

La Terre dans l'univers: les dangers qui la menacent

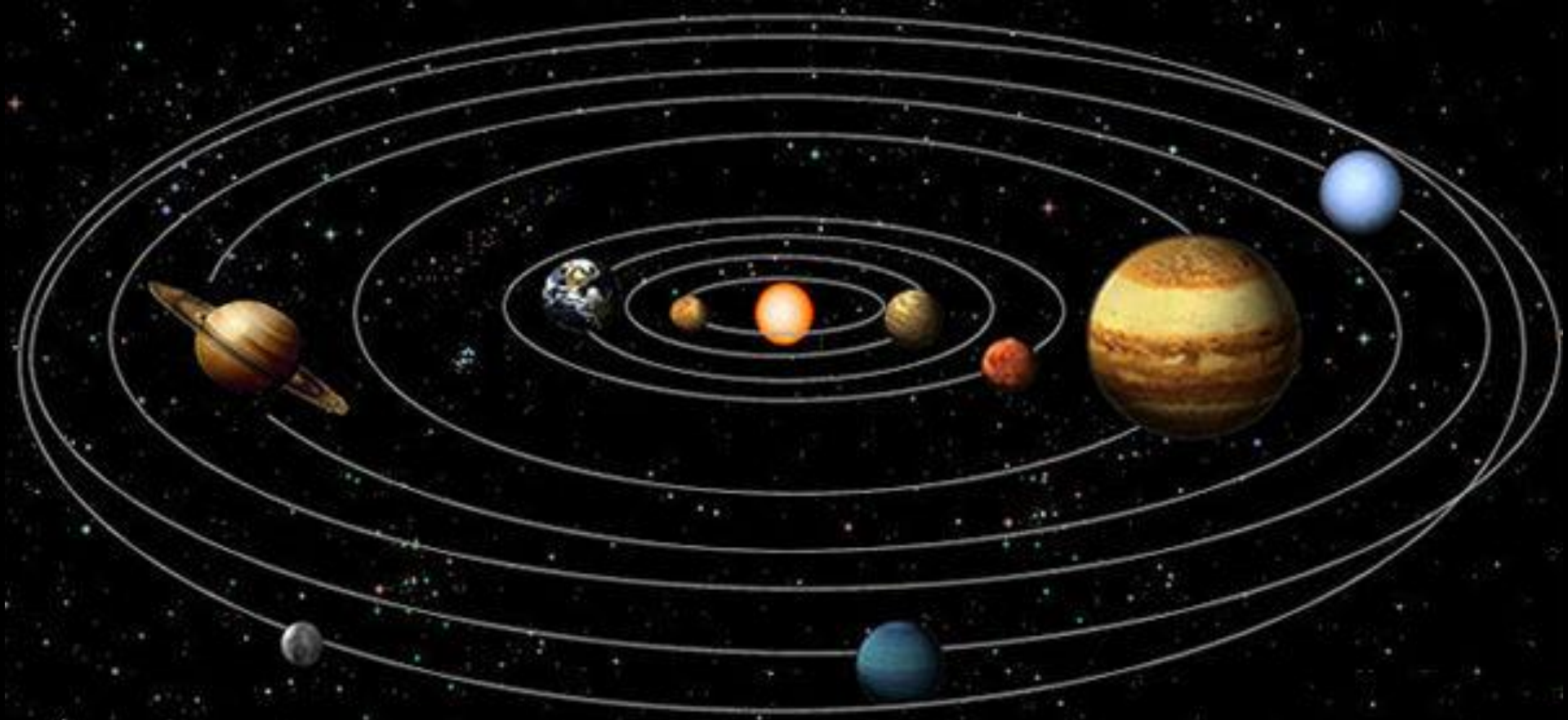


Jean-Eudes Arlot
Astronome émérite de l'observatoire de Paris
Louvenciennes janvier 2023

Notre vaisseau spatial: la Terre



La Terre voyage à travers l'espace



Elle doit affronter menaces et dangers

- Quels dangers la Terre a-t-elle à affronter dans son voyage dans l'espace?
- Des dangers immédiats ou à long terme?

- Quels scénarios pour une fin du monde?
- Et quelle fin du monde?
- De quel monde?
- A quelle échéance?

- Et existe-t-il des parades?
- L'humanité peut-elle se protéger? Se défendre?
- Quelles leçons apprendre du cosmos?

Le système solaire: notre environnement... dangereux?
Oui, mais la Terre nous protège!



Le fantasme d'une fin du monde: les risques sont réels,
mais ils ne sont pas toujours là où on croit...



La Lune, notre voisine très proche, est-elle un danger? risque-t-elle de nous tomber sur la tête? Se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de nous?

Comment s'est formée la Lune?

- à la suite d'une collision d'un corps céleste avec la Terre!
- mais l'existence de la Lune a permis la vie!
- et le système solaire a bien changé...
- de telles collisions ne sont plus possibles.





Terre

Lune

Non, pas de danger car la Lune s'éloigne...

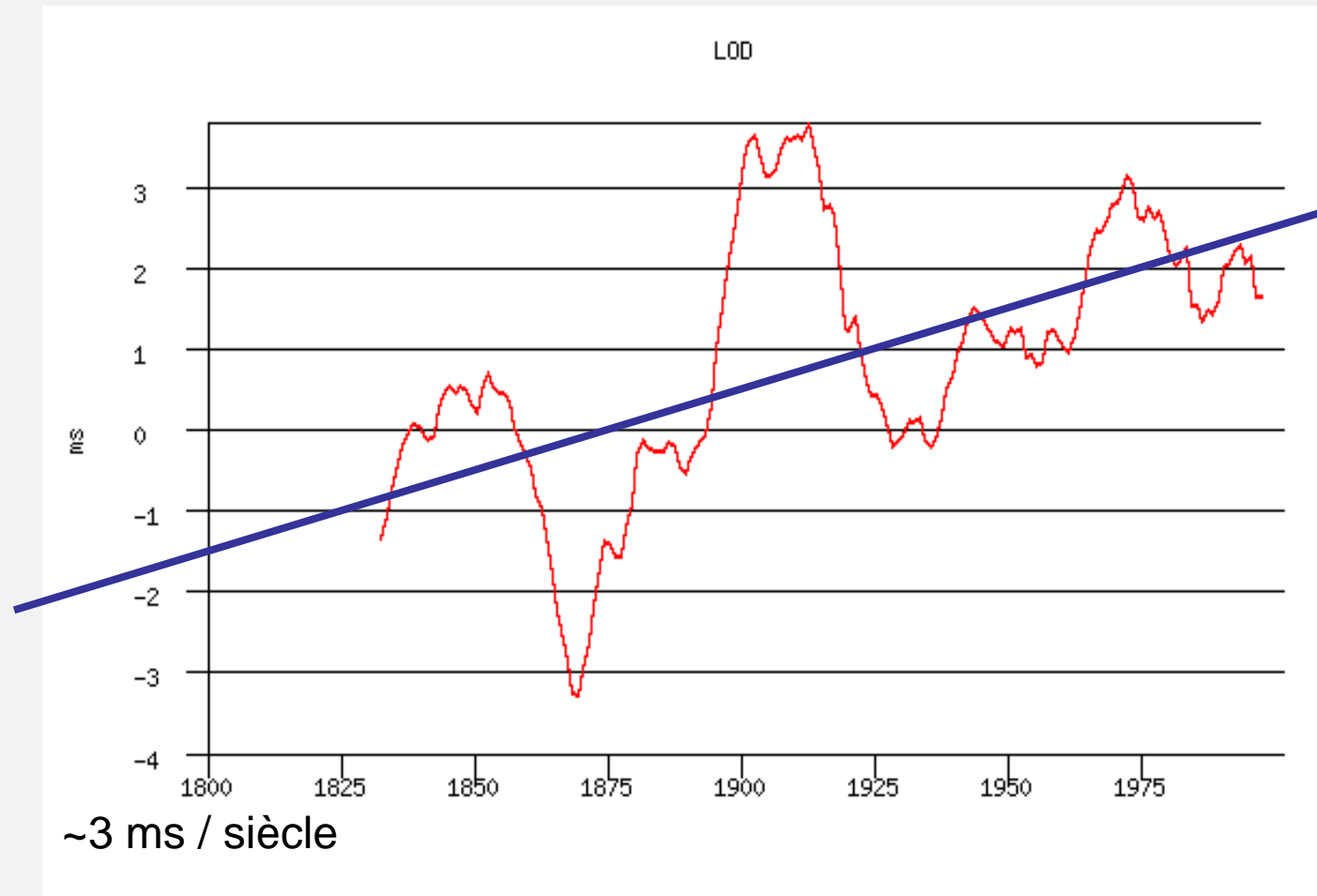
La Lune s'éloigne de 3 cm par an: elle ne peut donc pas nous tomber sur la tête!

C'est parce que la Terre, freinée par les marées, ralentit sa rotation autour de son axe.

Et si la Terre s'arrêtait??? Si elle montrait toujours la même face au Soleil?

La durée du jour augmente ...

... de 3 millièmes de seconde par siècle

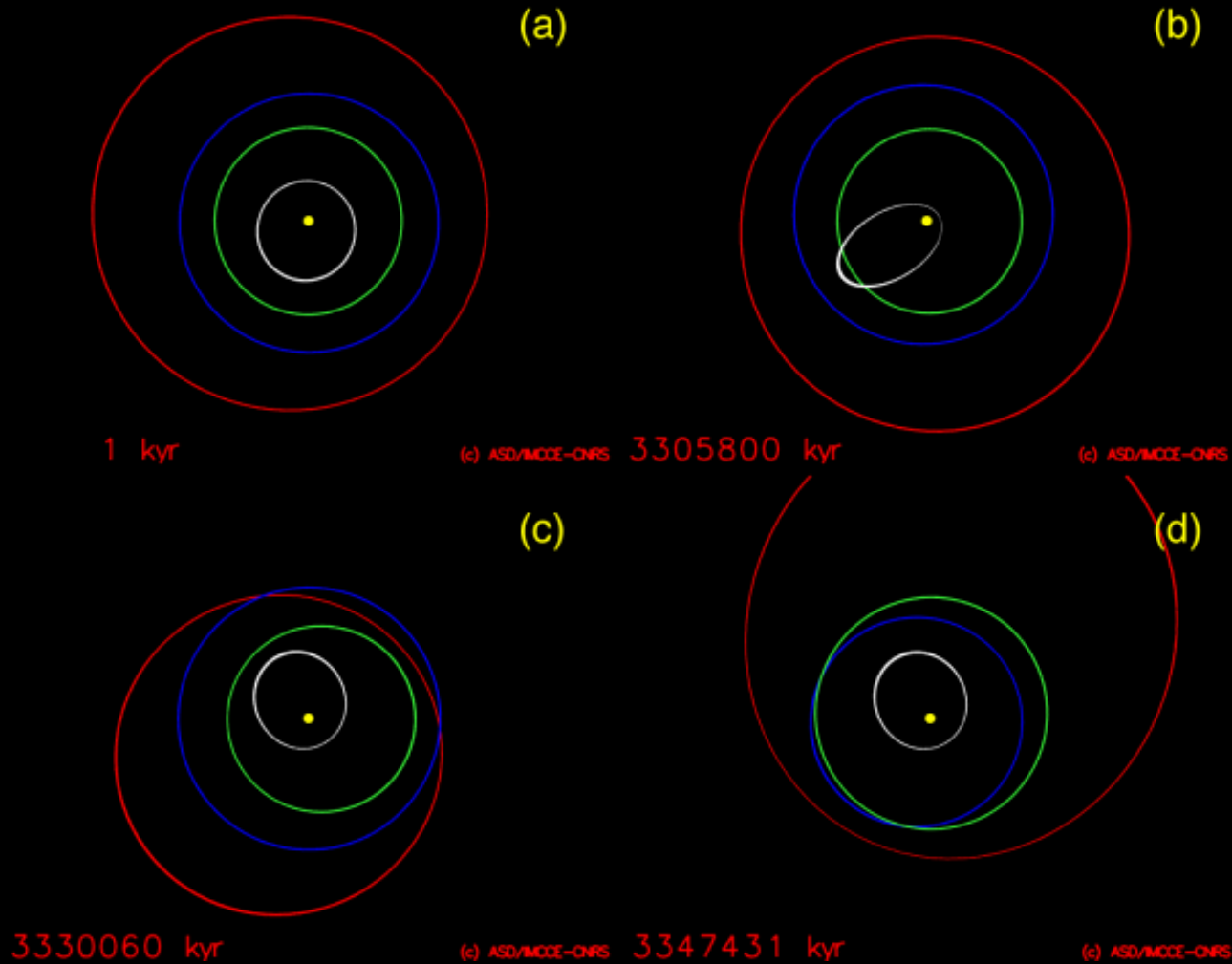


Mais l'arrêt de la Terre n'est pas pour demain !
Dans 5 milliards d'années, la durée du jour sera
peut-être de 40 heures... mais serons-nous encore là?

Vénus et Mars, nos voisines? Dangereuses?



Mars, Vénus, Mercure: une collision avec la Terre?



Les orbites des planètes ne sont pas exactement circulaires mais elles ne se recoupent pas, donc pas de danger de collision.



L'orbite de la Terre se déforme entre circulaire ou elliptique. La distance au Soleil va varier.

