

# 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**

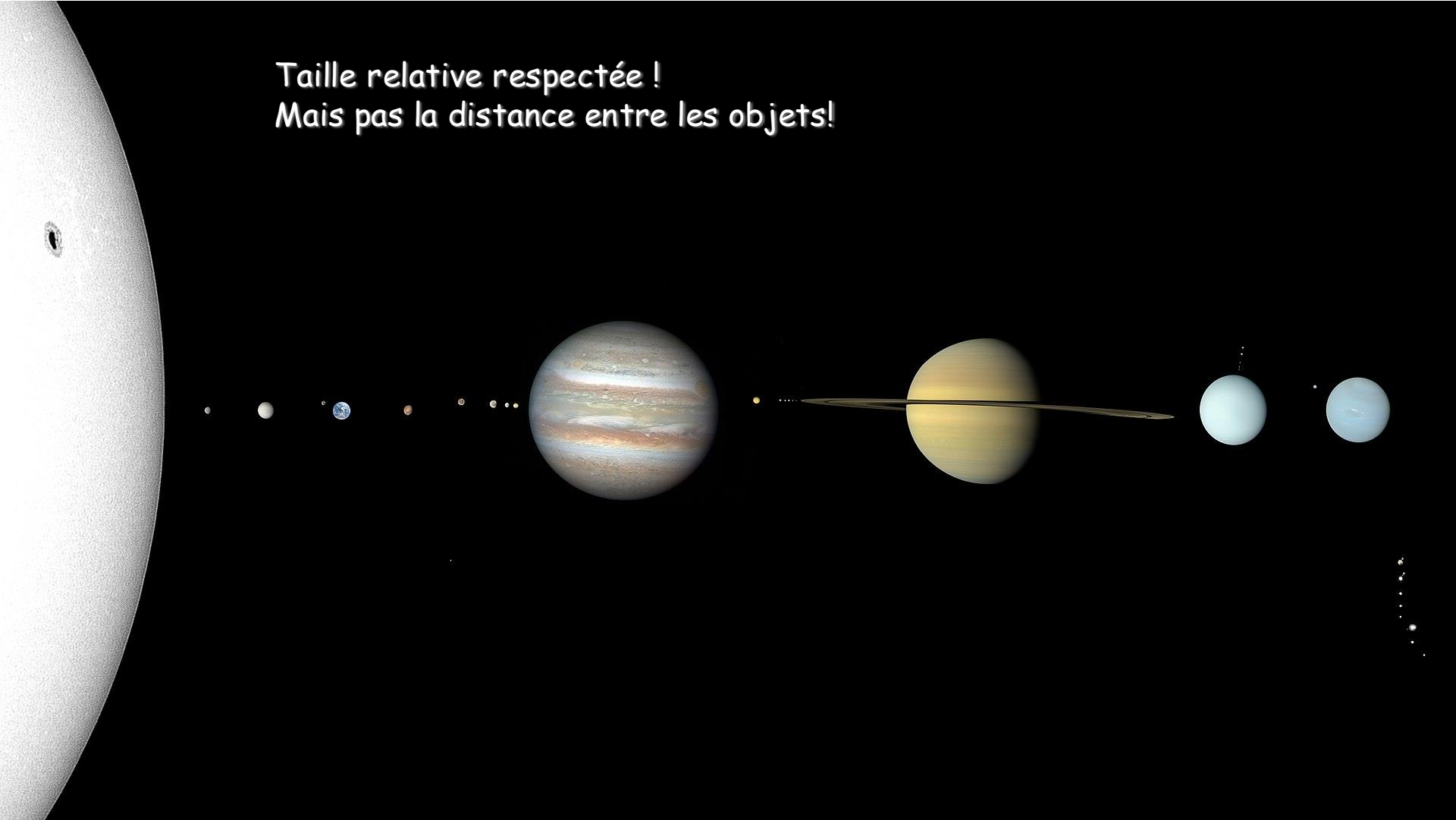
**-**

**Propriétés fondamentales  
des étoiles**

Echelles non respectées !



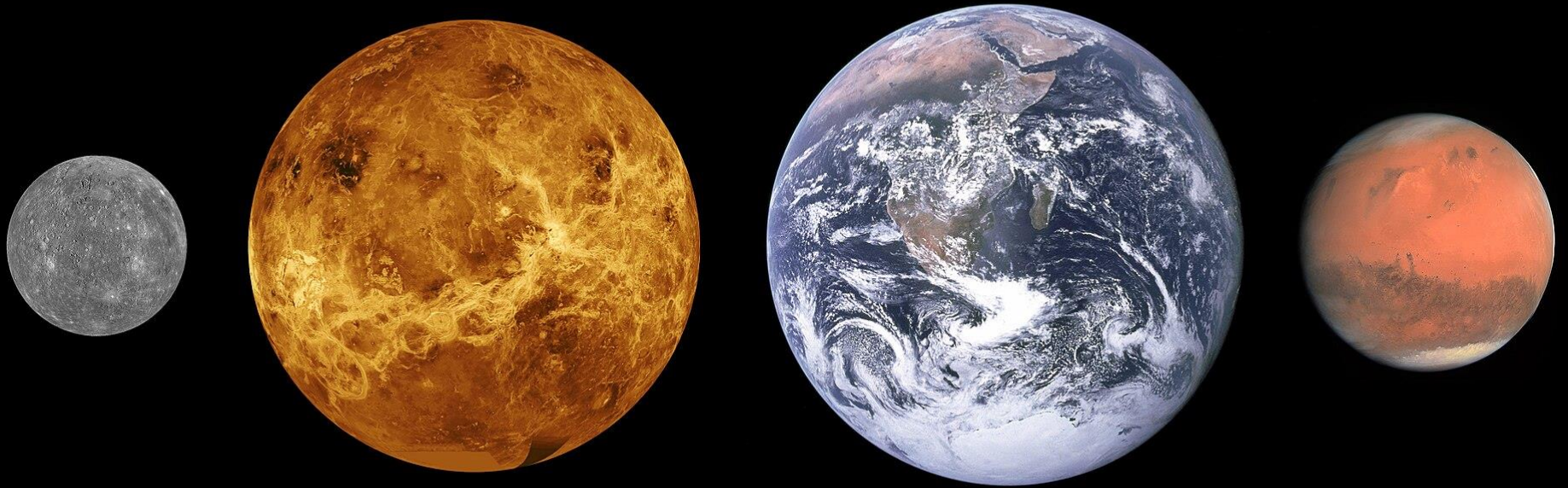
Taille relative respectée !  
Mais pas la distance entre les objets!



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

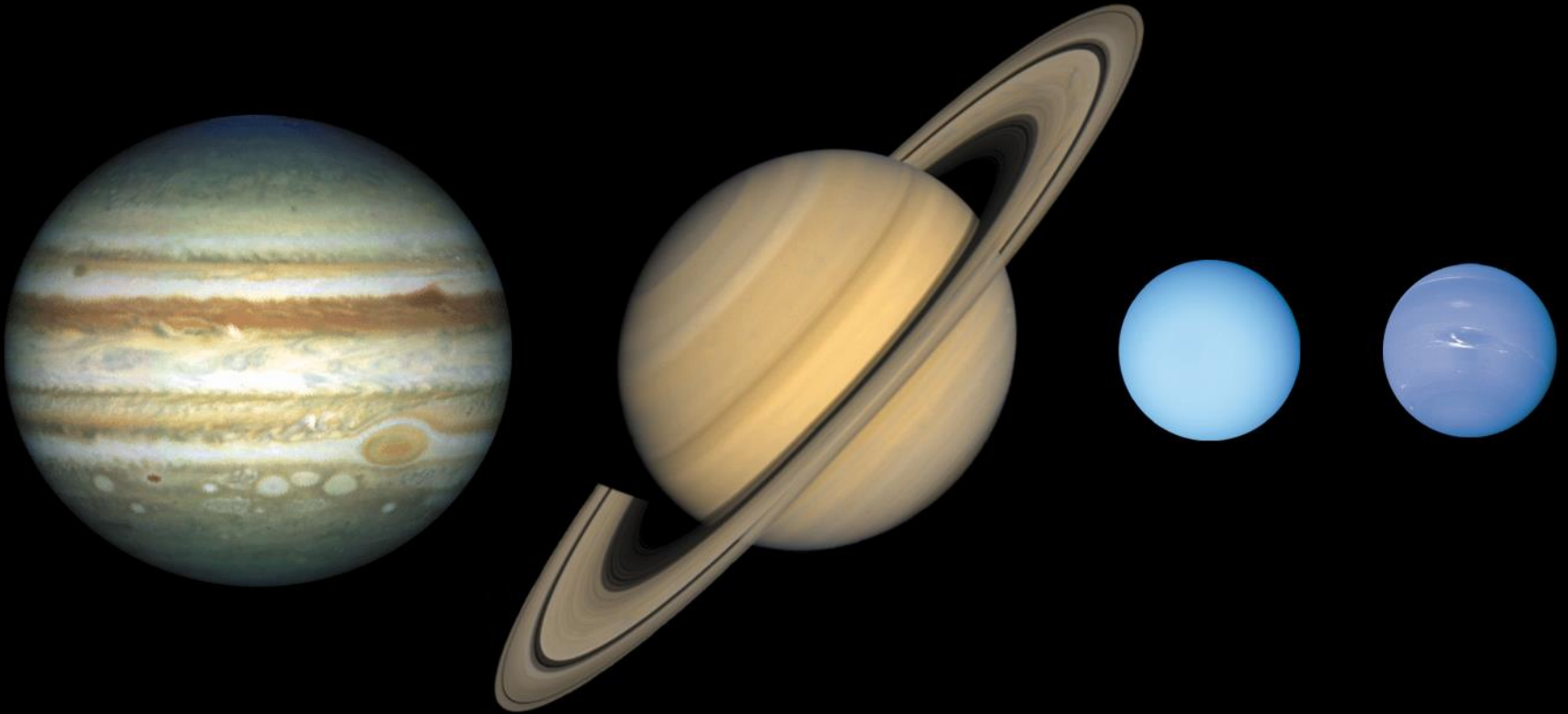
Données de l'université de Princeton par rapport à l'écliptique J2000.0 et au barycentre du Système solaire avec 1 ua = 1,495 978 707 00 × 10<sup>11</sup> m et 1 année = 365,25 jours = 31 557 600 secondes<sup>361</sup>.

# Planètes Rocheuses



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

# Planètes Gazeuses





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

**Pluton par  
la sonde  
New  
Horizon**



# Le Système Solaire

Soleil

Ø 1 392 684 km

Mercur

Ø 4 879,4 km  
☉ 57 909 000 km

Vénus

Ø 12 103,6 km  
☉ 108 140 000 km

Terre

Ø 12 756,3 km  
☉ 149 600 000 km

Mars

Ø 6 792,4 km  
☉ 227 990 000 km

Phobos  
Déimos

Vesta

Junon

Ceinture d'astéroïdes

Cérès

Pallas

Les lunes avec un cadre coloré ne sont pas à l'échelle

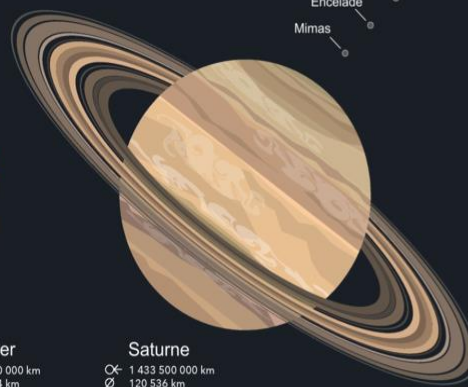
☉ = Distance moyenne de la planète au Soleil  
Ø = Diamètre moyen



