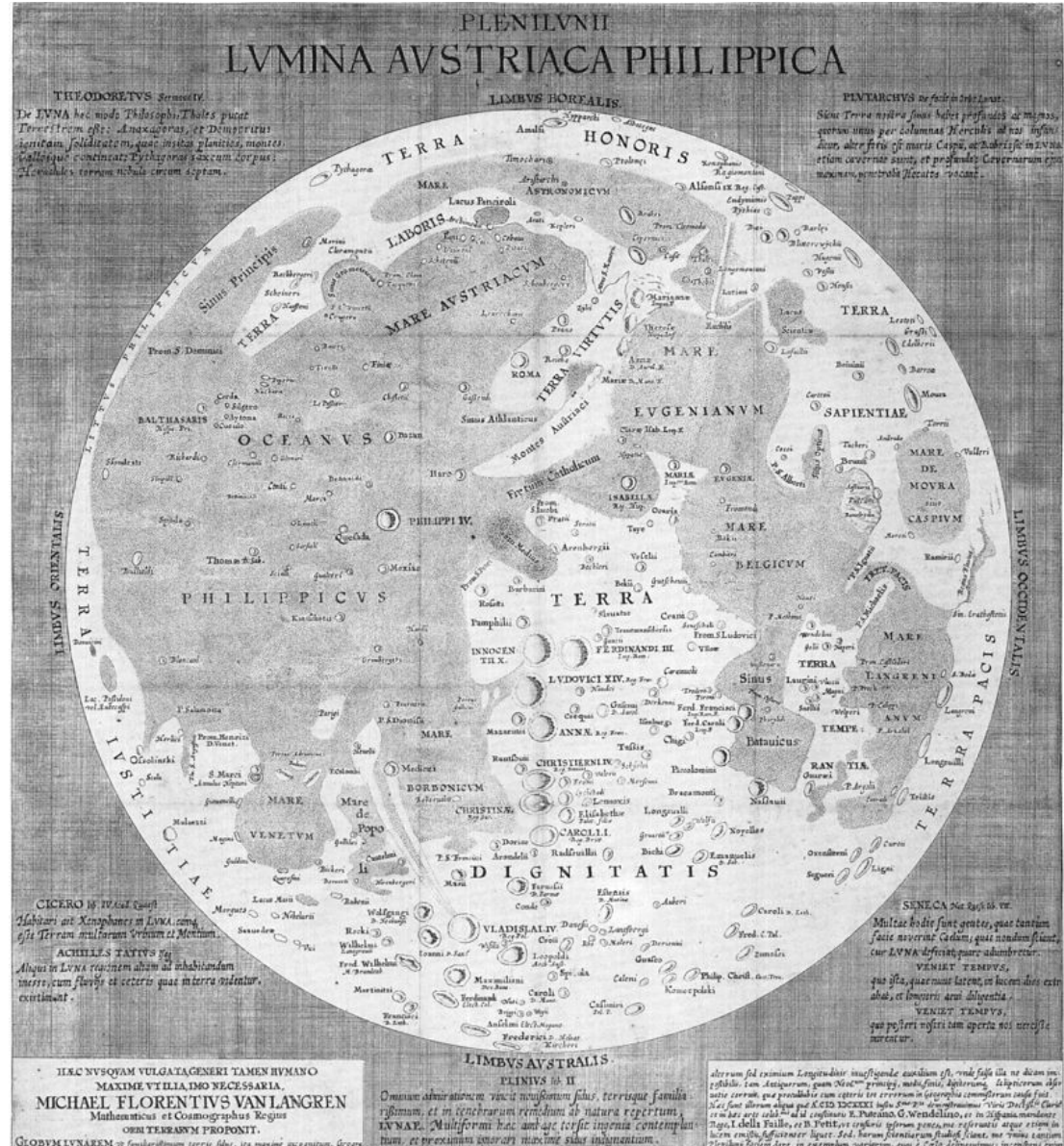
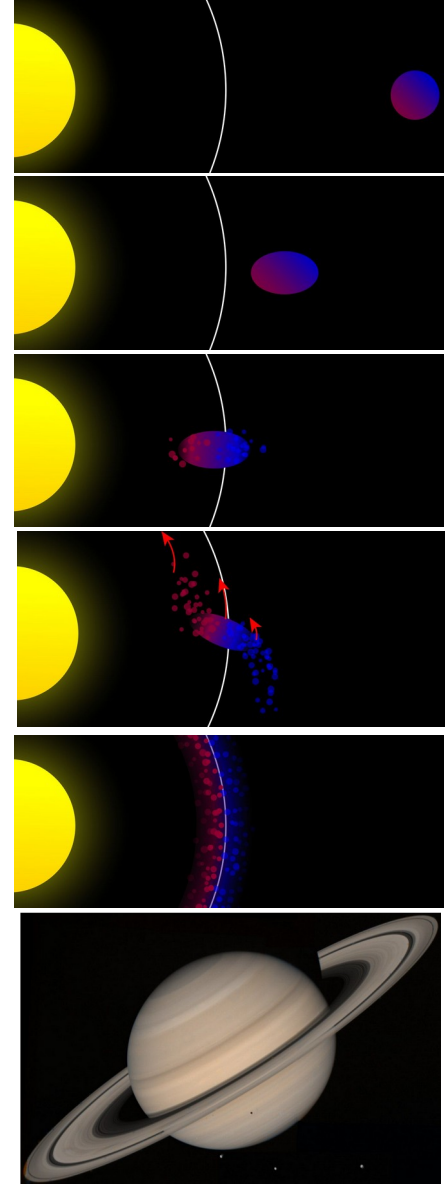
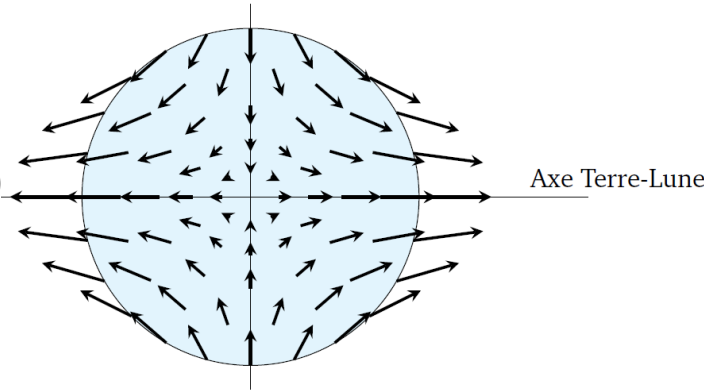




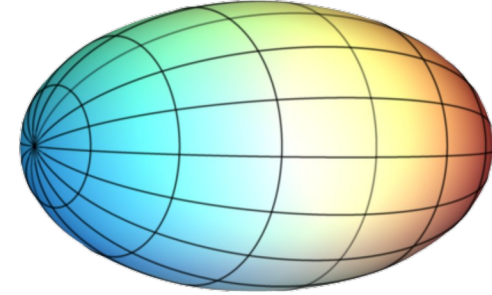
$$\overrightarrow{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \overrightarrow{e}_{12} = -\overrightarrow{F}_{2 \rightarrow 1}$$

-



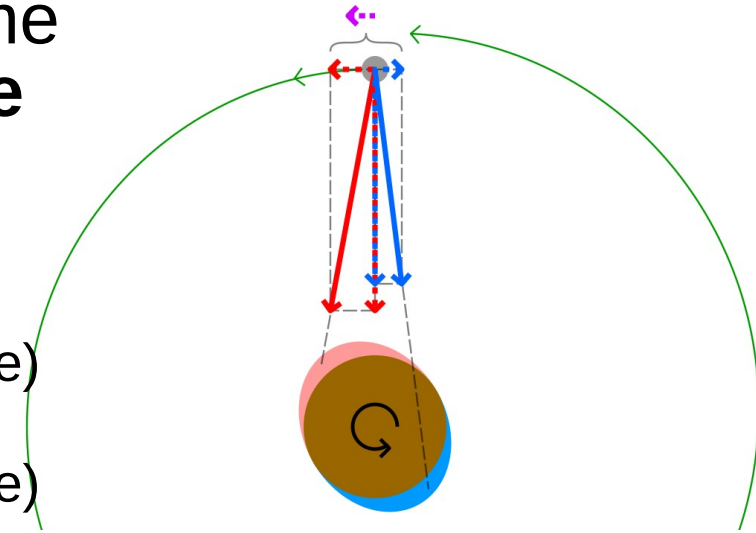
Conséquences (1)

Forme « prolate »
ou « cigaroïde »



- Comme rotation **plus rapide** que révolution ($T_{\text{Terre}} = 24 \text{ h} < T_{\text{Lune/Terre}} = 27 \text{ j}$), le bourrelet dû à la marée (dont la forme évolue lentement) **dépasse le satellite**

