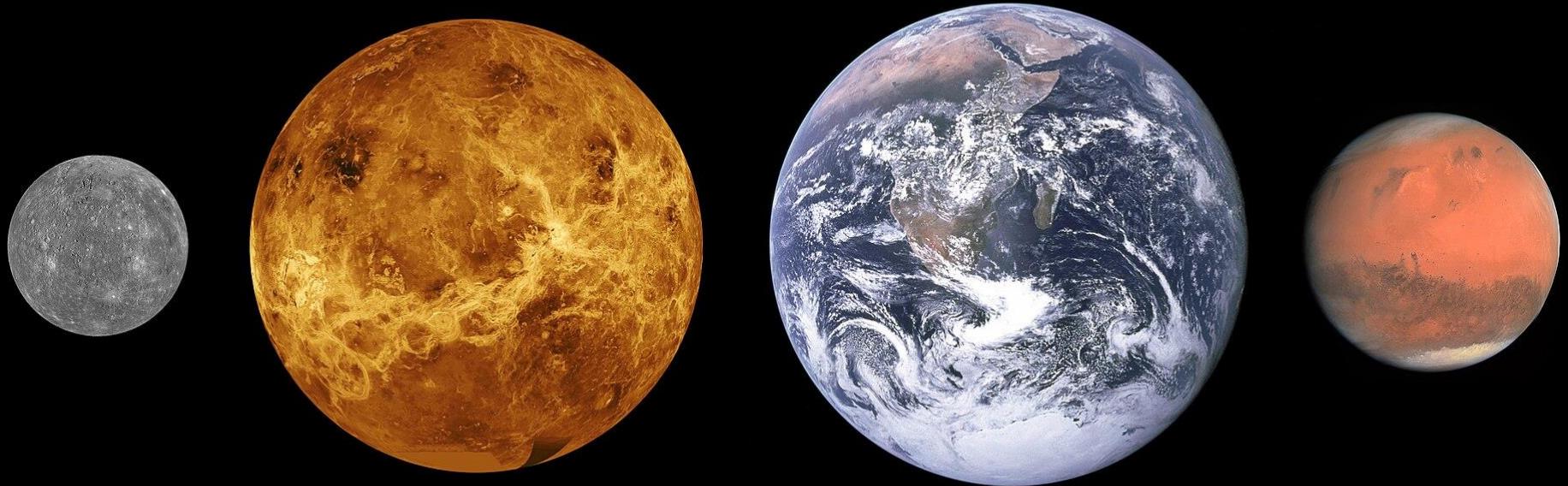
Taille relative respectée !
Mais pas la distance entre les objets!



	Demi-grand axe (au)	Excentricité orbitale	Période de révolution (années)	Lunes connues
Mercure	0,387 099 3	0,205 64	0,240 846 7	0
Vénus	0,723 336	0,006 78	0,615 197 26	0
Terre	1,000 003	0,016 71	1,000 017 4	1
Mars	1,523 71	0,093 39	1,880 815 8	2
Cérès (planète naine)	2,765 8	0,078	4,599 84	0
Jupiter	5,202 9	0,048 4	11,862 615	79
Saturne	9,537	0,053 9	29,447 498	82
Uranus	19,189	0,047 26	84,016 846	27
Neptune	30,069 9	0,008 59	164,791 32	14
Pluton (planète naine)	39,482 1	0,248 83	248,020 8	5
Hauméa (planète naine)	43,34	0,189	285,4	2
Makémaké (planète naine)	45,79	0,159	309,9	1
Éris (planète naine)	67,67	0,441 77	557,2	1

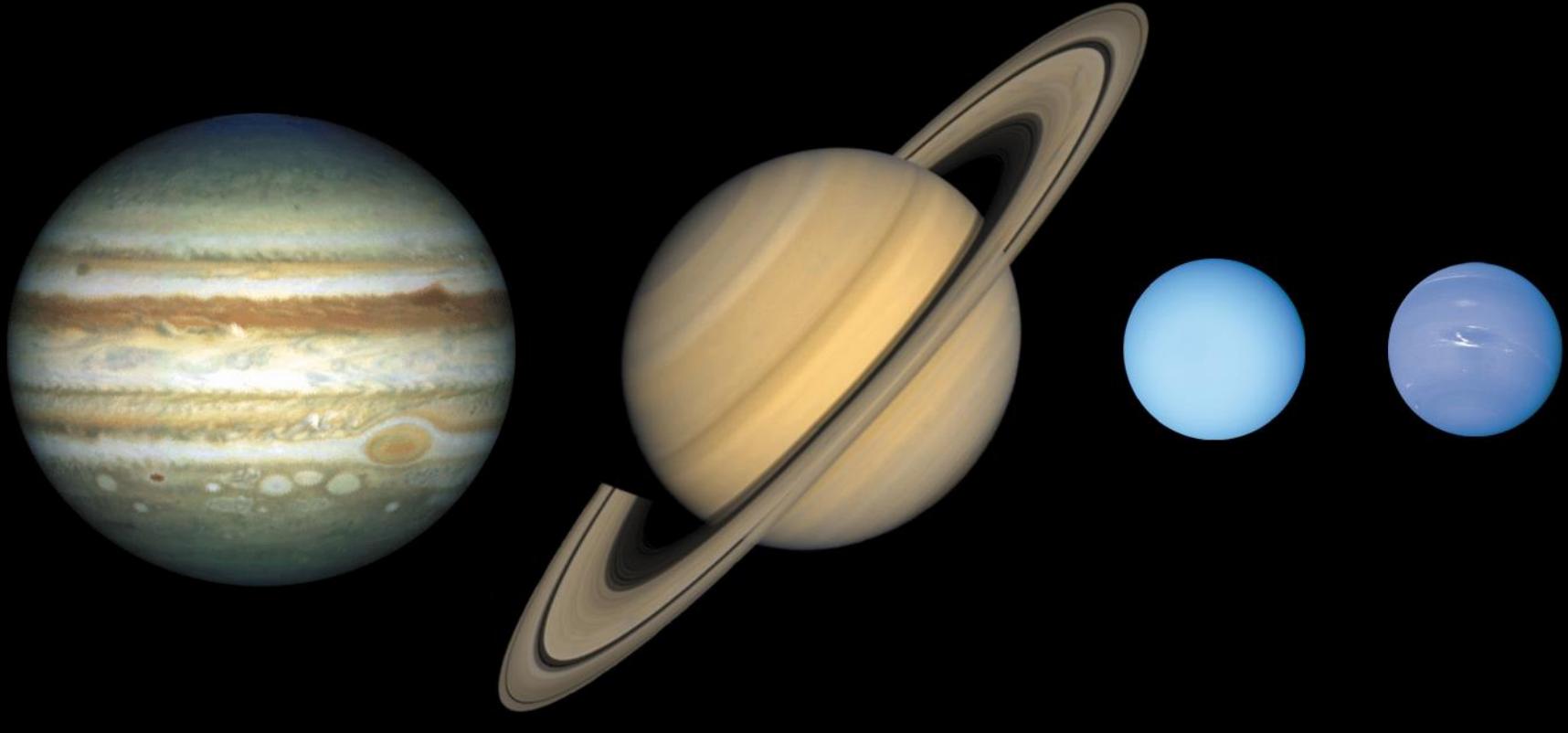
Données de l'université de Princeton par rapport à l'écliptique J2000.0 et au barycentre du Système solaire avec 1 ua = $1,495\,978\,707\,00 \times 10^{11}$ m et 1 année = 365,25 jours = 31 557 600 secondes³⁶¹.

Planètes Rocheuses



Planète	Rayon équatorial	Masse	Gravité	Inclinaison de l'axe
Mercure ⁹⁸	2 439,7 km (0,383 Terre)	$3,301 \times 10^{23}$ kg (0,055 Terre)	3,70 m/s ² (0,378 g)	0,03°
Vénus ¹⁰⁶	6 051,8 km (0,95 Terre)	$4,867\ 5 \times 10^{24}$ kg (0,815 Terre)	8,87 m/s ² (0,907 g)	177,36° ^e
Terre ¹¹³	6 378,137 km	$5,972\ 4 \times 10^{24}$ kg	9,780 m/s ² (0,997 32 g)	23,44°
Mars ¹²³	3 396,2 km (0,532 Terre)	$6,441\ 71 \times 10^{23}$ kg (0,107 Terre)	3,69 m/s ² (0,377 g)	25,19°

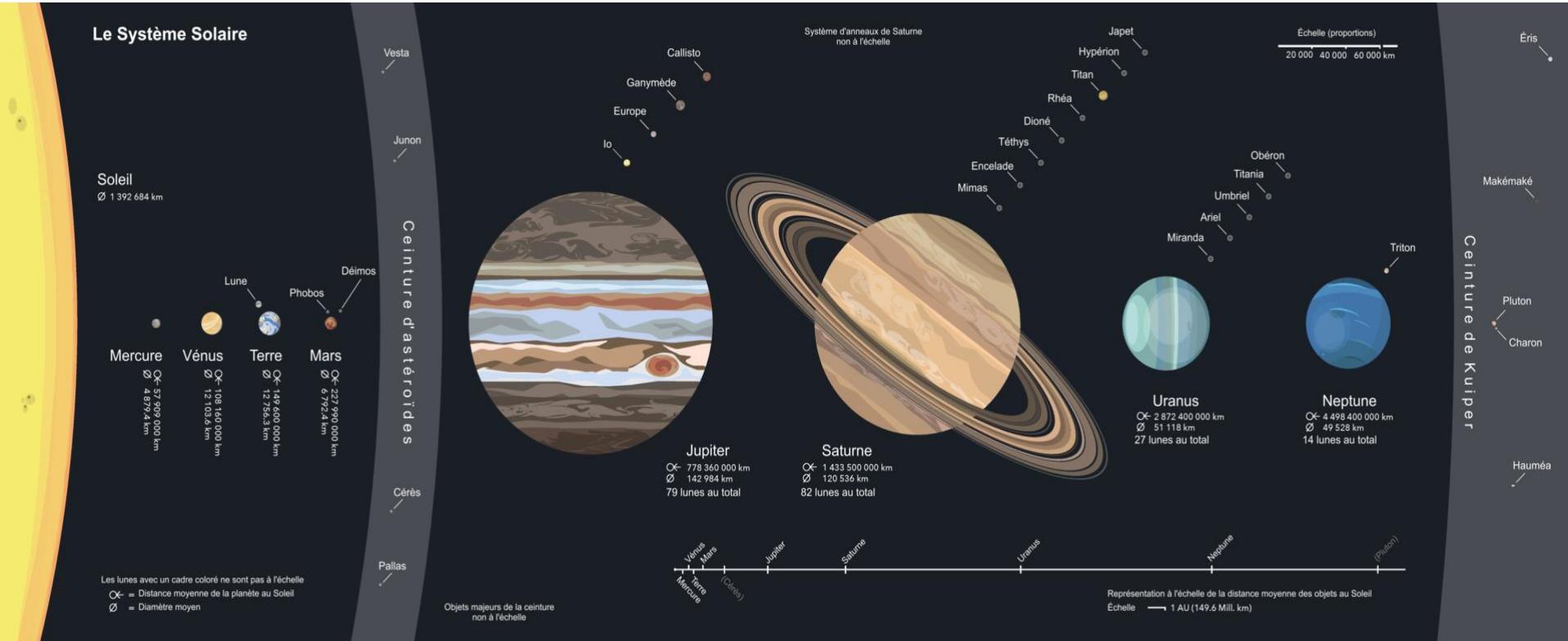
Planètes Gazeuses

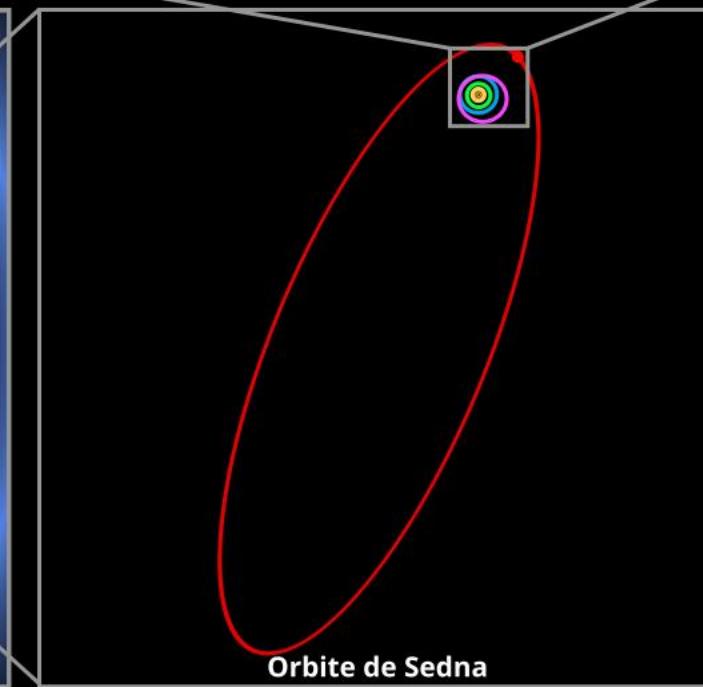
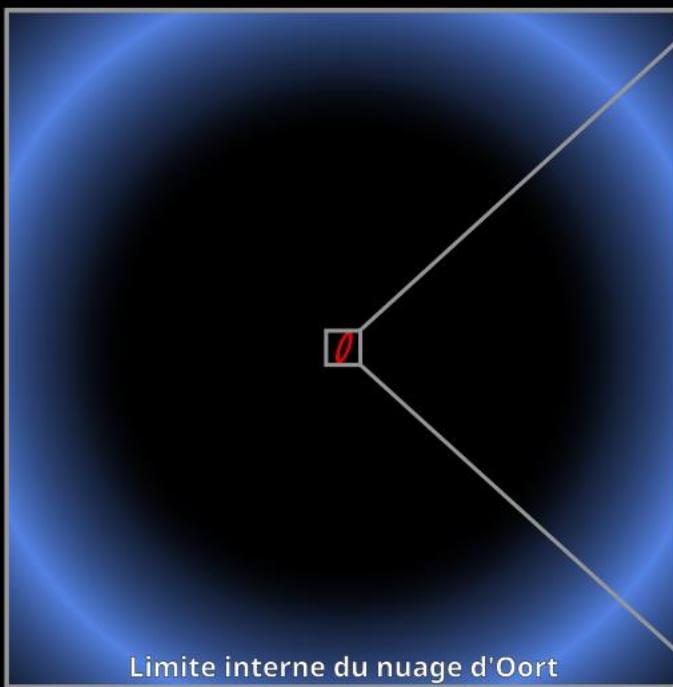
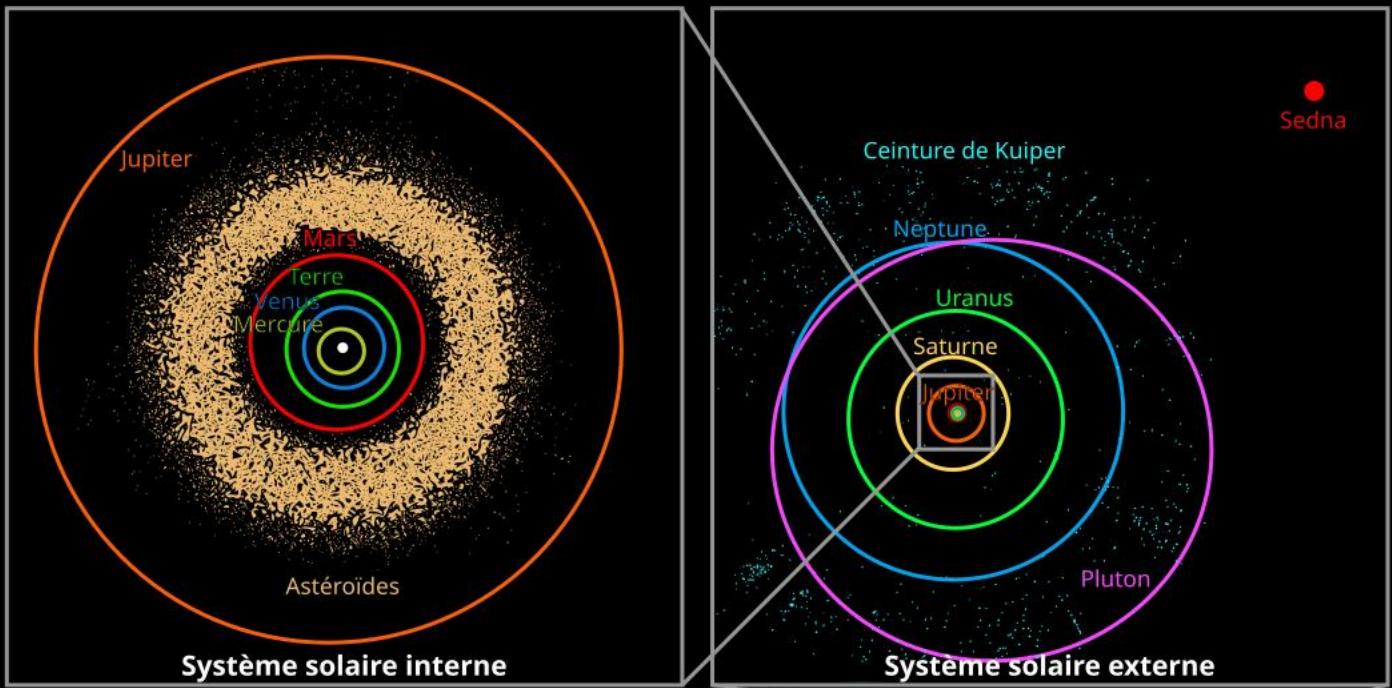