Jupiter

☉ 778 340 000 km  
Ø 142 984 km  
79 lunes au total

Io  
Europe  
Ganymède  
Callisto



Saturne

☉ 1 433 500 000 km  
Ø 120 536 km  
82 lunes au total

Mimas  
Encelade  
Téthys  
Dioné  
Rhéa  
Titan  
Hypérion  
Japet

Système d'anneaux de Saturne  
non à l'échelle



Uranus

☉ 2 872 400 000 km  
Ø 51 118 km  
27 lunes au total



Neptune

☉ 4 498 400 000 km  
Ø 49 528 km  
14 lunes au total

Miranda  
Ariel  
Umbriel  
Titania  
Obéron

Triton

Echelle (proportions)  
20 000 40 000 60 000 km

Ceinture de Kuiper

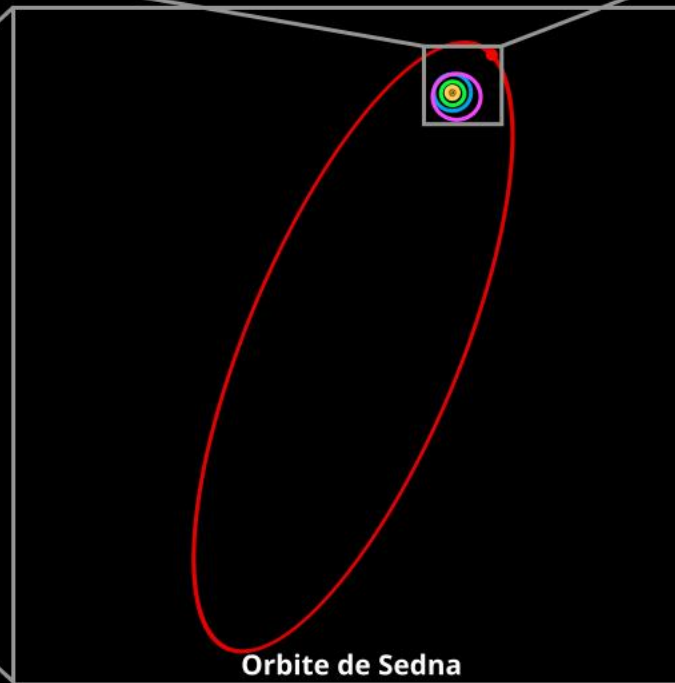
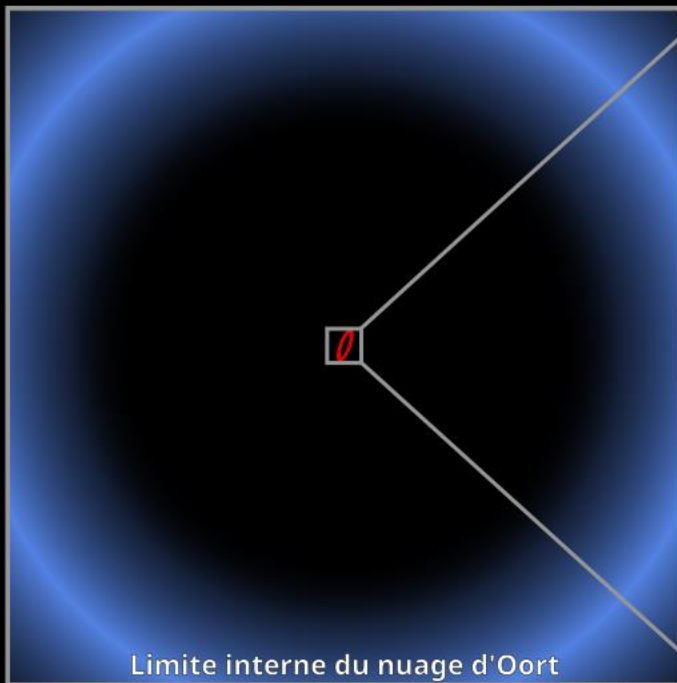
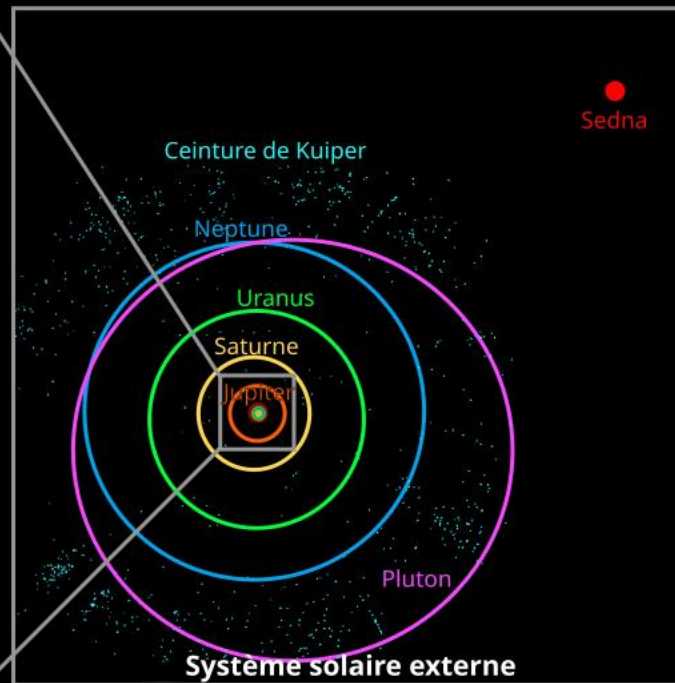
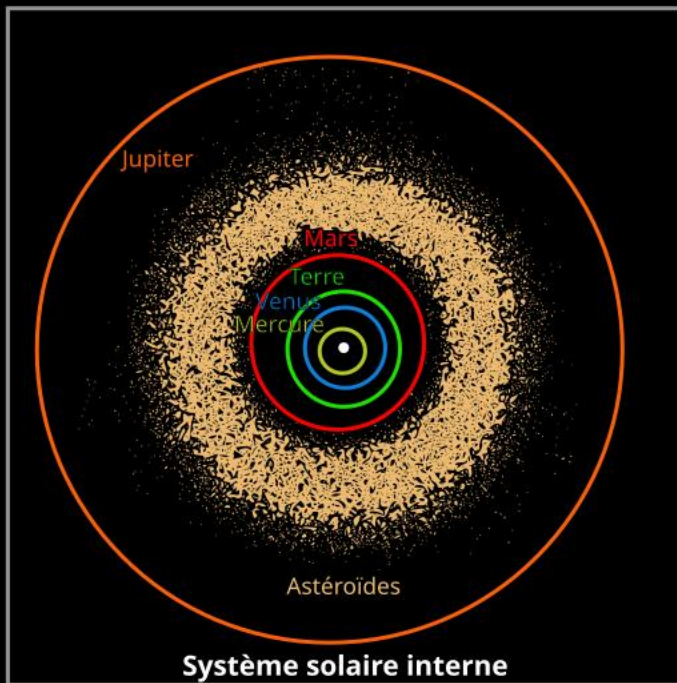
Hauméa  
Pluton  
Charon  
Makémaké  
Éris

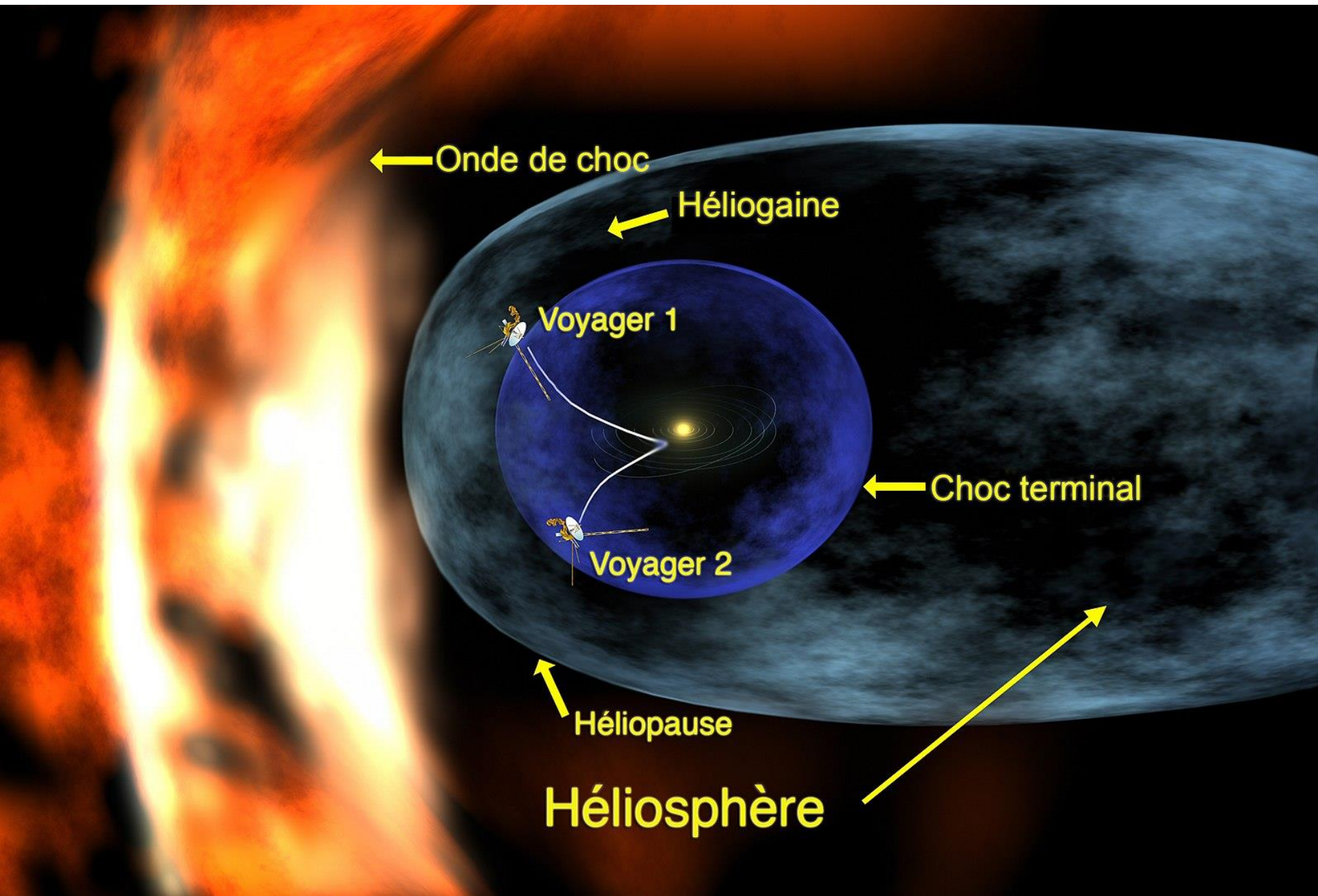


Représentation à l'échelle de la distance moyenne des objets au Soleil  
Echelle 1 AU (149,6 Mill. km)

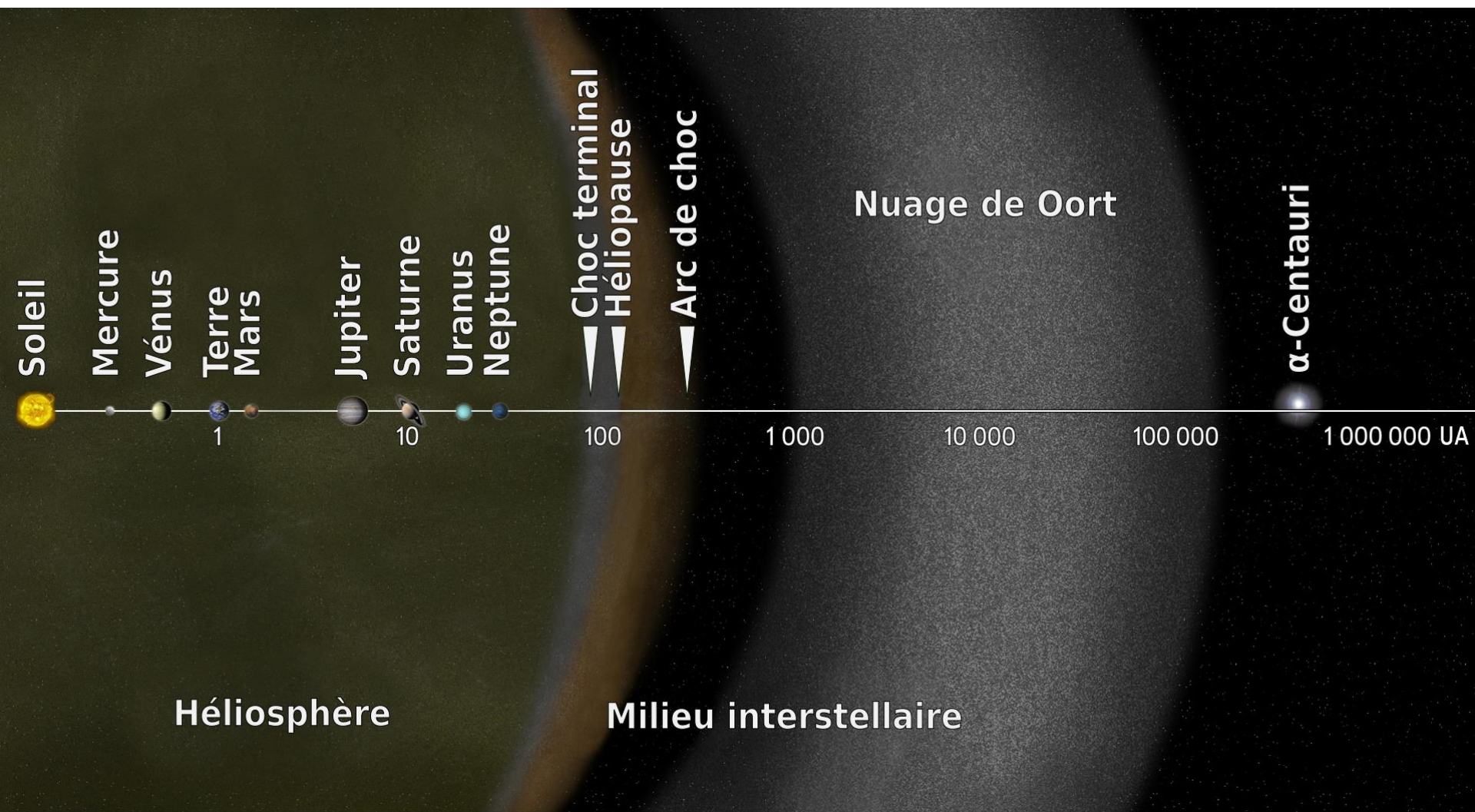
Objets majeurs de la ceinture  
non à l'échelle