- → répartition **dissymétrique**
- **couple sur la Lune** :
 - **Rouge** : « pousse la Lune vers l'avant »
(= transfère de l'énergie de la Terre à la Lune)
 - **Bleu** : « pousse la Lune vers l'arrière »
(= transfère de l'énergie de la Lune à la Terre)
 - Bourrelet rouge plus proche → effet plus fort
→ **la force nette (violette) donne de l'énergie à la Lune, prélevée à la Terre**
→ **augmentation de la taille de l'orbite**

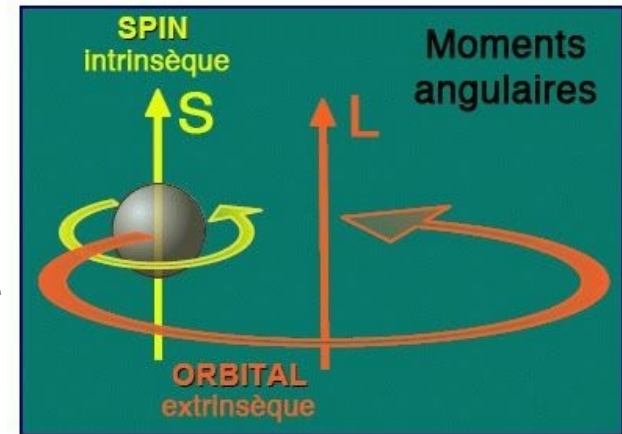


Vue de dessus

Conséquences (2)

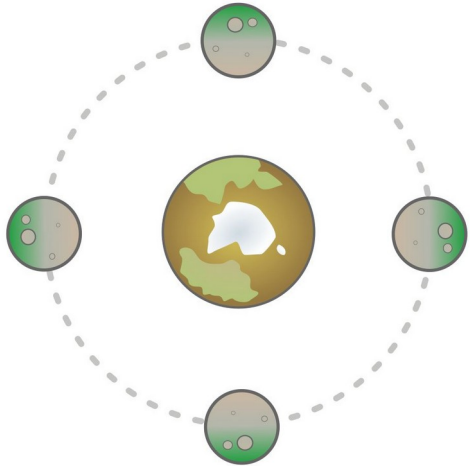
- Donc **transfert d'énergie** de la Terre vers la Lune
 - L'énergie mécanique de la Terre baisse, celle de la Lune augmente
- Principe de **conservation de l'énergie et du moment angulaire**
- **Théorème de König** : moment cinétique total = moment intrinsèque + moment extrinsèque

- Conséquences :
 - **Ralentissement de la rotation de la Terre**
 - **Éloignement de la Lune** de 3,8 cm/an, donc ralentissement de sa révolution (loi de Kepler)
 - → La période de rotation de la Terre et la période de révolution de la Lune **convergent**
= « **rotation synchrone** »
- (+ effets de friction → perte d'énergie)



Rotation synchrone

- Période de rotation du satellite = période de révolution → présente toujours la même face à la planète
- = « **verrouillage gravitationnel** »
ou « **verrouillage par effet de marée** »
- **Peut concerner les 2 corps** (ex : Pluton et Charon, Éris et Dysnomie)



- Pluton (~vraies couleurs, $r = 1200$ km) et Charon (fausses couleurs, $r = 600$ km)
- Charon évolue sur l'orbite **géo-stationnaire** de Pluton : en plus de présenter toujours la même face, Charon apparaît donc **immobile dans le ciel de Pluton**



Effets réciproques

- La Lune est **déjà en rotation synchrone** avec la Terre
- Sa **période de rotation** est égale à sa **période de révolution** autour de la Terre : 27,3 j (= **mois sidéral**)
- À l'équateur, $v = 16 \text{ km/h}$: on pourrait y courir et regarder **toujours dans la même direction** (étoiles fixes lointaines) !



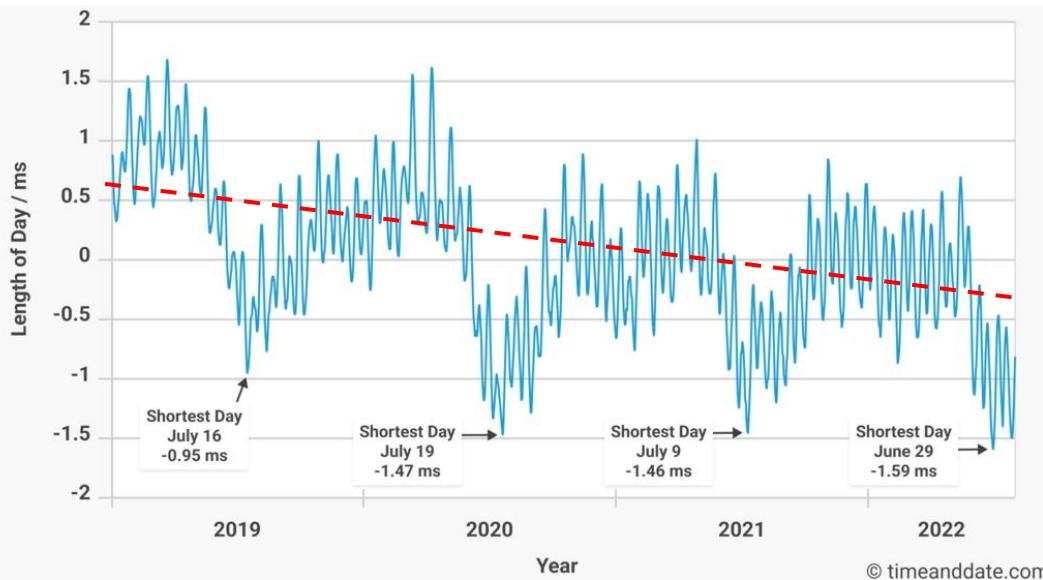
Projet « Latitude 0 » de Mike Horn

- La rotation de la Terre **ralentit** pour progressivement s'harmoniser avec la durée du mois lunaire qui s'allonge également
→ **convergence à 47 jours** (dans 50 milliards d'années...)
- Note : synchronisation de la Terre avec le Soleil, mais beaucoup plus lente

Variation de la durée du jour

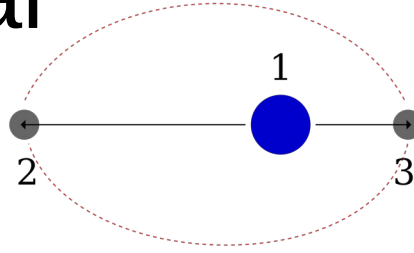
- Variation de la durée du jour : + 2 ms / siècle
- Variation **pas constante** (plusieurs causes)
 - Éloignement de la Lune → ↓ forces de marée
→ ralentissement du ralentissement
- Lune fixe dans le ciel de la Terre dans
~50 milliards d'années

↕	Période géologique ↕	Nombre de jours par an ¹⁸ ↕	Durée du jour ¹⁹ ↕
-4 500 Ma	Hadéen	1434	6,1 h
-2 500 Ma	Archéen	714	12,3 h
-1 200 Ma	Sténien	493,2	17,7 h
-500 Ma	Cambrien	425	20,5 h
-400 Ma	Silurien	410	21,5 h
-300 Ma	Carbonifère	400	22 h
-200 Ma	Jurassique	390	22,5 h
-100 Ma	Crétacé	380	23 h
0 Ma		365	24 h
+ ??? Ma		350	25 h



- **Fluctuations périodiques** de la durée du jour :
 - Rapides : effets de l'orbite lunaire
 - Lentes : mouvements atmosphériques
 - Tendance décroissante : raison inconnue
→ impossibilité de prédire à 1 an

Réchauffement par effet de marée



- Si le satellite a une **orbite elliptique**, **forces de marée plus fortes près du périapside** que de l'apoapside
 - processus de **friction**
 - énergie dissipée sous forme de **chaleur** dans la croûte des corps considérés
 - dissipation de l'énergie orbitale
 - rotation synchrone et orbite circulaire
- Mais !
Le réchauffement persiste si l'orbite **ne peut se circulariser** en raison de la présence d'autres objets
 - Io (Jupiter) et son volcanisme
 - Encelade (Saturne) et son eau liquide ?