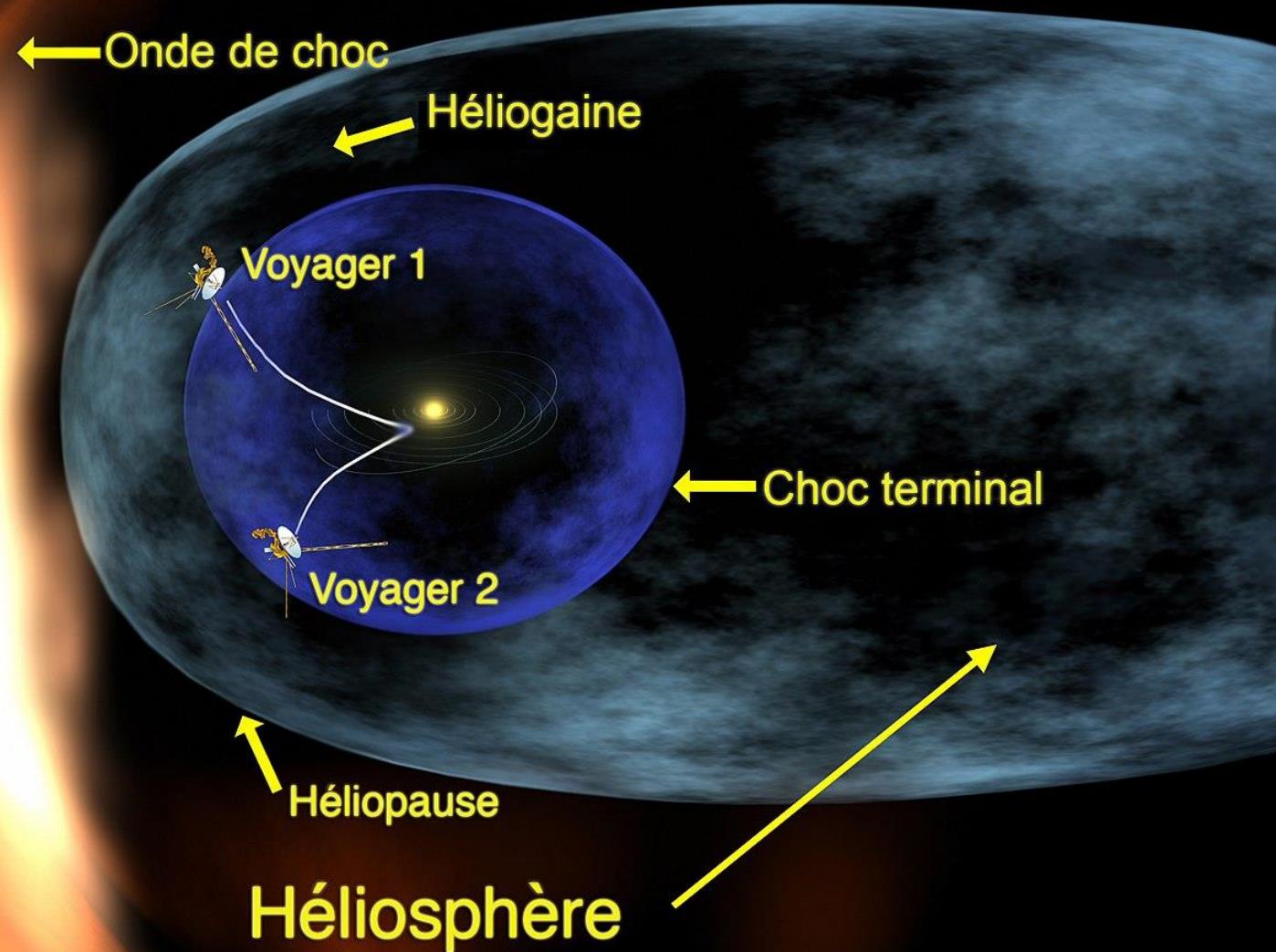
Planète	Rayon équatorial ^g	Masse	Gravité de surface ^h	Inclinaison de l'axe
Jupiter ⁴⁰	71 492 km (11,209 Terres)	$1\ 898,19 \times 10^{24}$ kg (317,83 Terres)	23,12 m/s ² (2,364 g)	3,13°
Saturne ⁴¹	60 268 km (9,449 Terres)	$568,34 \times 10^{24}$ kg (95,16 Terres)	8,96 m/s ² (0,916 g)	26,73°
Uranus ¹⁷³	25 559 km (4,007 Terres)	$86,813 \times 10^{24}$ kg (14,54 Terres)	8,69 m/s ² (0,889 g)	97,77° ⁱ
Neptune ¹⁸⁰	24 764 km (3,883 Terres)	$102,413 \times 10^{24}$ kg (17,15 Terres)	11,00 m/s ² (1,12 g)	28,32°