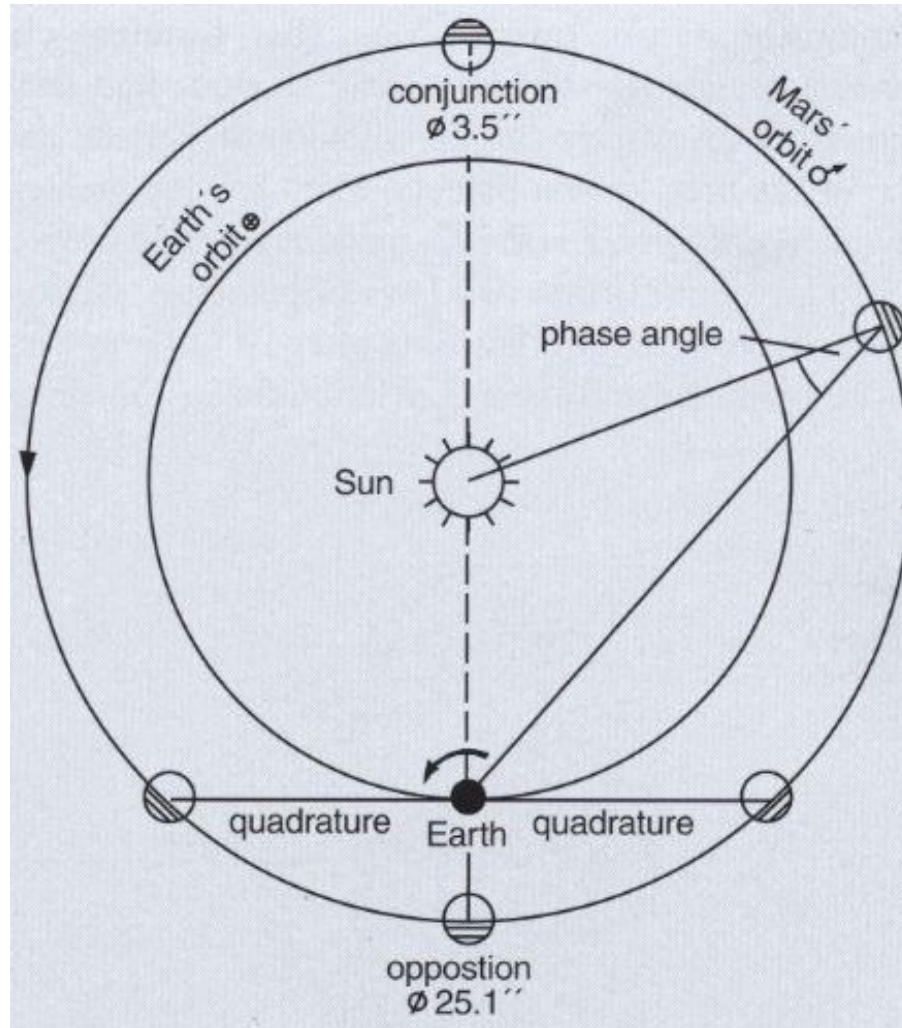
# Exemple des phases de Vénus



VENUS 2002

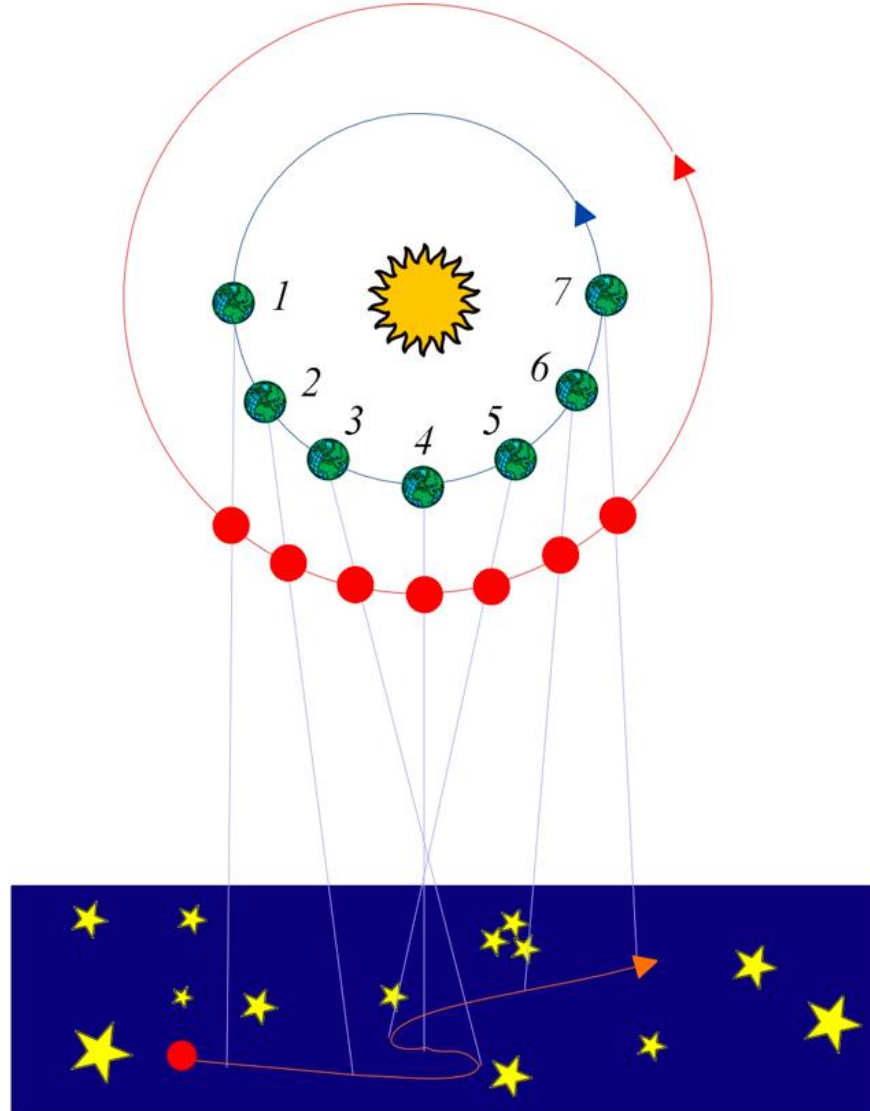
Photographed at the TBGS Observatory  
by Chris Proctor

# Phénomène de phases





# Mouvements planétaires

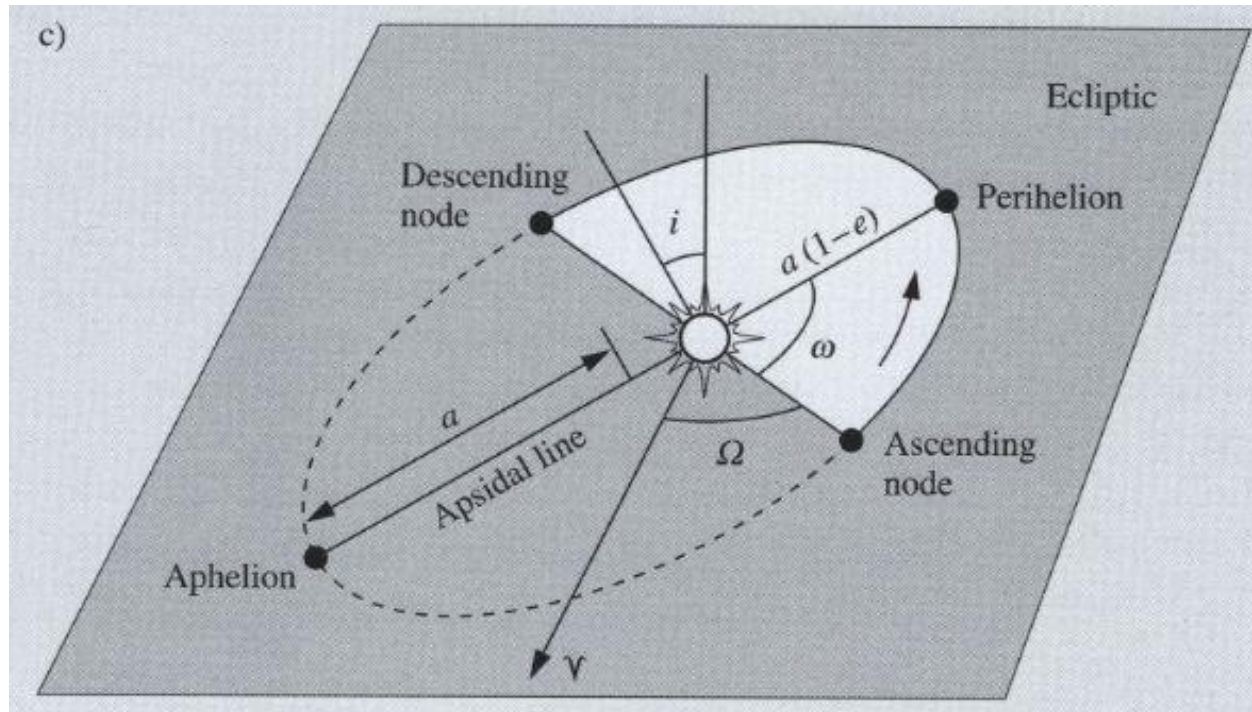


Mouvement rétrograde des planètes **extérieures**

# 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  $\Omega$
- Argument du périhélie  $\omega$
- Période de révolution  $P$
- Instant de passage au périhélie  $t_0$

**Exploration « in-situ »**



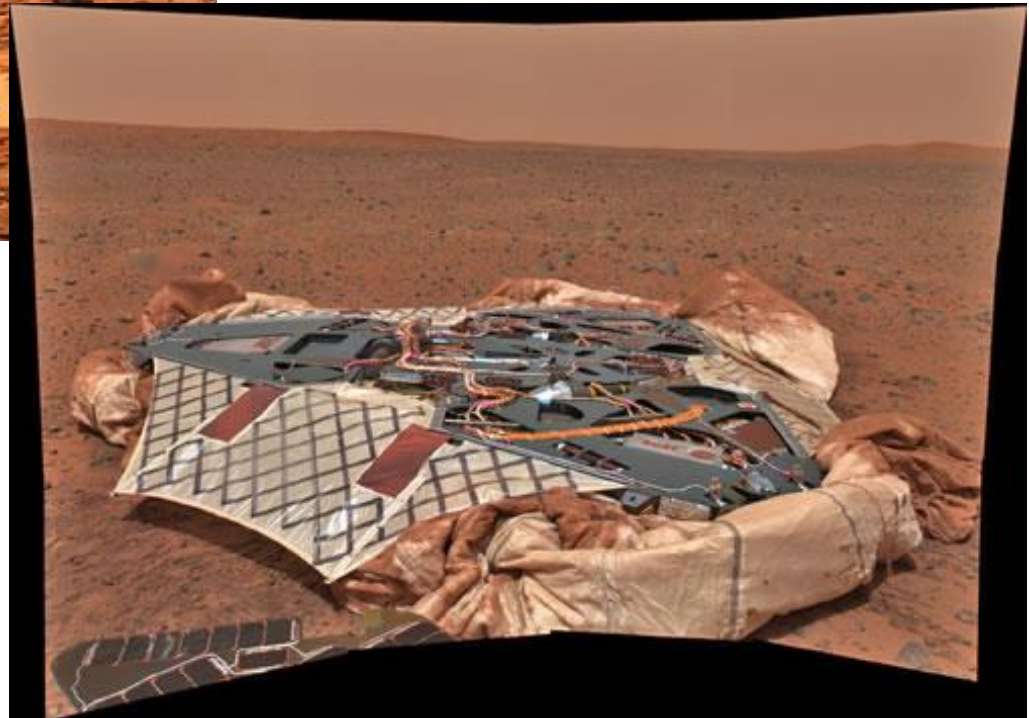
Exploration in-situ



Mars vue par Mars-express (ESA)

# Exploration in-situ

Rovers Opportunity & Spirit (Mars)



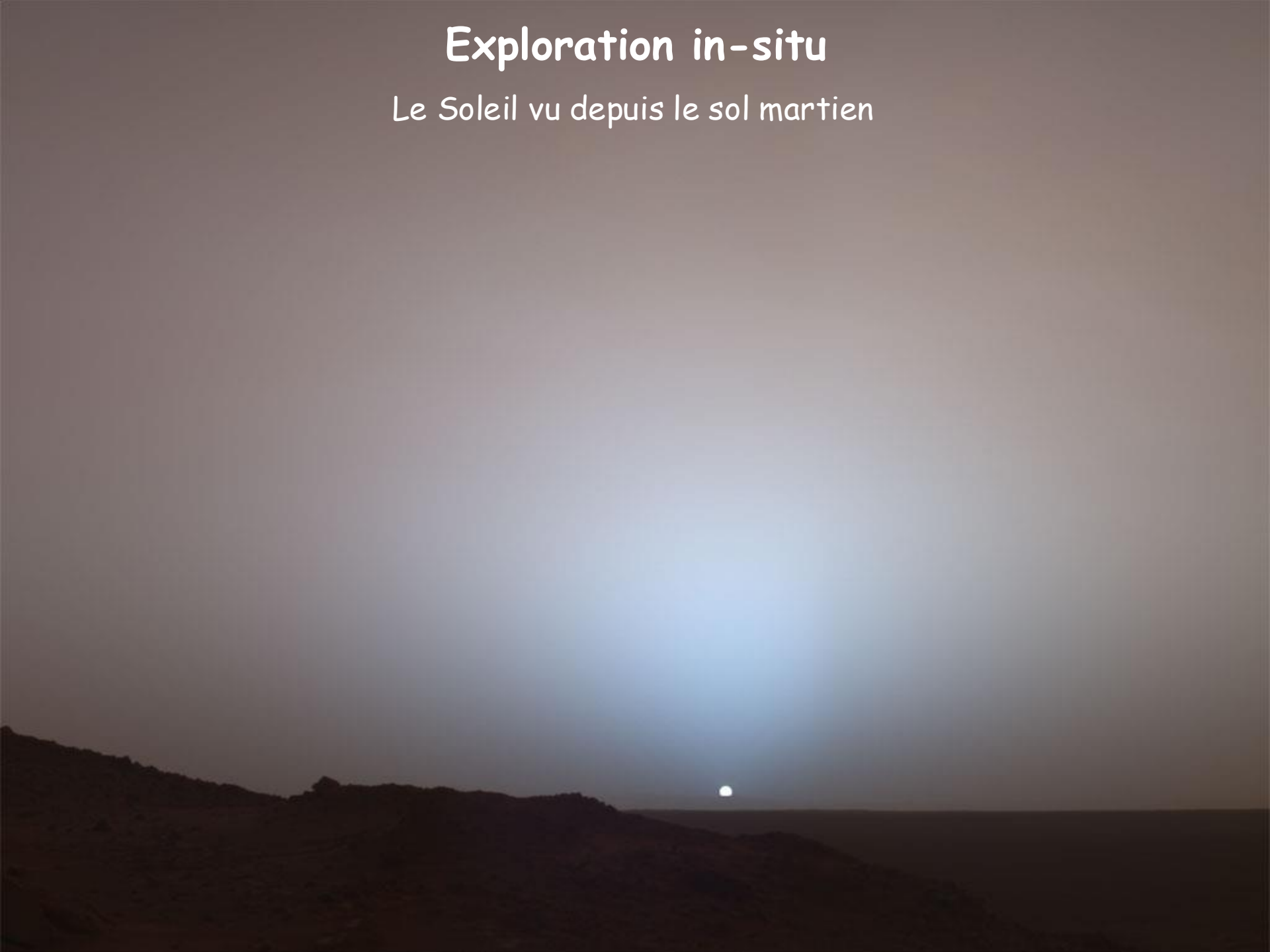




Exploration in-situ (Mars)