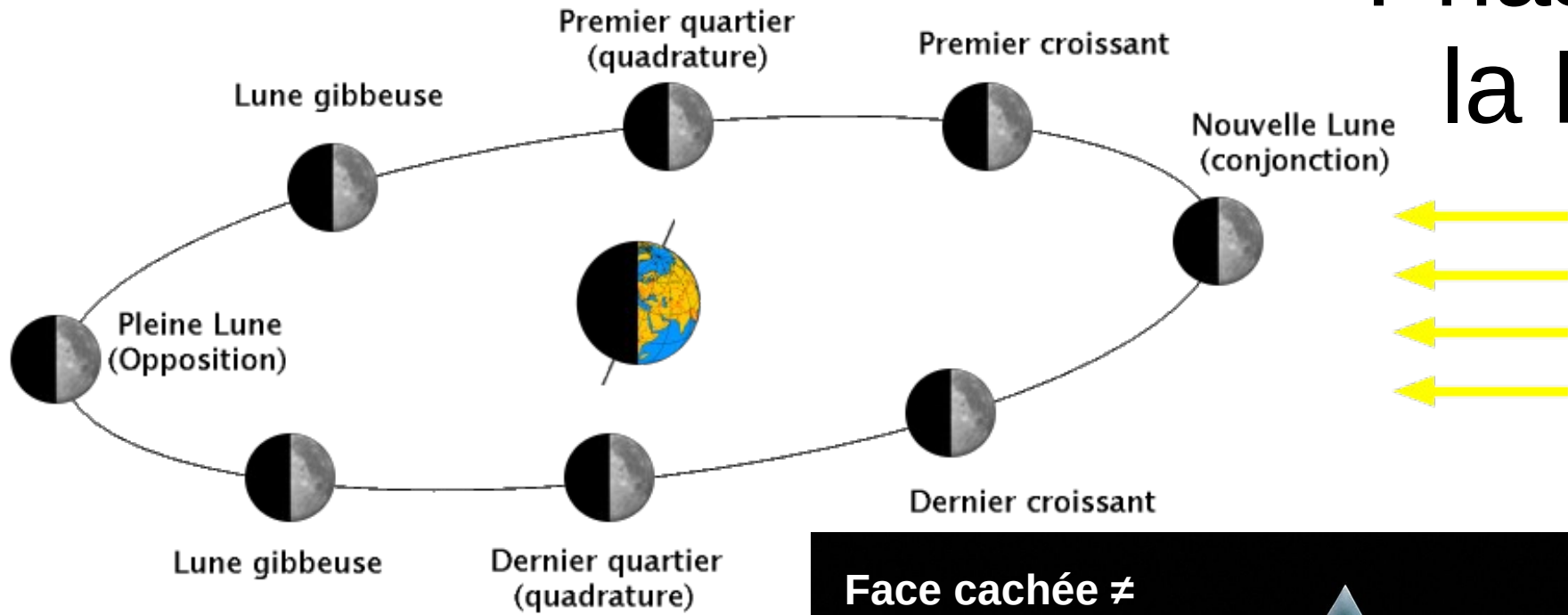


Encelade et ses « rayures du tigre »,
par la sonde Cassini en 2005



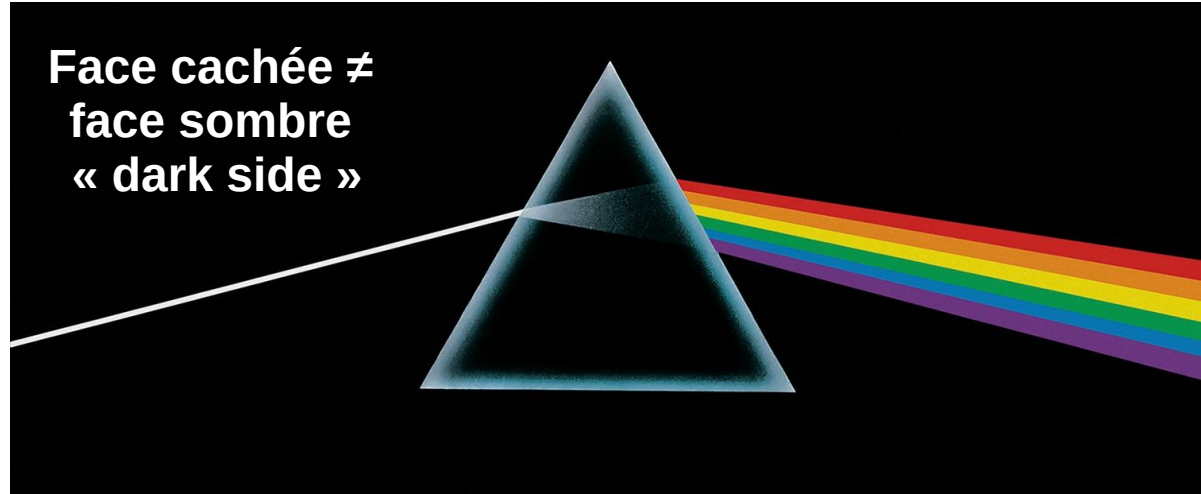
Éruption volcanique sur Io par Galileo, 2006

Phases de la Lune



- Simplification car Terre tourne autour du Soleil pendant cette période

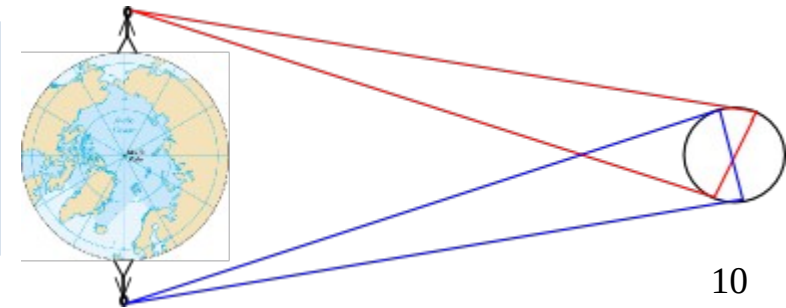
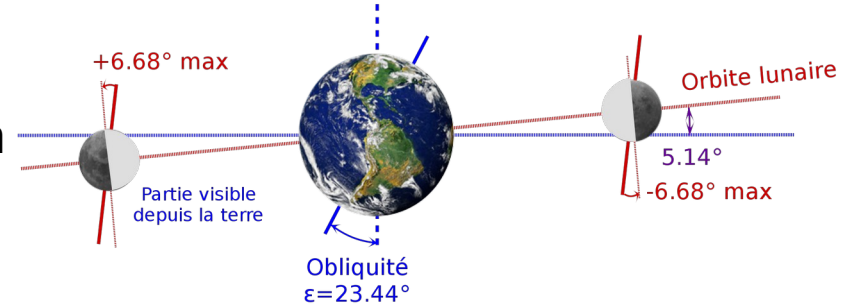
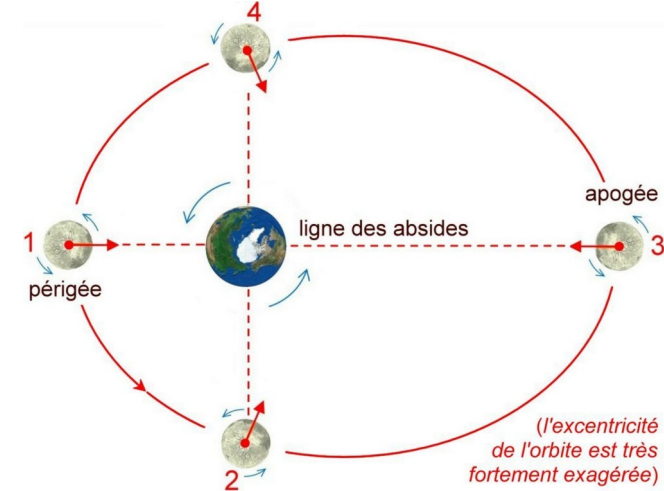
**Face cachée $\neq$
face sombre
« dark side »**



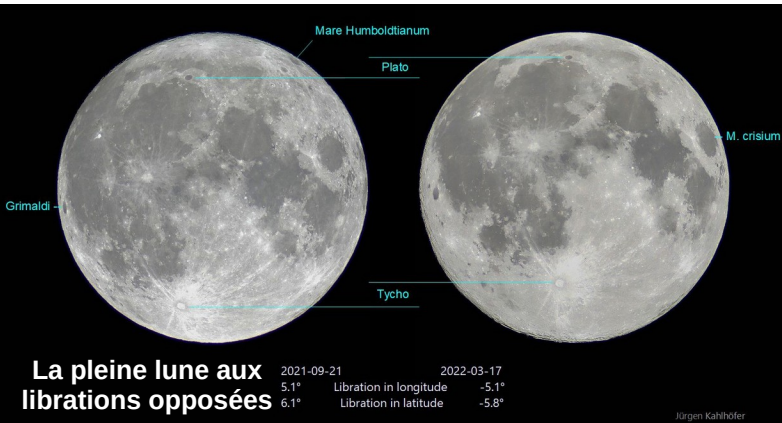
La libration (1)

- **Rotation synchrone** → **face visible & face cachée**
- Mais « **libration** » = lente oscillation, réelle ou apparente, d'un satellite vue à partir du corps autour duquel il orbite

1. **Libration en longitude** : en raison de l'excentricité (2ème loi de Kepler : le temps mis pour parcourir 1/4 de l'orbite n'est pas 1/4 de la période) → Est/Ouest
2. **Libration en latitude** : axe de rotation pas perpendiculaire au plan de l'orbite (max = $6,68^\circ$) → Nord / Sud
3. **Libration parallactique** : changement de position d'un observateur sur Terre par rapport à la Lune → y.c. libration diurne due à la rotation de la Terre



On peut ainsi voir
59 % de la surface lunaire (mais 50 % à un instant donné !)