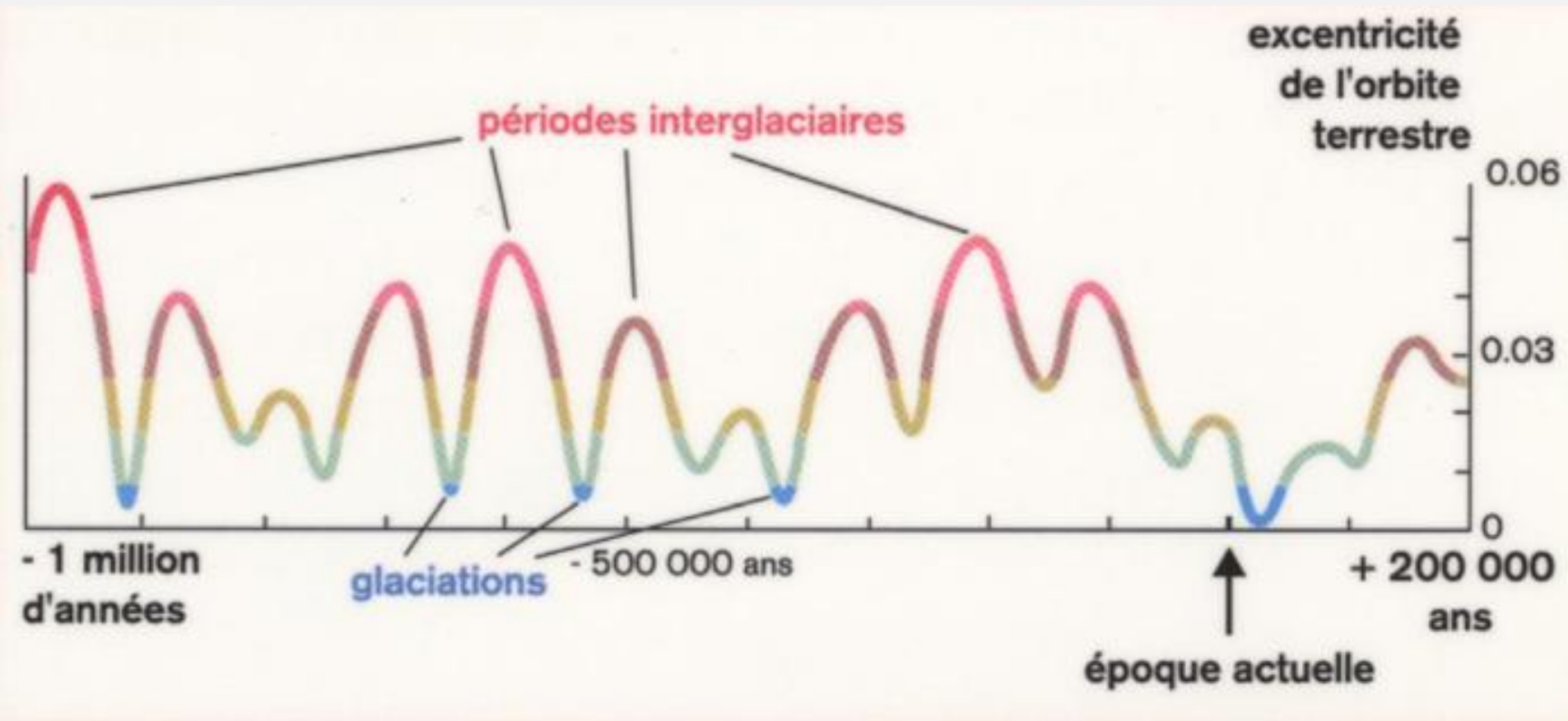
Les leçons de la mécanique céleste:

Prévoir l'excentricité de l'orbite terrestre

Excentricité faible: orbite circulaire → froid

Excentricité forte: orbite allongée → chaud

Le climat de la Terre dépend plus de son orbite que de sa distance au soleil





Et le Soleil?



Le Soleil est 400 fois plus loin que la Lune, il nous est indispensable mais il est beaucoup plus dangereux: il émet des radiations mortelles. Sa chaleur est-elle constante? Va-t-il s'éteindre un jour?

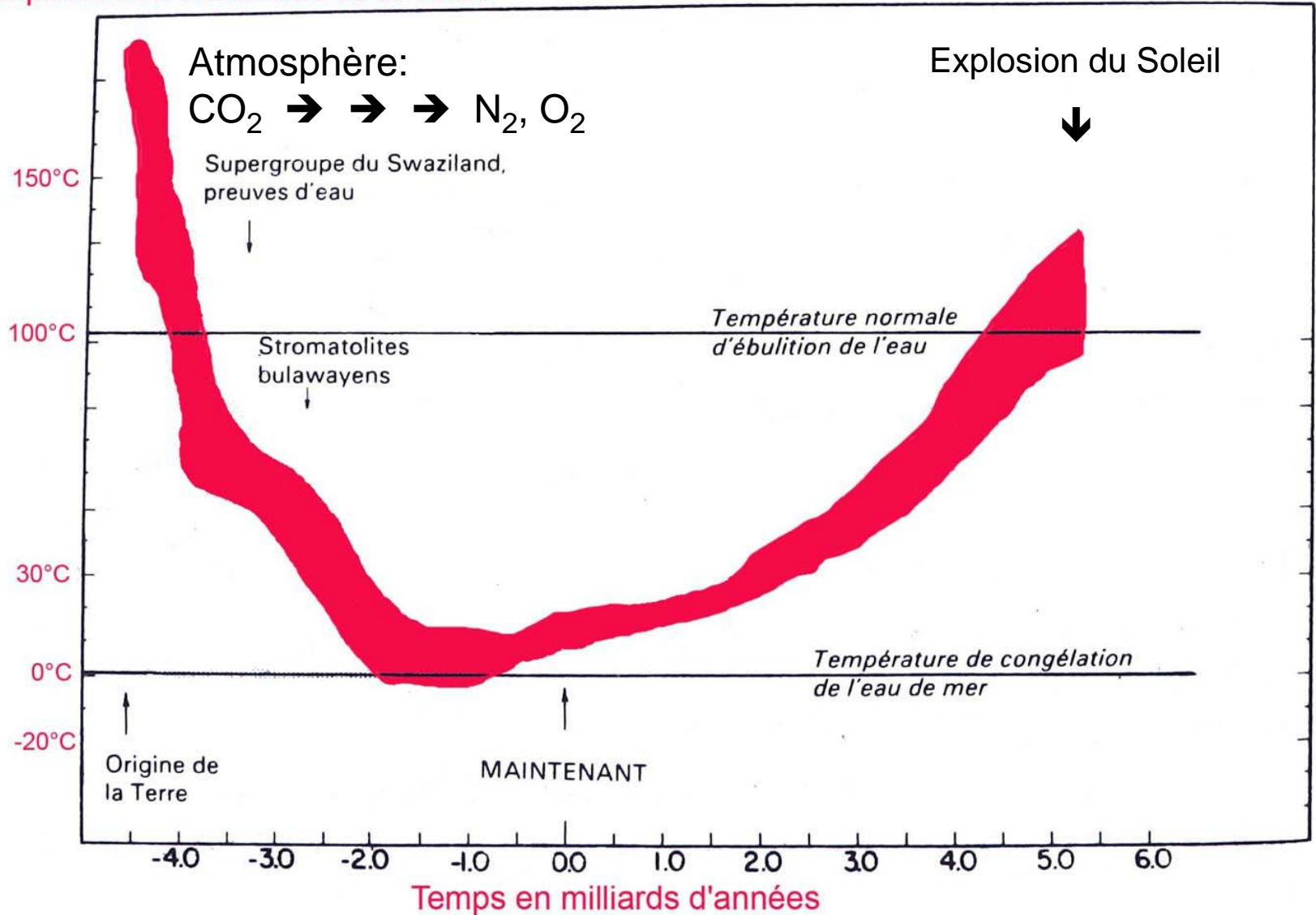
Le Soleil est de plus en plus chaud



- D'ici plusieurs centaines de millions d'années, il n'y aura plus d'eau sur Terre car le rayonnement solaire augmente!

Evolution de la température terrestre quels responsables?

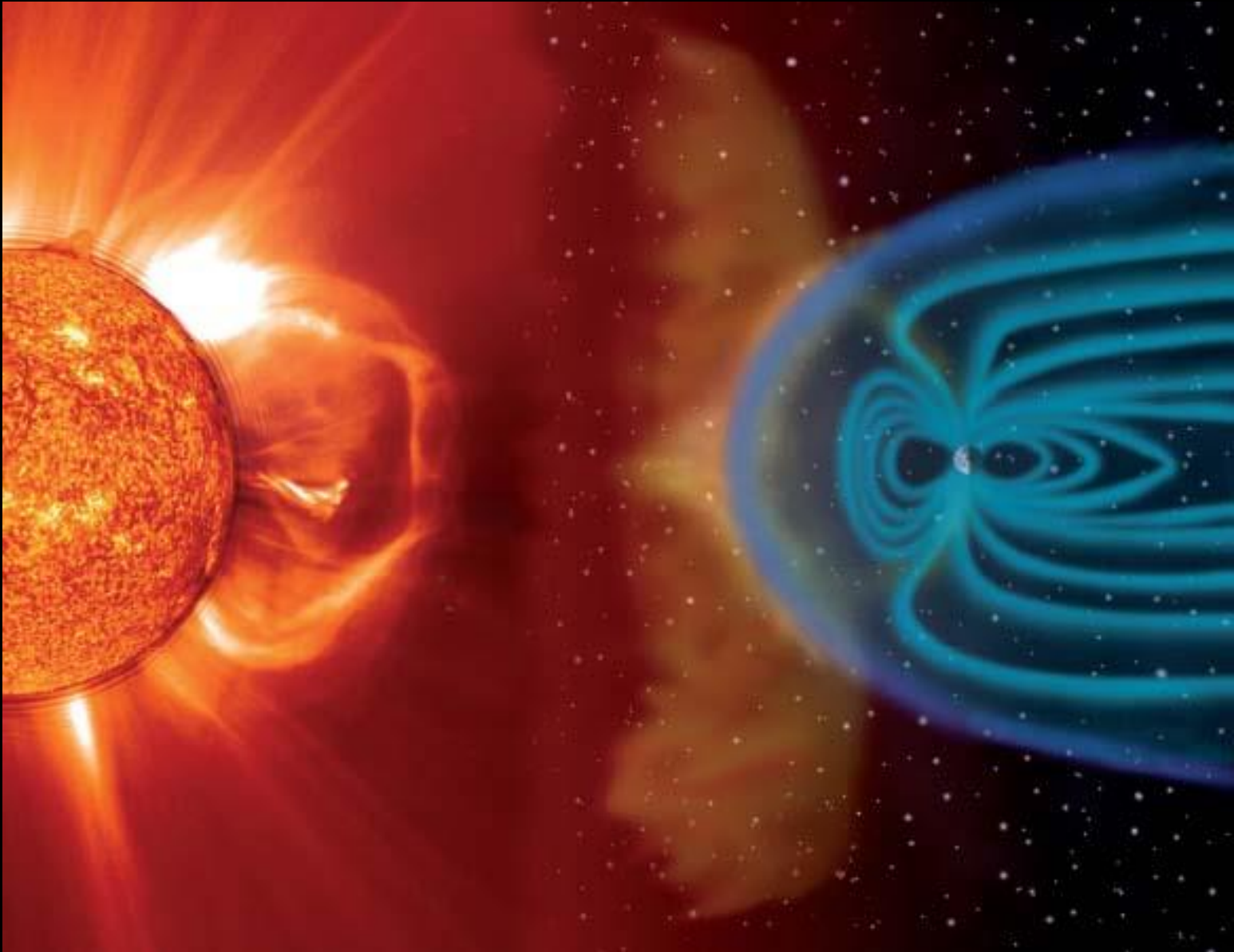
Température à la surface de la Terre





Un danger plus immédiat:
les éruptions solaires nous
bombardent de particules
radioactives.

Le champ magnétique terrestre: un bouclier qui nous protège des radiations dangereuses



Les aurores boréales: belles mais pas inoffensives



Ce sont des pluies de particules mortelles... à éviter!