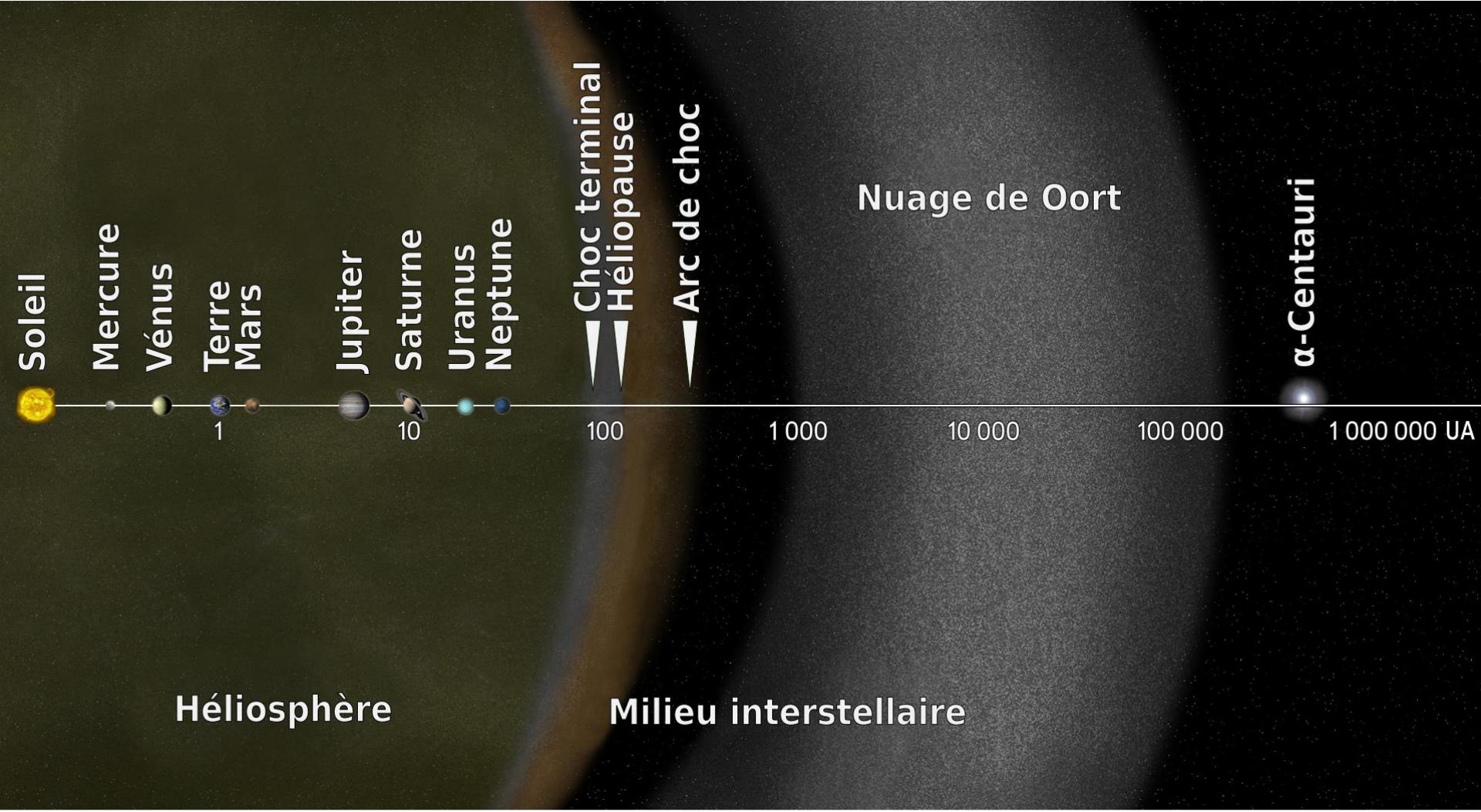
Pluton par
la sonde
New
Horizon







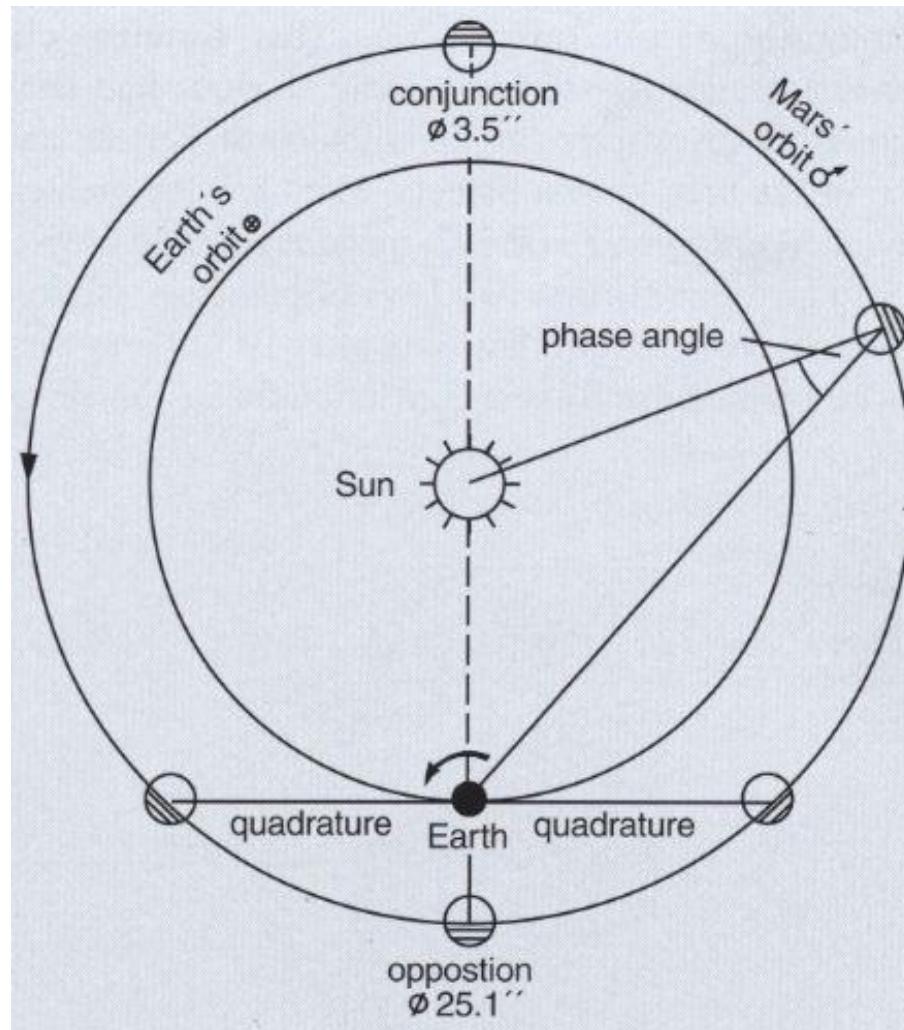




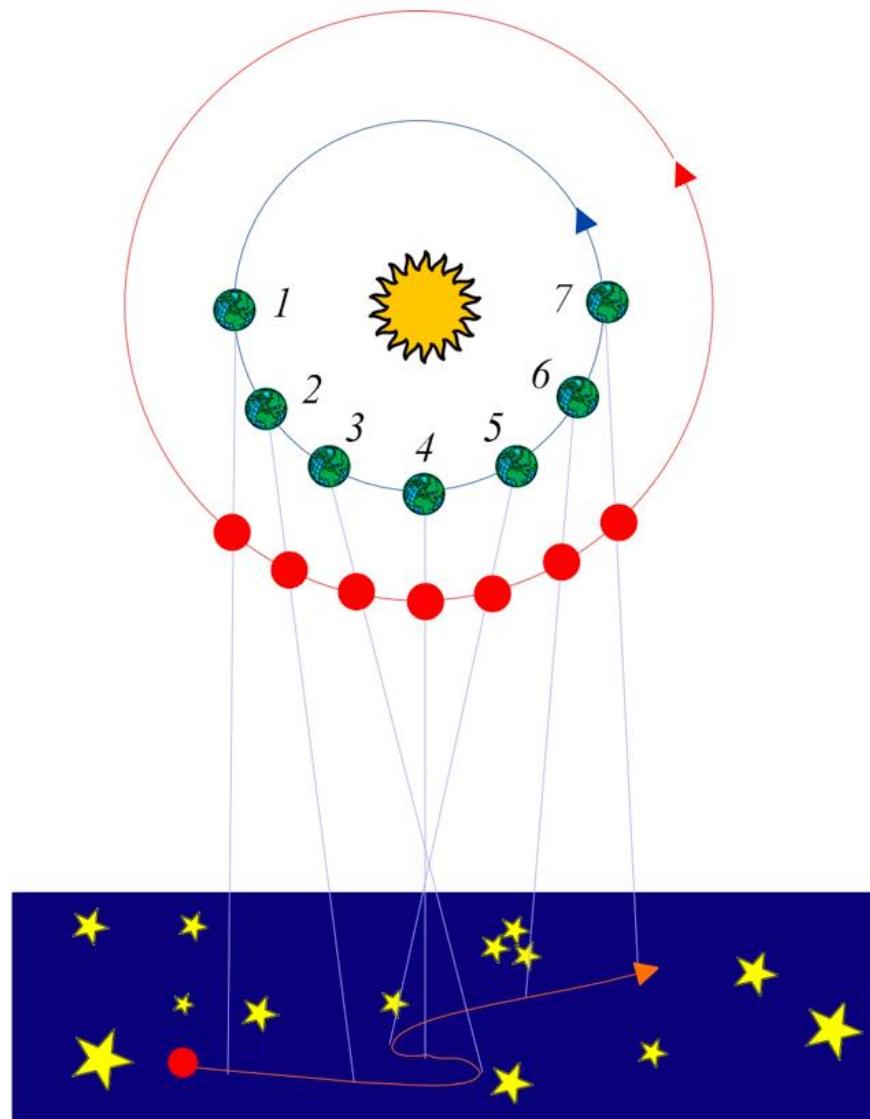
Exemple des phases de Vénus



Phénomène de phases



Mouvements planétaires

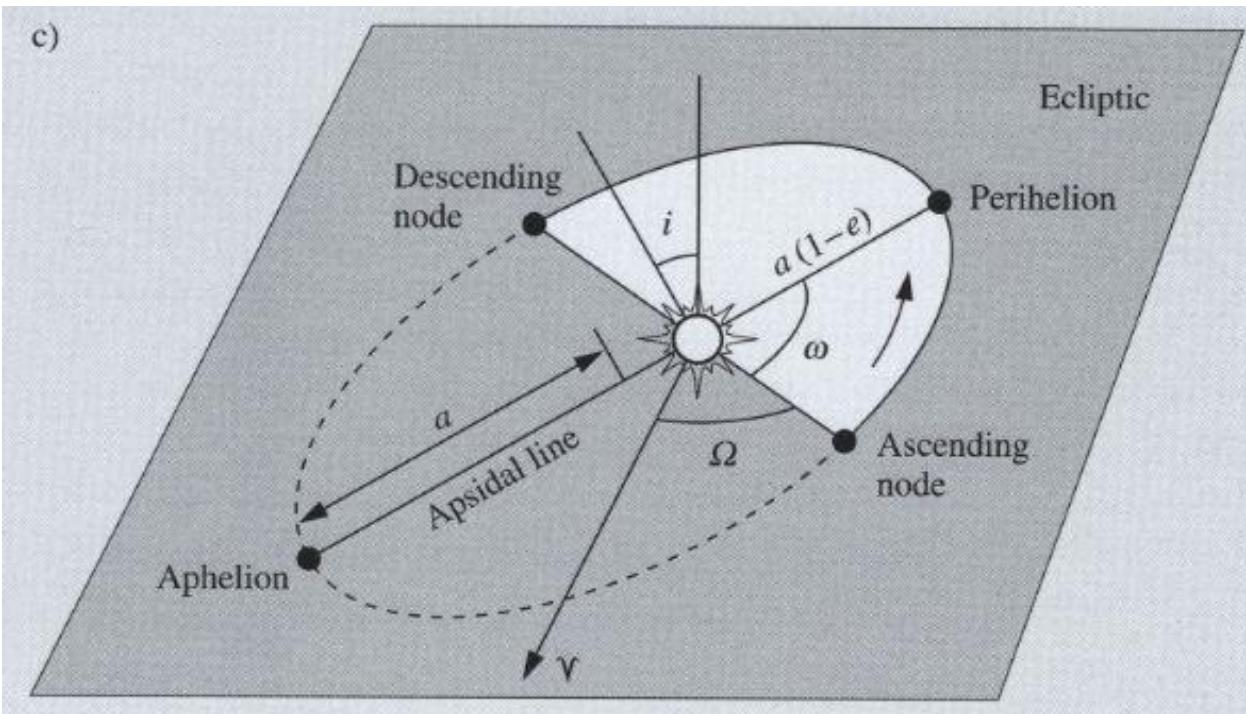


Mouvement rétrograde des planètes **extérieures**

Mouvements rétrograde de Mars



Mouvements planétaires



- Demi-grand axe a
- Excentricité $e^2 = 1 - b^2/a^2$
- Inclinaison du plan de l'orbite, i , par rapport à l'écliptique
- Longitude du nœud ascendant Ω
- Argument du périhélie ω
- Période de révolution P
- Instant de passage au périhélie t_0

Exploration « in-situ »

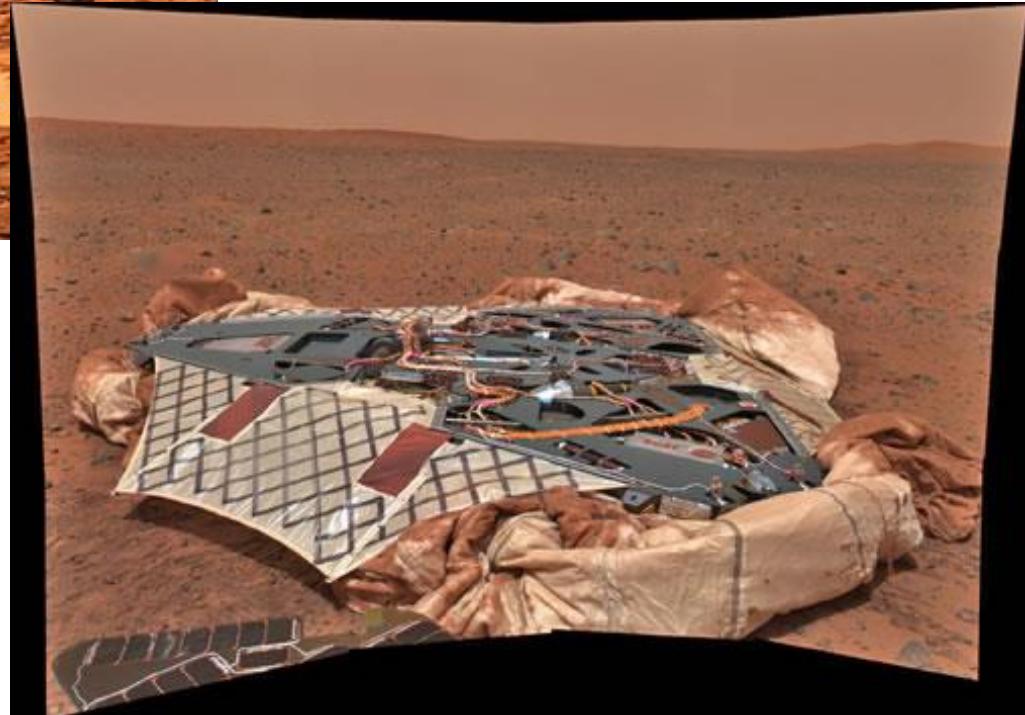
Exploration in-situ

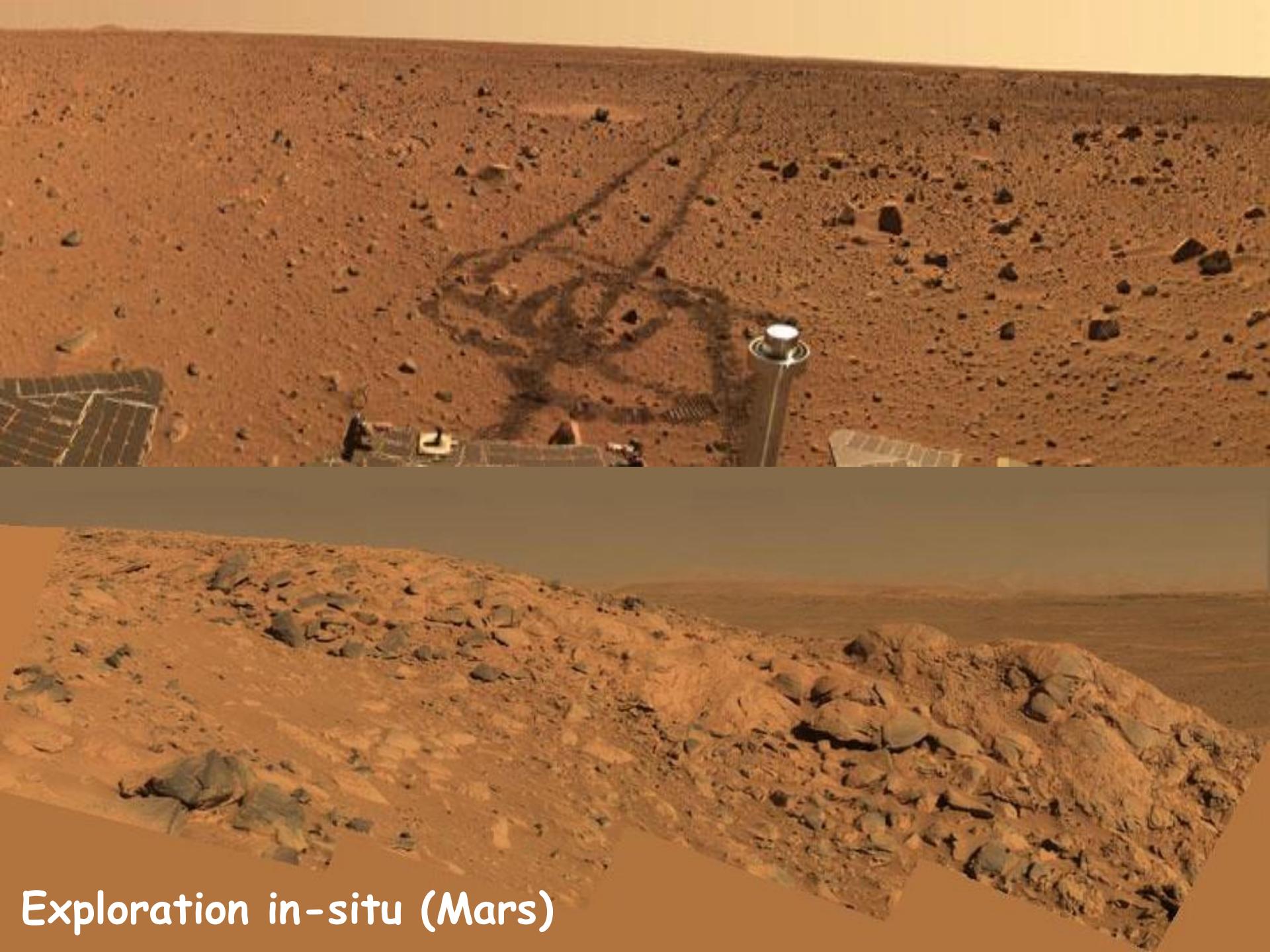


Mars vue par Mars-express (ESA)

Exploration in-situ

Rovers Opportunity & Spirit (Mars)

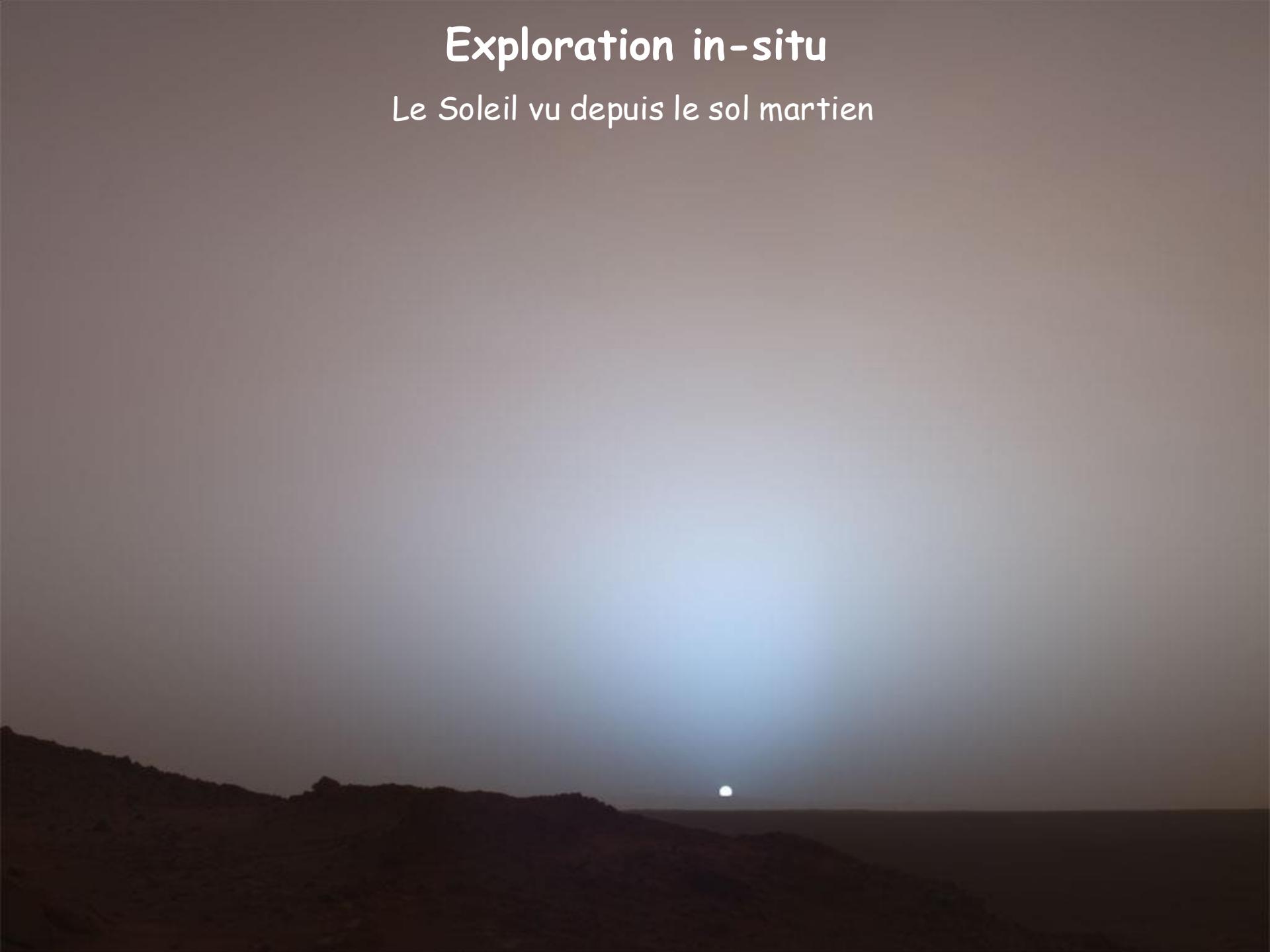




Exploration in-situ (Mars)