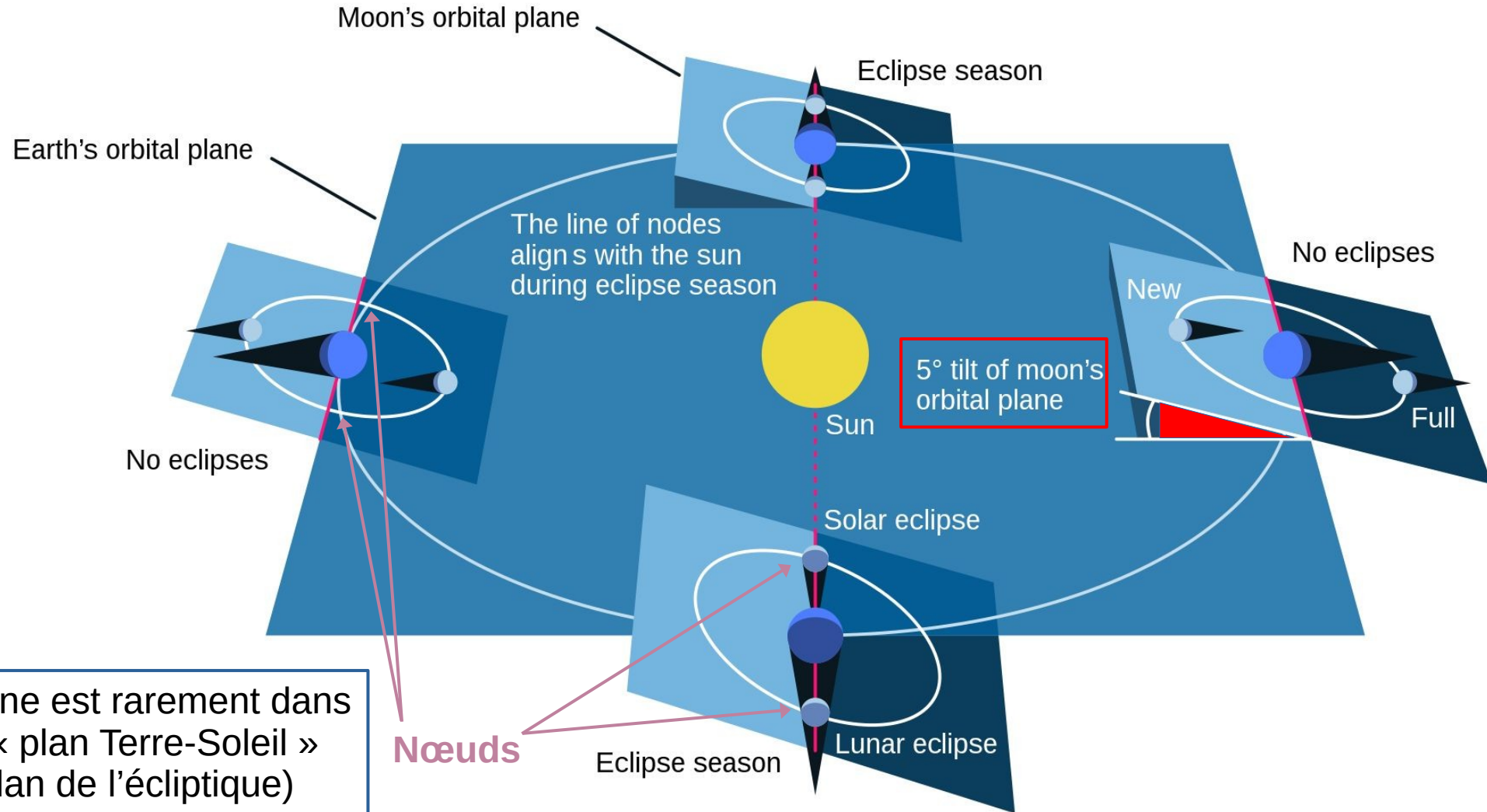


La libration (2)

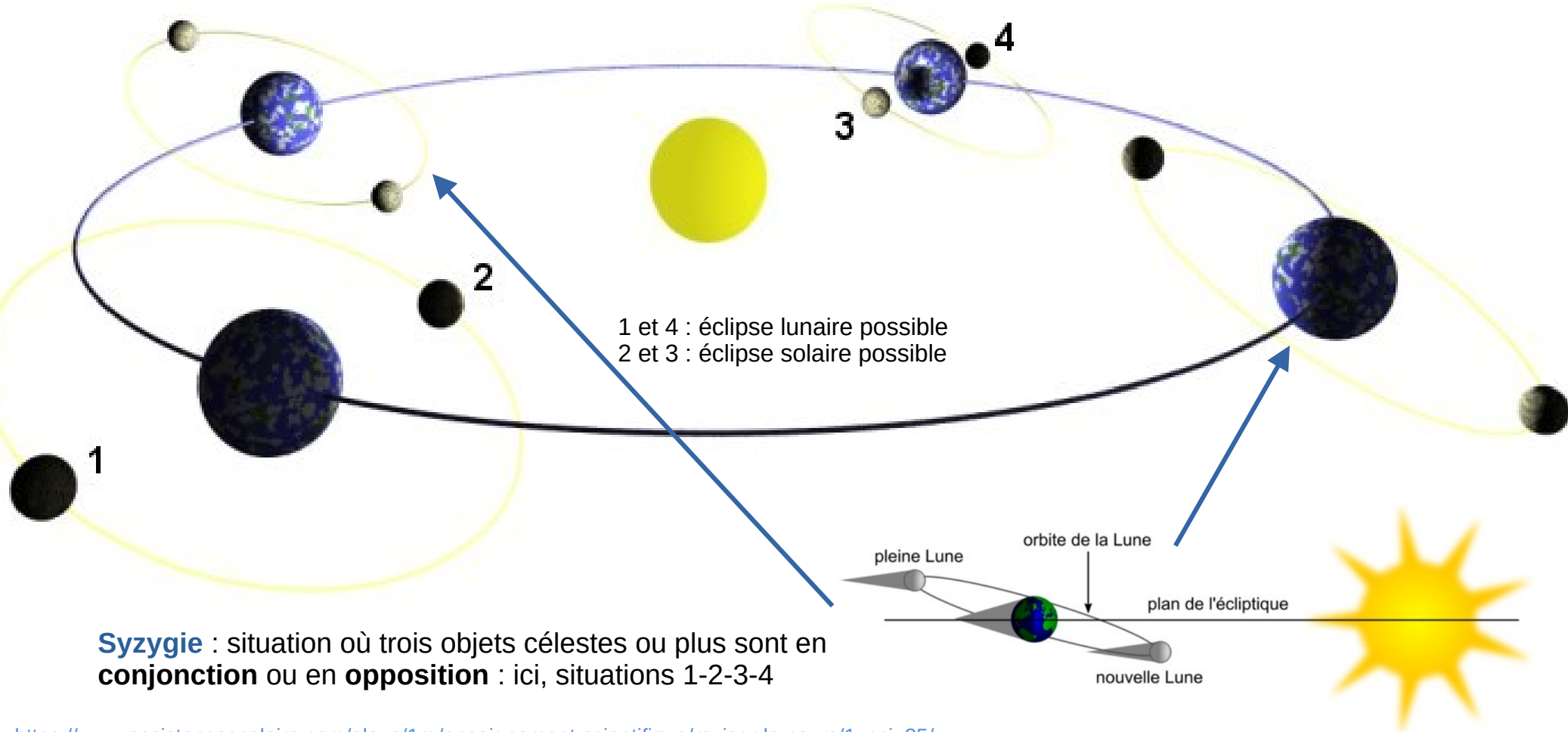
- Carte de la face visible de la Lune par Johannes Hevelius (1647)
- On y voit les librations de la Lune → plus de 50 % de la surface lunaire visibles depuis la Terre



Terre, Lune, Soleil et éclipses (1)



Terre, Lune, Soleil et éclipses (2)