# Exploration in-situ

Le Soleil vu depuis le sol martien





# Exploration in-situ

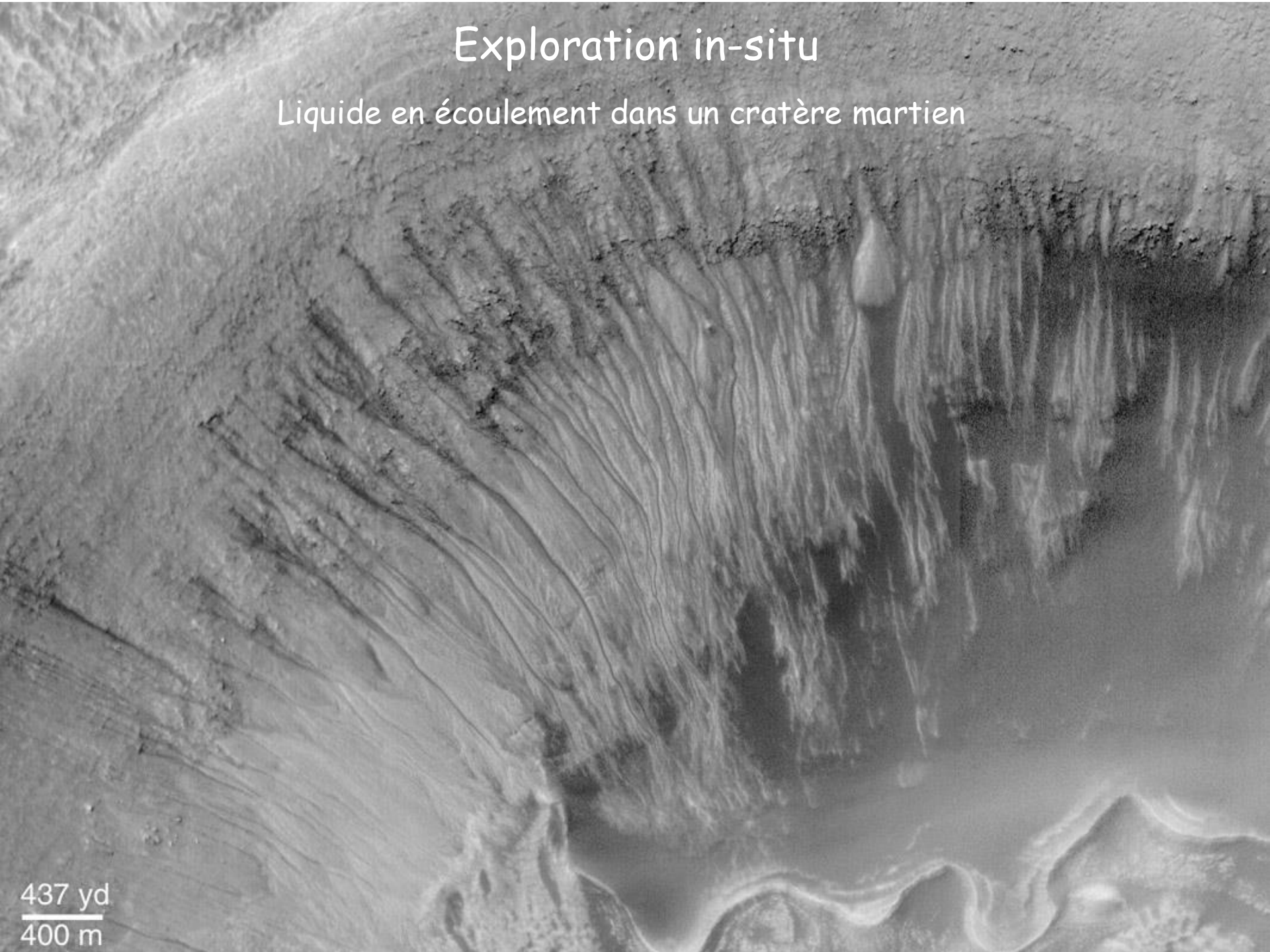


Mars-orbiter (NASA) et l'eau sur mars

Preuves spectroscopiques par  
Mars-express (ESA)

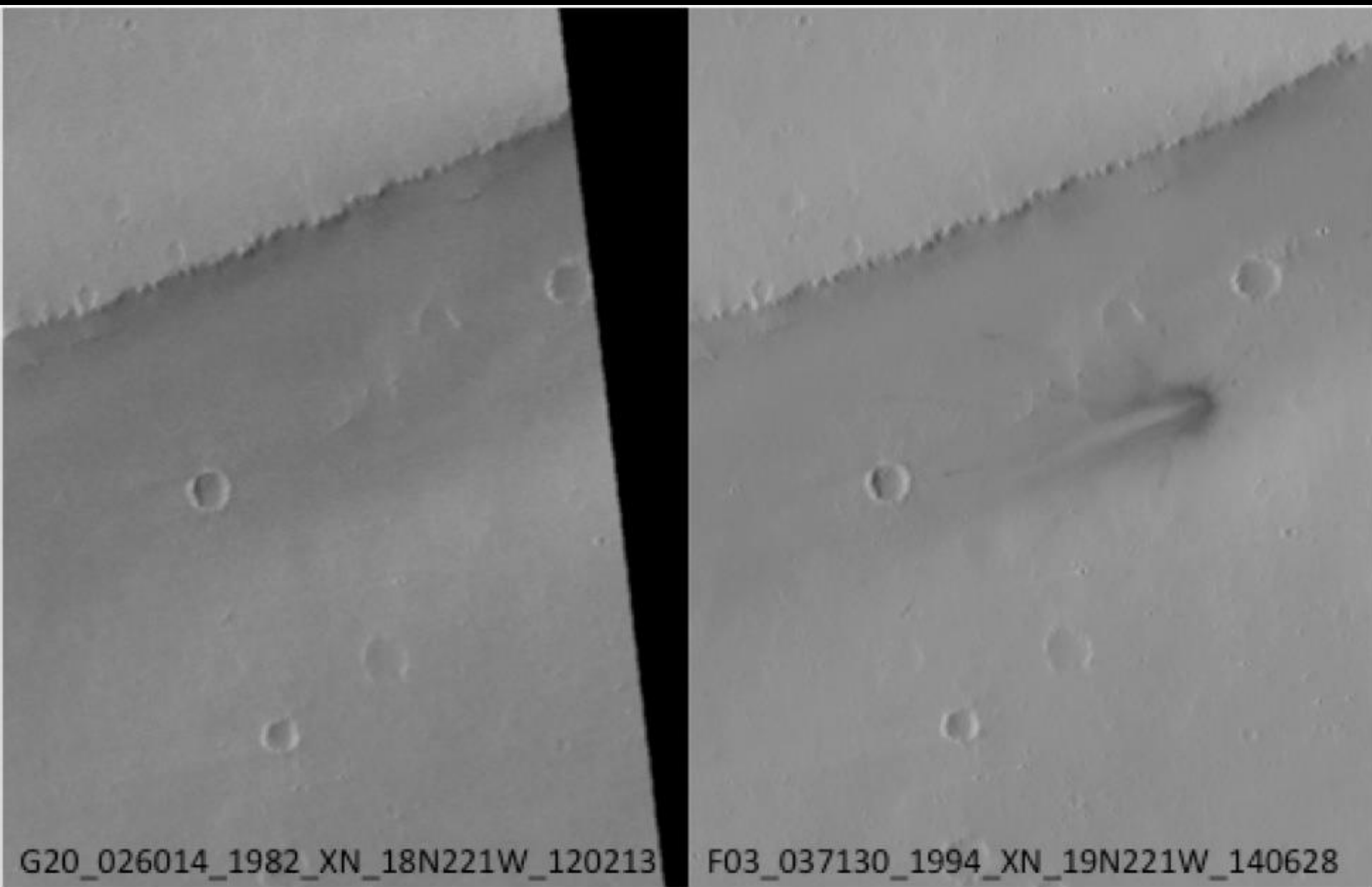
# Exploration in-situ

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

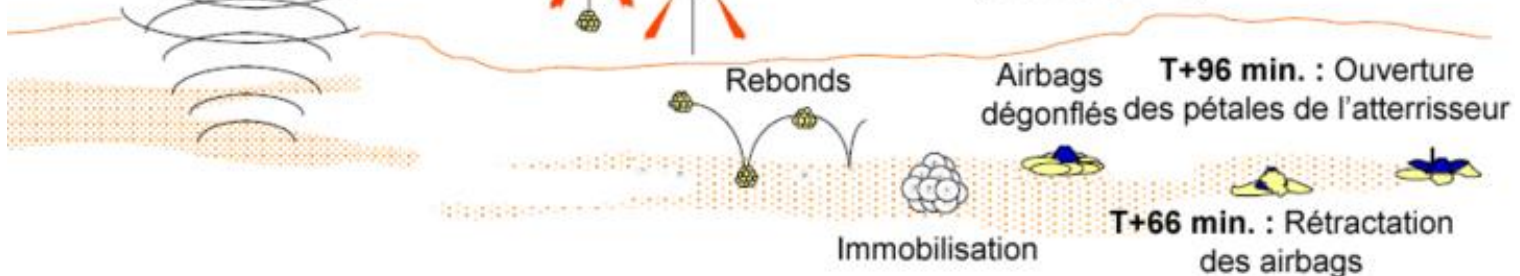
**T-35 s.** : Activation du radar altimètre (*altitude 2,4 km*)

**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.*)

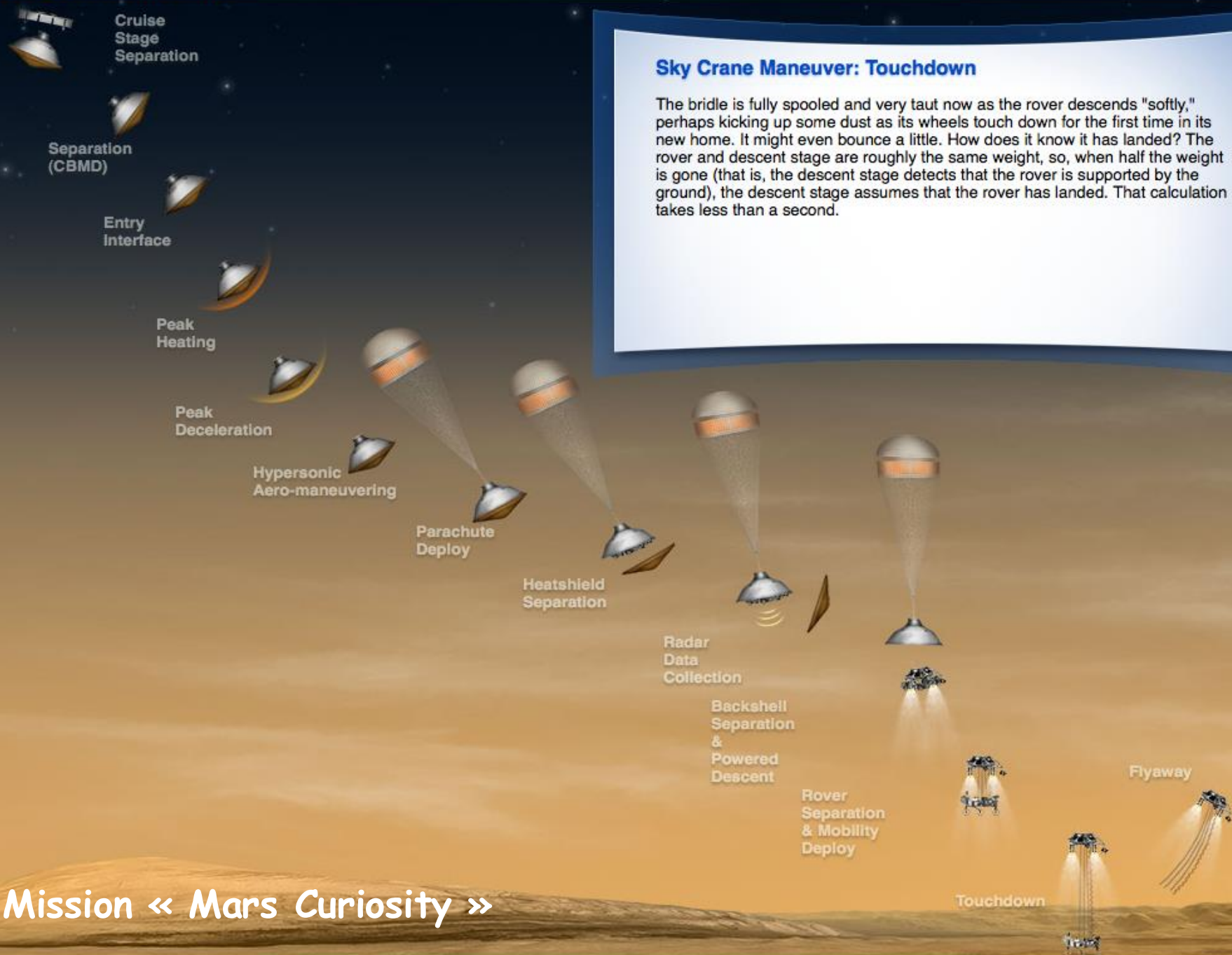
**T-6 s.** : Mise à feu des fusées d'atterrissage  
(*altit. 184 m, vitesse 82 km/h*)

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





## How do I land on Mars?



Mission « Mars Curiosity »



# Mars polar lander - Spirit/Opportunity - Curiosity





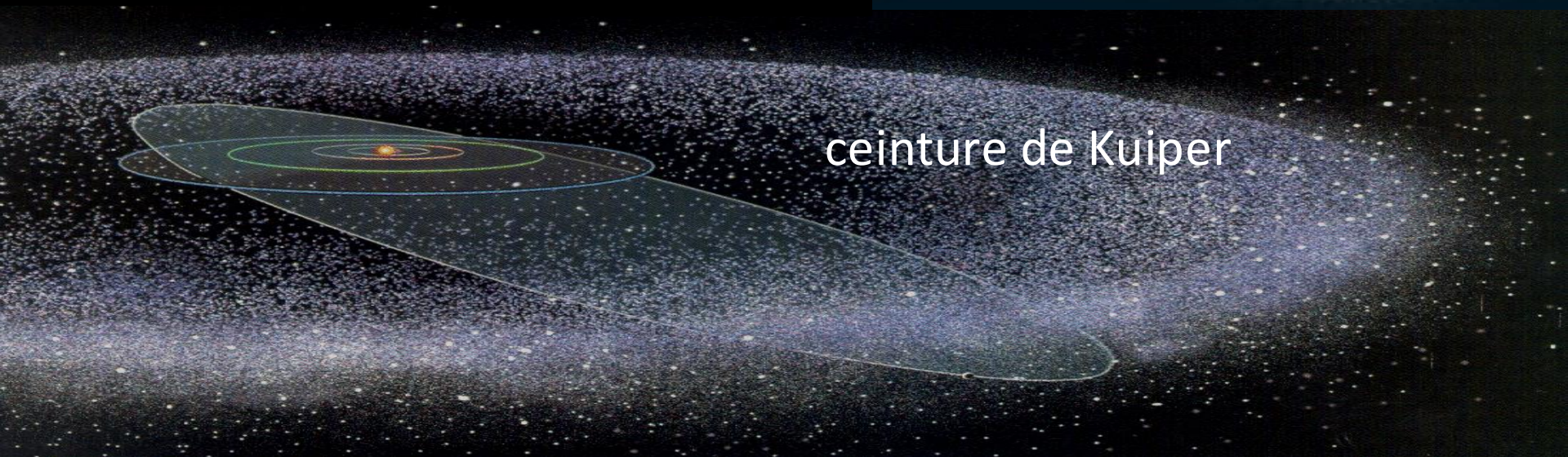
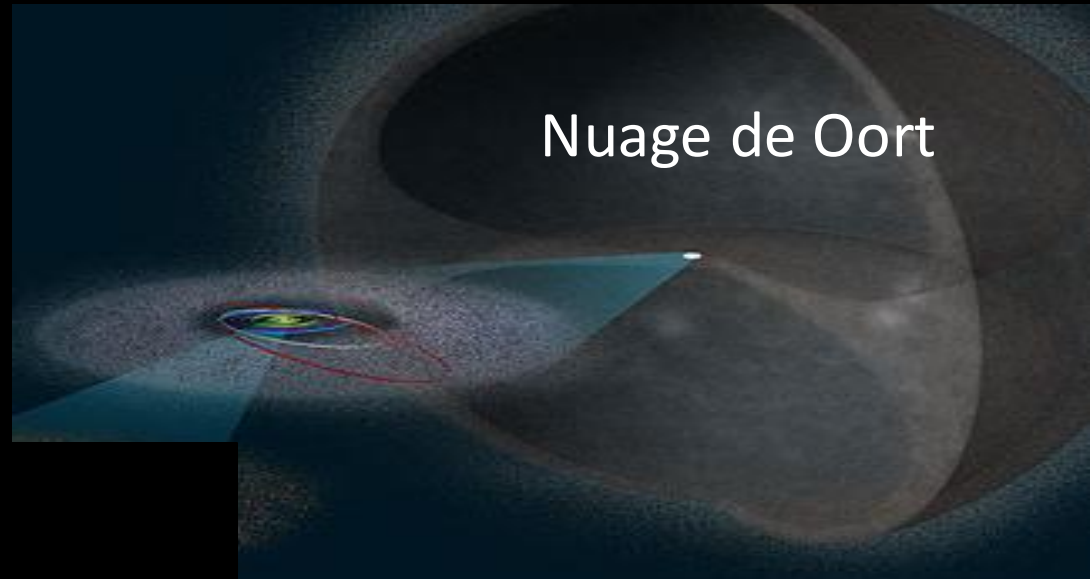