Exploration in-situ

Le Soleil vu depuis le sol martien



Exploration in-situ

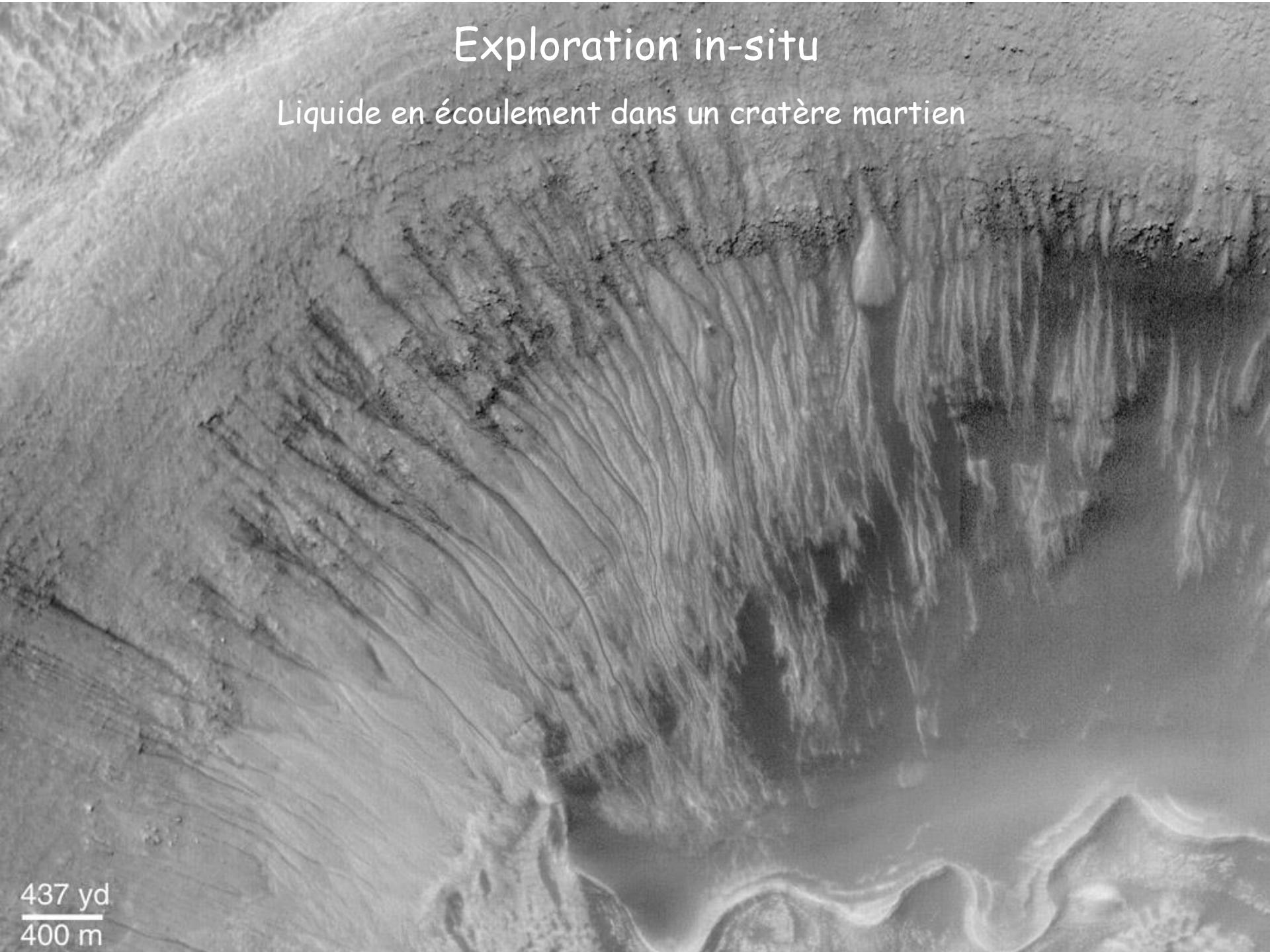


Mars-orbiter (NASA) et l'eau sur mars

Preuves spectroscopiques par
Mars-express (ESA)

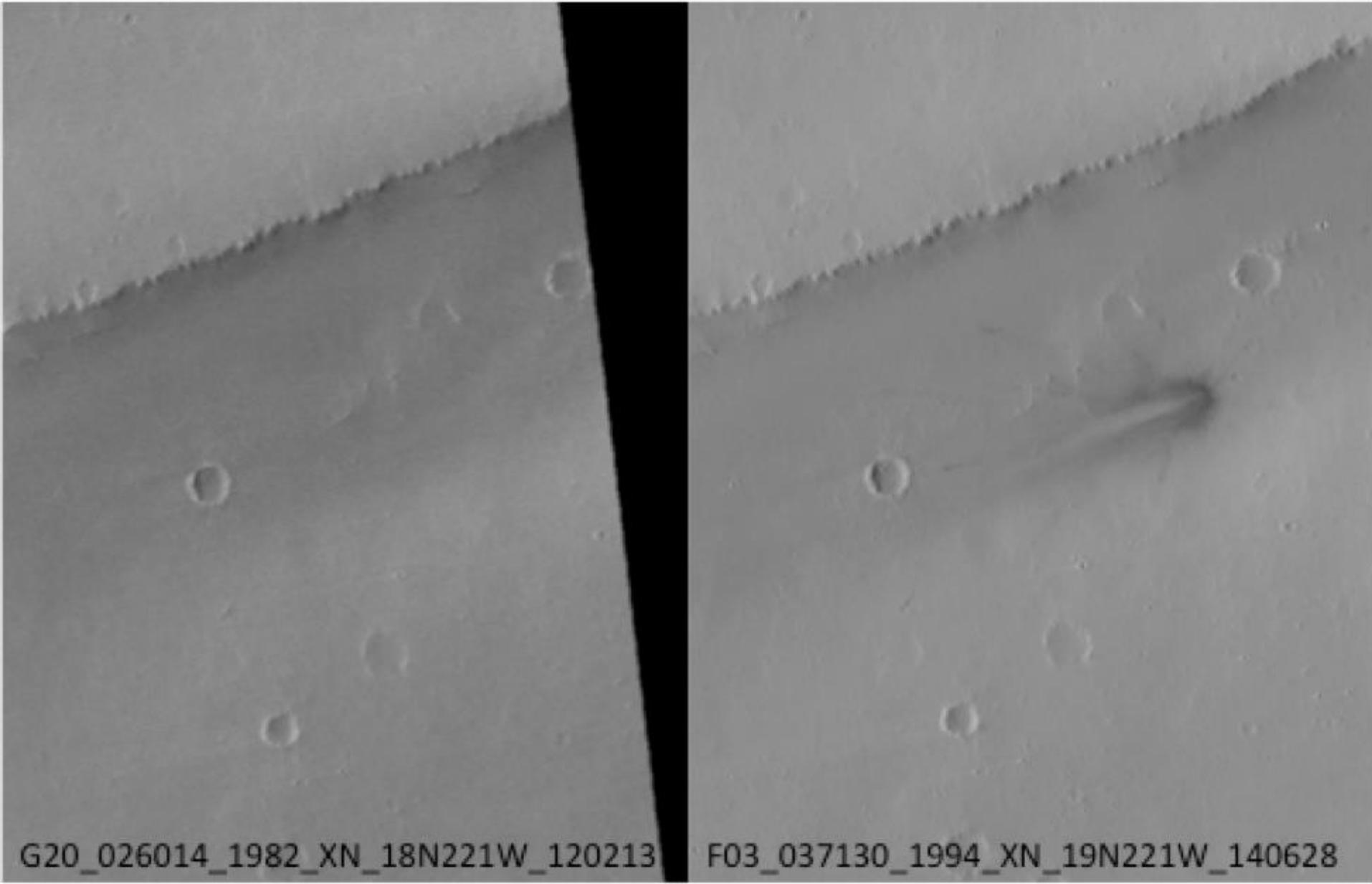
Exploration in-situ

Liquide en écoulement dans un cratère martien



437 yd
400 m

Bombardement martien



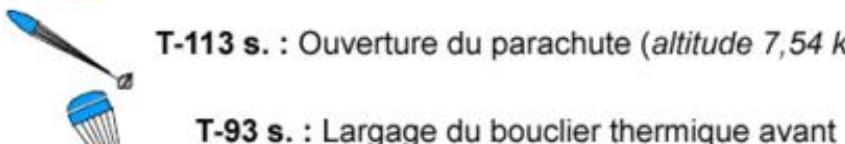
Missions Spirit & Opportunity

↑ T-91 à 77 min. : Modification de l'orientation pour préparer la rentrée atmosphérique

↓ T-21 min. : Largage de l'étage de croisière

→ T-6 min. : Rentrée atmosphérique (*altitude* : 120 km)

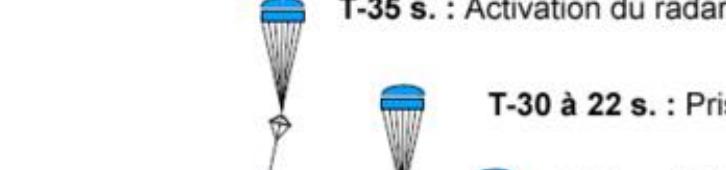
T-113 s. : Ouverture du parachute (*altitude* 7,54 km, *vitesse* mach 1,8)



T-93 s. : Largage du bouclier thermique avant



T-83 s. : Séparation atterrisseur



T-35 s. : Activation du radar altimètre (*altitude* 2,4 km)



T-30 à 22 s. : Prises de photo du terrain (*altitude* : 2 - 1,7 - 1,4 km)



T-8 s. : Déploiement des airbags (*altitude* 284 m.)



T-6 s. : Mise à feu des fusées d'atterrissement
(*altit.* 184 m, *vitesse* 82 km/h)



T-3 s. : Bride de retenue de l'atterrisseur coupée
(*altitude* 8,5 m.)



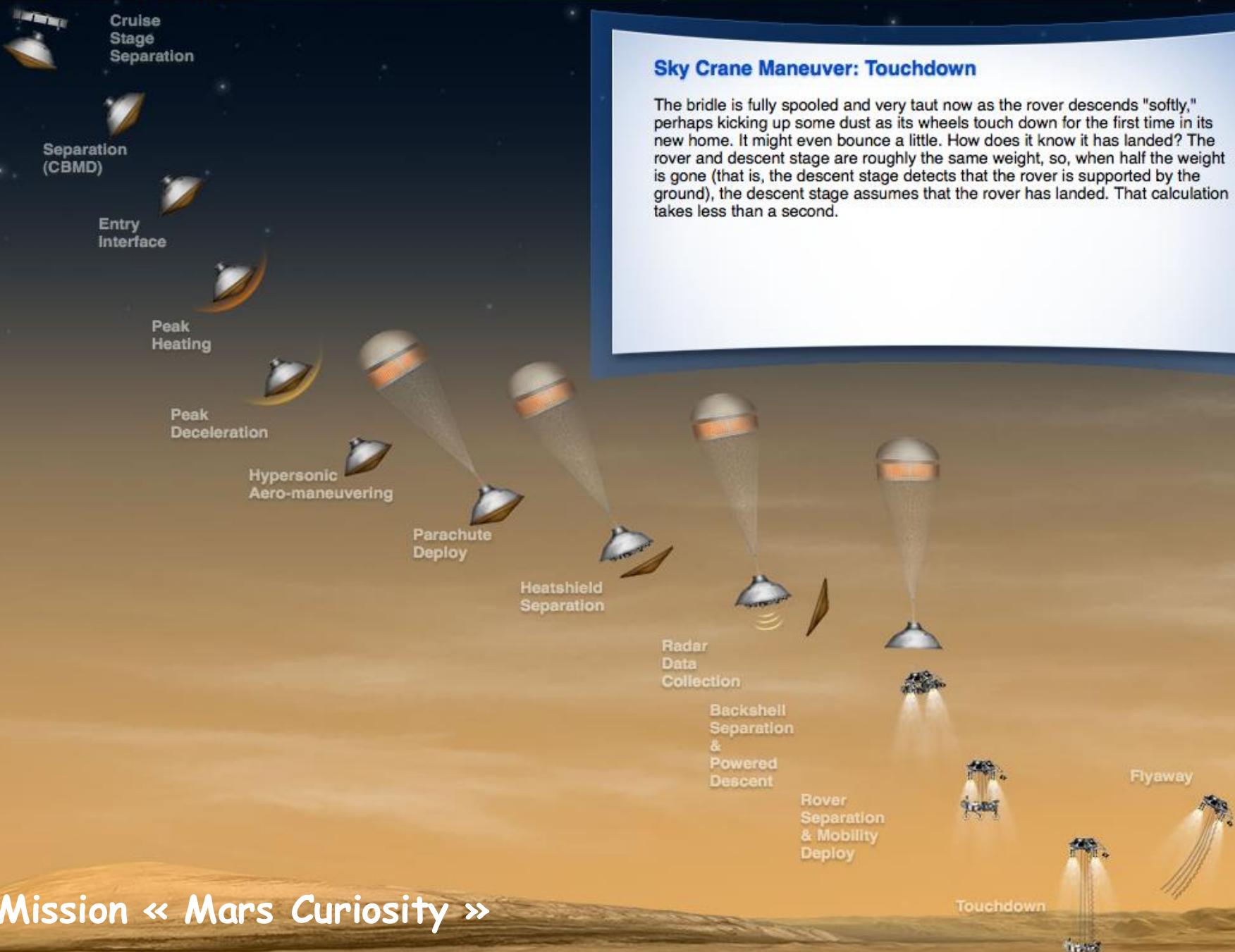
Rebonds Airbags T+96 min. : Ouverture dégonflés des pétales de l'atterrisseur



Immobilisation

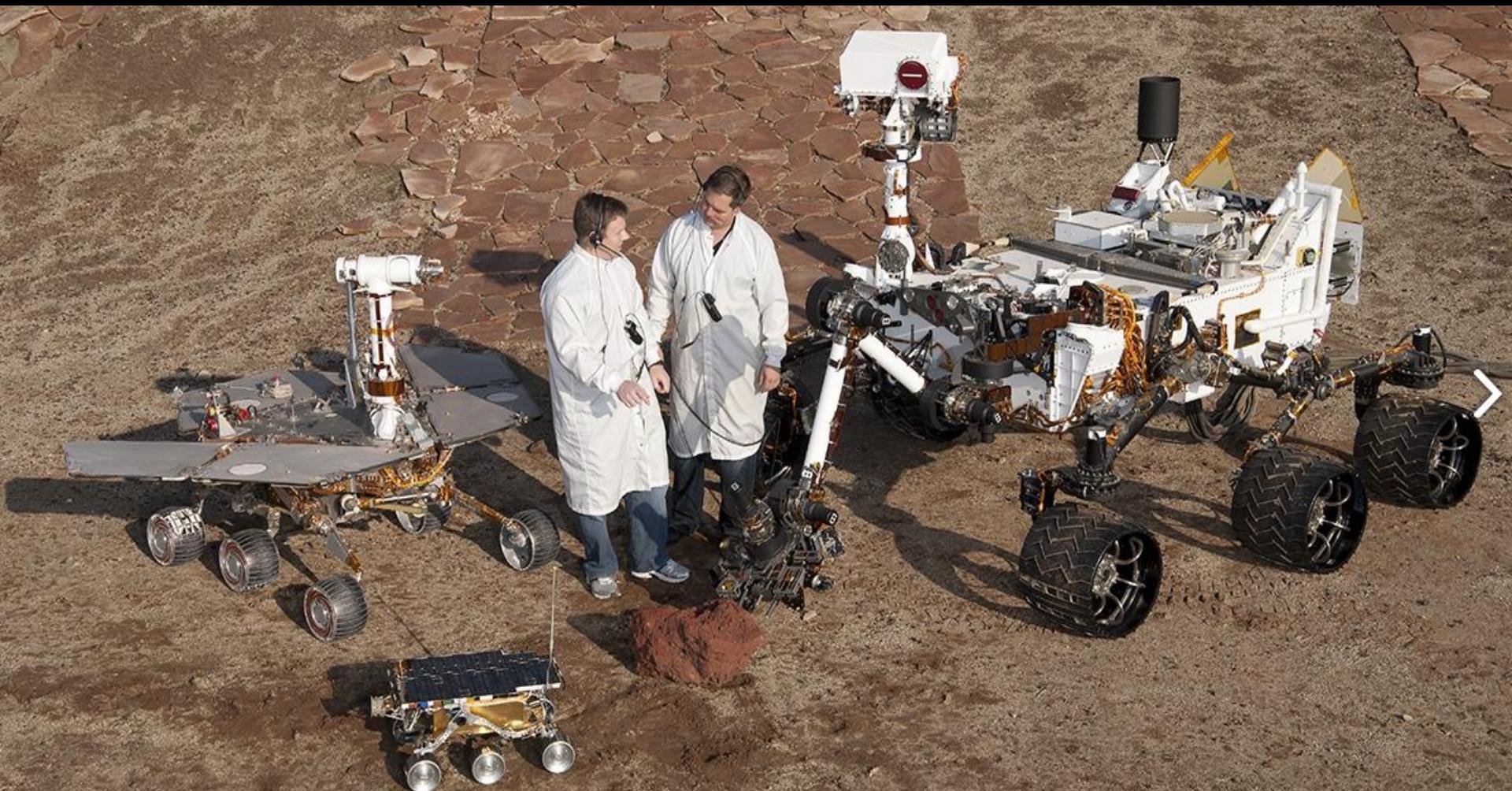
T+66 min. : Rétraction des airbags

How do I land on Mars?