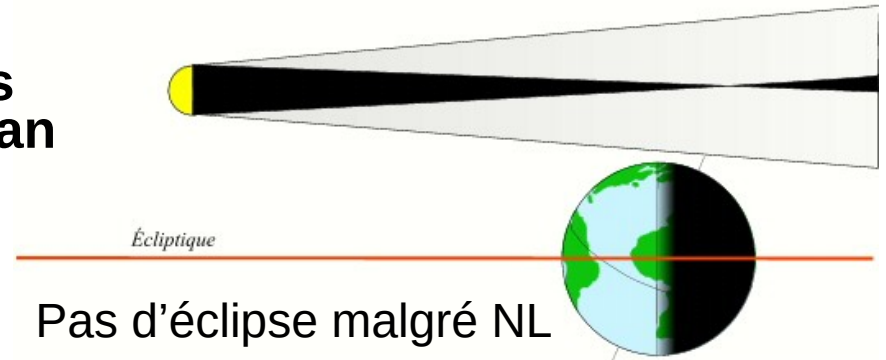
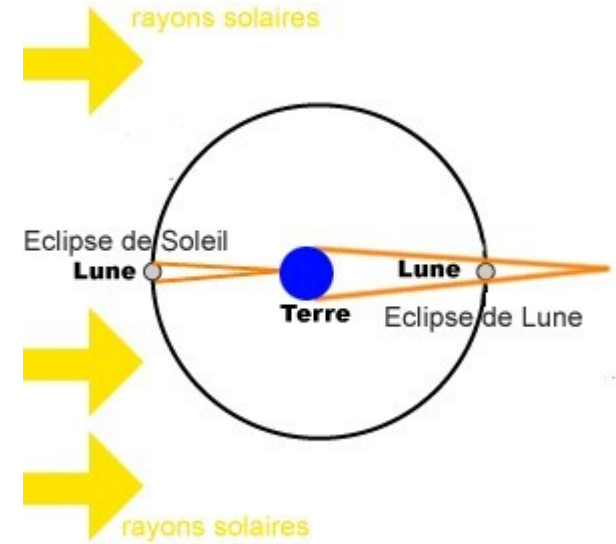
Les éclipses (1)

- Éclipses :

- **Solaires** : Lune passe entre Terre et Soleil
- **Lunaires** : Terre passe entre Soleil et Lune
- **Totales** ou **partielles**

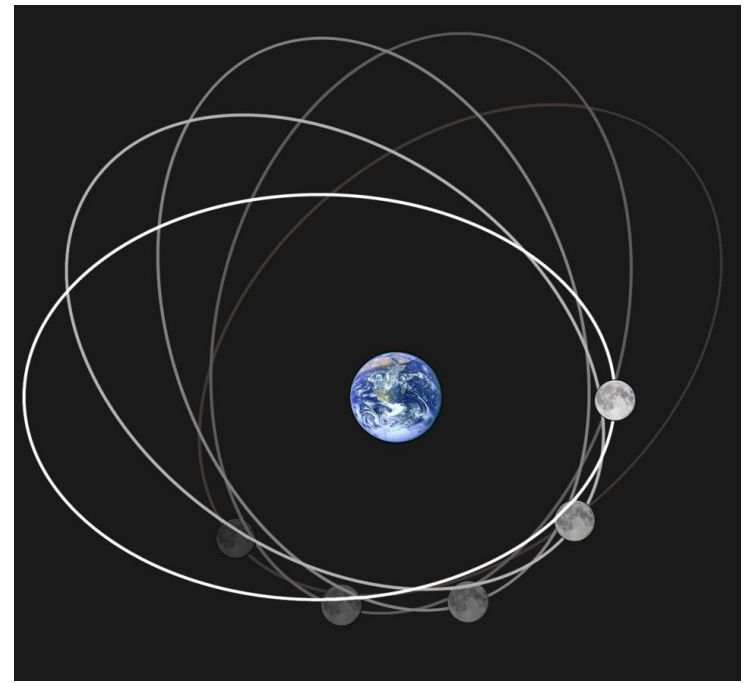
- Deux conditions :

- **Alignement Soleil-Terre-Lune**
= pleine lune ou nouvelle lune
- **Lune à proximité d'un des deux points d'intersection de son orbite avec le plan de l'écliptique (orbite de la Terre) :**
« **nœuds lunaires ascendant et descendant** »

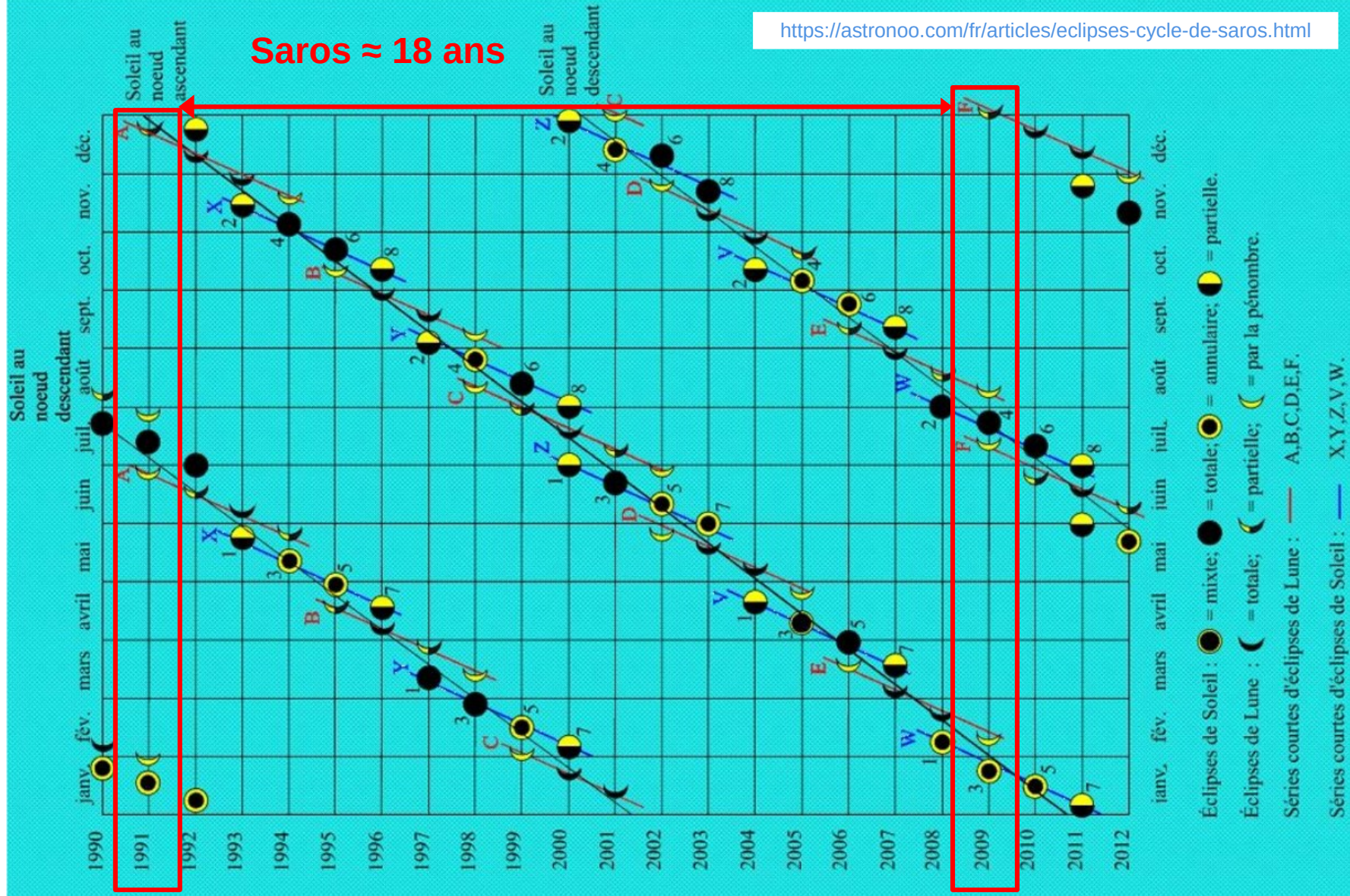


Les éclipses (2)

- **Conjonction de 2 configurations :**
PL ou NL (mois **synodique** = 29,53 j) et **passage de la Lune par le plan de l'écliptique** (mois **draconitique** = 27,21 j)
→ **configuration propice aux éclipses tous les 5-6 mois**
- La nature de l'éclipse dépend de la **distance entre la Terre et la Lune** = mois **anomalistique** (27,55 j), à cause de la **précession du périée**
- **Saros** : intervalle de 223 mois synodiques ou lunaisons (≈ 18 ans) au bout duquel le Soleil, la Terre et la Lune retrouvent **approximativement la même configuration relative**
→ **$\sim$ période de répétition d'éclipses quasi identiques**