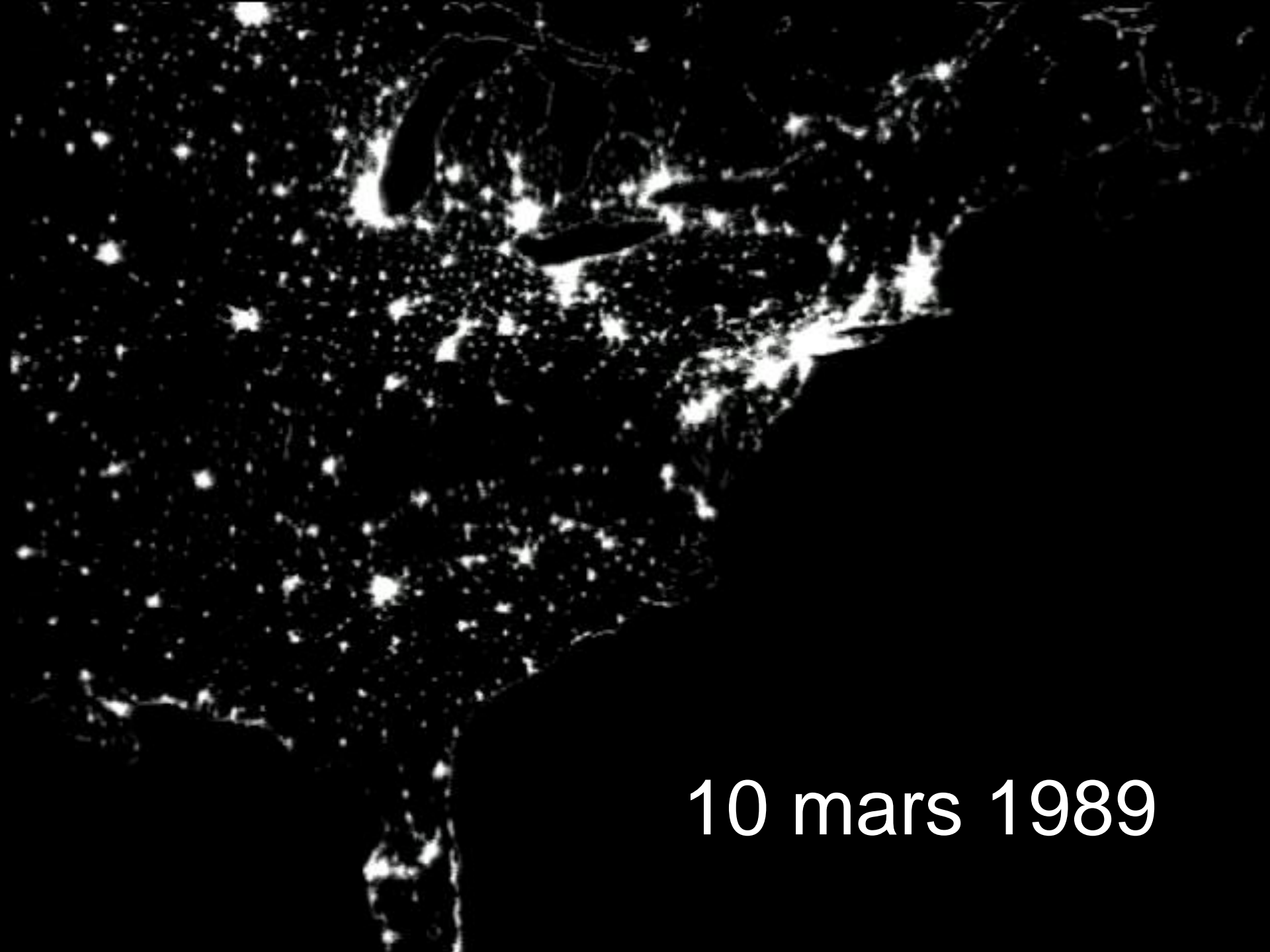
Un danger pour les voyageurs





Mais dès aujourd'hui, des perturbations dans notre vie courante

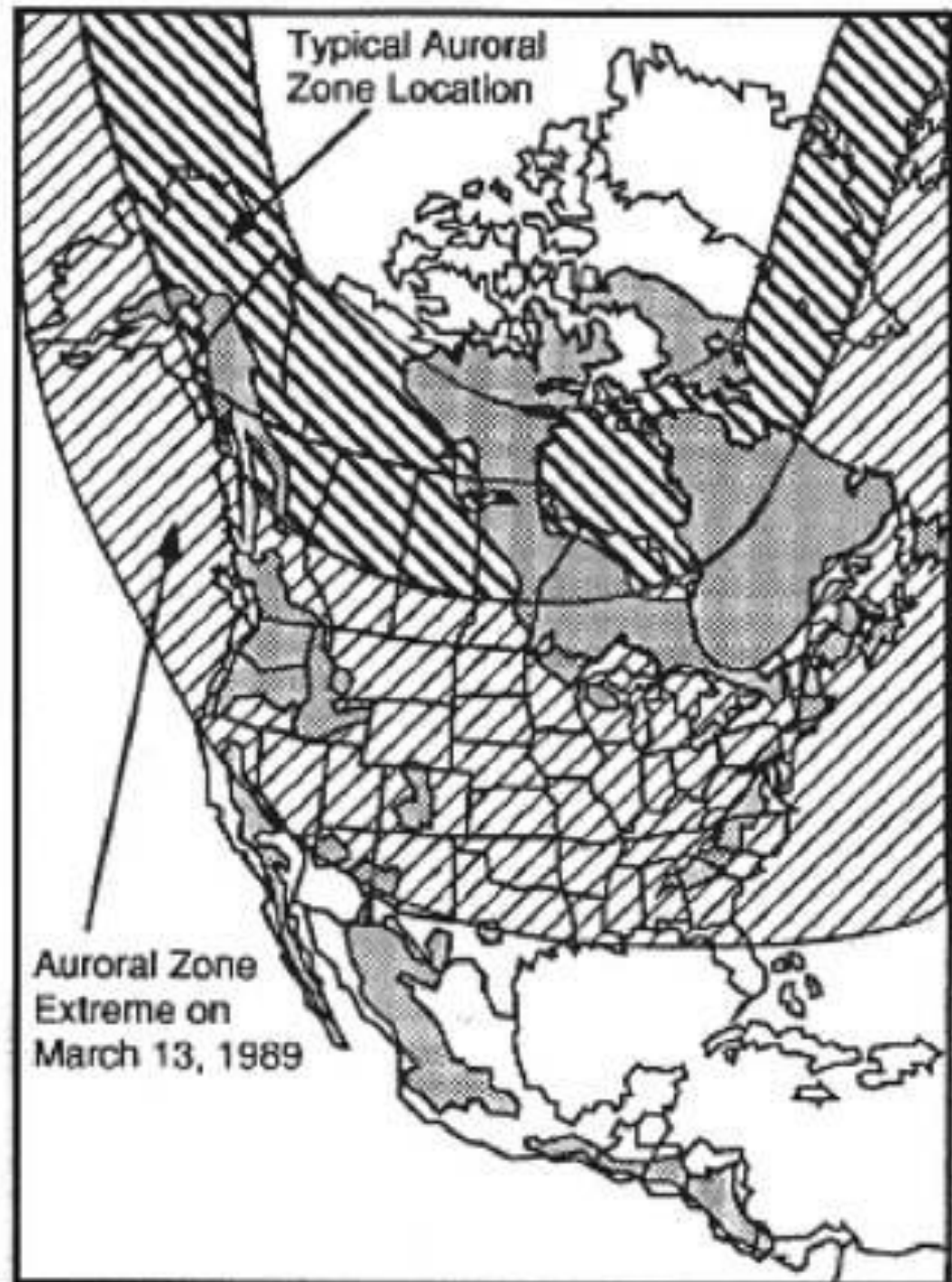


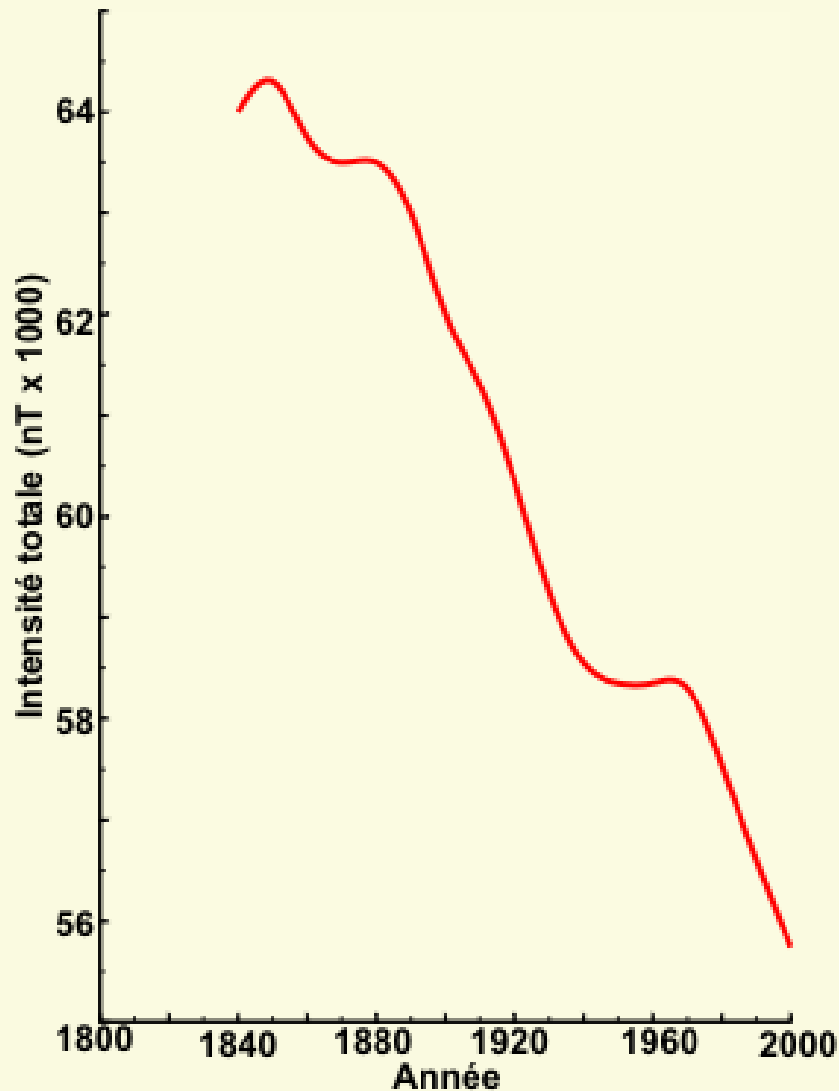


10 mars 1989

L'aurore
boréale de
mars 1989:

éruption solaire
le 9 et arrivée
sur Terre le 13.





Dernière inversion, il y a 780 000 ans
Dernière annulation, il y a 41 000 ans

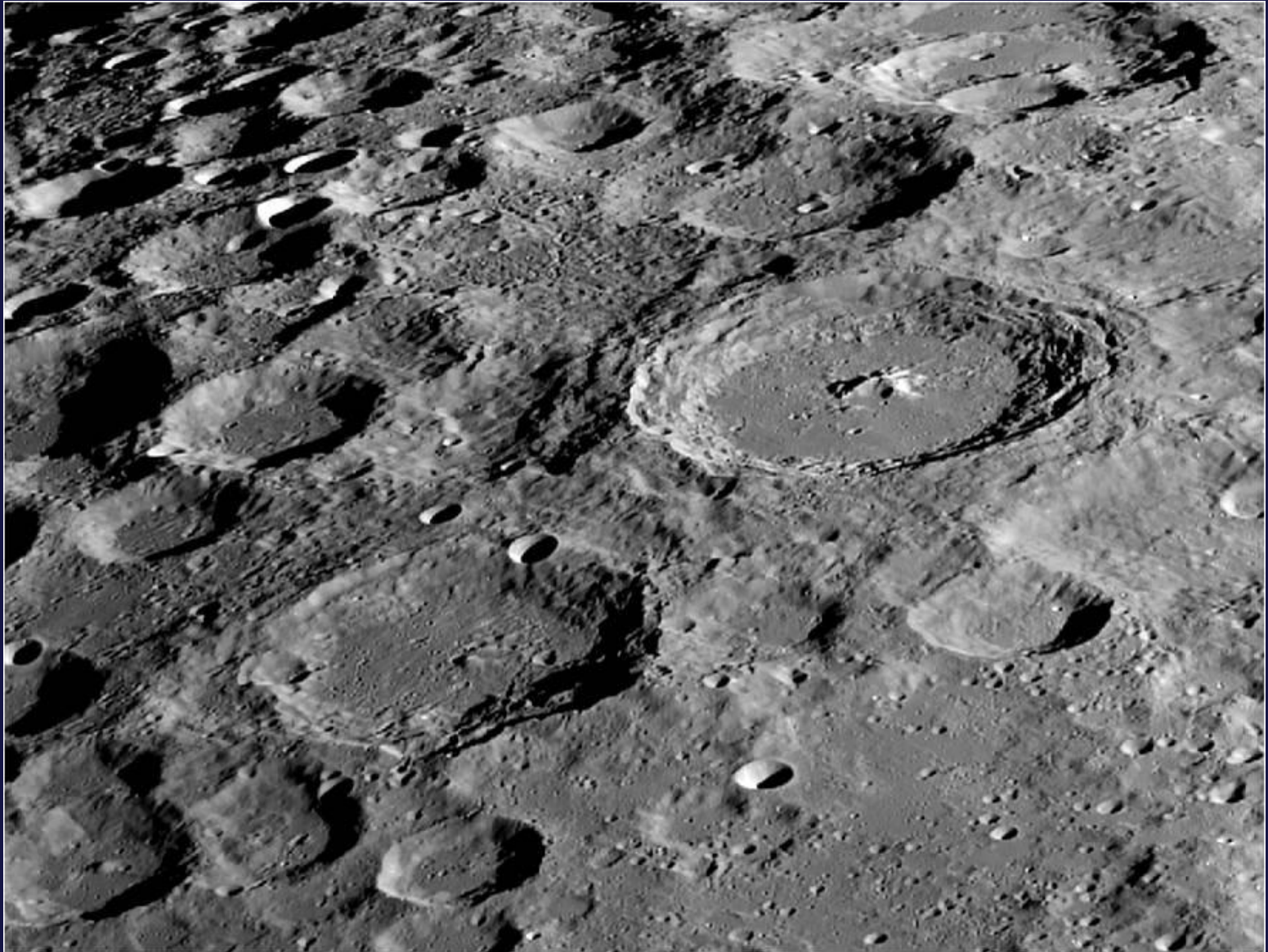
- Le champ magnétique terrestre qui nous protège diminue et semble devoir s'annuler dans 1600 ans ce qui rendrait la vie difficile sur Terre.
- Mais espérons que la tendance s'inverse bientôt !



La Lune va nous apprendre qu'un grand danger nous menace



Des formations curieuses sur la Lune:
des volcans? Non! Des impacts!



Des cratères d'impact aussi sur la Terre mais créés
par quels objets?