Mission « Mars Curiosity »

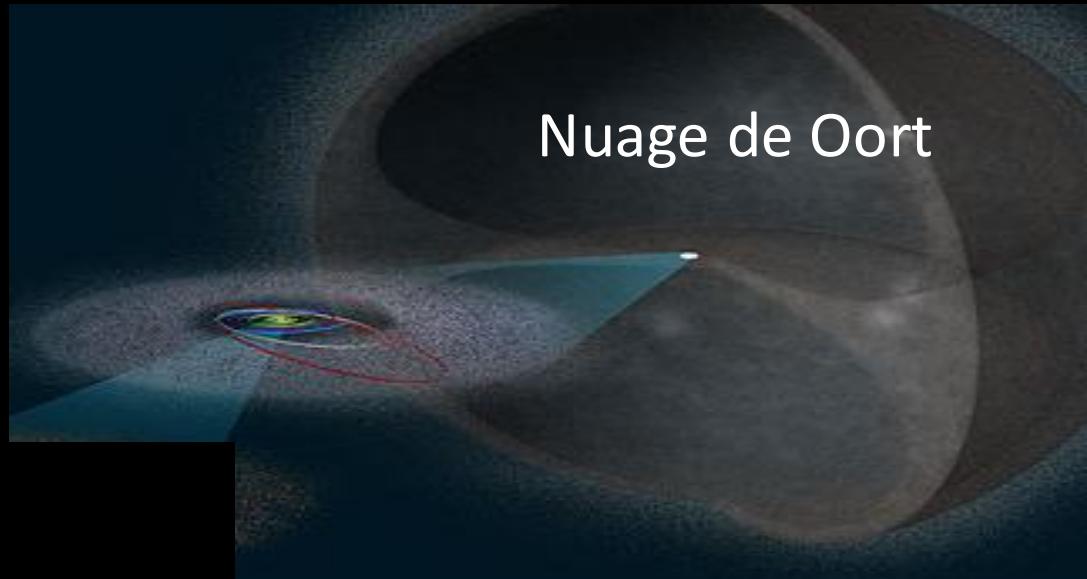
Mars polar lander - Spirit/Opportunity - Curiosity





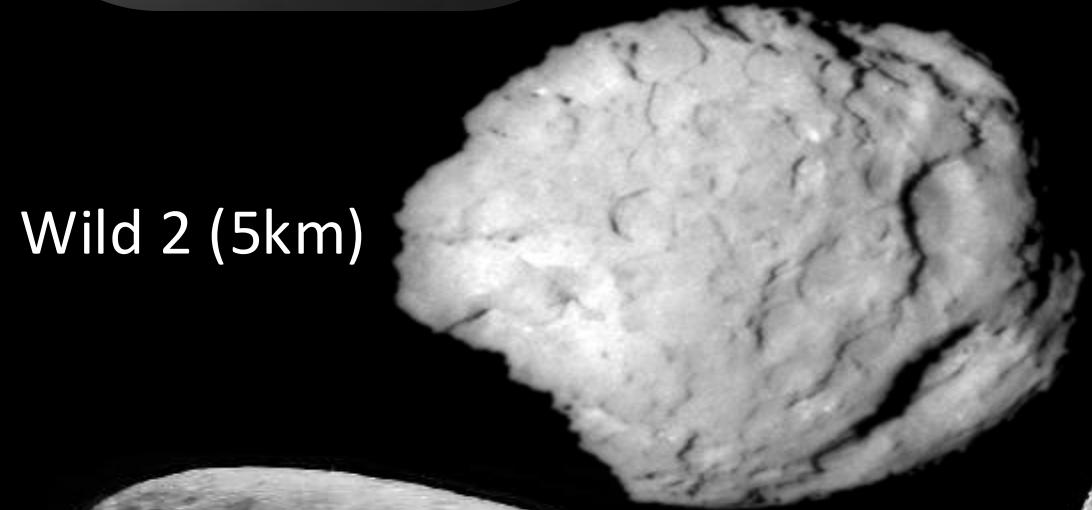
Les comètes et astéroïdes

Le système solaire extérieur





Halley
(10km)



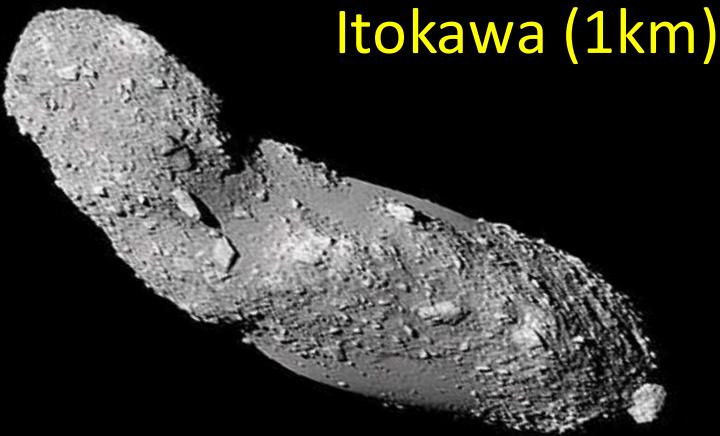
Wild 2 (5km)



Icarus (13km)



Gaspra (10km)



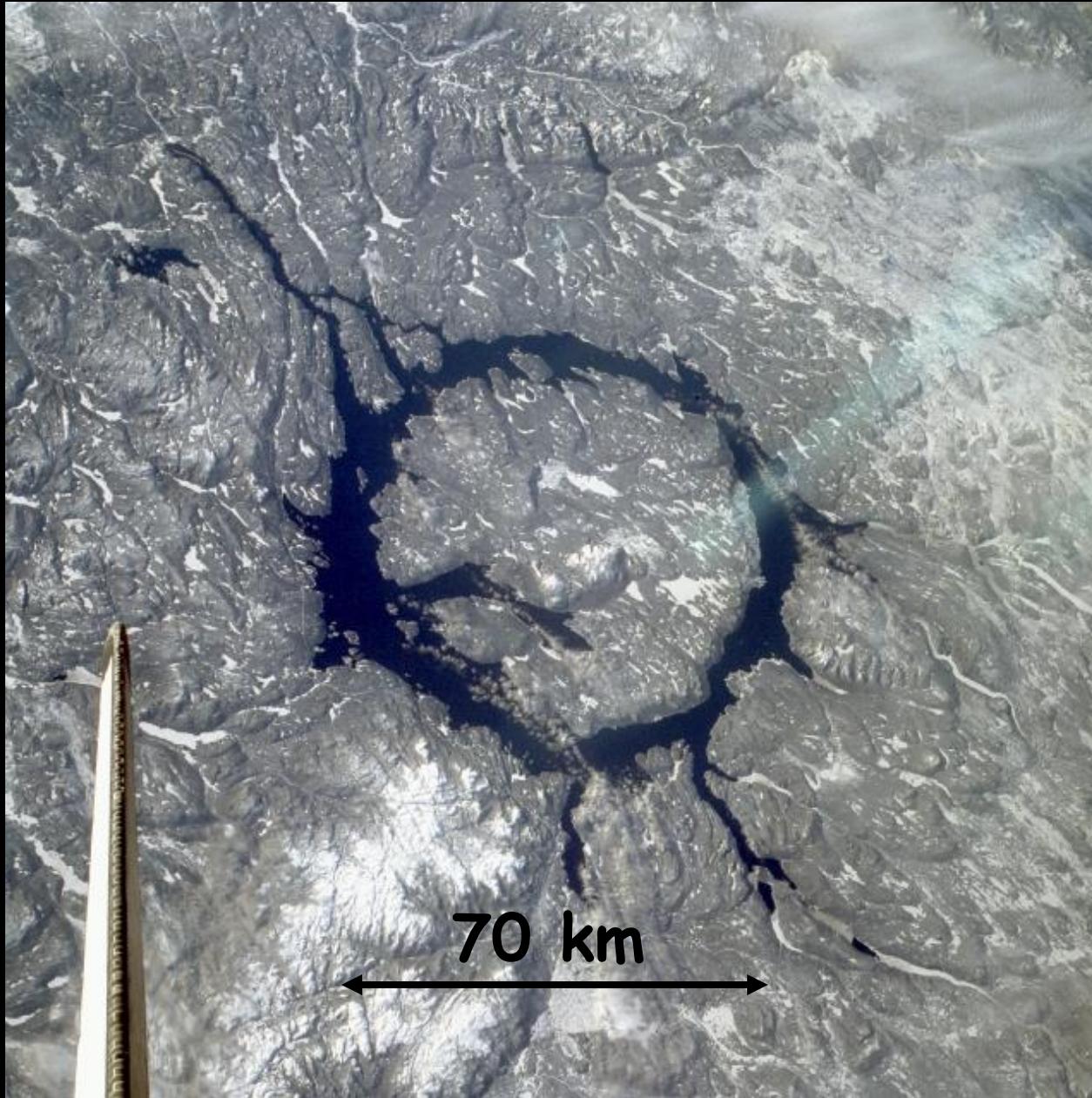
Itokawa (1km)