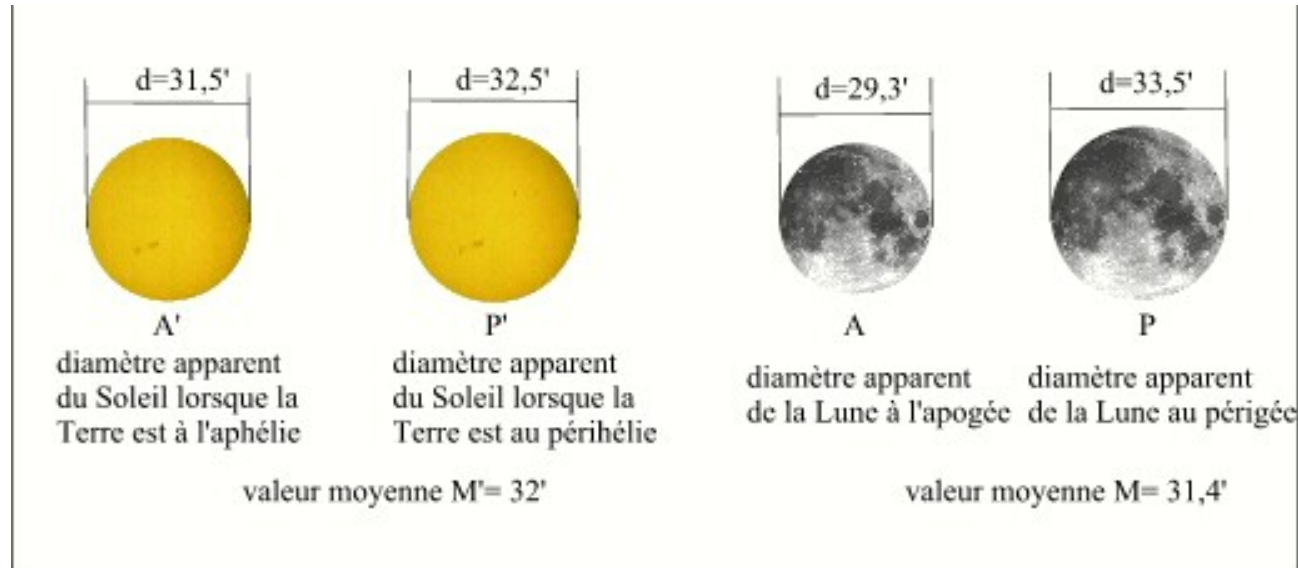


Calendrier des éclipses de Lune et de Soleil de 1990 à 2012



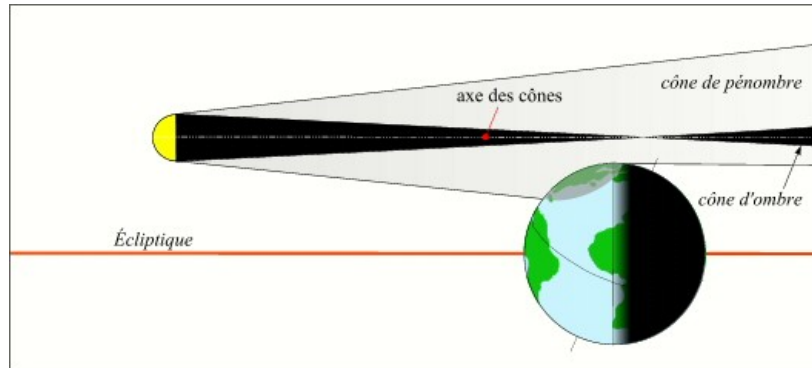
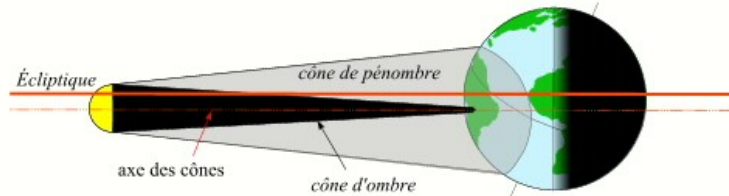
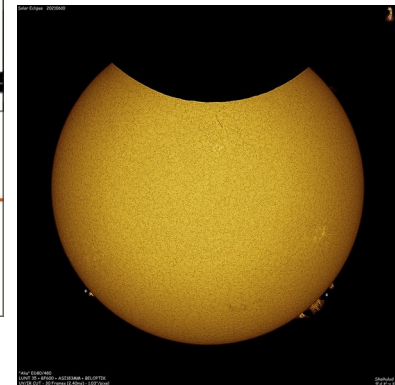
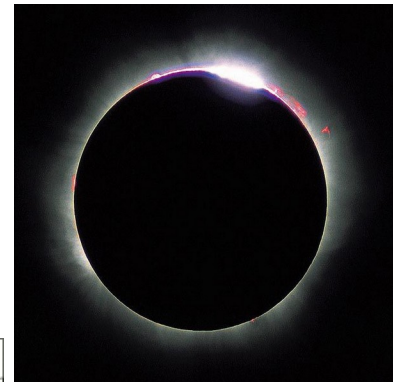
Éclipse solaire

- **Taille apparente de la Lune $\approx$ celle du Soleil $\approx 0,5^\circ$**
 - Diamètre du Soleil ≈ 400 fois celui de la Lune et distance ≈ 400 fois plus grande
 - la Lune couvre **presque exactement** le Soleil → possibilité d'**éclipses solaires totales = occultations du Soleil par la Lune**
- Ce recouvrement total disparaîtra peu à peu car éloignement de la Lune ($\sim 3,8$ cm / an)



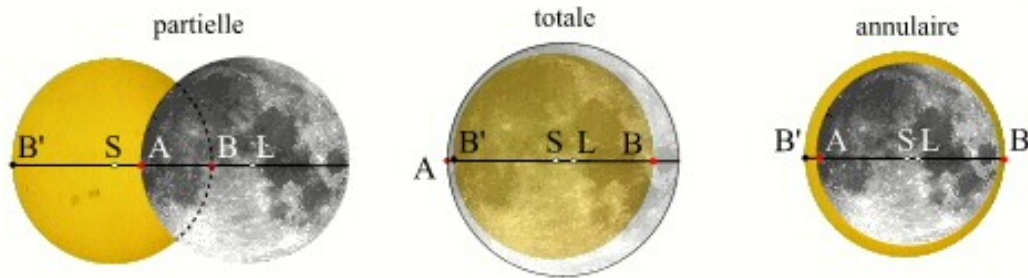
Types d'éclipses solaires

1. **Totale** : Soleil complètement occulté par la Lune
2. **Annulaire** : Soleil, Terre et Lune parfaitement alignés mais taille apparente de la Lune < Soleil → anneau très brillant autour du disque lunaire
3. **Hybride ou mixte** (cas intermédiaire): totale ou annulaire selon l'endroit d'observation sur Terre (distance à la Lune)
Éclipse « **perlée** » : présence d'une couronne de perles (grains de Bailey, dus à la présence de montagnes, cratères, vallées sur la surface de la Lune) lorsque les diamètres apparents de la Lune et du Soleil sont très voisins
4. **Partielle (non centrale)** : Soleil, Terre et Lune pas parfaitement alignés → la Lune n'occulte pas totalement le Soleil



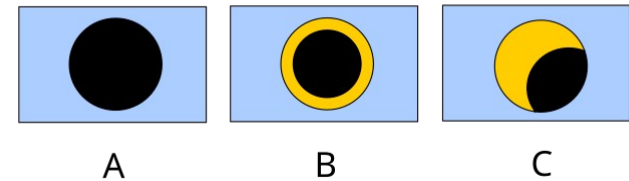
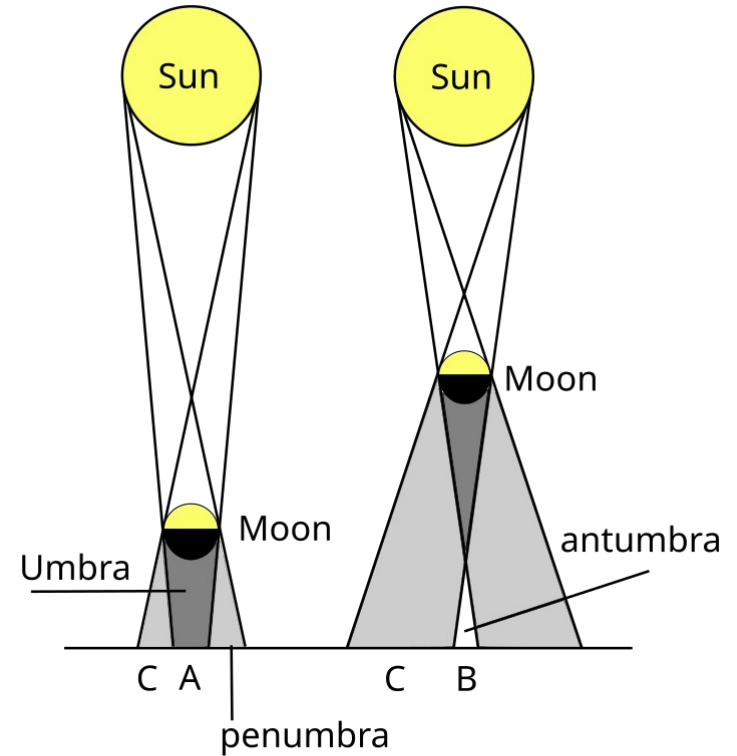
Magnitude

- La **magnitude** (ou **grandeur**) d'une **éclipse** ou d'un **transit astronomique** est la **proportion du diamètre du corps occulté** :
 $g = AB/BB'$
 - AB = portion du diamètre du Soleil occulté
 - BB' = diamètre du Soleil
- Différents cas :
 - Partielles & annulaires : $g < 1$
 - Totales : $g \geq 1$
 - Mixtes : $g \approx 1$



A : bord de la Lune le plus proche du centre S du Soleil
 B : bord du Soleil le plus proche du centre L de la Lune

$$g = AB/BB'$$



A Éclipse totale dans l'ombre.
 B Éclipse annulaire dans l'anté-ombre.
 C Éclipse partielle dans la pénombre.