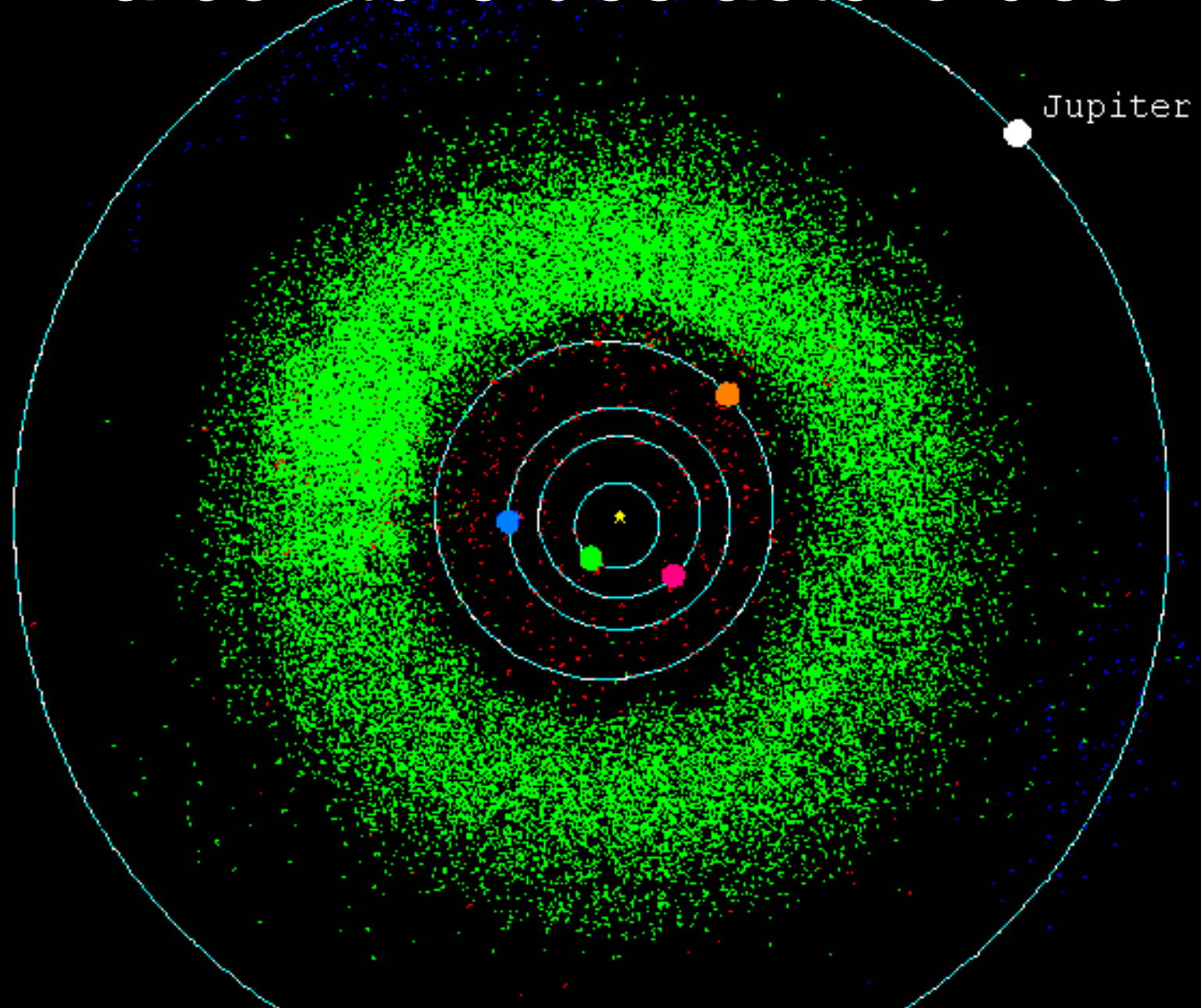
Cratère Manicouagan, Canada (200 millions d'années)

Des cratères d'impact aussi sur la Terre mais créés
par quels objets?



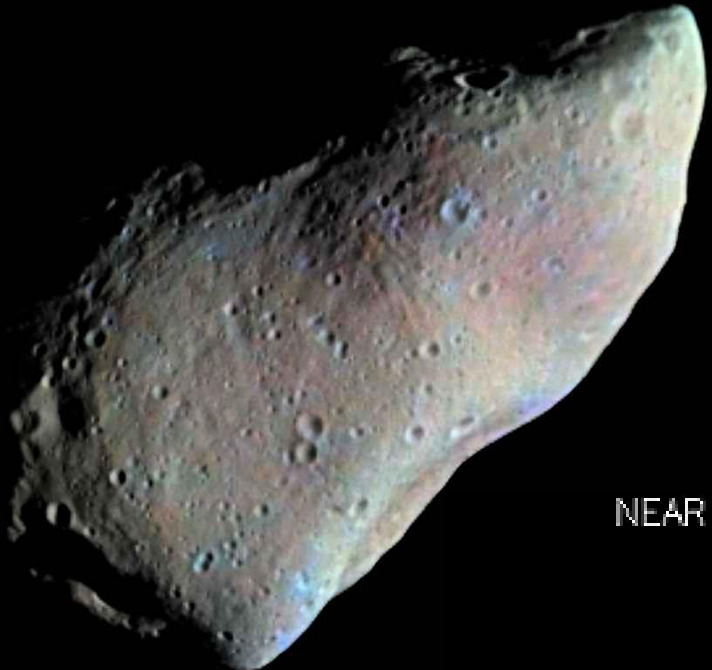
Cratère Aorounga, Tchad (345 millions d'années)

La ceinture des astéroïdes



- Astéroïdes

- Ce ne sont pas des planètes!
(diamètres < 100km)
- Ce sont de gros cailloux
- Ils ont des formes irrégulières
- Ce sont des blocs ou des tas de gravats...



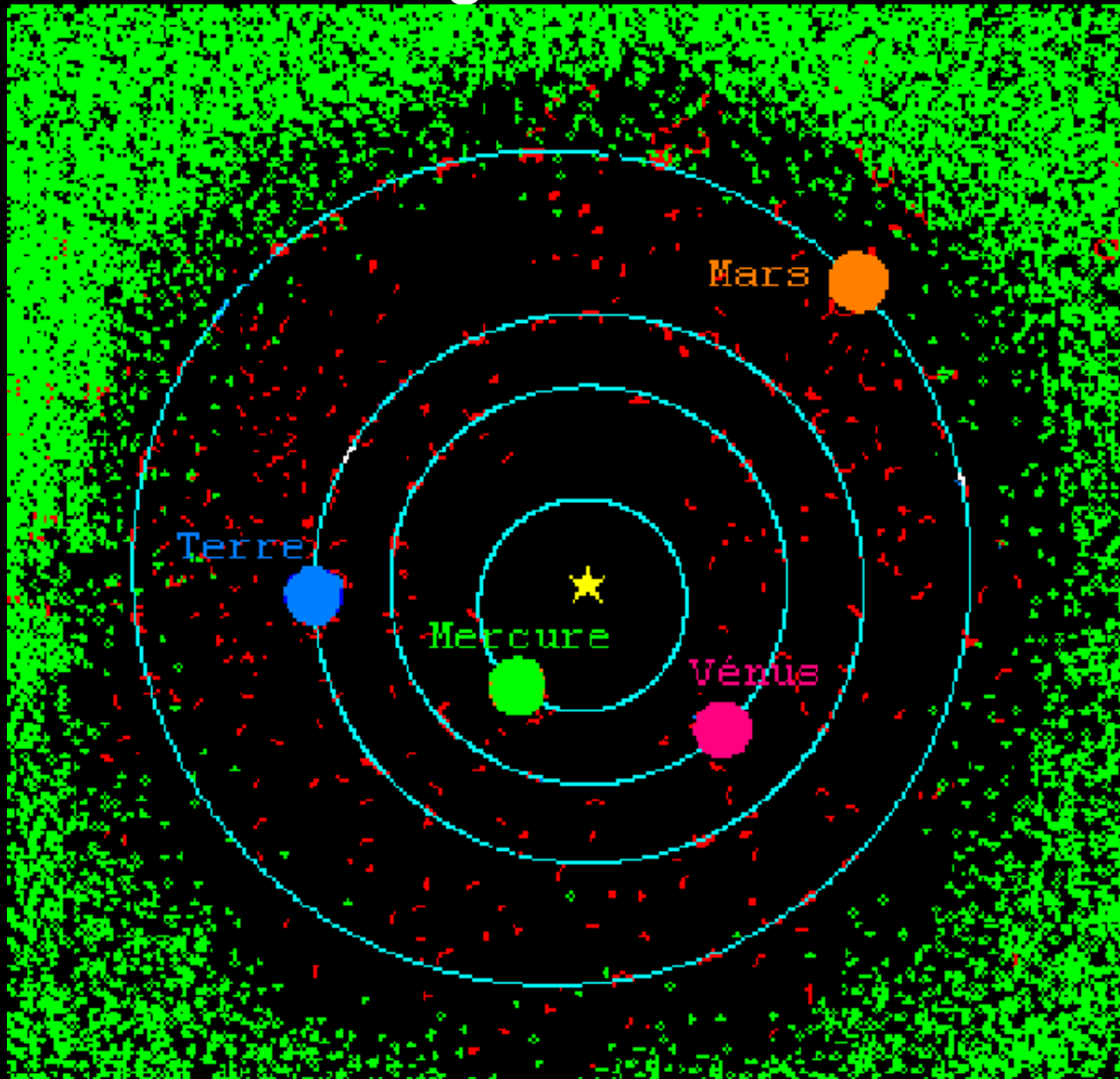
NEAR - 433 Eros



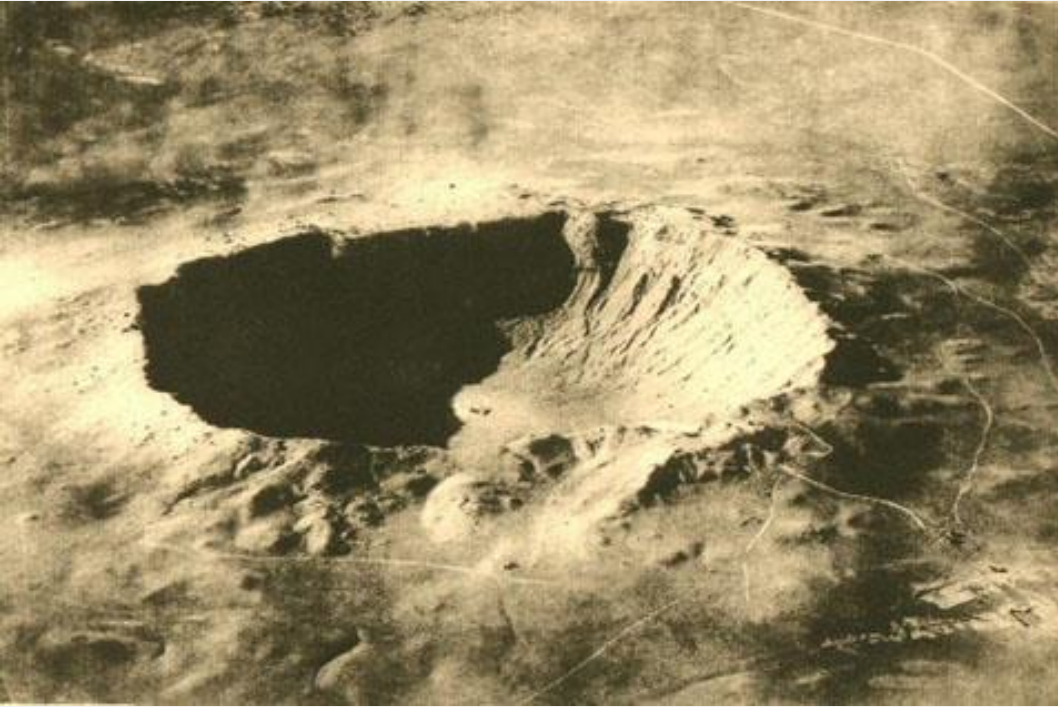
Feb 12 2000 00:58:00



Les astéroïdes géocroiseurs: un vrai danger, à surveiller...



Un danger pour la Terre?



← Le « Meteor Crater » en Arizona
(100 000 ans)
astéroïde de 40 mètres de diamètre
cratère de 2000m de diamètre

Un thème intéressant pour les films à sensation mais cela reste possible! →





- La majorité des cailloux du ciel sont petits !



- D'autres sont plus importants mais plus rares (ici au Pérou en 2007)

L'environnement terrestre

THE INNER SOLAR SYSTEM

This animation shows the motion of the inner part of the solar system over a two-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Mercury, Venus, Earth and Mars are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles). Comets are shown as blue squares (numbered periodic comets are filled squares, other comets are outline squares). Main-belt minor planets are displayed as green circles, near-Earth minor planets are shown as red circles.

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

L'environnement terrestre

A Ride With The Earth

An animation centered on Earth showing the known objects that have approached to within 20 million km between July 2007 and June 2008.

See the Animations Page on the MPC website for a description of the symbols used in this animation.

L'aventure de 2008 TC3





- L'orbite de 2008 TC3 devait rencontrer la Terre le 7 juillet 2008: le point d'impact se situant au Soudan.
- L'impact eut lieu! Et les astronomes vinrent vérifier leurs calculs sur place...





← La traînée laissée dans le ciel par la chute de l'objet

Les morceaux découverts dans le désert →

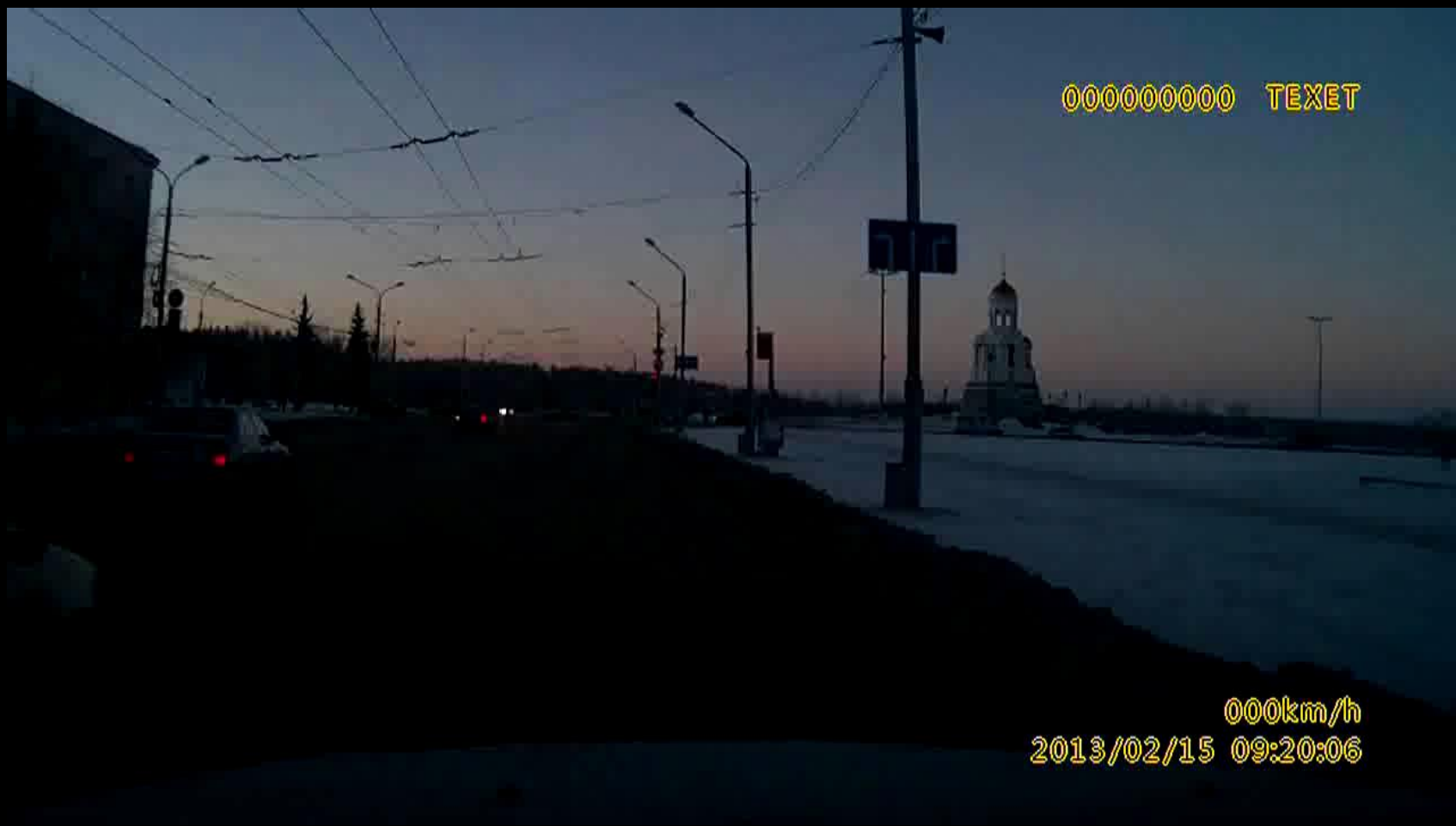


Arrivée d'un objet de quelques centimètres



Okie-Tex Star Party
September 30, 2008
Howard Edin

Arrivée d'un objet de quelques mètres



Tchéliabinsk le 15 février 2013



Tchéliabinsk le 15 février 2013: plus brillant que le Soleil!