« Meteor crater » (Arizona, USA): 50000 ans

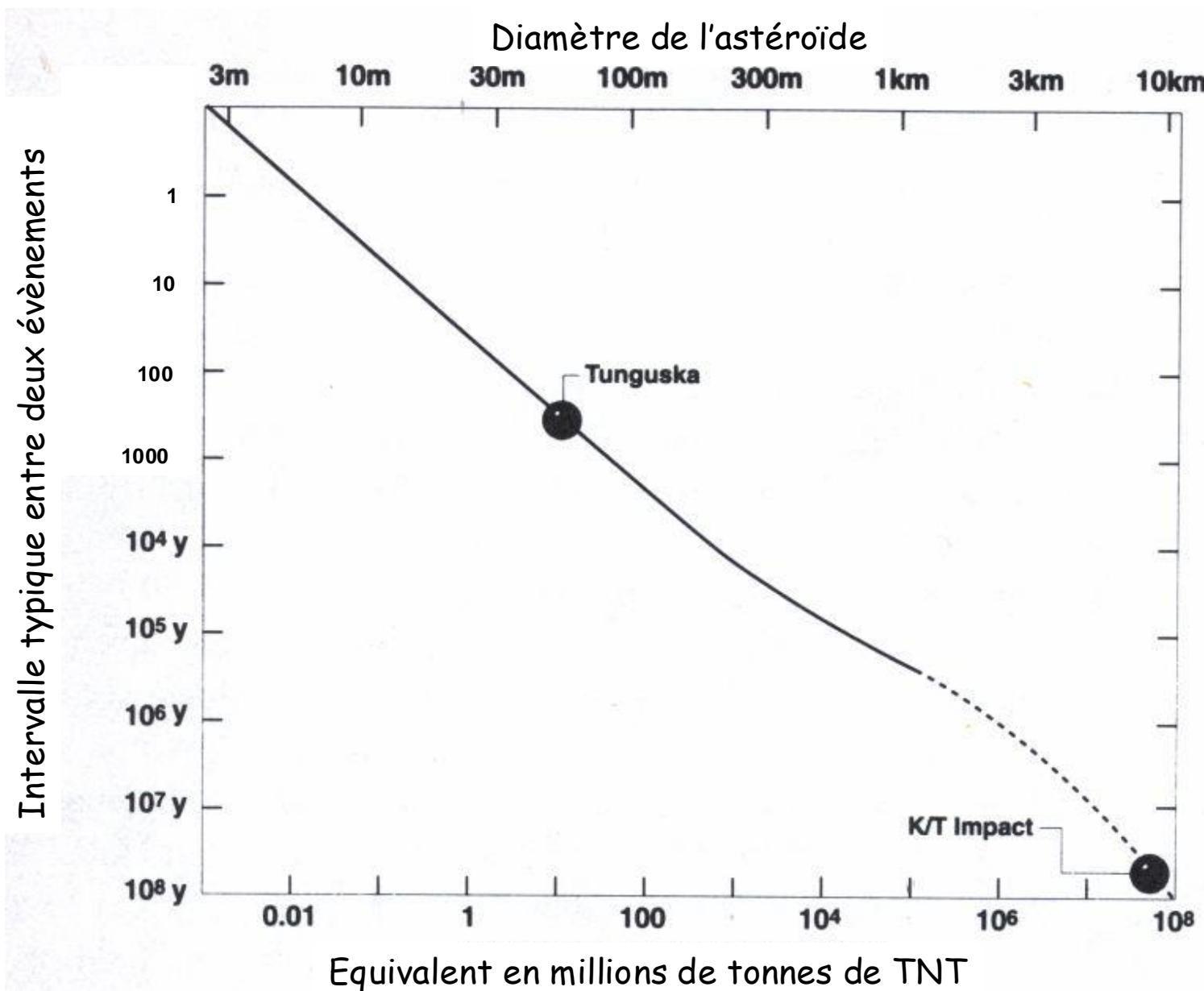


500 m

Cratère Manicouagan (Canada): 200 millions d'années

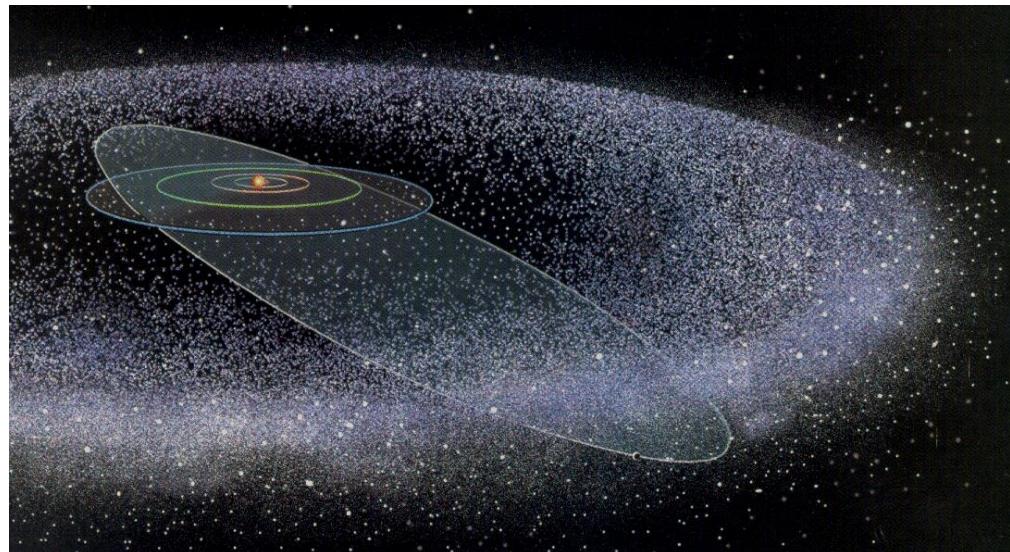


Fréquence des impacts atmosphériques

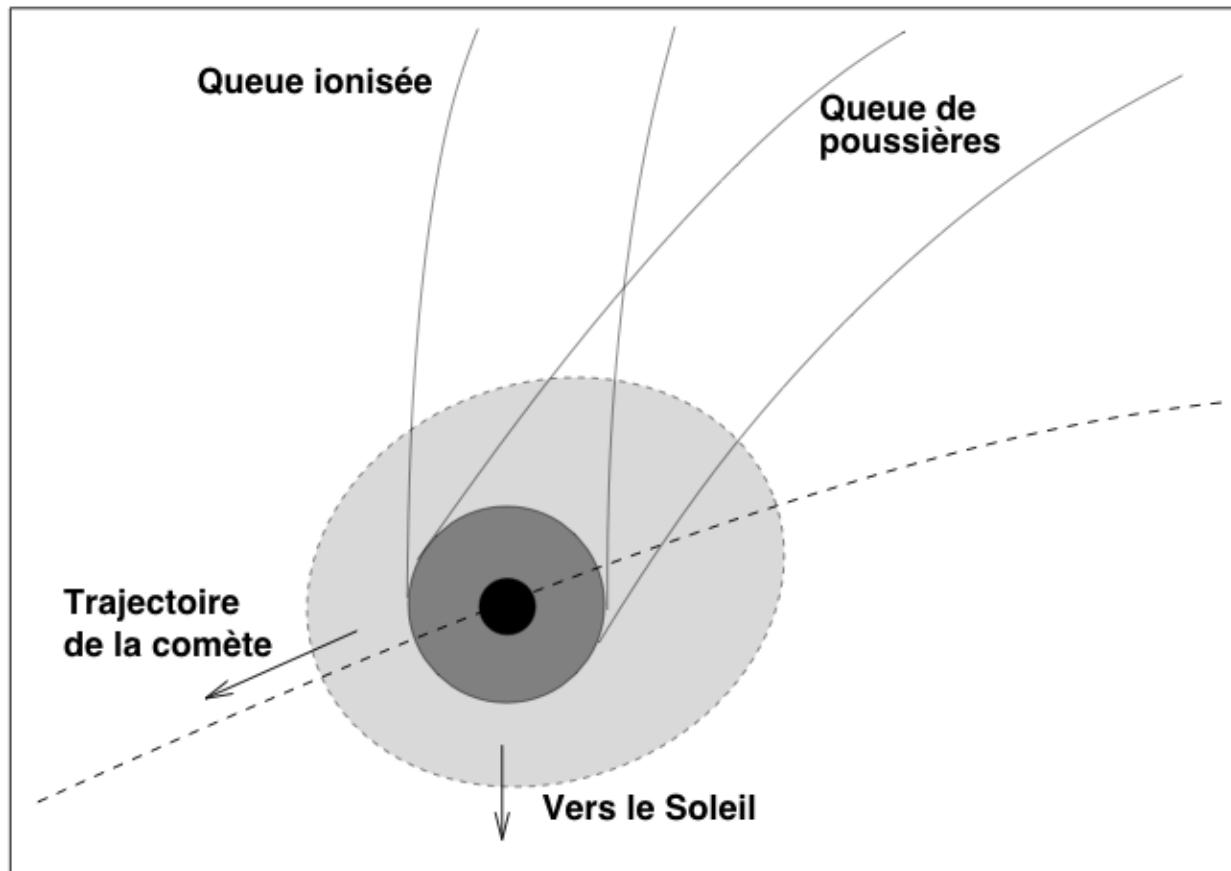


Les comètes

- Aurrefois: Signe précurseur (de malheur)
- Origine peu connue
- Viennent d'un « réservoir lointain »: nuage de Oort ?
« Décrochage » des comètes lors du passage proche d'une étoile ?
- Pleines de molécules: origine de la vie sur Terre ?
- Origine des pluies météoritiques



Les comètes



Equilibre entre la pression de radiation et la gravité

Les comètes

Equilibre entre la pression de radiation et la gravité

Chaque photon en provenance du Soleil a une énergie $E = pc$

Si on considère un flux de photons à une distance r du Soleil
l'énergie disponible est

$$\begin{aligned} E &= L_{\text{sol}} / 4\pi r^2 \\ &= pc \end{aligned}$$

D'où $p = L_{\text{sol}} / (4\pi r^2 c)$

Où L_{sol} est la luminosité du Soleil

A chaque interaction entre un photon et une particule de poussière la force s'appliquant à un grain de poussière est de section efficace σ

$$F = L_{\text{sol}} \sigma / (4\pi r^2 c)$$

Les comètes

Pour un grain de poussière de rayon R , à la distance r du Soleil on a donc

$$F_{\text{rad}} = \frac{L_{\text{sol}}}{4r^2c} \cdot R^2$$

Et la force de gravité

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM_{\text{sol}} m_{\text{grain}}}{r^2}$$

Le rapport entre les deux forces donne le rayon critique R_{crit} en-dessous duquel les poussières de densité ρ sont « éjectées »

$$\frac{F_{\text{grav}}}{F_{\text{rad}}} = \frac{16\rho GM_{\text{sol}} R rc}{3L_{\text{sol}}}$$

En pratique $R_{\text{crit}} \sim 2000 \text{ \AA} = 200 \text{ nm} = 0.2 \text{ micron}$

Queue ionisée (CO^+)

Queue de poussières

Comète Hale-Bopé (1997)

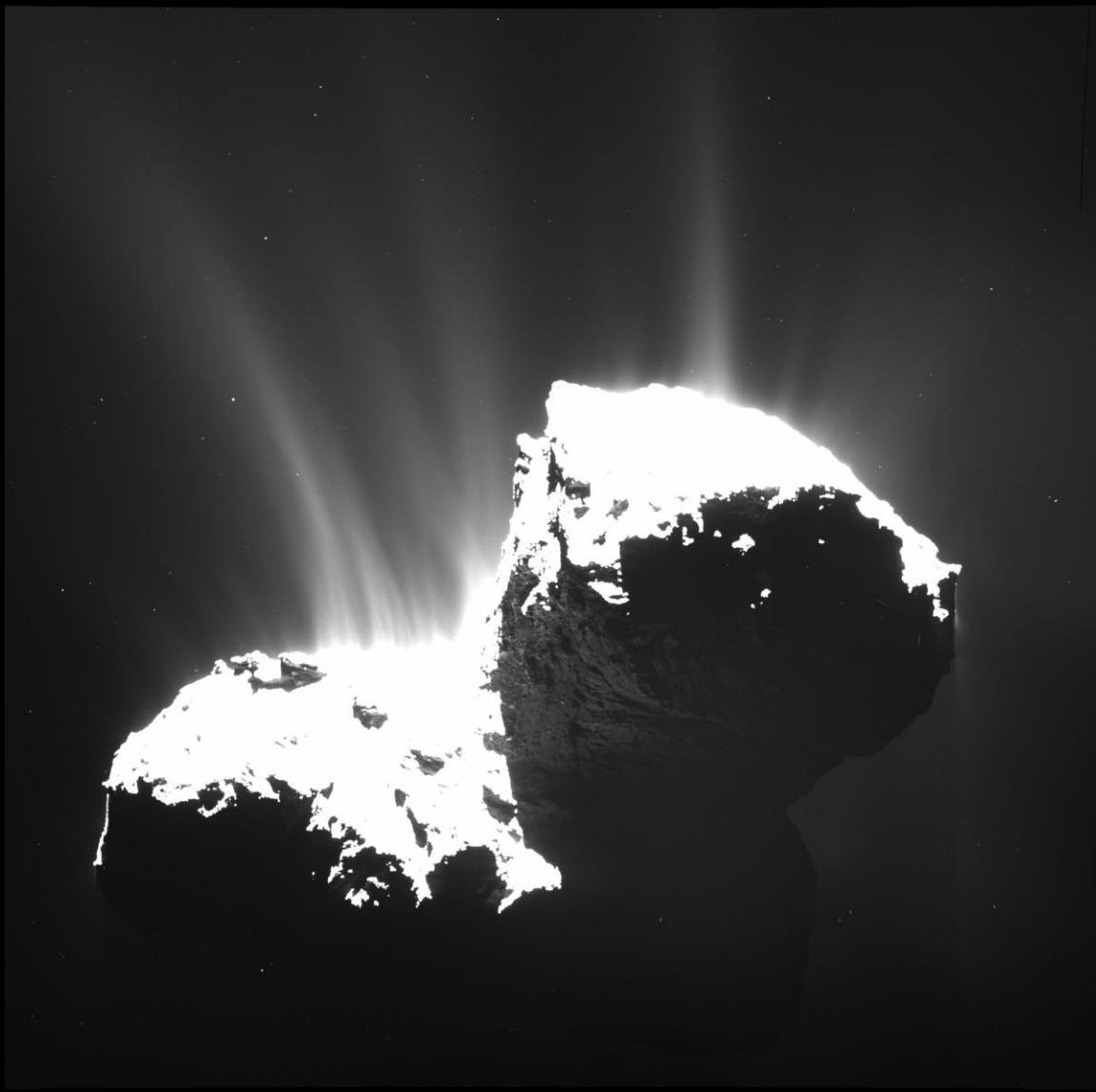
Vers le Soleil

Comète Mc Naught vue depuis Cerro Paranal (VLT) au
Chili (Janvier 2007)



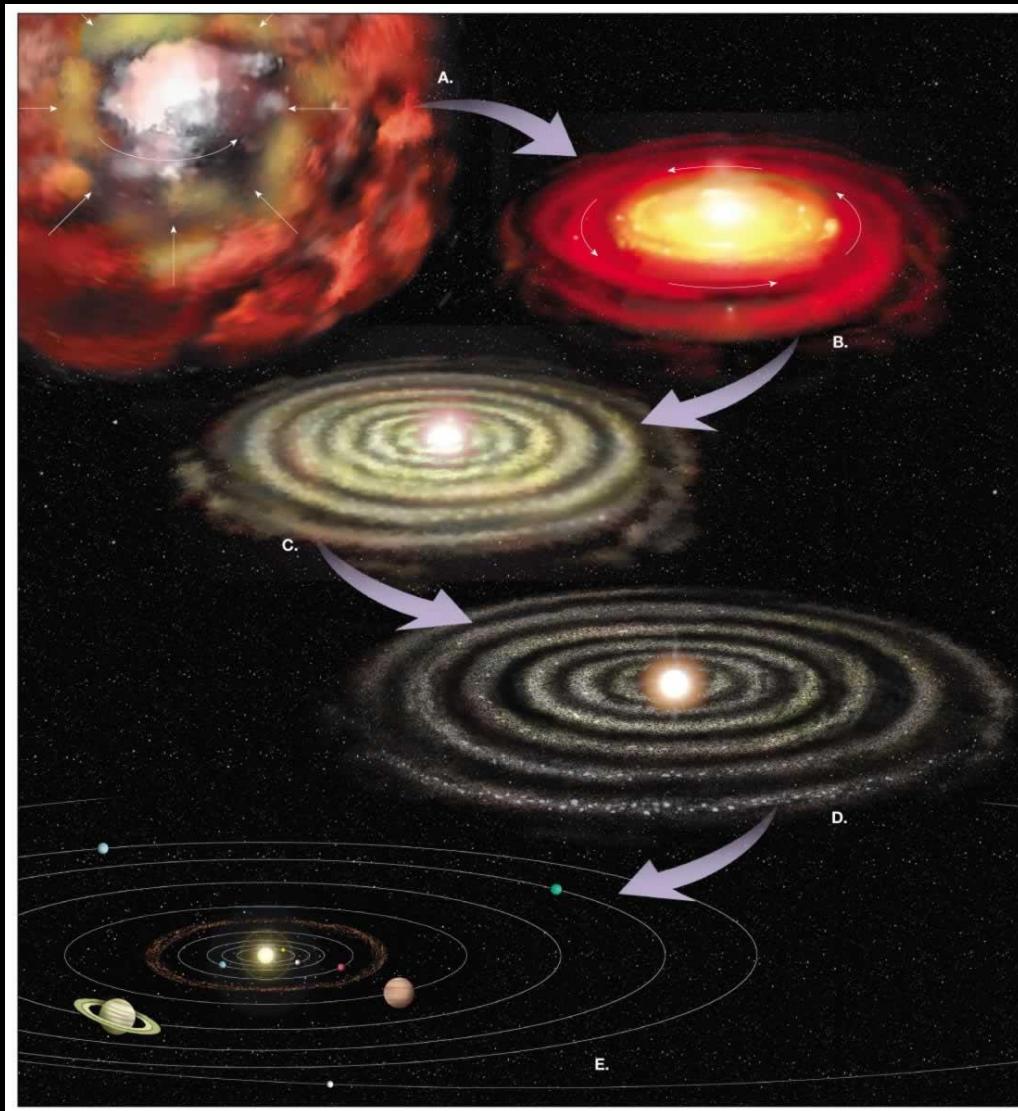
Queue de poussières

Mission Rosetta-Philae sur 67-Tchourioumov



Formation des systèmes planétaires

Formation des systèmes planétaires

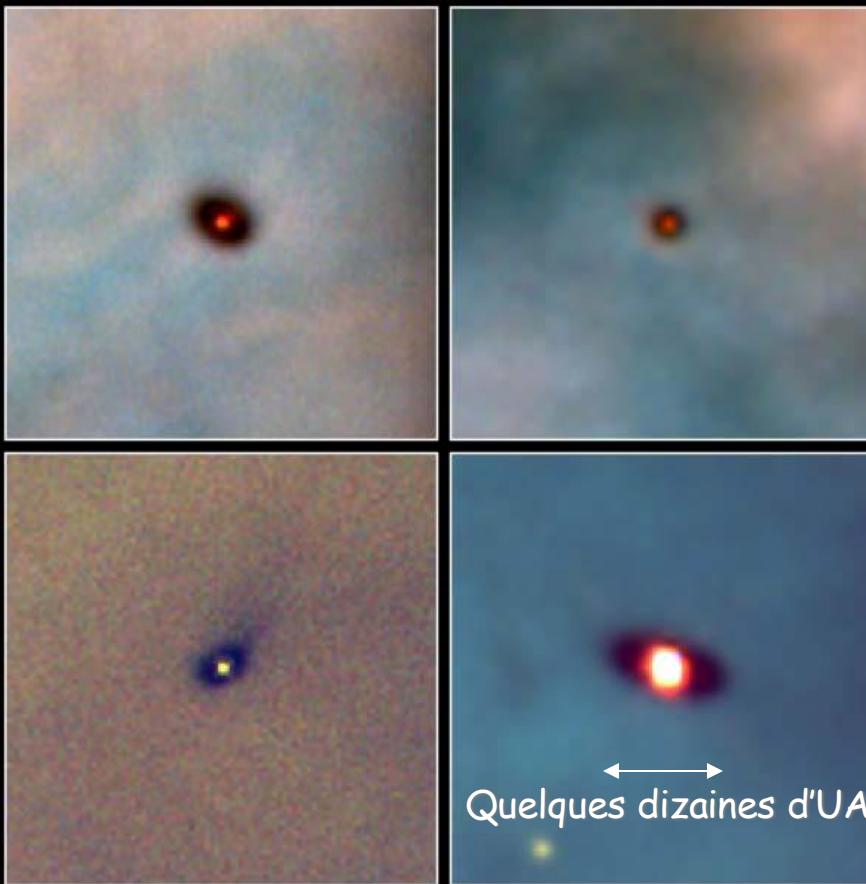


Formation des systèmes planétaires



Grande nébuleuse d'Orion vue par le HST

Formation des systèmes planétaires



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST Scl OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Propriétés fondamentales des étoiles

Observables

- Flux lumineux observé (magnitudes apparentes)
- Flux lumineux intrinsèque (magnitude absolue) *si la distance est connue*
- Couleur et donc température (position du pic du corps noir)
- Composition chimique (de surface)
- Rayon (en interférométrie)
- Rotation ($v \times \sin i$)
- Environnement: enveloppe gazeuse, companions