Éclipse totale

32°32'31.4"N 44°25'15.1"E

Durée de la phase totale = 00:01:07.5

Durée de l'éclipse = 02:39:19.0

Grandeur = 1.07424

Obscurité = 100 %

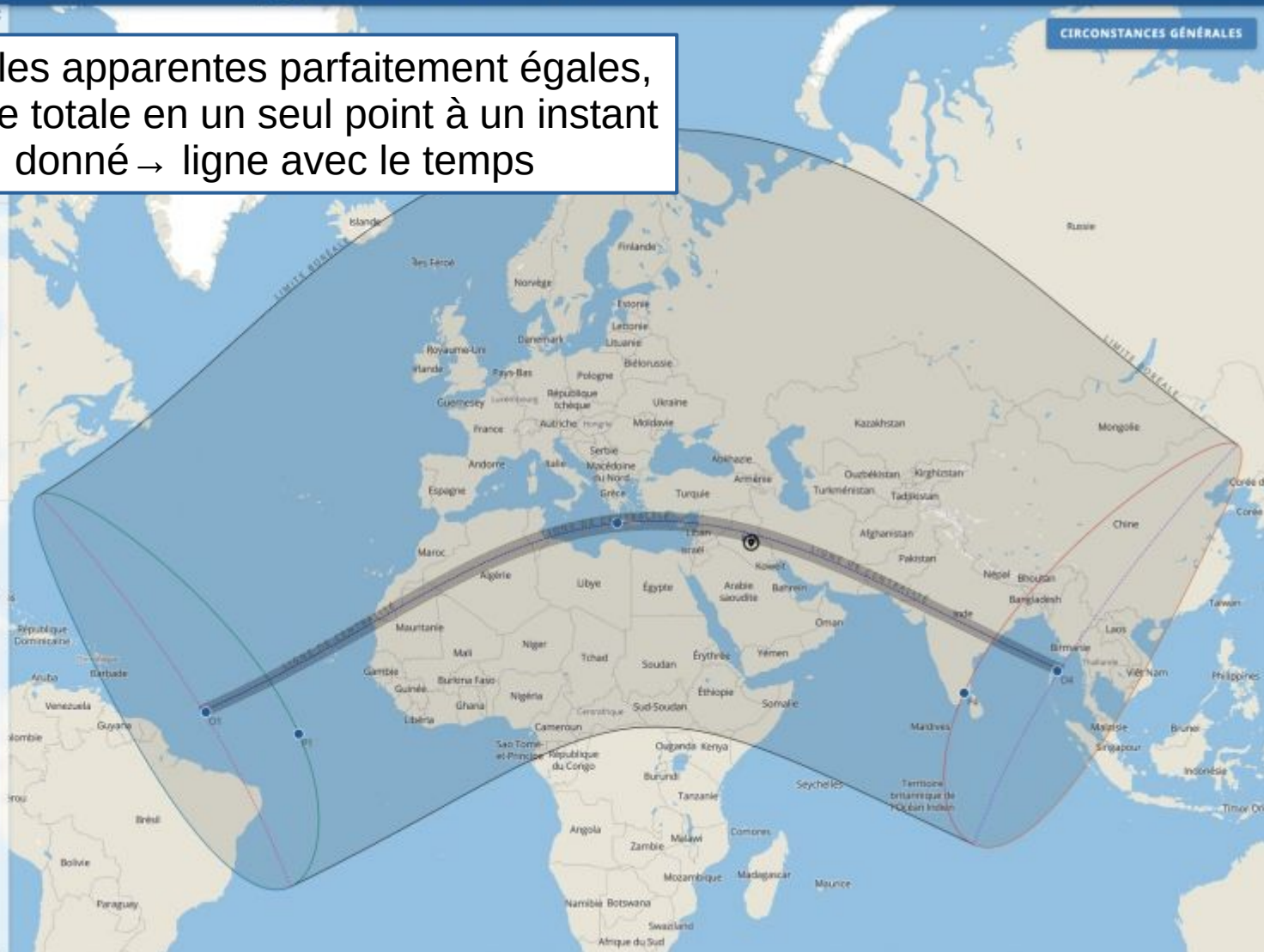
Si tailles apparentes parfaitement égales,
éclipse totale en un seul point à un instant
donné → ligne avec le temps

Circonstances locales

Phase	Date (UT1)	P	Z	H
P1	-0009-06-28T09:49:33	271.66°	223.57°	76.05°
O1	-0009-06-28T11:12:41	170.38°	104.61°	59.72°
M	-0009-06-28T11:13:16	1.82°	296.00°	59.60°
O4	-0009-06-28T11:13:49	193.07°	127.22°	59.48°
P4	-0009-06-28T12:28:52	91.26°	24.24°	43.71°

Déplacement de la Lune

☒ Repère céleste ☐ Repère local

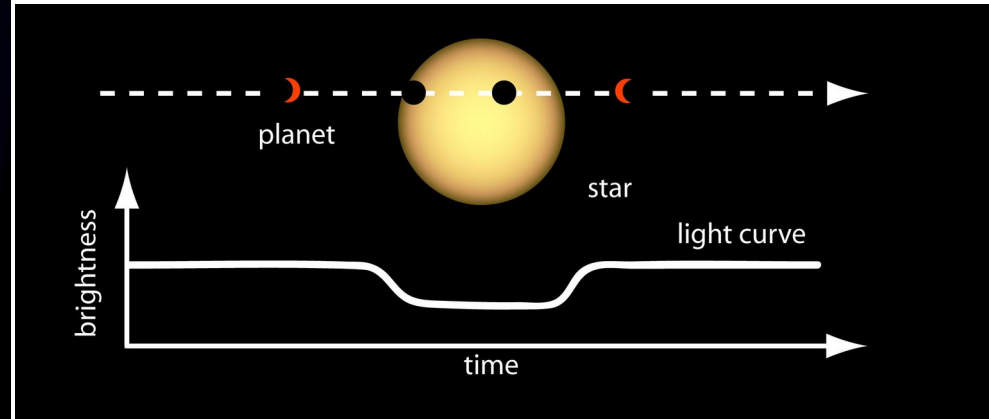


D'où cette photo est-elle prise?

Transit de la Lune devant le Soleil

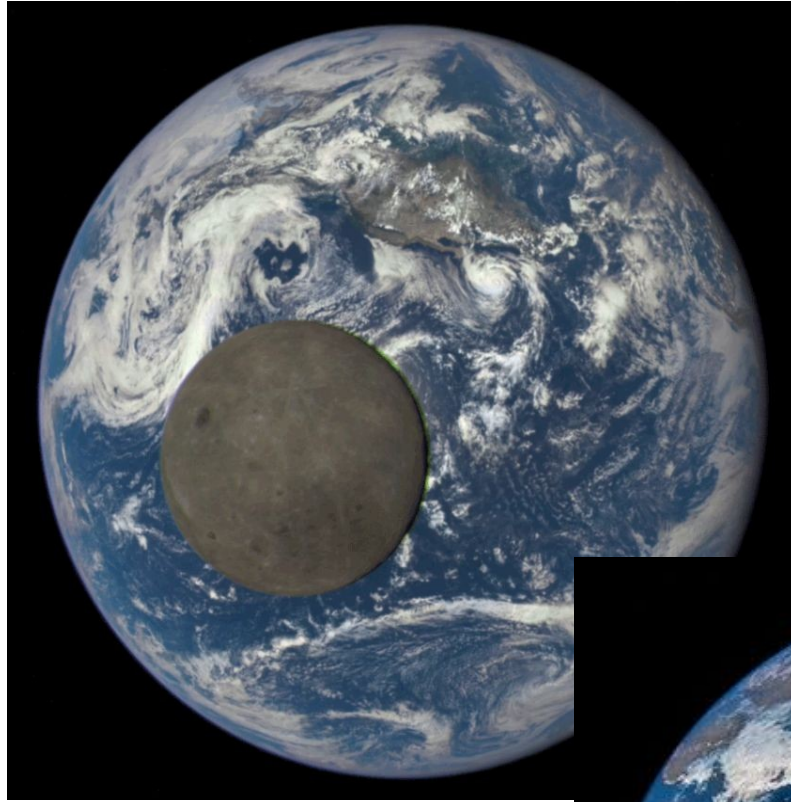


- C'est comme cela qu'on détecte les exoplanètes : **variation périodique de la luminosité de l'étoile**