Les dégâts causés par l'objet de Tchéliabinsk



Arrivée d'un objet de quelques dizaines de mètres

Arizona, il y a 100 000 ans



Tunguska, Sibérie, en 1908



Arrivée d'un objet de quelques kilomètres



Le risque d'un tsunami

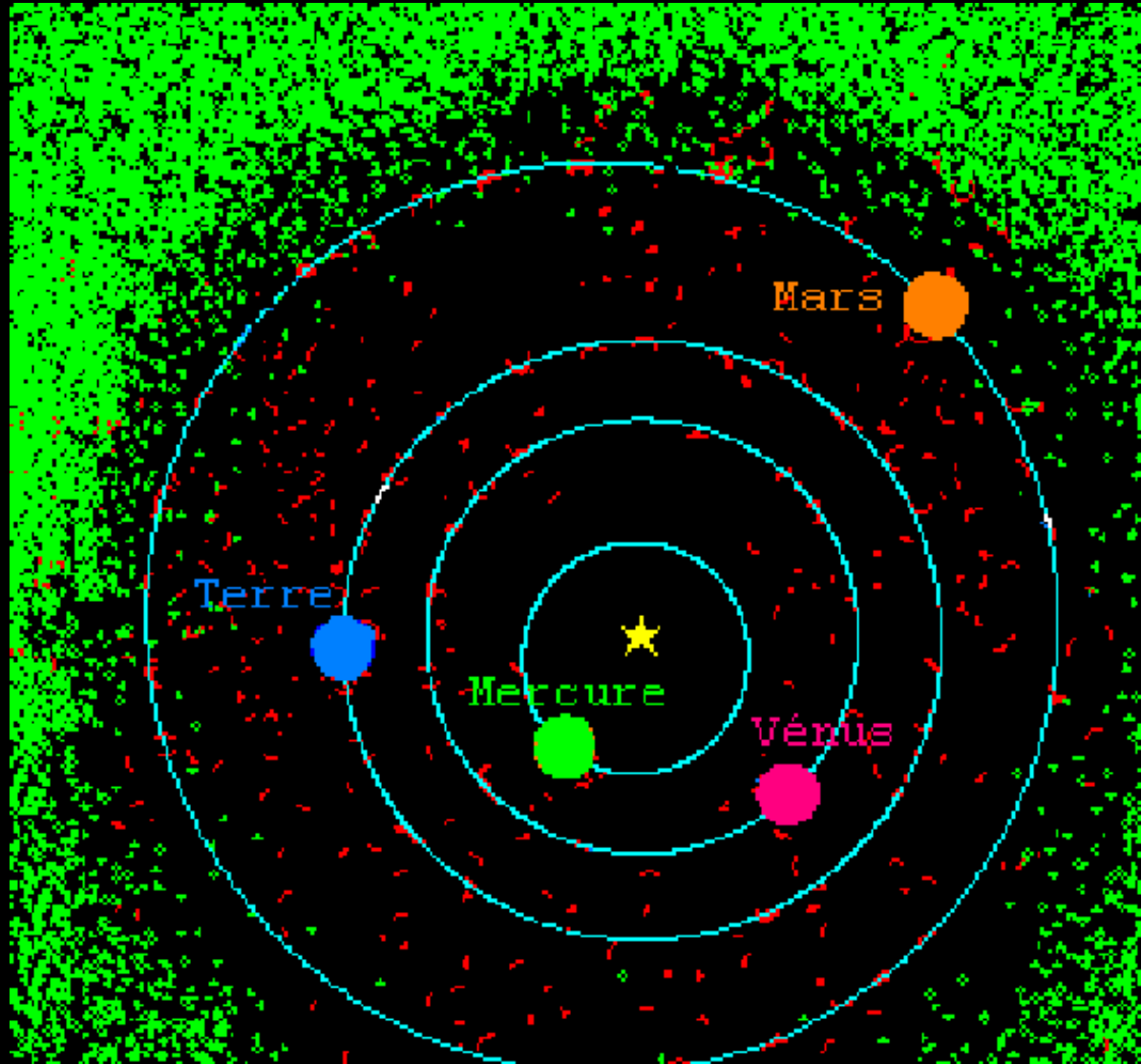


Combien d'objets dangereux?

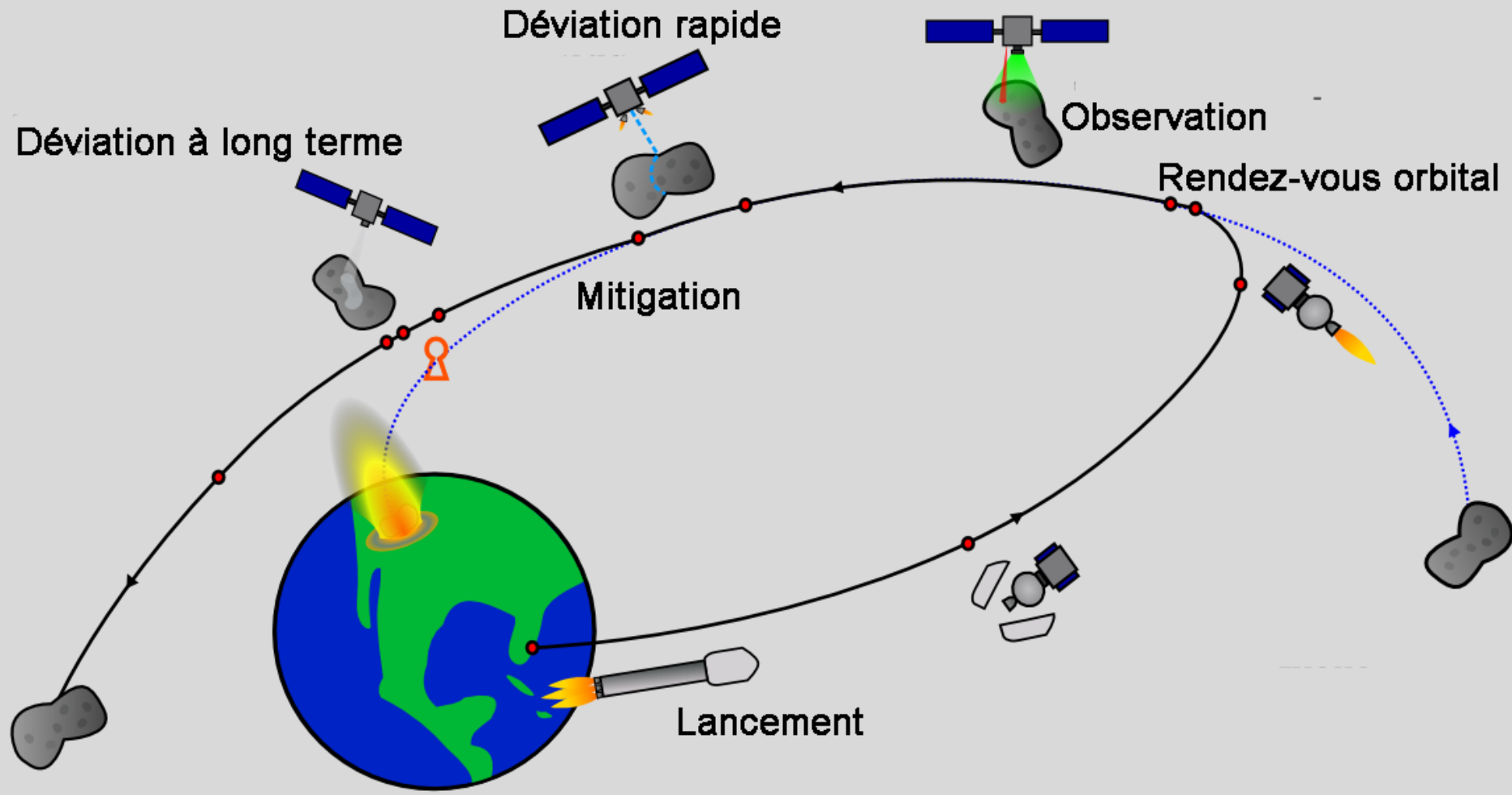
- Objets dangereux répertoriés et suivis: 1500
- Objets d'une taille supérieure à 1km : 500
- Prochain passage proche d'un gros objet:
(99942) Apophis le 13 avril 2029 à 35 590 km de la Terre (taille: 250 mètres)

Quelle probabilité pour une collision à risque ?

- Très faible: un objet de 1km tous les 1 million d'années
- Tous nos gros voisins sont répertoriés et suivis: prochain passage proche, Apophis en 2029
- Préparer cependant une parade: **comment dévier un tel objet?**

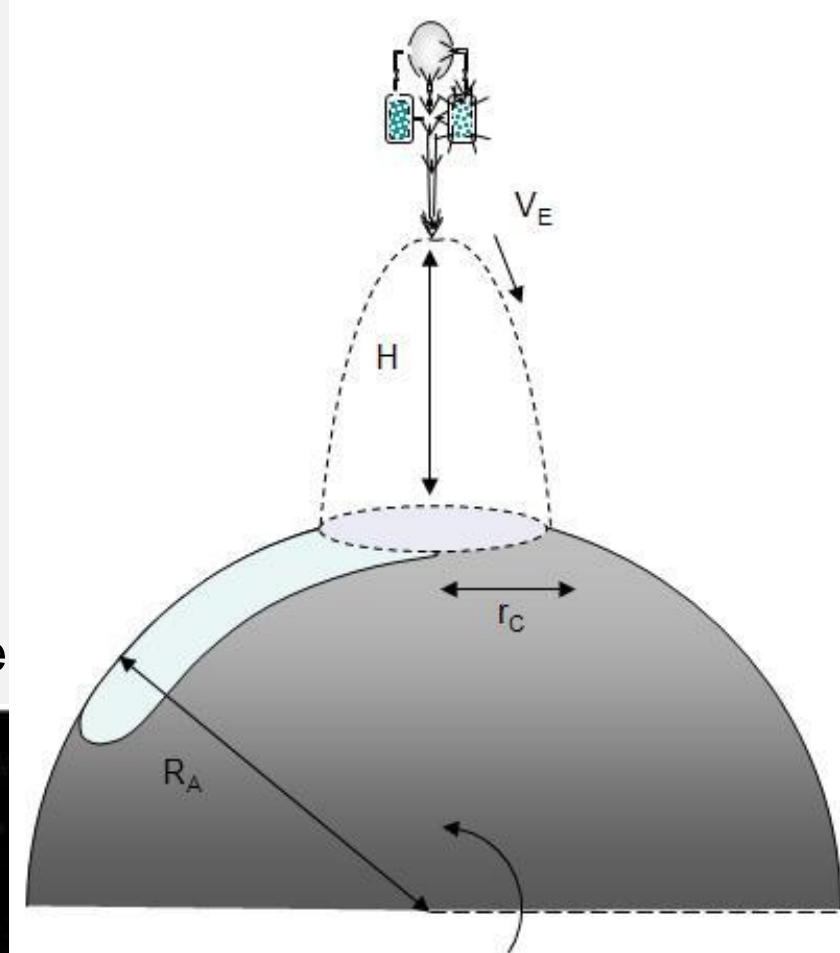
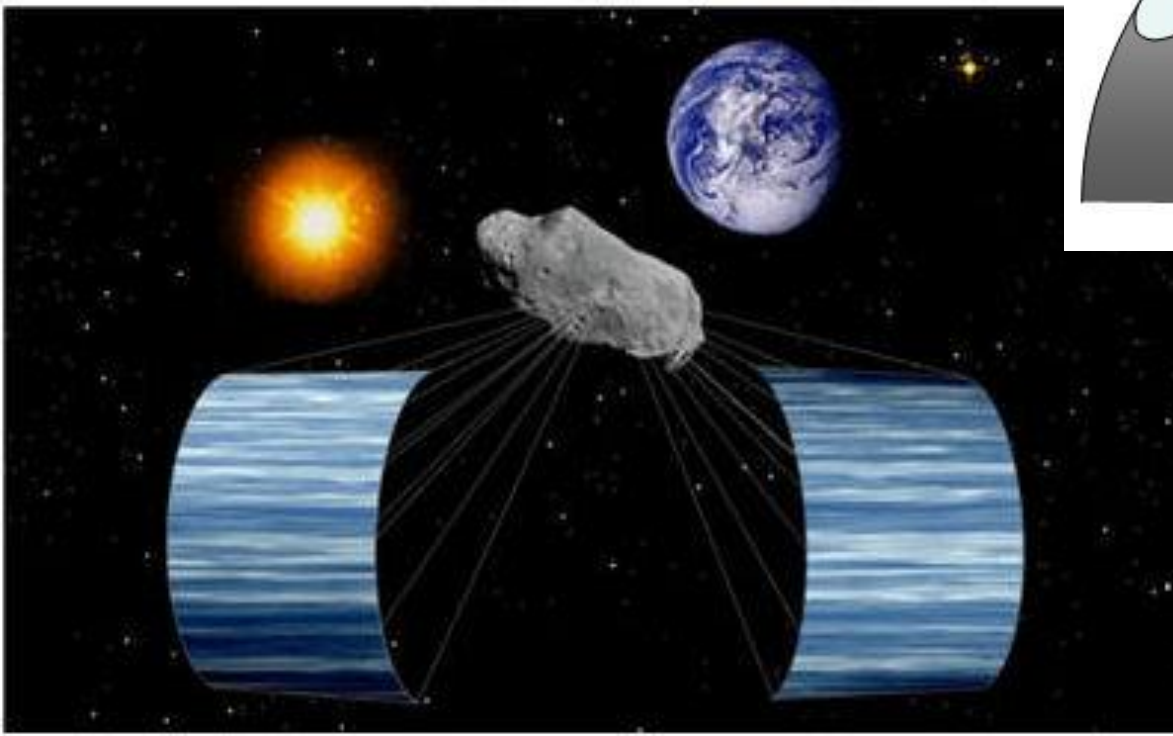