Qu'est ce qu'une étoile

Une boule de gaz chaud

Température de surface dans l'intervalle: $2000 \text{ K} < T < 50000 \text{ K}$

Composée surtout d'hydrogène

Sources d'énergie : contraction gravitationnelle
réactions nucléaires

TOUS les éléments autres que l'hydrogène (et un peu de deutérium et d'hélium) sont formés dans les étoiles

Rayonnement de surface du type corps noir

Evolution complexe qui dépend presque uniquement de la **masse initiale**

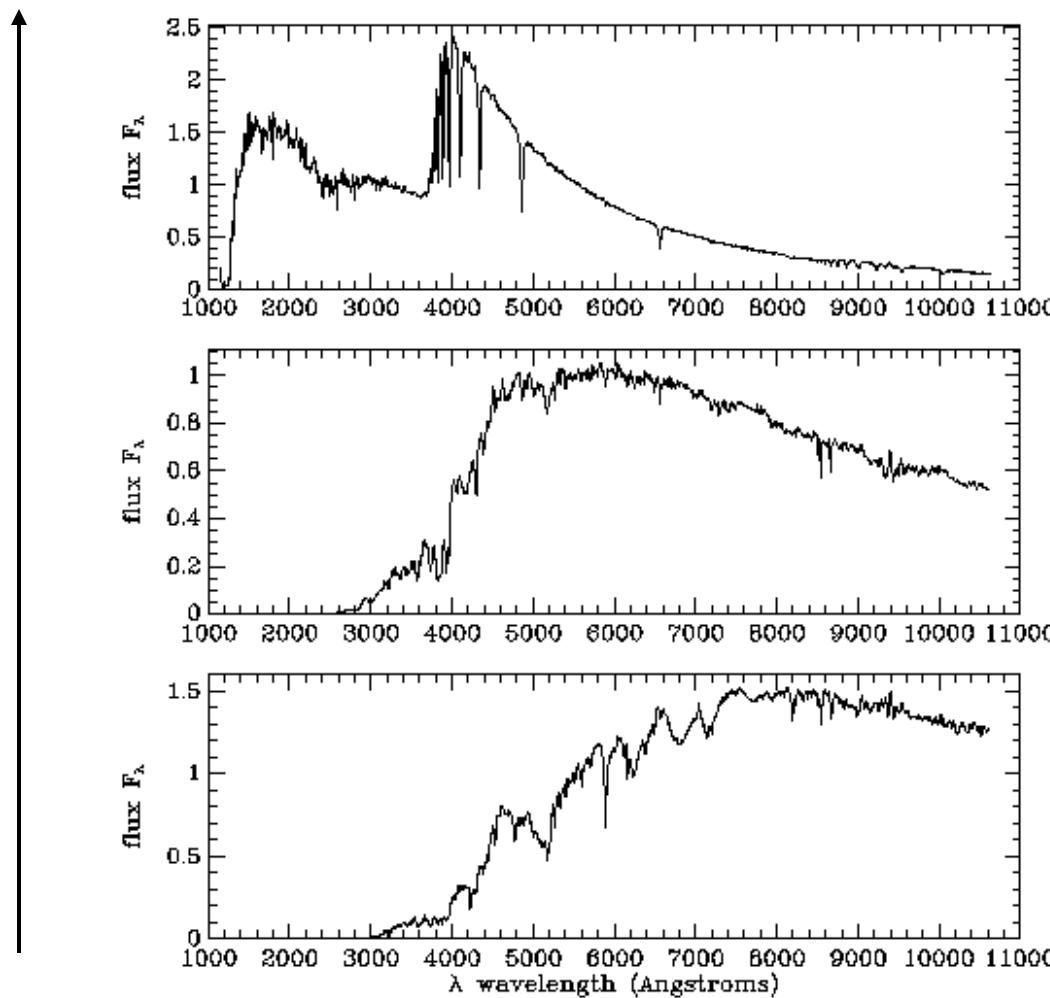
Tableau de Mendeleïev

Origine des atomes

H 1		Fusion lors du Big Bang	Fin de vie d'étoiles peu massives	Explosion d'étoiles massives	Elément artificiel (synthèse humaine) Pas d'isotope stable	He 2													
Li 3	Be 4	Fission de rayons cosmiques	Fusion d'étoiles à neutrons	Explosion de naines blanches	B 5	C 6													
Na 11	Mg 12				N 7	O 8													
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ne 10	Ar 18
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
Cs 55	Ba 56		Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	
Fr 87	Ra 88		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71		
			Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103		

Exemples de spectres stellaires et importance de l'hydrogène

Etoiles de plus
en plus chaudes



Bleu

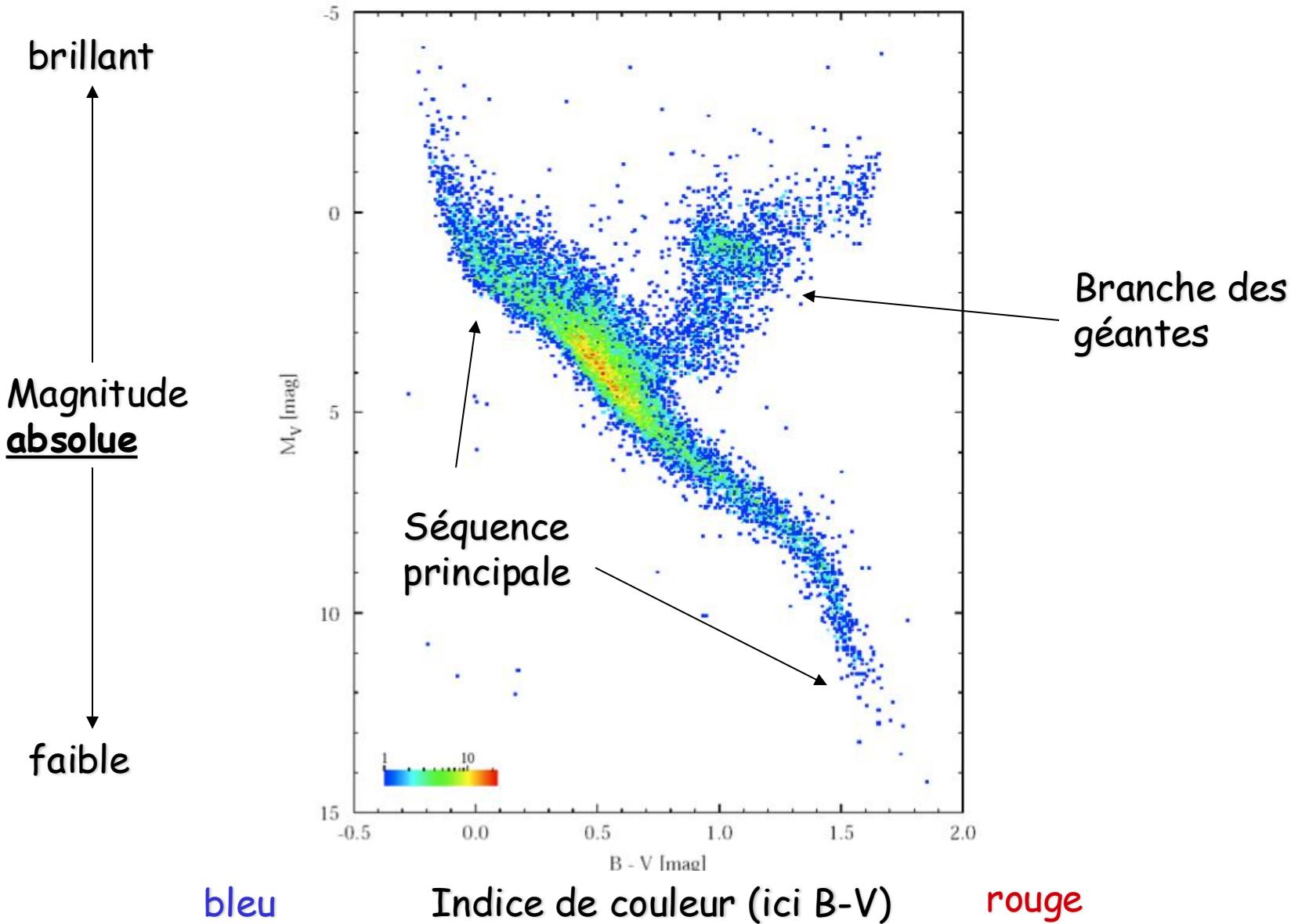
Rouge

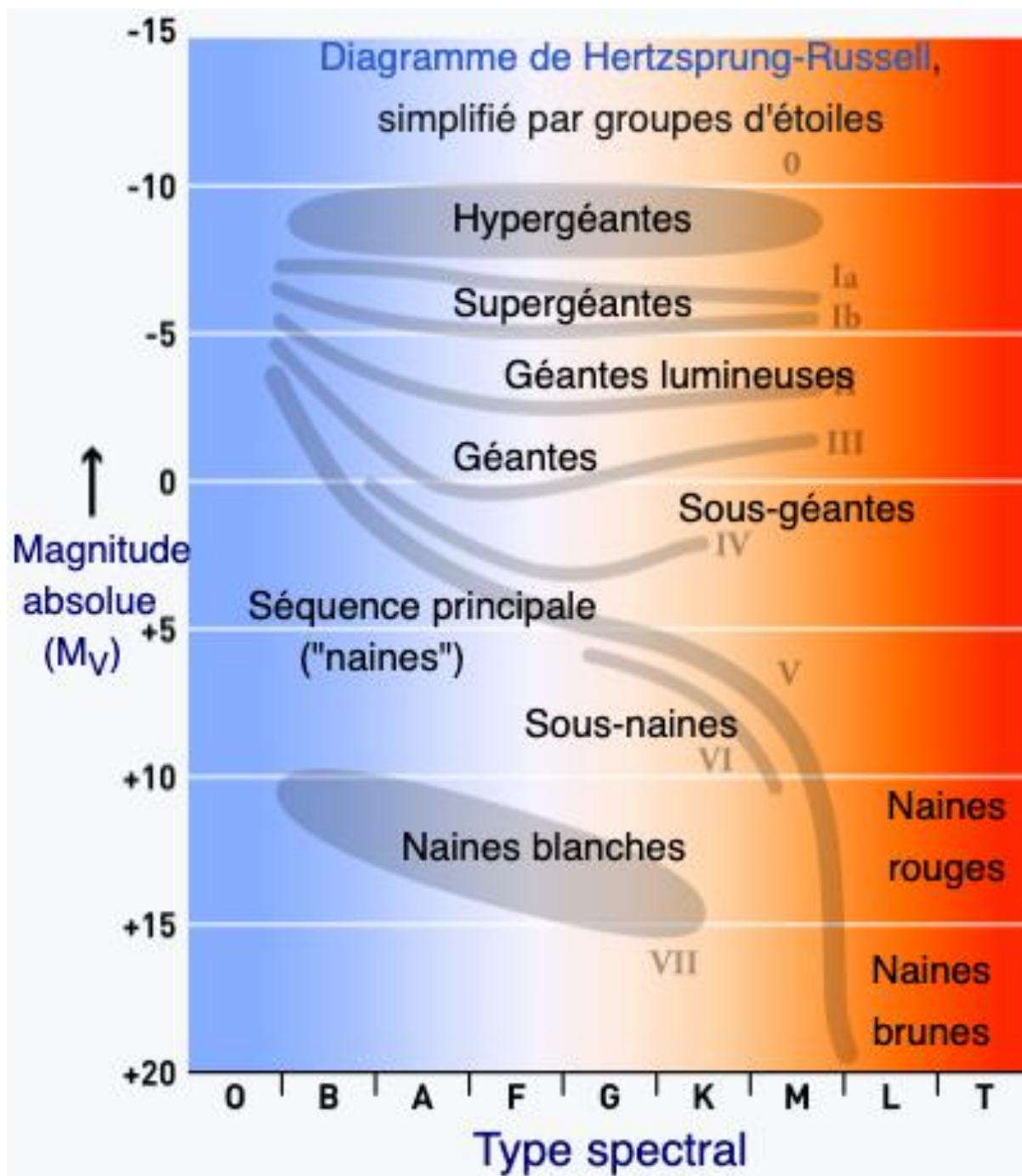
Le diagramme de Hertzsprung-Russell (diagramme « HR »)

Le diagramme de Hertzsprung-Russell

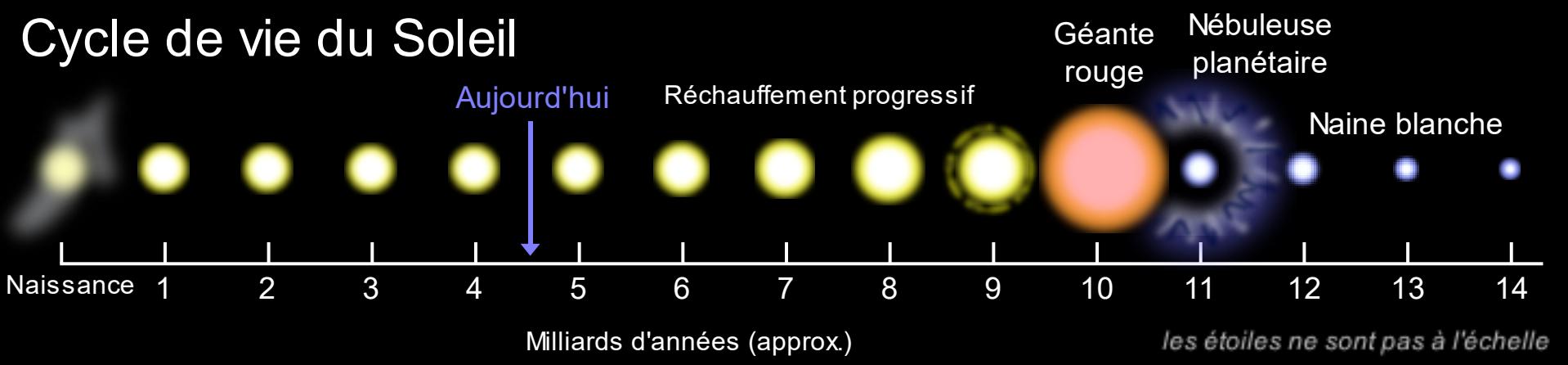
- Le diagramme « HR » relie la **température** à la **luminosité** des étoiles
-> nécessité de connaître les distances et d'avoir des spectres
- On utilise plus souvent le diagramme **couleur-magnitude** plutôt que le diagramme HR
- Les étoiles ne se répartissent pas au hasard dans le diagramme
- Au cours de sa vie une étoile change de place dans le diagramme, on parle d'**évolution stellaire** (cf. prochain cours)
- Dans un temps de vie humain, nous n'avons qu'un « instantané » du diagramme HR

Le diagramme de Hertzsprung-Russell





Cycle de vie du Soleil



Classification spectrale de Morgan-Keenan

- 7 types spectraux correspondants à la température (couleur) des étoiles: O, B, A, F, G, K, M, L, T (Soleil: type G2V)
- Etoiles O: T~50000K
Etoiles M: T~2500K
- 9 sous-classes, par exemple O1, O9 sont des étoiles O de plus en plus rouges. Deux étoiles de type O9 et B0 ont des couleurs très similaires
- 7 classes de luminosités
 - Ia-0: hyper-géantes
 - I: super-géantes
 - II: géantes lumineuses
 - III: géantes
 - IV: sous-géantes
 - V: séquence principale des naines (dont le Soleil: G2V)
 - VI: sous-naines

Classification spectrale de Morgan-Keenan (séquence principale)