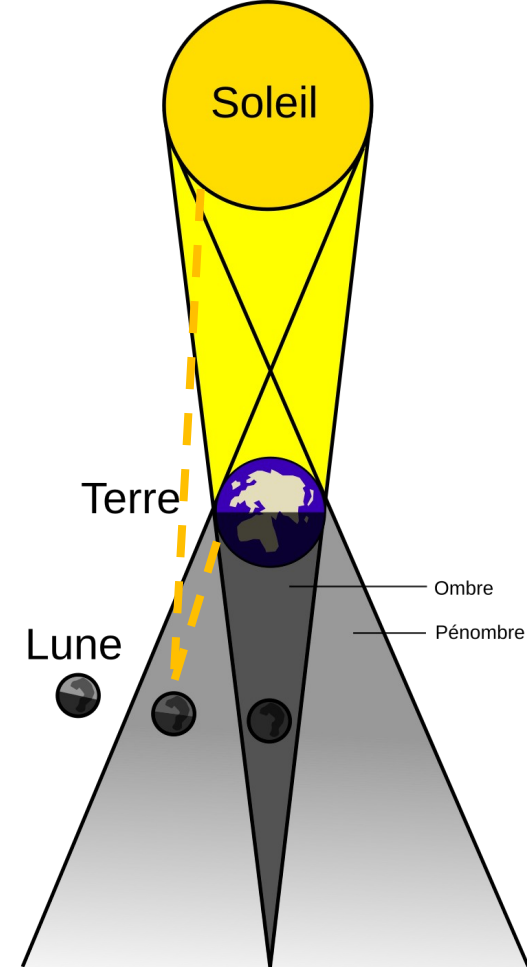
Et celles-ci ?

- Le satellite DSCOVR capture le passage de la Lune devant la Terre et l'ombre d'une éclipse totale
 - Deep Space Climate Observatory, à 1,5 M de km
 - Commandé par Al Gore (VP des EU) à la NASA en 1998
 - Lancé en 2015
 - Données sur les vents solaires ~ 1h avant qu'ils n'arrivent sur la Terre
 - Météorologie spatiale
- Face **cachée** mais **pas sombre**



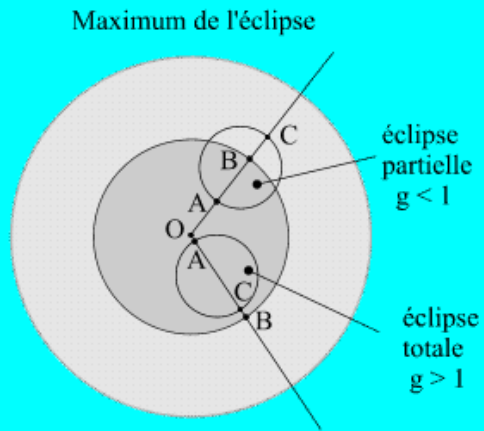
Éclipse lunaire

- = Projection de l'ombre de la Terre sur la Lune
- Deux conditions :
 1. Lune pleine = **alignement Soleil-Terre-Lune**
 2. Lune à proximité d'un des deux points d'intersection de son orbite avec le plan de l'écliptique (orbite de la Terre) :
« **nœuds lunaires ascendant et descendant** »
- Depuis la Lune, le diamètre apparent de la Terre est **supérieur** à celui du Soleil : **la Terre peut complètement masquer le Soleil à la Lune**
- Deux zones : **ombre** et **pénombre**



Types d'éclipses lunaires

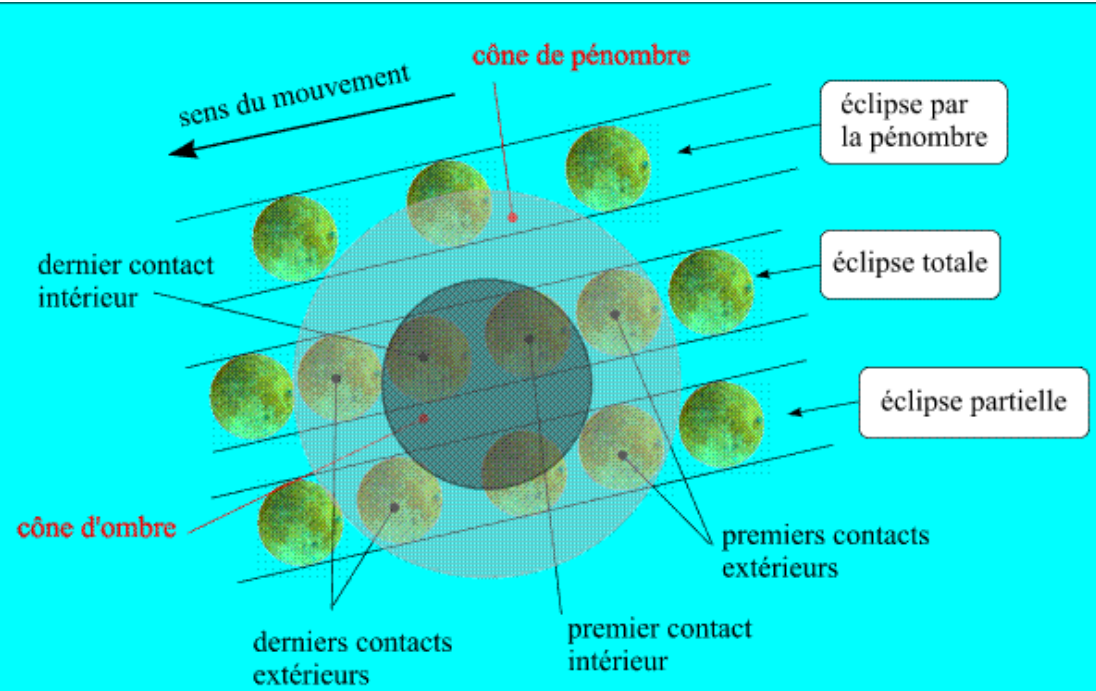
- Selon que la Lune passe, partiellement ou pas, par les cônes d'ombre ou de pénombre
- On définit la « **grandeur** » / **magnitude**



Grandeur d'une
éclipse de Lune

$$g = \frac{AB}{AC}$$

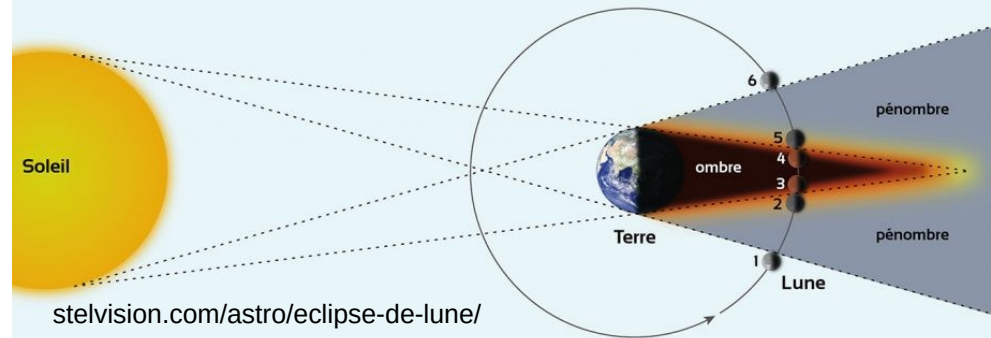
Grandeur d'une éclipse de Lune



Les différents types d'éclipses de Lune

La Lune de sang

- Ou Lune rouge / cuivrée
- Lors d'une éclipse totale, la Lune, plutôt jaune-blanche, **peut apparaître rouge**
- **Majorité de la lumière bloquée** par la Terre mais de la lumière peut être **réfractée par l'atmosphère = déviée vers la Lune**
- La lumière qui traverse l'atmosphère subit de la **diffusion** (de Rayleigh), qui touche particulièrement la lumière bleue : **il ne reste que du rouge** (même mécanisme que le coucher de soleil)
 - Également lorsque la Lune est basse sur l'horizon
 - Différent de la « Lune rousse »



- **L'échelle de Danjon (« L »)** évalue l'apparence et la luminosité de la Lune durant une éclipse, qui dépend de :
 - **Trajectoire** à travers l'ombre de la Terre
 - **Conditions atmosphériques terrestres** (présence de particules dans l'air, éruptions volcaniques)
Ex : Pinatubo → L = 0 en 1992

0	Lune presque invisible
1	Lune sombre et de couleur grise / brunâtre
2	Lune rouge sombre ou de couleur rouille
3	Lune rouge brique
4	Lune de couleur cuivre ou orange très brillant