Comment dévier un objet dangereux: la mitigation



Mitigation

↓ dévier un astéroïde avec une voile solaire



↑
peindre un astéroïde en blanc!

ou donner une
impulsion à l'astéroïde

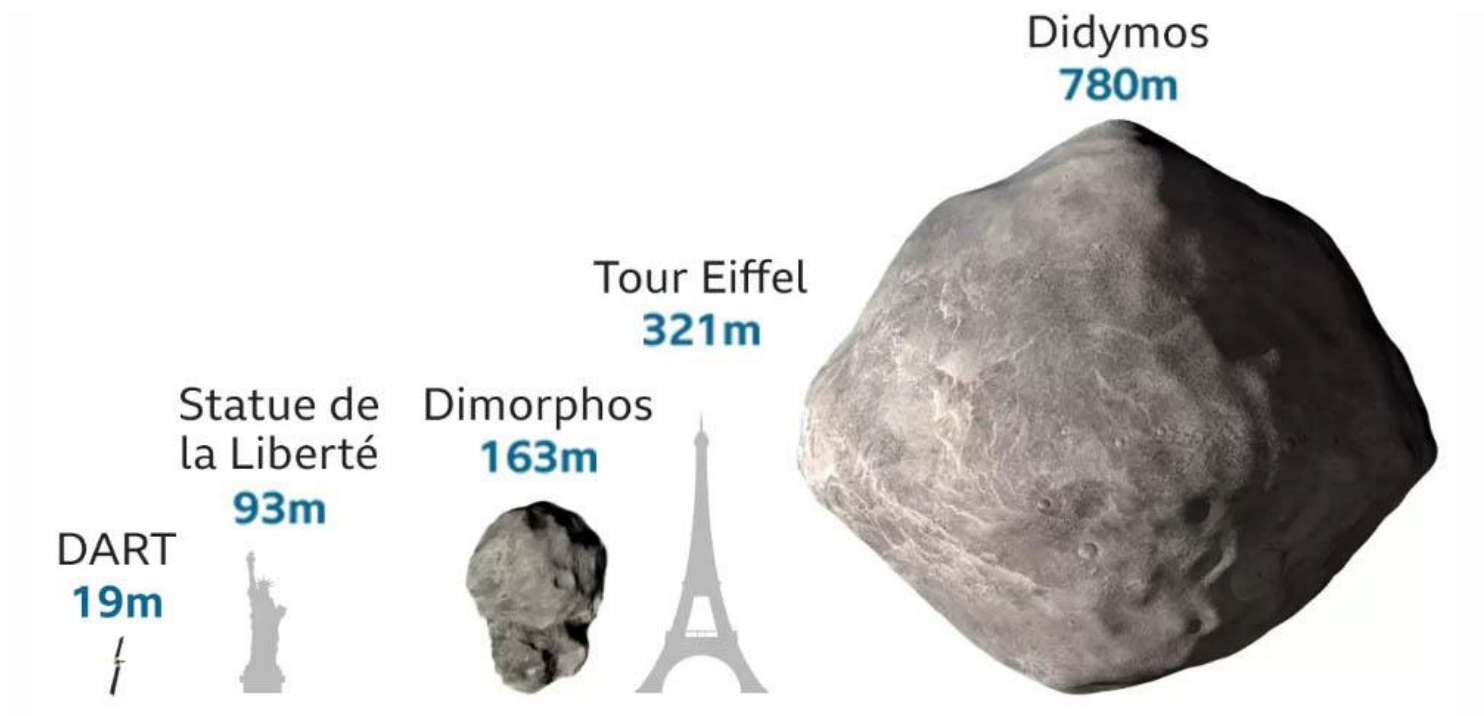
La mission DART de la NASA (Double Asteroid Redirection Test)

Dévier le système double de Dimorphos orbitant
autour de Didymos.

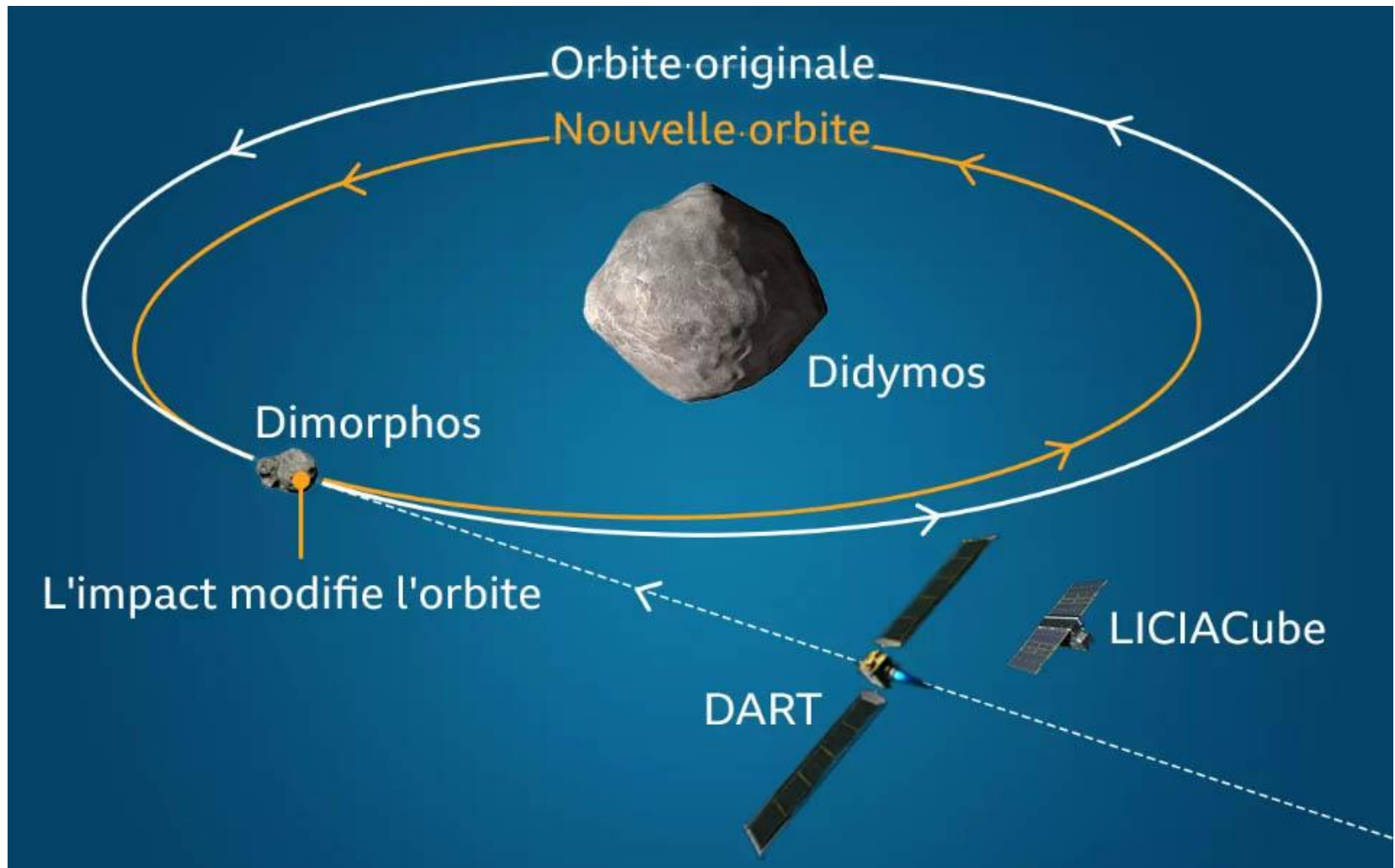


La mission DART (Double Asteroid Redirection Test)

- Le but: modifier la trajectoire de l'astéroïde Dimorphos orbitant autour de Didymos à l'aide d'un choc.



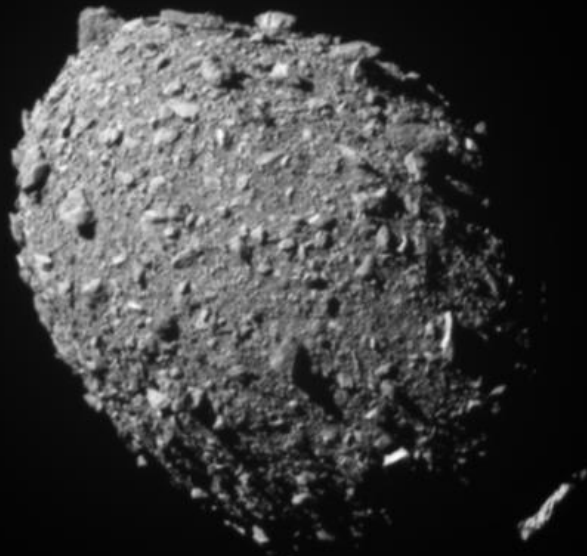
La mission DART: s'écraser sur Dimorphos



La mission DART: impact le 26 septembre 2022



La mission DART: impact le 26 septembre 2022

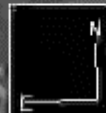


Que s'est-il passé après
l'impact?



Didymos et Dimorphos

Suivi depuis la Terre à l'aide d'un petit télescope



La mission HERA de l'ESA: aller voir les dégâts!

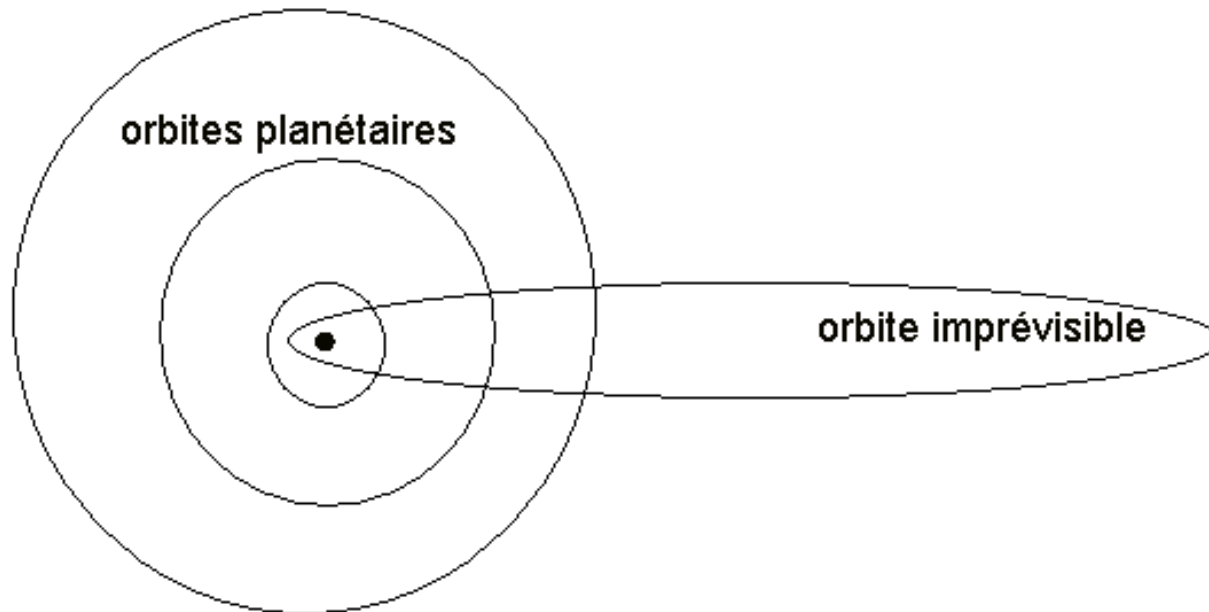


Des visiteuses inattendues: les comètes:
belles mais peut-être pas inoffensives...



L'inquiétude face aux comètes vient de leur orbite très excentrique non prévisible

D'où viennent-elles?