Table 3.13 Physical properties of MS stars

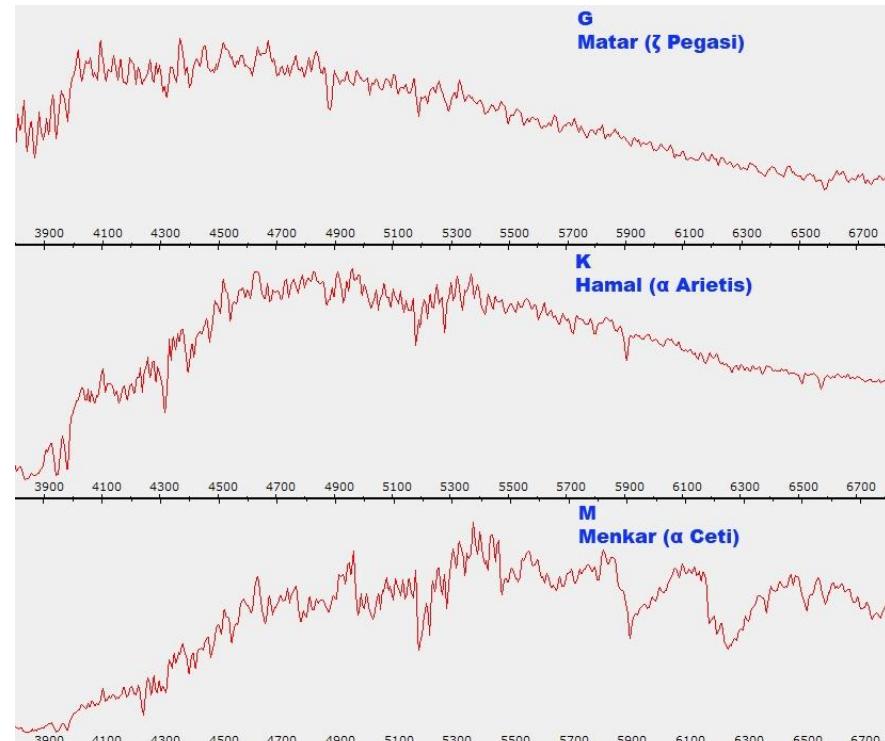
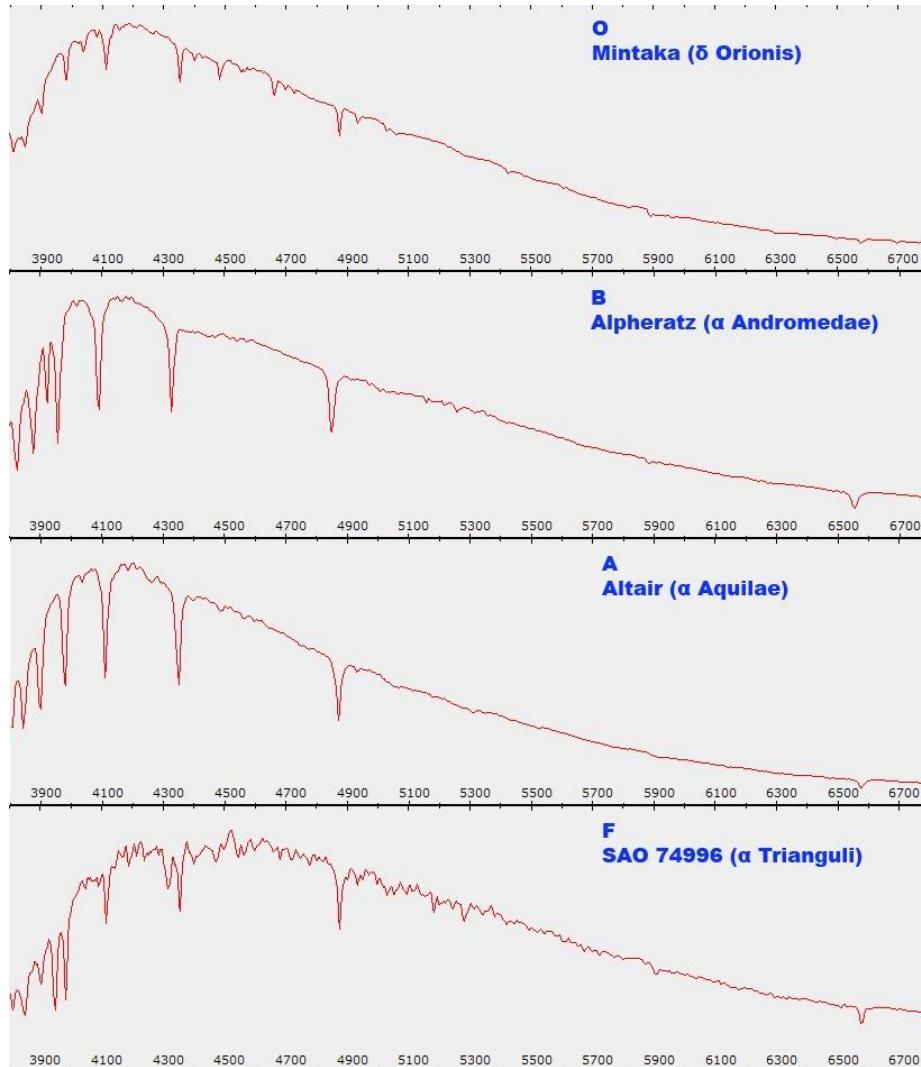
Spectral type	$\mathcal{M}/\mathcal{M}_\odot$	$\log(L/L_\odot)$	M_{bol}	M_V	R/R_\odot	$\bar{\rho}/\bar{\rho}_\odot$
O3	120	6.15	-10.7	-6.0	15	0.035
O5	60	5.90	-10.1	-5.7	12	0.035
O8	23	5.23	-8.4	-4.9	8.5	0.037
B0	17.5	4.72	-7.1	-4.0	7.4	0.043
B3	7.6	3.28	-3.5	-1.6	4.8	0.069
B5	5.9	2.92	-2.7	-1.2	3.9	0.099
B8	3.8	2.26	-1.0	-0.2	3.0	0.14
A0	2.9	1.73	0.3	0.6	2.4	0.21
A5	2.0	1.15	1.7	1.9	1.7	0.41
F0	1.6	0.81	2.6	2.7	1.5	0.47
F5	1.3	0.51	3.4	3.5	1.3	0.59
G0	1.05	0.18	4.2	4.4	1.1	0.79
G5	0.92	-0.10	4.9	5.1	0.92	1.18
K0	0.79	-0.38	5.6	5.9	0.85	1.29
K5	0.67	-0.82	6.7	7.4	0.72	1.79
M0	0.51	-1.11	7.4	8.8	0.60	2.36
M5	0.21	-1.96	9.6	12.3	0.27	10.7
M7	0.12	-2.47	10.8	14.3	0.18	20.6
M8	0.06	-2.92	11.9	16.0	0.1	60

SOURCE: Data published in Schmidt-Kaler (1982)

Table de paramètres stellaires de la séquence principale³⁸

Type spectral	R / R_\odot	M / M_\odot	L / L_\odot	K	Exemples ³⁹
	Rayon	Masse	Luminosité	Température	
O5	18	40	500 000	38 000	Zeta Puppis
B0	7,4	18	20 000	30 000	Phi ¹ Orionis
B5	3,8	6,5	800	16 400	Pi Andromedae A
A0	2,5	3,2	80	10 800	Alpha Coronae Borealis A
A5	1,7	2,1	20	8 620	Beta Pictoris
F0	1,4	1,7	6	7 240	Gamma Virginis
F5	1,2	1,29	2,5	6 540	Eta Arietis
G0	1,05	1,10	1,26	6 000	Beta Comae Berenices
G2	1,00 ^{note 3}	1,00 ^{note 3}	1,00 ^{note 3}	5 750	Soleil
G5	0,93	0,93	0,79	5 560	Alpha Mensae
K0	0,85	0,78	0,40	5 150	70 Ophiuchi A
K5	0,74	0,69	0,16	4 640 ⁴⁰	61 Cygni A
M0	0,63	0,47	0,063	3 920	Gliese 185 ⁴¹
M5	0,32	0,21	0,0079	3 120	EZ Aquarii A
M8	0,13	0,10	0,0008	~ 2 600	Étoile de Van Biesbroeck ⁴²

Exemples de spectres stellaires



Taille des étoiles

La luminosité (**bolométrique**, cad intégrée sur toutes les longueurs d'ondes) des étoiles est donnée par :

$$L = 4\pi R^2 \cdot ST_{eff}^4$$

En prenant le logarithme et en exprimant les grandeurs en unités solaires, on obtient une relation entre les principales grandeurs physiques des étoiles

$$\frac{L}{L_{sol}} = \frac{\pi R^2 T^4}{\pi R_{sol}^2 T_{sol}^4}$$

Les étoiles de la **séquence principale** ont des tailles entre 0,1 et 15 rayons solaires

Taille des étoiles

Si on connaît le flux f reçu d'une étoile et son flux intrinsèque F , on peut estimer son rayon angulaire α en fonction du rayon R et de la distance r :

$$f = F \cdot 4\pi R^2 \cdot \frac{1}{4\pi r^2} = F \cdot \frac{\alpha R^2}{r^2}$$

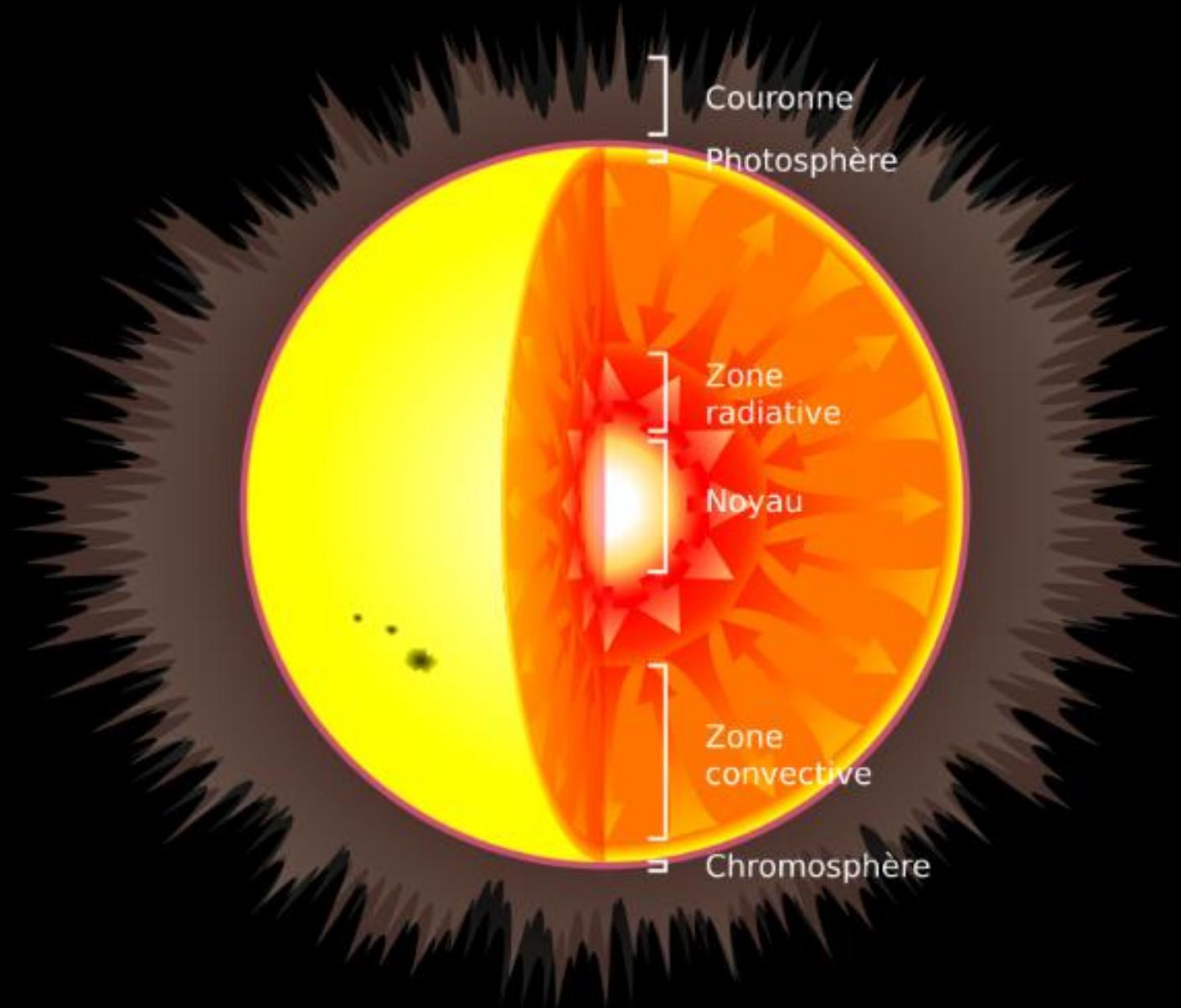
$$f = F \cdot \alpha^2$$

Pour une hypergéante de magnitude apparente $V=0,5$ à une distance de 200 pc et de rayon $R = 1000 \times R_{\text{sol}}$ on obtient

$$\alpha = 0,02''$$

qui est environ 10 fois plus petit que la résolution du télescope spatial Hubble

Sources d'énergie dans les étoiles



Sources d'énergie dans les étoiles

Le théorème du viriel, appliqué à une étoile de la séquence principale donne une estimation de sa température

$$T \sim 10^6 - 10^7 \text{ K}$$

Les calculs faits à la fin du XIX ième siècle en supposant que la source d'énergie est la combustion du charbon donnent une estimation du temps de vie du Soleil ~ 1000 ans ...

Autres sources possibles:

- Energie nucléaire
- Contraction gravitationnelle.

Contraction gravitationnelle

Variation d'énergie totale rayonnée par une étoile de luminosité L

$$dE_{Tot} = dE_{cin} + dE_{pot} = -Ldt$$

Or, le théorème du viriel nous dit

$$2dE_{cin} + dE_{pot} = 0$$

d'où

$$dE_{pot} = -2L dt$$

et

$$dE_{cin} = L dt$$

Contraction gravitationnelle

Les deux équations obtenues

$$dE_{pot} = -2L dt$$

$$dE_{cin} = L dt$$

nous disent que :

- 1- l'énergie rayonnée a pour effet de diminuer l'énergie potentielle de l'étoile
 - 2- la moitié de l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique
- > l'effet de la contraction est de chauffer l'étoile

Contraction gravitationnelle

La contraction gravitationnelle n'est pas suffisante à expliquer le temps de vie des étoiles. Ce dernier est simplement

$$t_{vie} = \frac{E_{pot}}{L} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{LR}$$

pour une étoile de masse **M** et de rayon **R** ne tirant son énergie que de la contraction.

Ce temps est connu sous le nom de temps de **Helmholtz-Kelvin**

Pour le Soleil il n'est que de 10^7 ans, soit 1000 fois trop court.

-> il y a donc une autre source d'énergie

Les réactions nucléaires

La contraction gravitationnelle permet d'atteindre des températures suffisantes pour engager la combustion (nucléaire) de l'hydrogène.



Masse atomique de 4 atomes d'hydrogène: 4,0313 m_u

Masse atomique d'un noyau d'hélium: 4,0026 m_u

Lors de la réaction l'énergie équivalente au défaut de masse est donc

$$\Delta E = \Delta m \times c^2$$

Pour une étoile d'hydrogène de 1 masse solaire le temps de vie est

$$t \sim 10^{11} \text{ ans}$$

Les réactions nucléaires

La vie d'une étoile est une succession de contractions et de réactions nucléaires, toujours plus énergétiques. Les éléments se forment à tour de rôle en « pelures d'oignons » dans le cœur de l'étoile