# **Les comètes et astéroïdes**



# Le système solaire extérieur



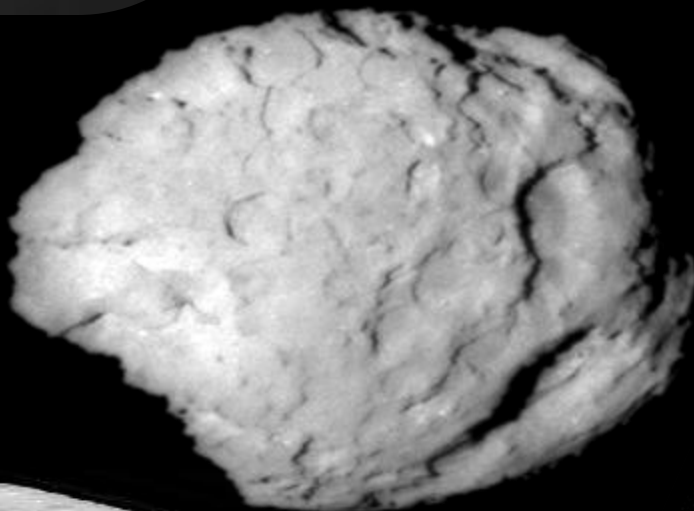


Halley  
(10km)

Gaspra (10km)

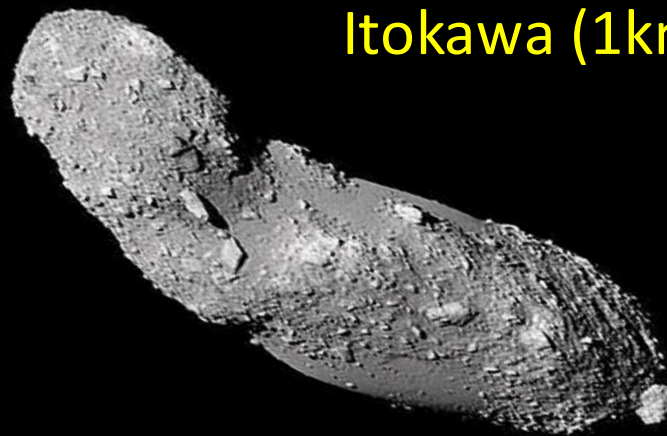


Wild 2 (5km)



IEros (13km)

Itokawa (1km)





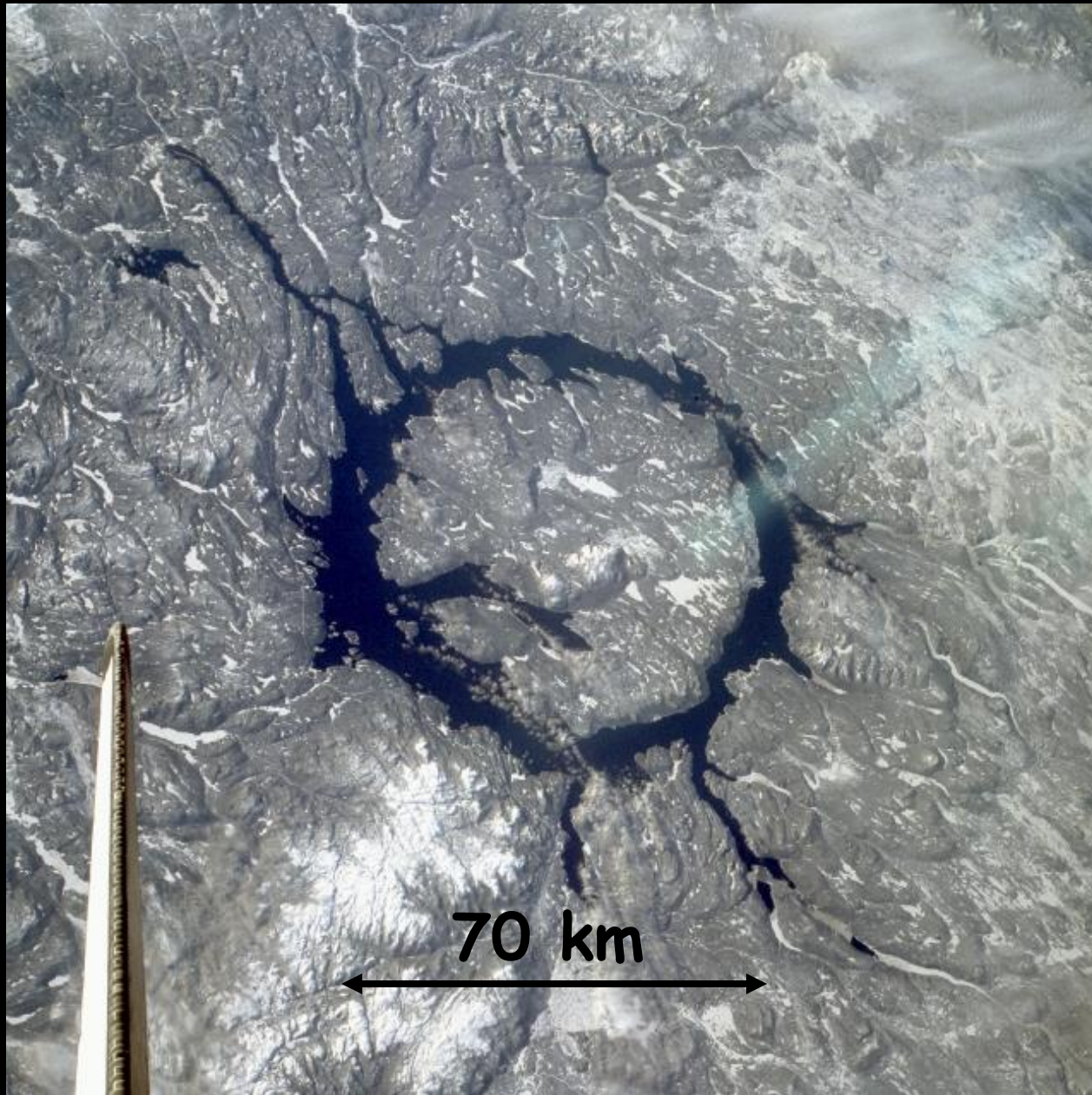
« Meteor crater » (Arizona, USA): 50000 ans