Réservoir de comètes, peu à peu déstabilisées par la présence des étoiles

La peur des comètes

→ la comète de Halley en 1066



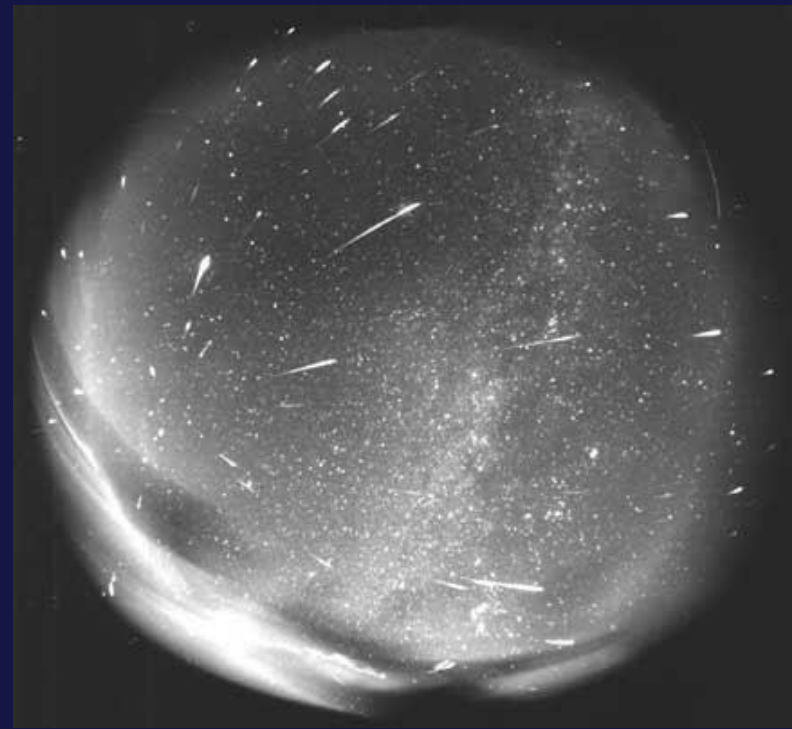
La catastrophe du 30 juin 1908 à 7h 17m au lieu-dit
« Tunguska » en Sibérie: un morceau de comète?



Les comètes, génératrices des pluies d'étoiles filantes

Les Léonides en 1998 →

- Un danger pour les satellites en orbite, pas pour le Terre

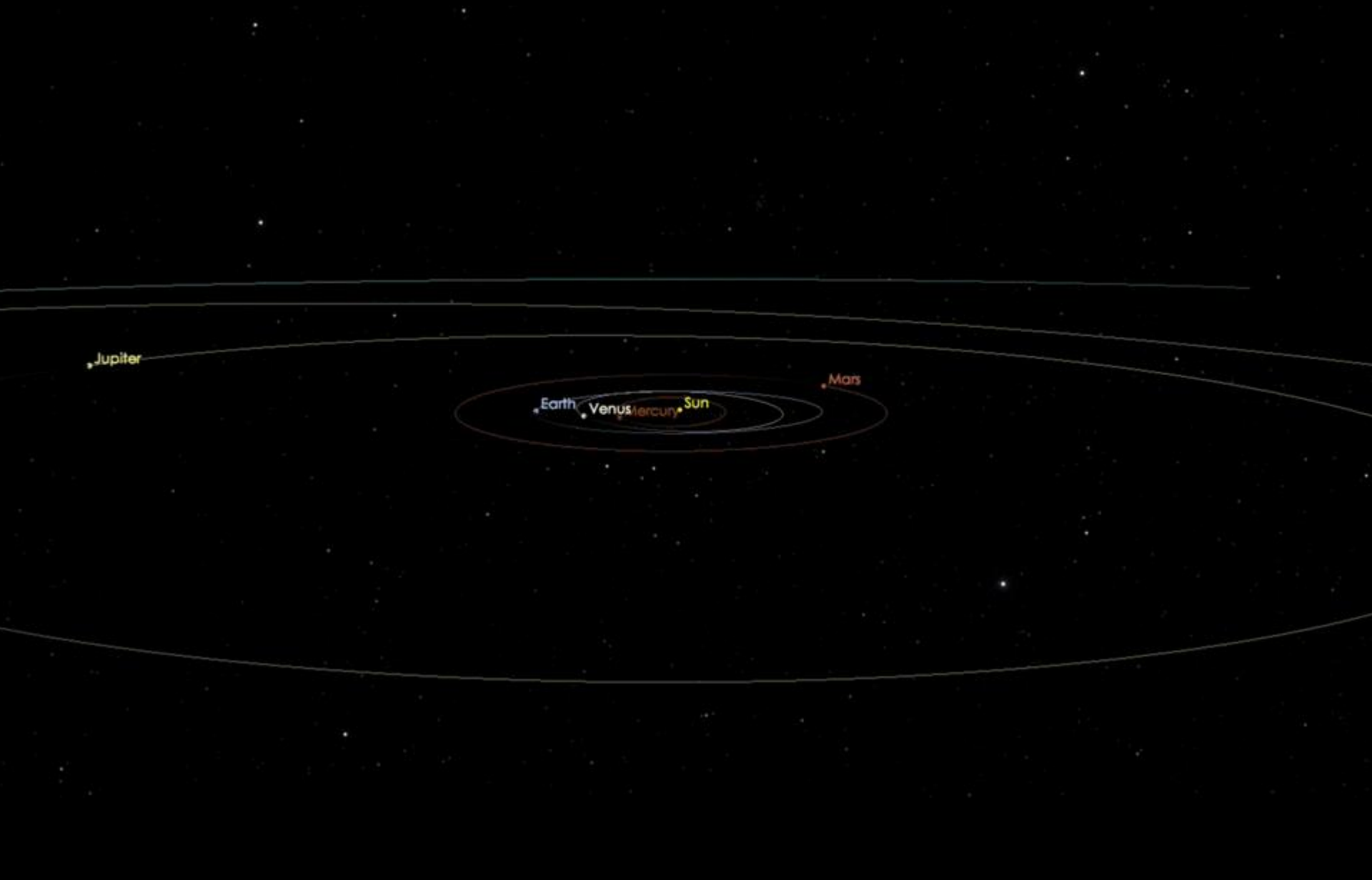


Des objets extra solaires?

- Le 19 octobre 2017, l'observatoire d'Hawaï (téléscope Pan-STARRS) observe un objet inhabituel provenant de l'extérieur du système solaire, d'un autre système solaire (sur une trajectoire hyperbolique): comète ou astéroïde?



La détection du premier objet extra solaire



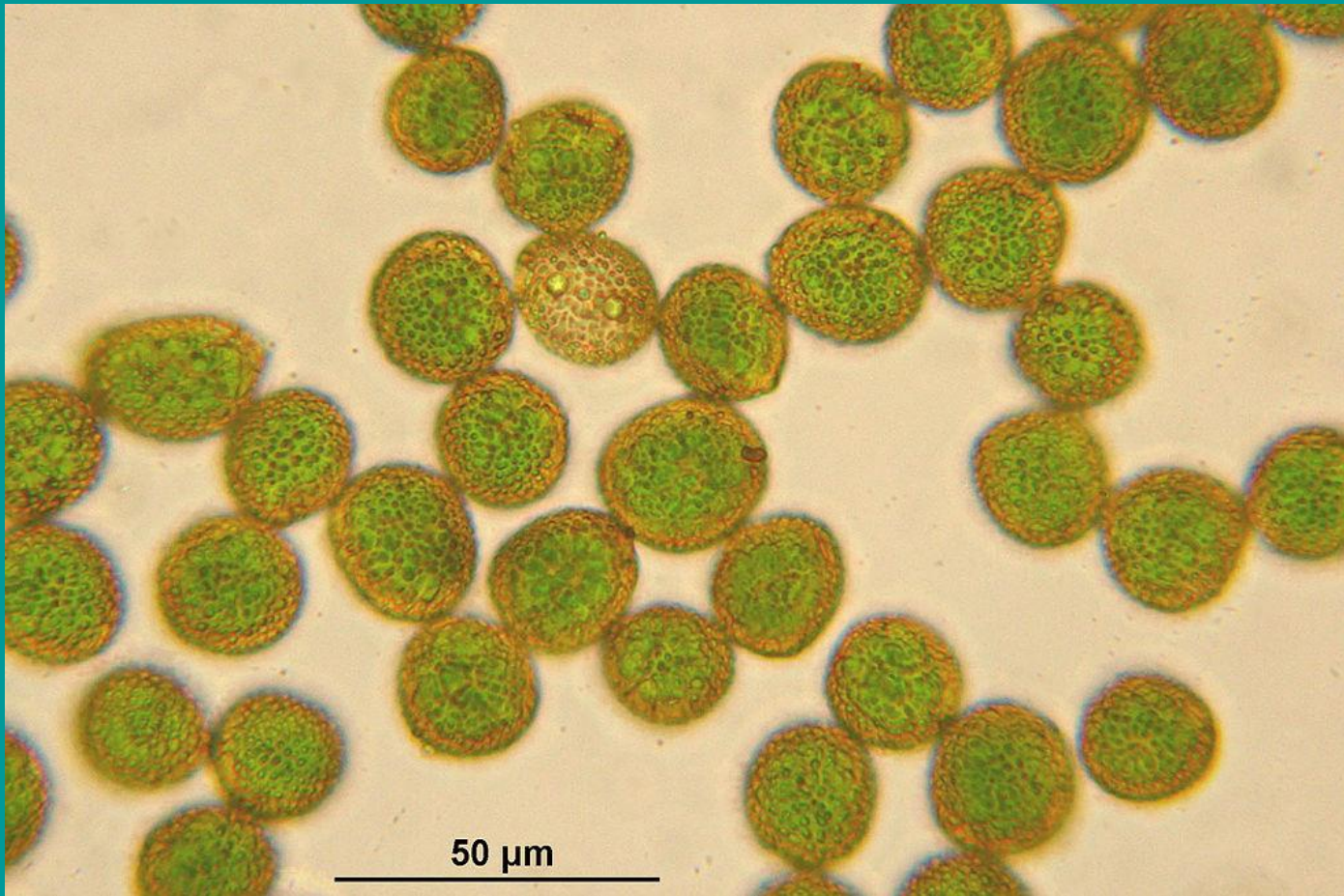
La détection du premier objet extra solaire



Les comètes: messagères ou transporteuses?

- Peuvent-elles venir d'autres systèmes solaires?
- Comment se forment-elles?
- Peuvent-elles apporter de nouvelles formes de vie?

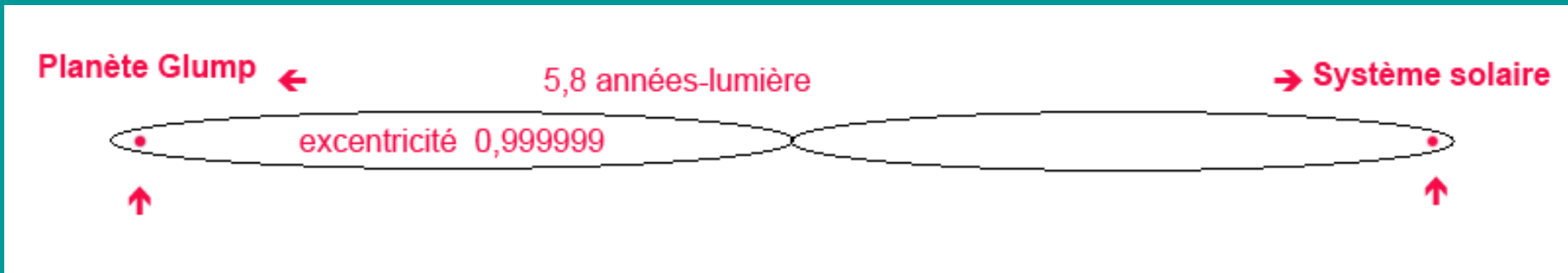
Les spores



Des êtres vivants très résistants: des voyageurs spatiaux?

Le transfert d'un système à l'autre

Des formes de vie transportées d'un système à l'autre



$a^3/T^2=1$ si a est en UA et T en années

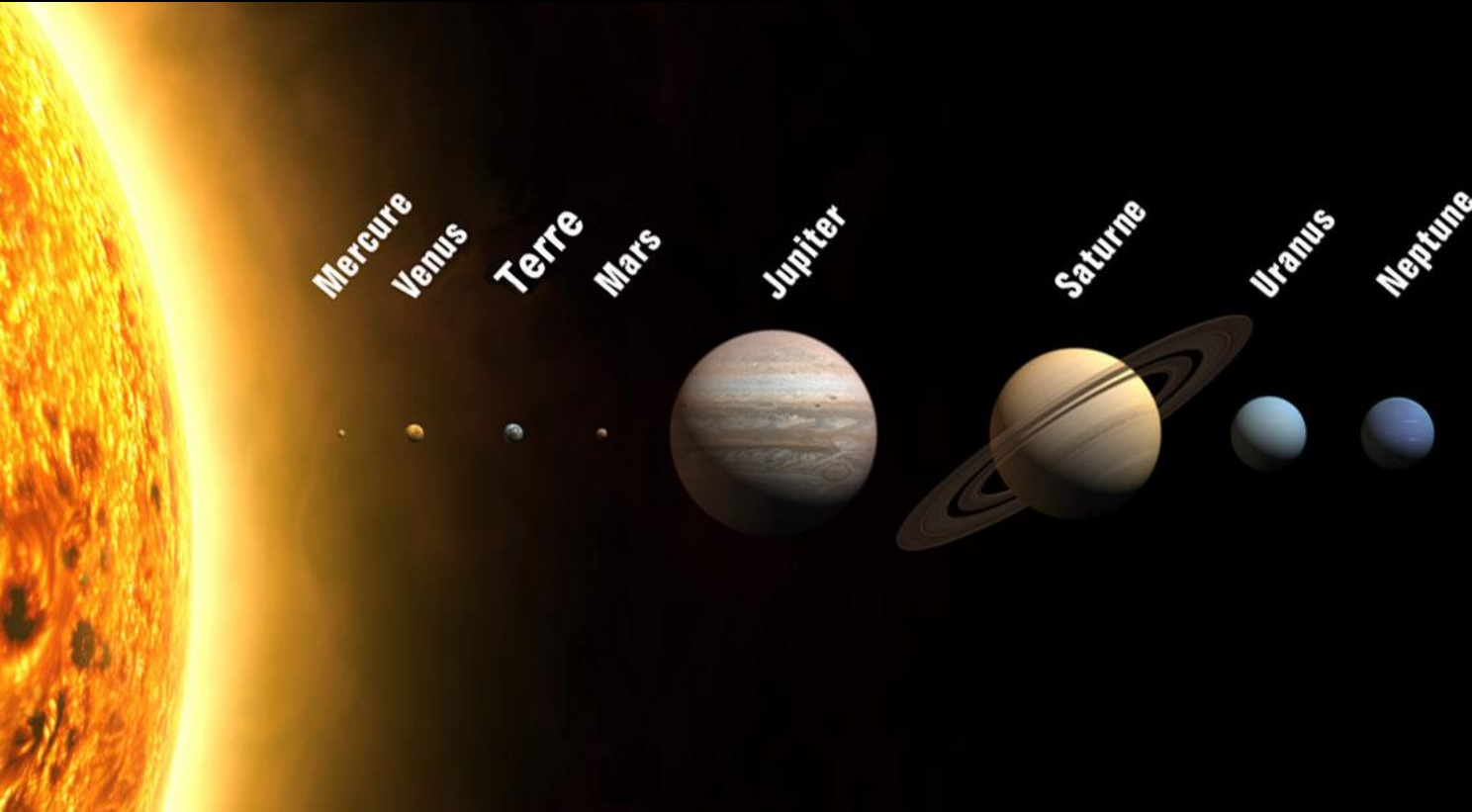
$a \times 0,000001 = 15 \text{ Mkm}$

donc $a = 15 \times 10^6 \times 10^6 \text{ km} = 3,1 \text{ années-lumière} = 10^5 \text{ UA}$

et $T^2 = (10^5)^3$ d'où $T = (10^{15})^{-2} \text{ années} = 10^{-2} \times 10^7 = 31 \text{ millions d'années}$

Si la comète parcourt les deux demies orbites, elle mettra environ **31 millions d'années** pour arriver à proximité de la Terre.