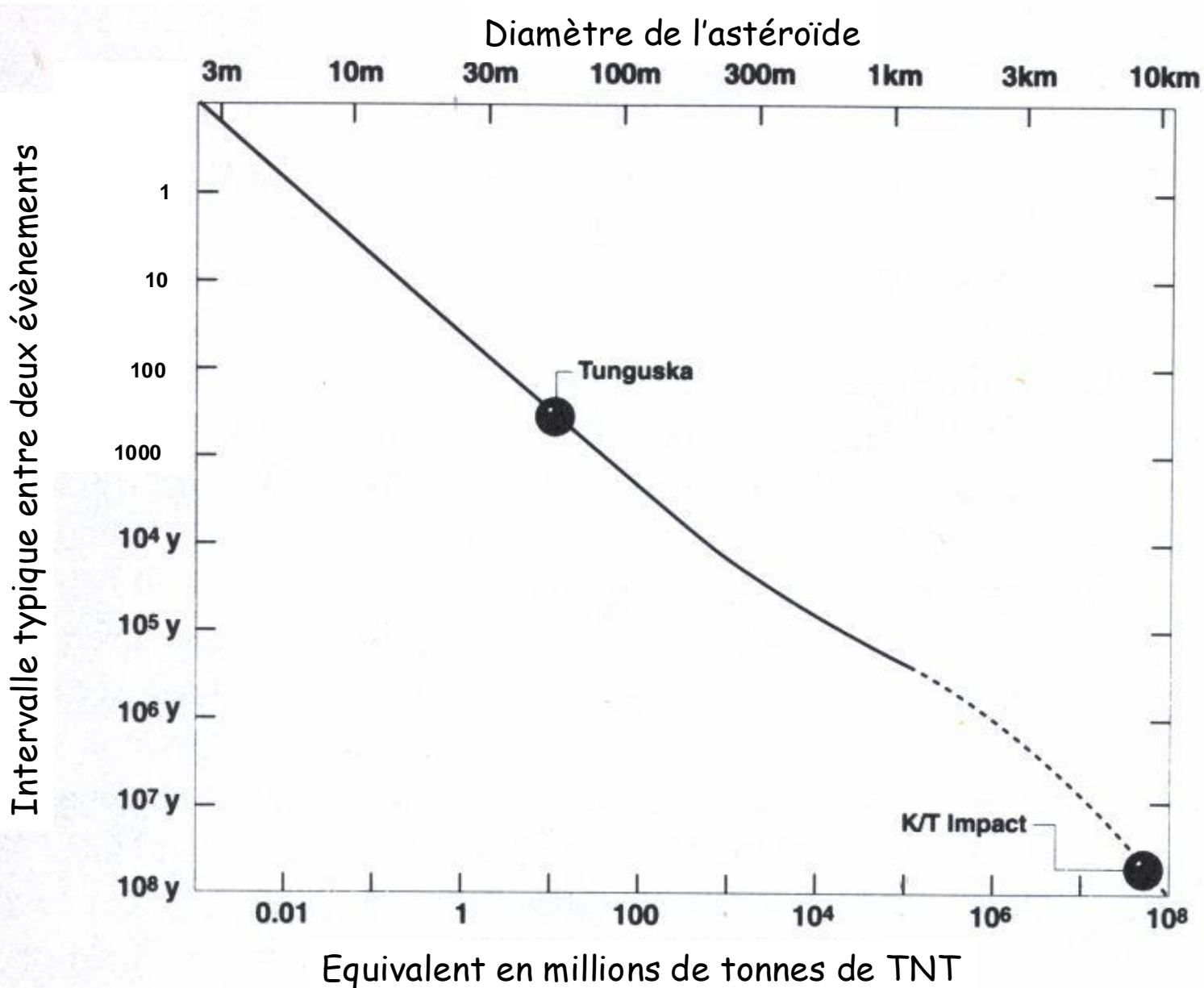
500 m



# Cratère Manicouagan (Canada): 200 millions d'années

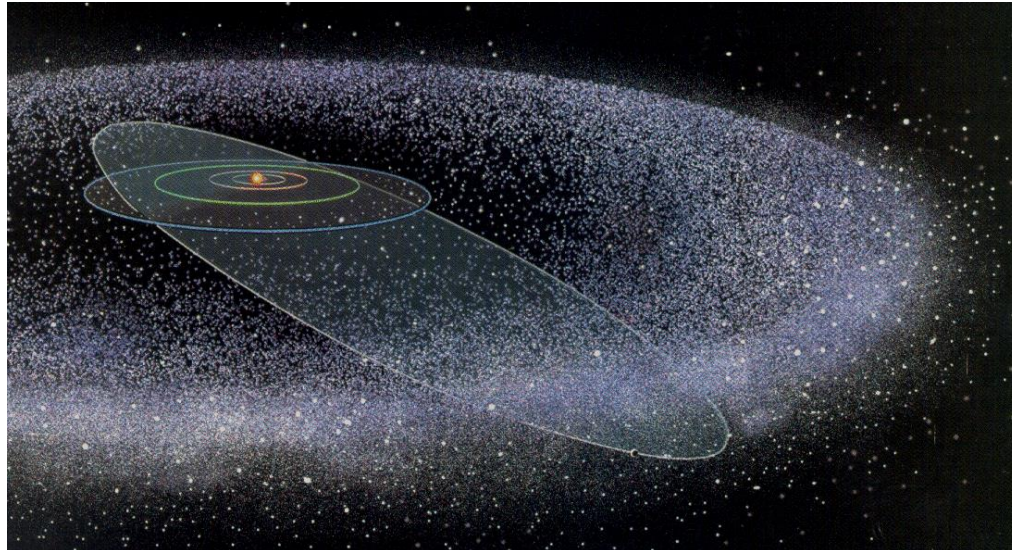


# Fréquence des impacts atmosphériques

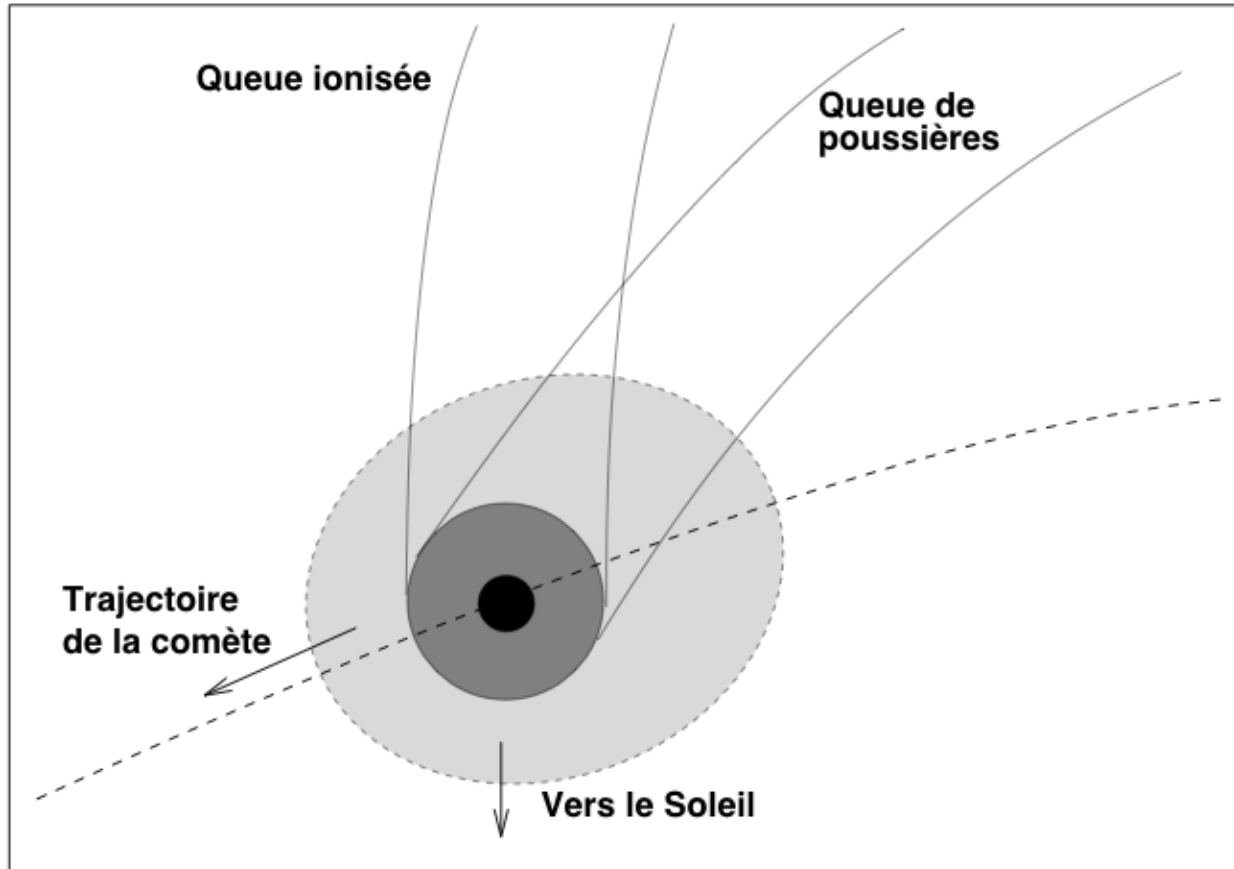


# Les comètes

- Autrefois: 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  $L_{\text{sol}}$  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  $\sigma$

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





# Les comètes

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

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

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  $R_{\text{crit}}$  en-dessous duquel les poussières de densité  $\rho$  sont « éjectées »

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

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

Queue ionisée ( $\text{CO}^+$ )

Queue de poussières

Comète Hale-Bope (1997)

Vers le Soleil

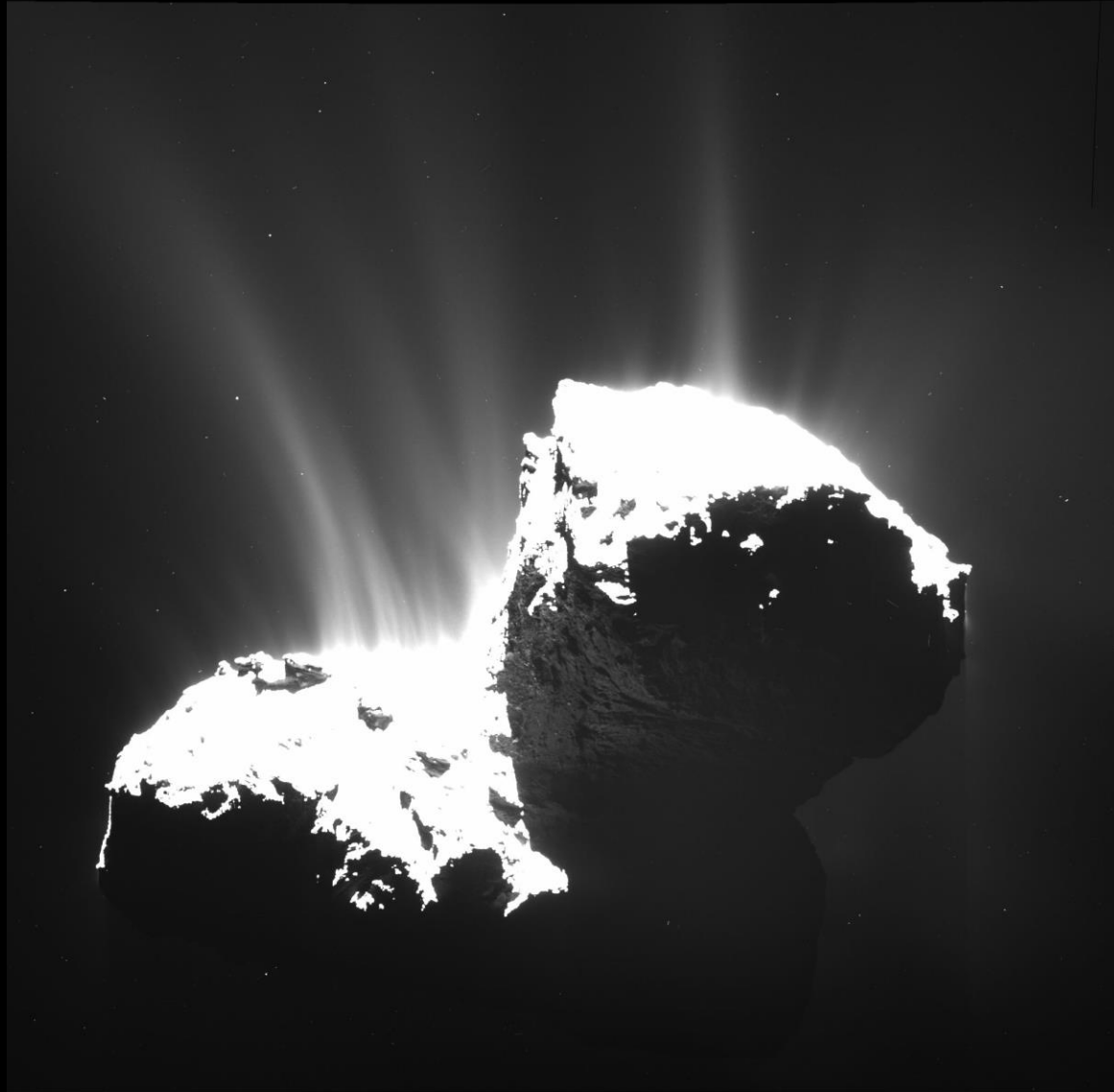


# Comète Mc Naught vue depuis Cerro Paranal (VLT) au Chili (Janvier 2007)



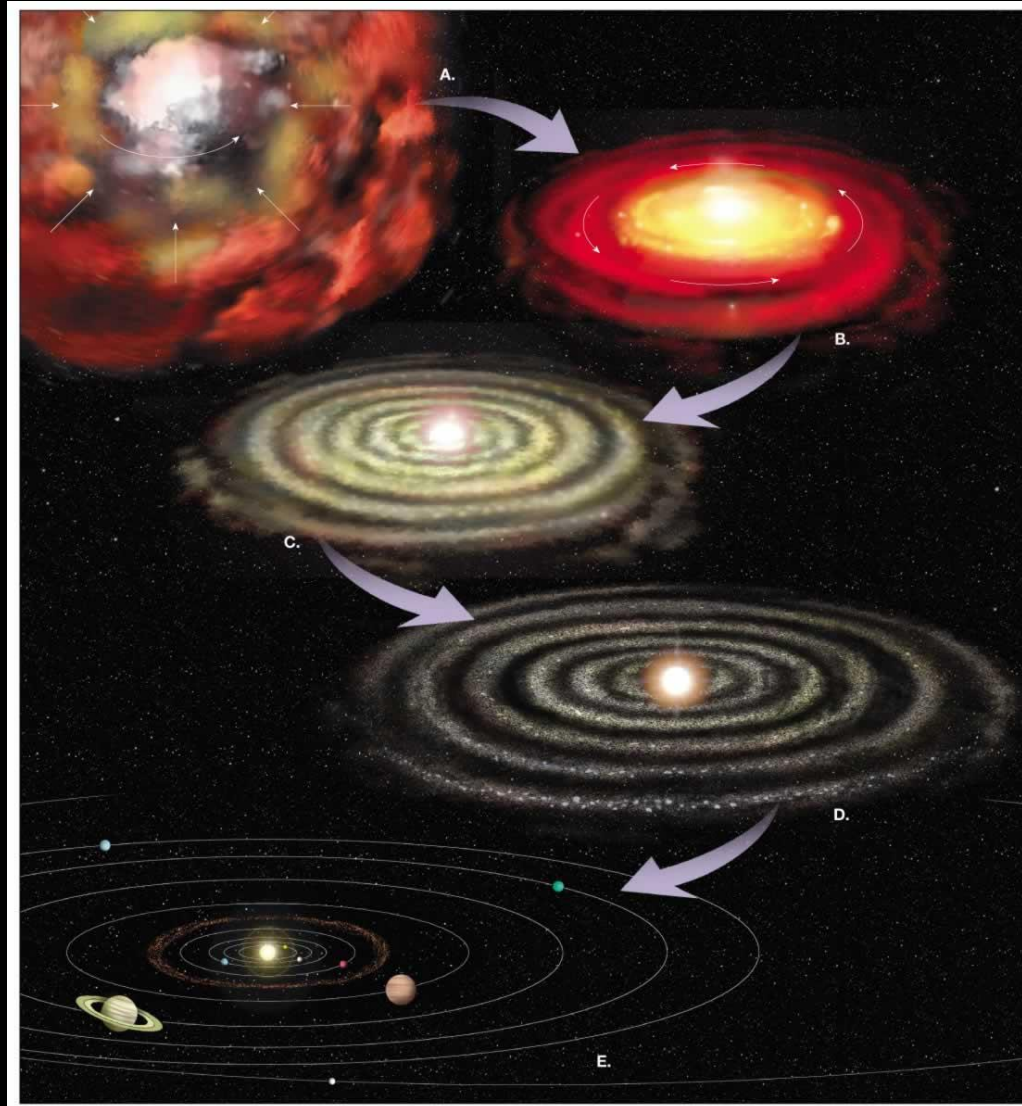


# Mission Rosetta-Philae sur 67-Tchourioumov



# Formation des systèmes planétaires

# Formation des systèmes planétaires



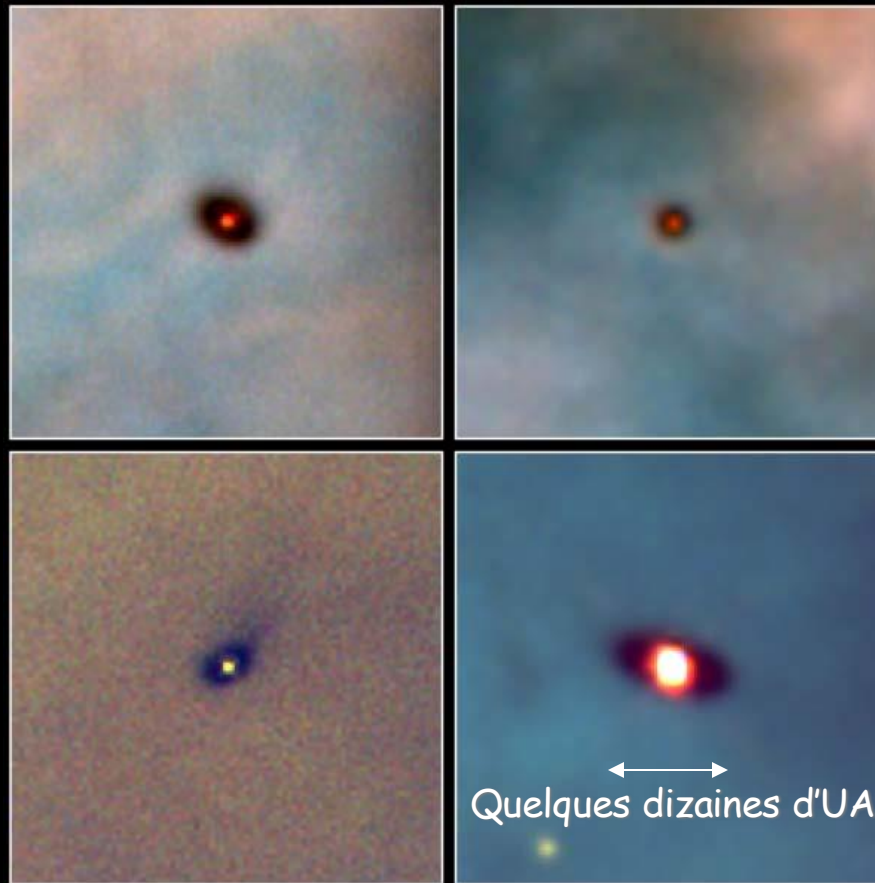


# Formation des systèmes planétaires



Grande nébuleuse d'Orion vue par le HST

# Formation des systèmes planétaires



**Protoplanetary Disks**  
**Orion Nebula**

HST • WFPC2

PRC95-45b • ST ScI 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

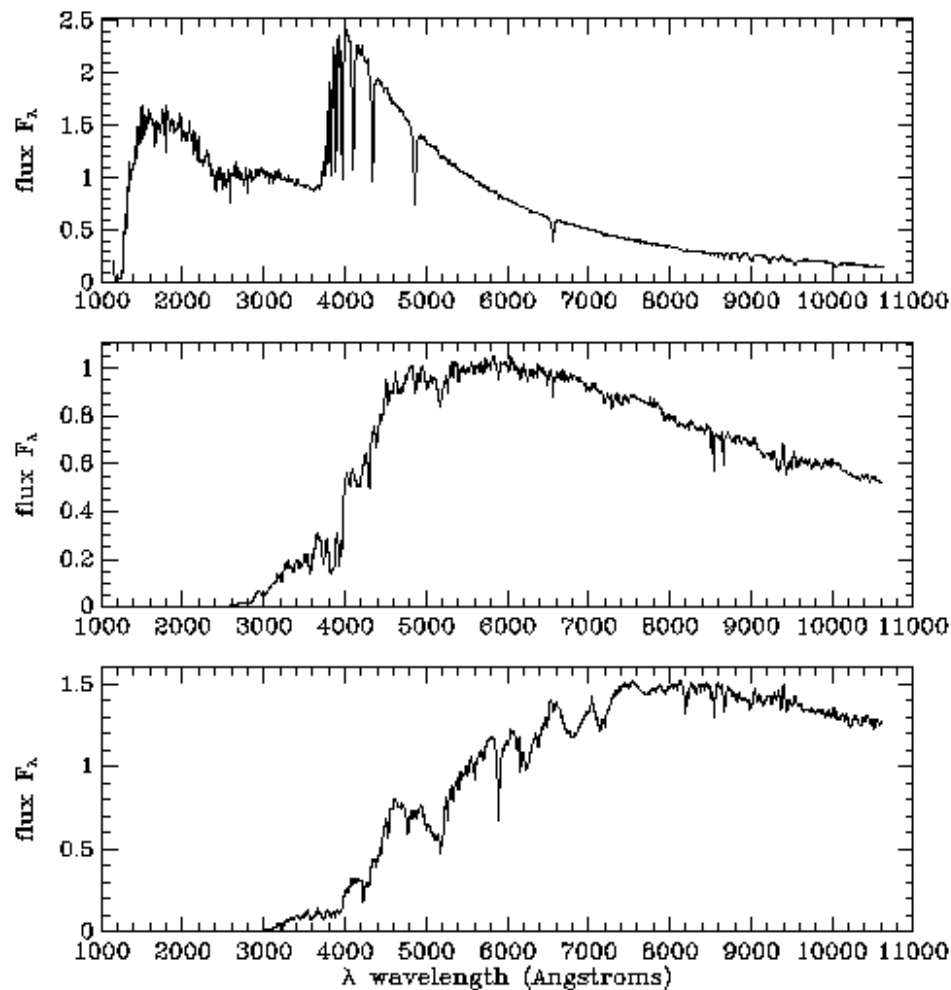
## Origine des atomes

<div><div><div>Fusion lors du Big Bang</div><div>Fin de vie d'étoiles peu massives</div><div>Explosion d'étoiles massives</div><div>Elément artificiel (synthèse humaine) Pas d'isotope stable</div></div><div><div>Fission de rayons cosmiques</div><div>Fusion d'étoiles à neutrons</div><div>Explosion de naines blanches</div></div></div>																<div><div>He</div><div>2</div></div>					
<div><div>H</div><div>1</div></div>	<div><div>Li</div><div>3</div></div>		<div><div>Be</div><div>4</div></div>													<div><div>B</div><div>5</div></div>	<div><div>C</div><div>6</div></div>	<div><div>N</div><div>7</div></div>	<div><div>O</div><div>8</div></div>	<div><div>F</div><div>9</div></div>	<div><div>Ne</div><div>10</div></div>
<div><div>Na</div><div>11</div></div>	<div><div>Mg</div><div>12</div></div>											<div><div>Al</div><div>13</div></div>	<div><div>Si</div><div>14</div></div>	<div><div>P</div><div>15</div></div>	<div><div>S</div><div>16</div></div>	<div><div>Cl</div><div>17</div></div>	<div><div>Ar</div><div>18</div></div>				
<div><div>K</div><div>19</div></div>	<div><div>Ca</div><div>20</div></div>	<div><div>Sc</div><div>21</div></div>	<div><div>Ti</div><div>22</div></div>	<div><div>V</div><div>23</div></div>	<div><div>Cr</div><div>24</div></div>	<div><div>Mn</div><div>25</div></div>	<div><div>Fe</div><div>26</div></div>	<div><div>Co</div><div>27</div></div>	<div><div>Ni</div><div>28</div></div>	<div><div>Cu</div><div>29</div></div>	<div><div>Zn</div><div>30</div></div>	<div><div>Ga</div><div>31</div></div>	<div><div>Ge</div><div>32</div></div>	<div><div>As</div><div>33</div></div>	<div><div>Se</div><div>34</div></div>	<div><div>Br</div><div>35</div></div>	<div><div>Kr</div><div>36</div></div>				
<div><div>Rb</div><div>37</div></div>	<div><div>Sr</div><div>38</div></div>	<div><div>Y</div><div>39</div></div>	<div><div>Zr</div><div>40</div></div>	<div><div>Nb</div><div>41</div></div>	<div><div>Mo</div><div>42</div></div>	<div><div>Tc</div><div>43</div></div>	<div><div>Ru</div><div>44</div></div>	<div><div>Rh</div><div>45</div></div>	<div><div>Pd</div><div>46</div></div>	<div><div>Ag</div><div>47</div></div>	<div><div>Cd</div><div>48</div></div>	<div><div>In</div><div>49</div></div>	<div><div>Sn</div><div>50</div></div>	<div><div>Sb</div><div>51</div></div>	<div><div>Te</div><div>52</div></div>	<div><div>I</div><div>53</div></div>	<div><div>Xe</div><div>54</div></div>				
<div><div>Cs</div><div>55</div></div>	<div><div>Ba</div><div>56</div></div>	<div><div>Hf</div><div>72</div></div>		<div><div>Ta</div><div>73</div></div>	<div><div>W</div><div>74</div></div>	<div><div>Re</div><div>75</div></div>	<div><div>Os</div><div>76</div></div>	<div><div>Ir</div><div>77</div></div>	<div><div>Pt</div><div>78</div></div>	<div><div>Au</div><div>79</div></div>	<div><div>Hg</div><div>80</div></div>	<div><div>Tl</div><div>81</div></div>	<div><div>Pb</div><div>82</div></div>	<div><div>Bi</div><div>83</div></div>	<div><div>Po</div><div>84</div></div>	<div><div>At</div><div>85</div></div>	<div><div>Rn</div><div>86</div></div>				
<div><div>Fr</div><div>87</div></div>	<div><div>Ra</div><div>88</div></div>																				
		<div><div>La</div><div>57</div></div>	<div><div>Ce</div><div>58</div></div>	<div><div>Pr</div><div>59</div></div>	<div><div>Nd</div><div>60</div></div>	<div><div>Pm</div><div>61</div></div>	<div><div>Sm</div><div>62</div></div>	<div><div>Eu</div><div>63</div></div>	<div><div>Gd</div><div>64</div></div>	<div><div>Tb</div><div>65</div></div>	<div><div>Dy</div><div>66</div></div>	<div><div>Ho</div><div>67</div></div>	<div><div>Er</div><div>68</div></div>	<div><div>Tm</div><div>69</div></div>	<div><div>Yb</div><div>70</div></div>	<div><div>Lu</div><div>71</div></div>					
		<div><div>Ac</div><div>89</div></div>	<div><div>Th</div><div>90</div></div>	<div><div>Pa</div><div>91</div></div>	<div><div>U</div><div>92</div></div>	<div><div>Np</div><div>93</div></div>	<div><div>Pu</div><div>94</div></div>	<div><div>Am</div><div>95</div></div>	<div><div>Cm</div><div>96</div></div>	<div><div>Bk</div><div>97</div></div>	<div><div>Cf</div><div>98</div></div>	<div><div>Es</div><div>99</div></div>	<div><div>Fm</div><div>100</div></div>	<div><div>Md</div><div>101</div></div>	<div><div>No</div><div>102</div></div>	<div><div>Lr</div><div>103</div></div>					



# Exemples de spectres stellaires et importance de l'hydrogène

Etoiles de plus  
en plus chaudes



Bleu

Rouge

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

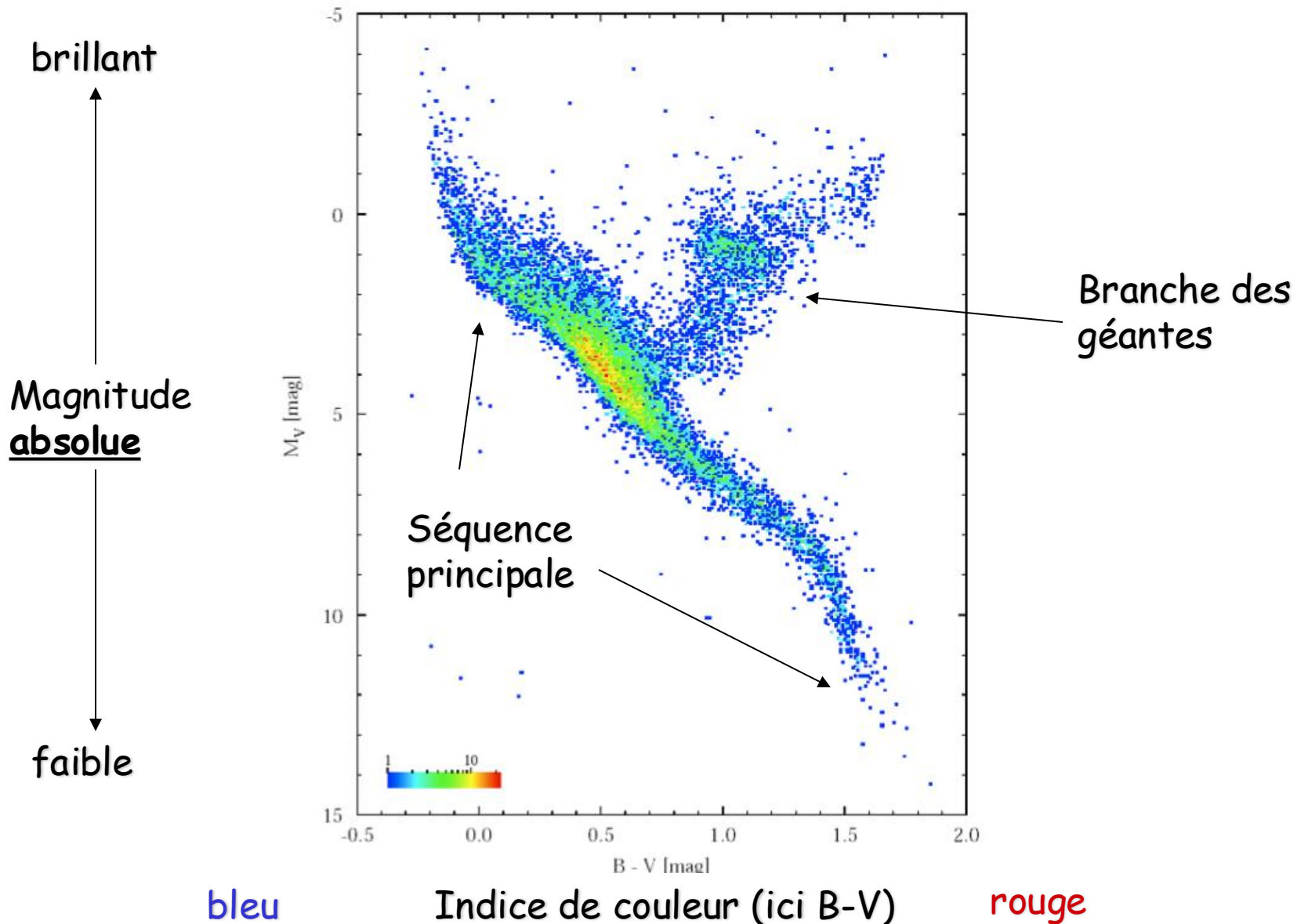


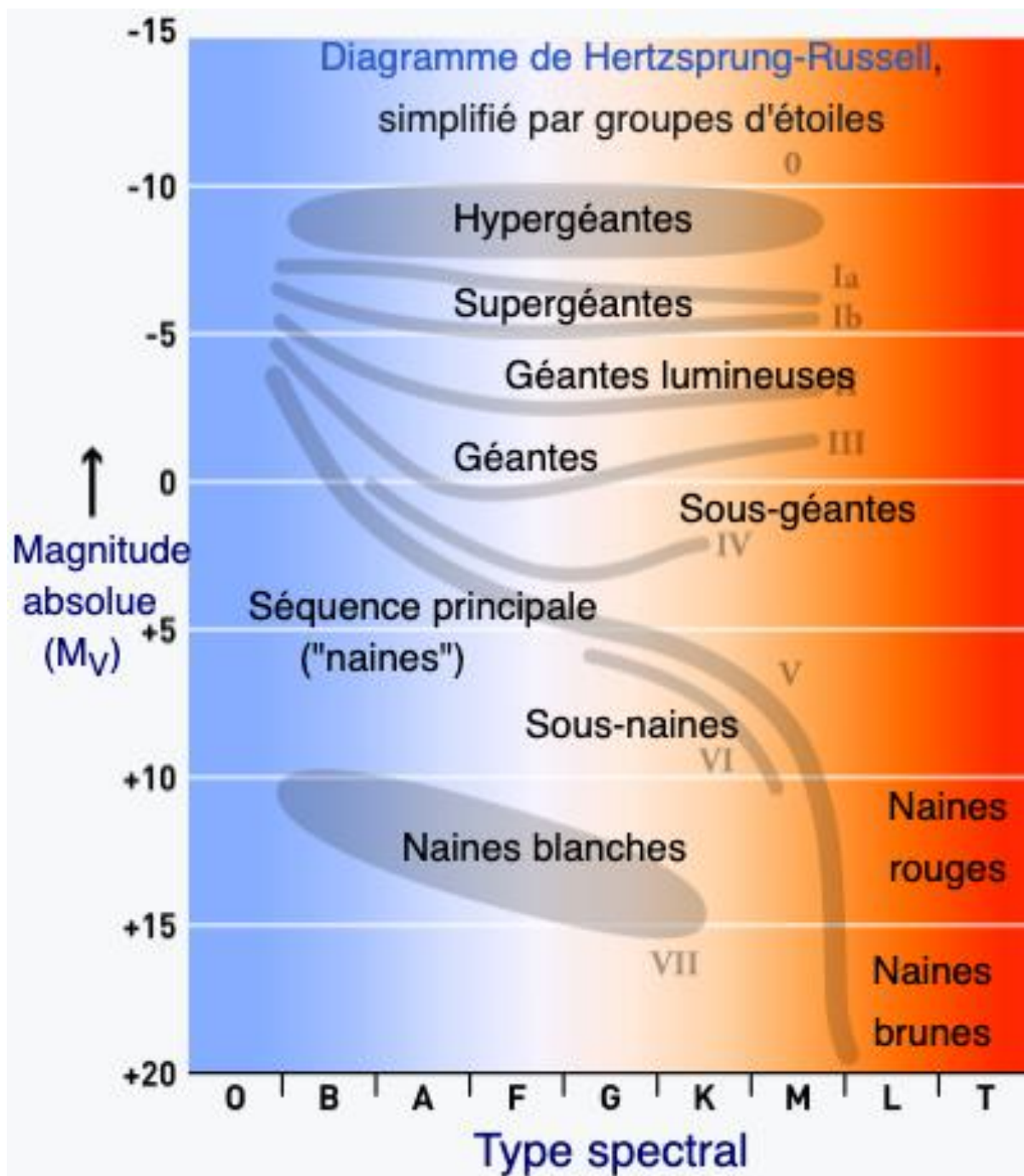
# Le diagramme de Hertzsprung-Russell

- 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

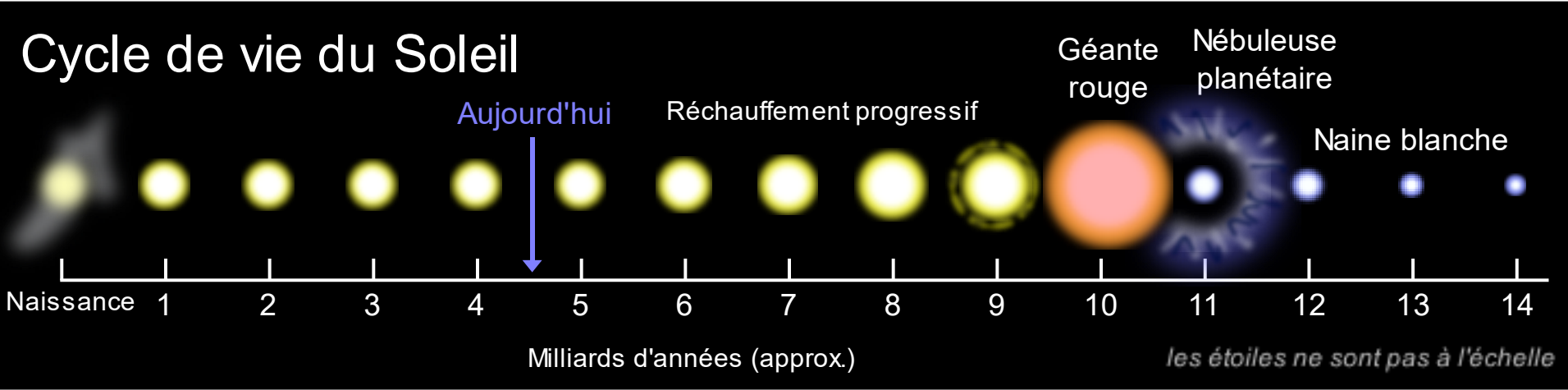


# Le diagramme de Hertzsprung-Russell





# 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:  $T \sim 50000\text{K}$   
Etoiles M:  $T \sim 2500\text{K}$
- **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	$\mathcal{M}/\mathcal{M}_{\odot}$	$\log(L/L_{\odot})$	$M_{\text{bol}}$	$M_V$	$R/R_{\odot}$	$\bar{\rho}/\bar{\rho}_{\odot}$
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

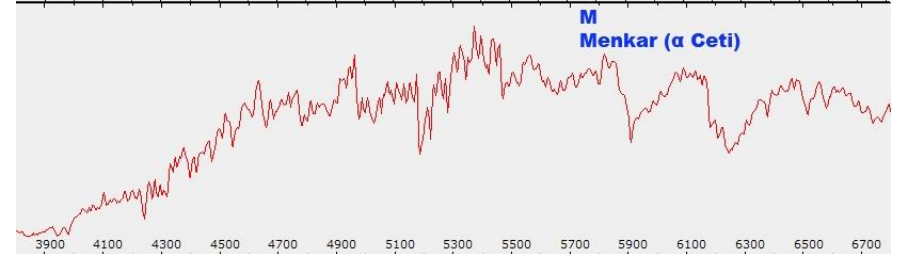
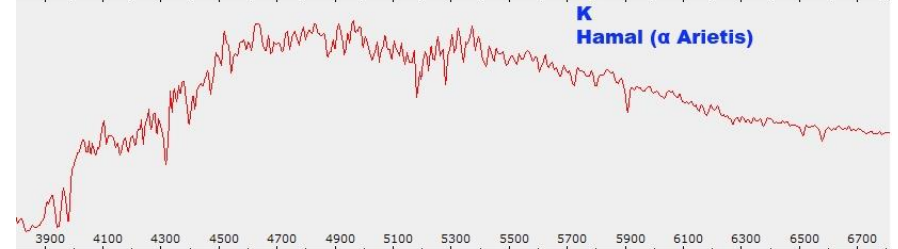
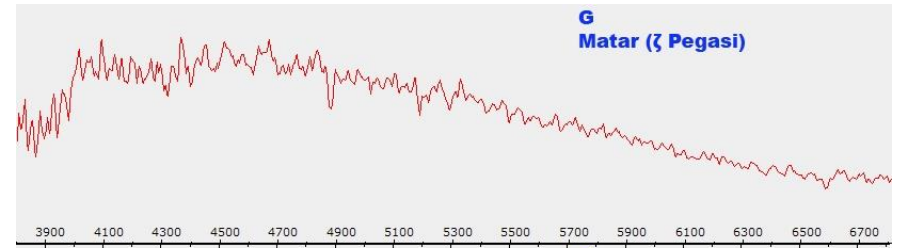
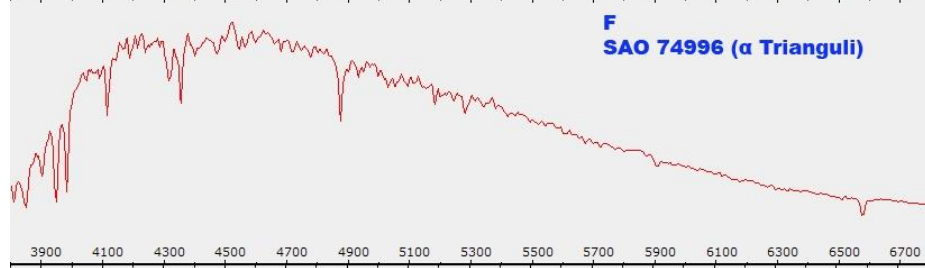
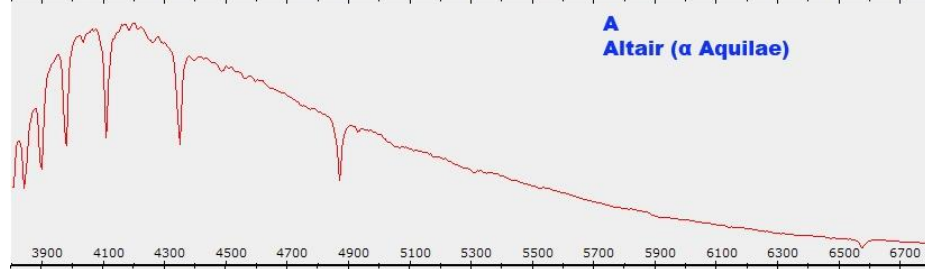
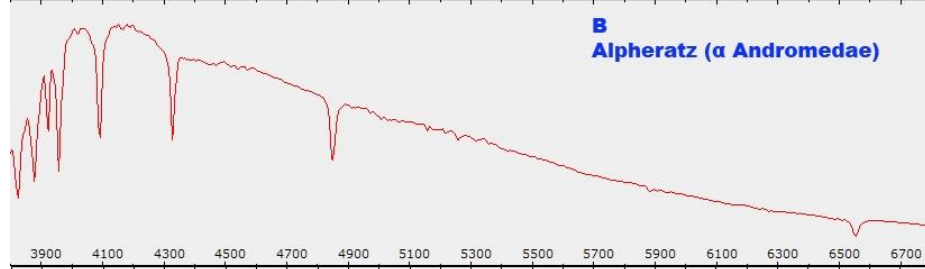
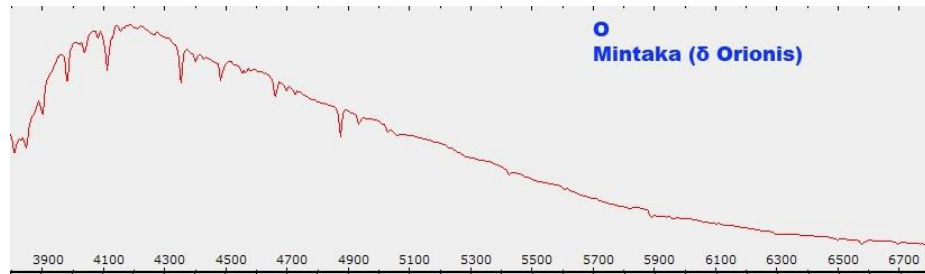
SOURCE: Data published in Schmidt-Kaler (1982)

**Table de paramètres stellaires de la séquence principale<sup>38</sup>**

Type spectral <sup>↕</sup>	$R / R_{\odot}$	$M / M_{\odot}$	$L / L_{\odot}$	<b>K</b>	Exemples <sup>39</sup> <sup>↕</sup>
	Rayon <sup>↕</sup>	Masse <sup>↕</sup>	Luminosité <sup>↕</sup>	Température <sup>↕</sup>	
O5	18	40	500 000	38 000	Zeta Puppis
B0	7,4	18	20 000	30 000	Phi <sup>1</sup> 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 <sup>note 3</sup>	1,00 <sup>note 3</sup>	1,00 <sup>note 3</sup>	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 <sup>40</sup>	61 Cygni A
M0	0,63	0,47	0,063	3 920	Gliese 185 <sup>41</sup>
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 <sup>42</sup>



# Exemples de spectres stellaires



# Taille des étoiles

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

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

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

$$\frac{L}{L_{\text{sol}}} = \left( \frac{R}{R_{\text{sol}}} \right)^2 \left( \frac{T}{T_{\text{sol}}} \right)^4$$

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  $\alpha$  en fonction du rayon  $R$  et de la distance  $r$ :

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

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

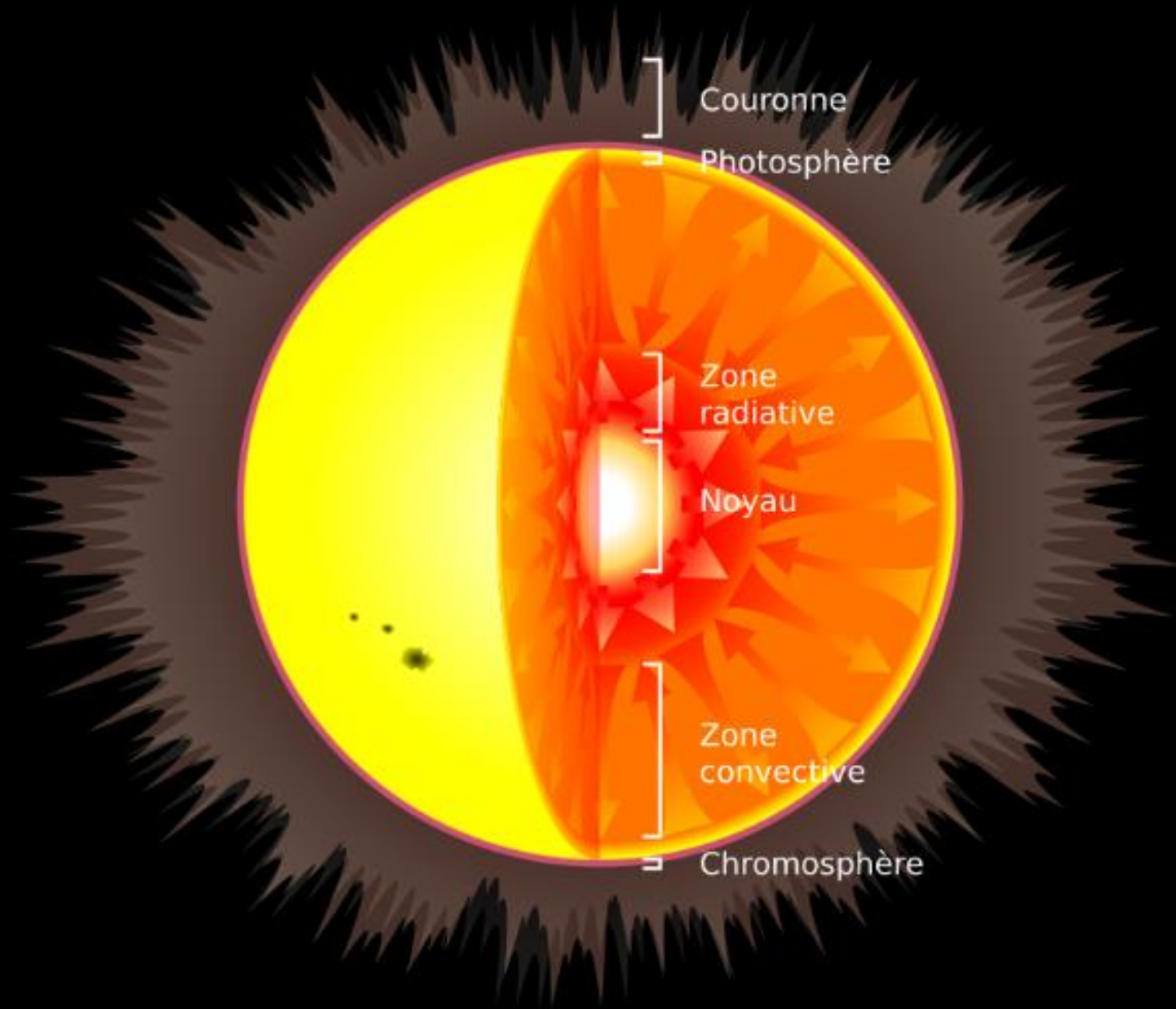
Pour une hypergéante de magnitude apparente  $V=0,5$  à une distance de 200 pc et de rayon  $R = 1000 \times R_{\text{sol}}$  on obtient

$$a = 0,02''$$

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  $\sim 1000$  ans ...

Autres sources possibles:

- Energie nucléaire
- Contraction gravitationnelle.

# Contraction gravitationnelle

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

$$dE_{Tot} = dE_{cin} + dE_{pot} = -L dt$$

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**

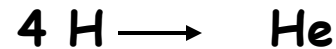
Pour le Soleil il n'est que de  $10^7$  ans, soit 1000 fois trop court.

-> 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