D'autres dangers dans le système solaire ?



Des leçons à tirer de nos observations du système solaire ?



Évolution du climat: les leçons de Mars et de Vénus

- Risque-t-elle de devenir comme Mars, un désert glacé ou comme Vénus, un désert brûlant?
- Que nous apprennent Vénus et Mars sur notre avenir ?

Planètes telluriques: une évolution parallèle?



Vénus: une planète où il fait chaud



Très chaud!
un enfer à 400 degrés!



De la vie sur Mars?



Mars: des jours et des saisons comme sur la Terre
donc de la vie, donc des Martiens...!



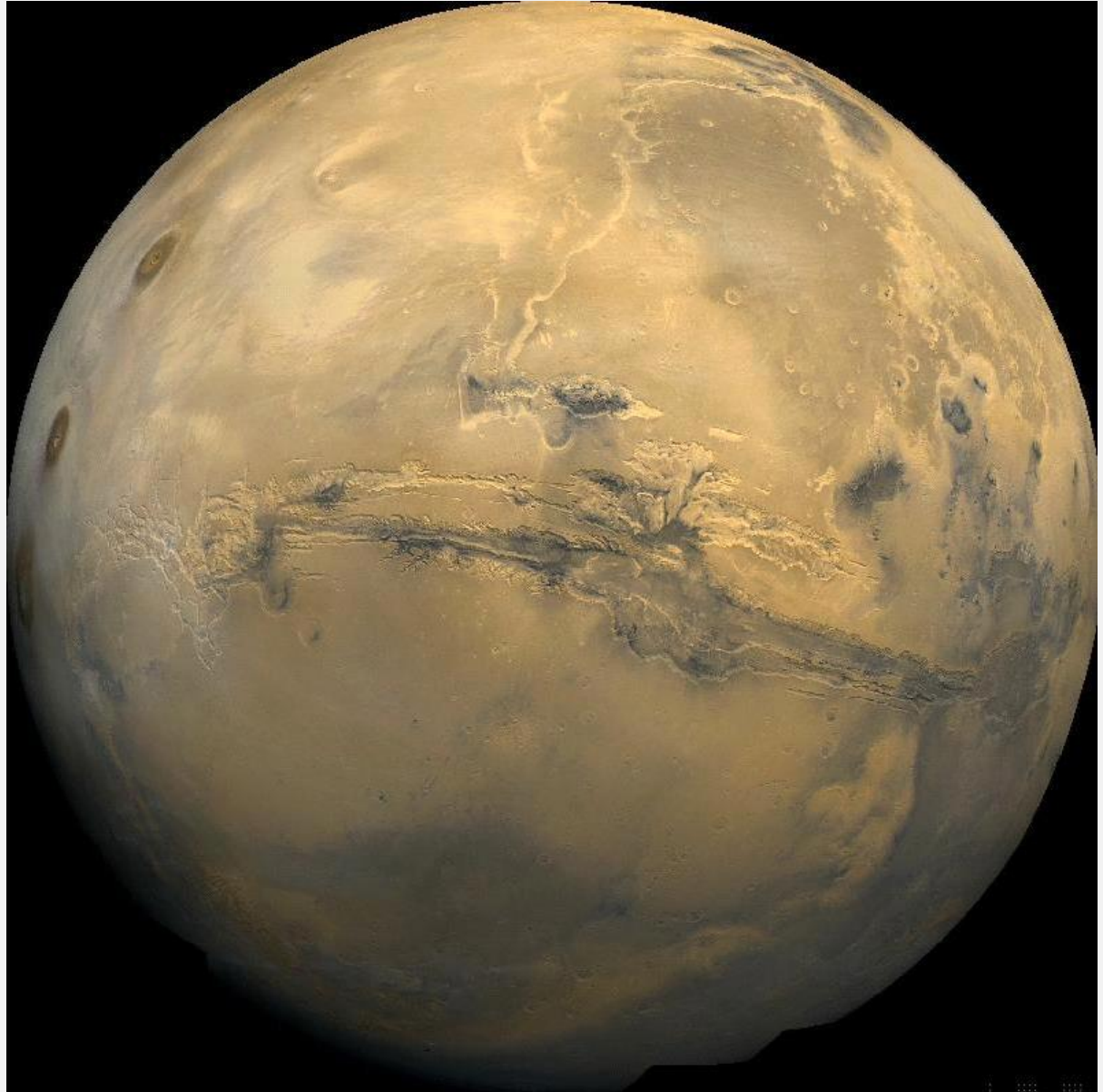
La grande peur des Martiens!



Mars

La planète rouge:
Un désert...

Pas de danger de
la part des
Martiens!
Ni des extra-
terrestres!



Mars n'est qu'un désert inhospitalier et froid



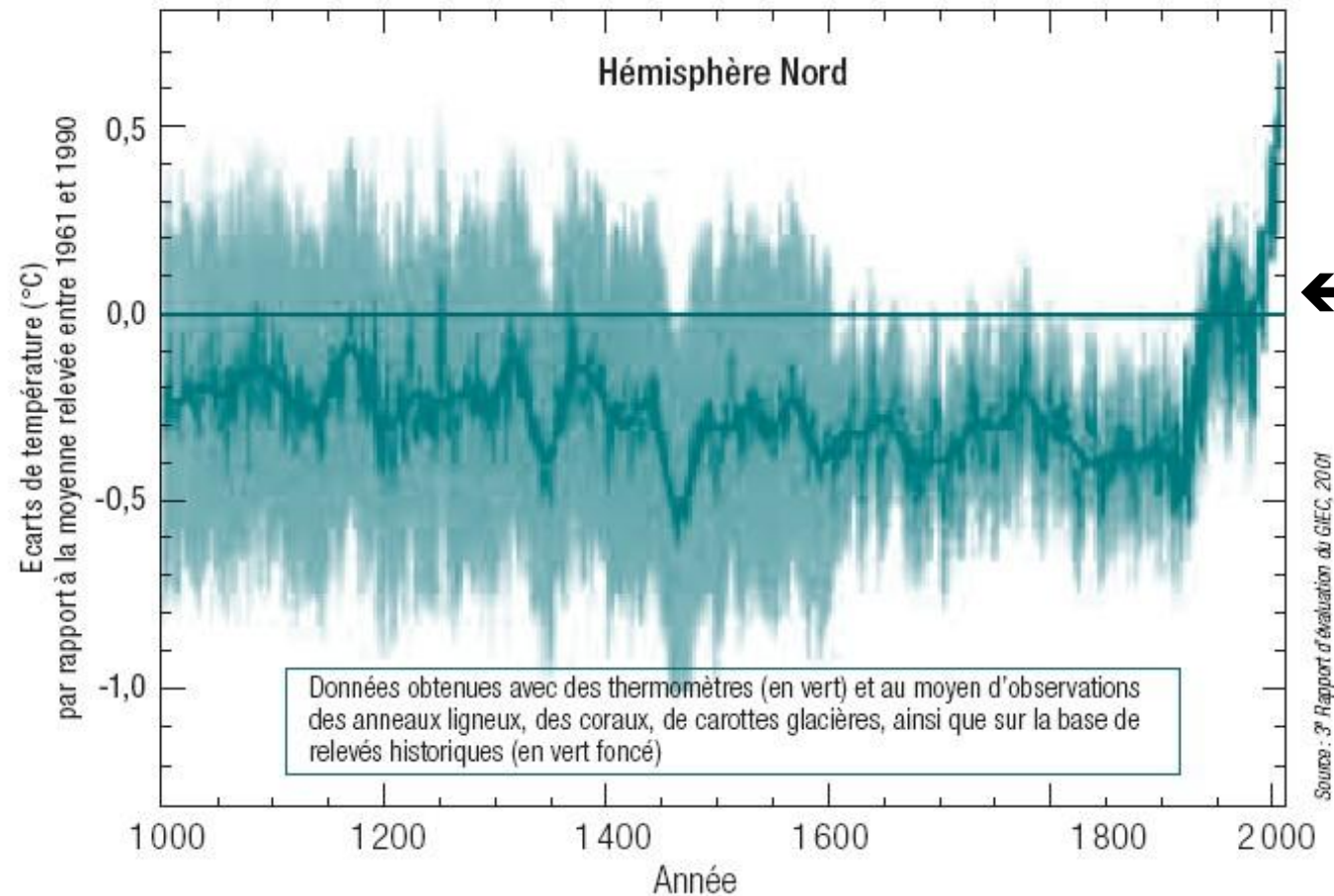
Et la Terre, va-t-elle ressembler à Mars ou à Vénus?



A long terme, plutôt comme Vénus

L'évolution de la température terrestre

Les variations de la température à la surface de la terre au cours du dernier millénaire

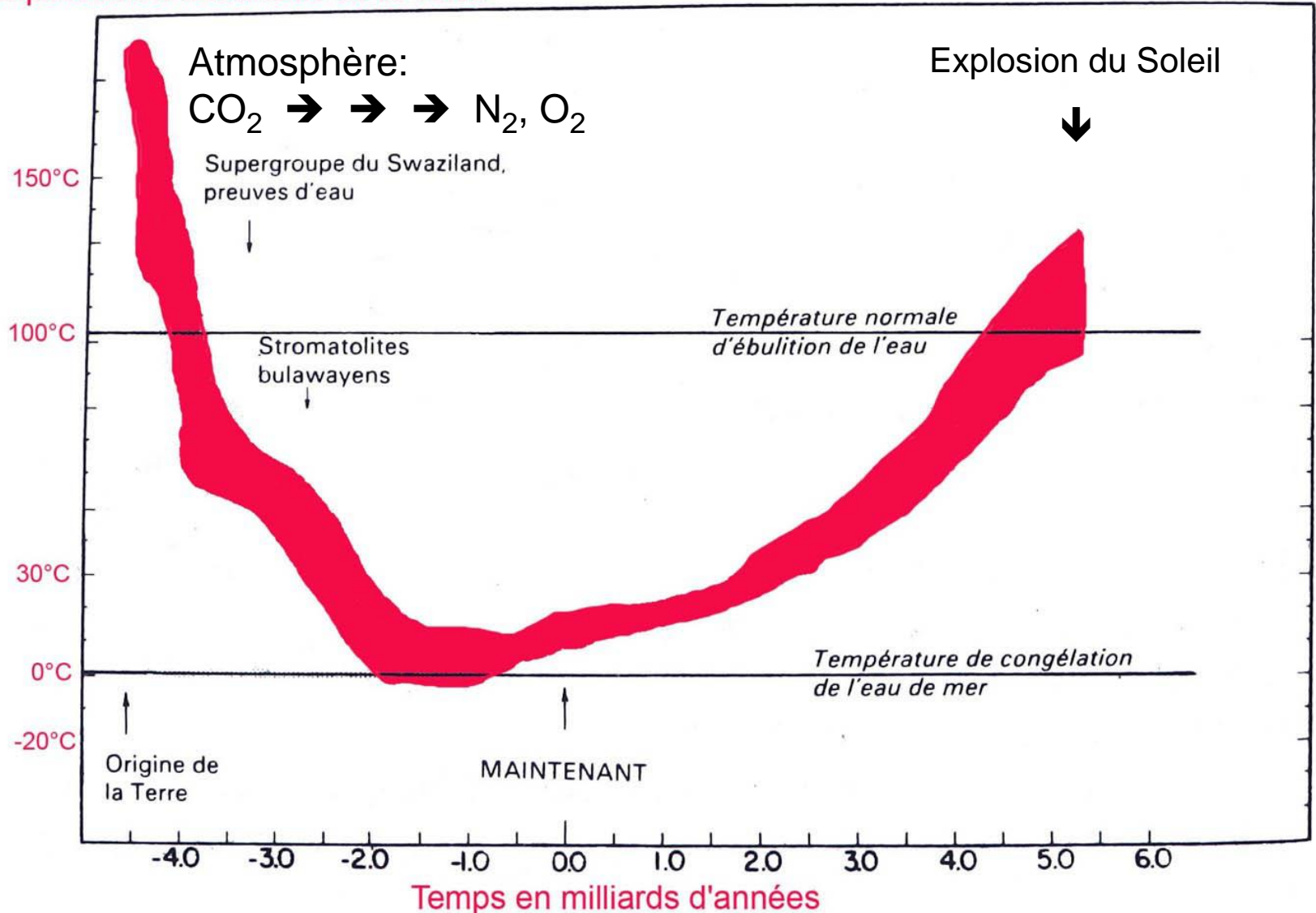


← Que se passe-t-il ici?

Malgré les marges d'incertitude plus importantes au fur à mesure que l'on s'éloigne dans le passé (zone vert clair du graphique), les résultats montrent que la rapidité et la durée du réchauffement ont été beaucoup plus élevées au 20^e siècle qu'au cours de n'importe lequel des neuf siècles précédents.

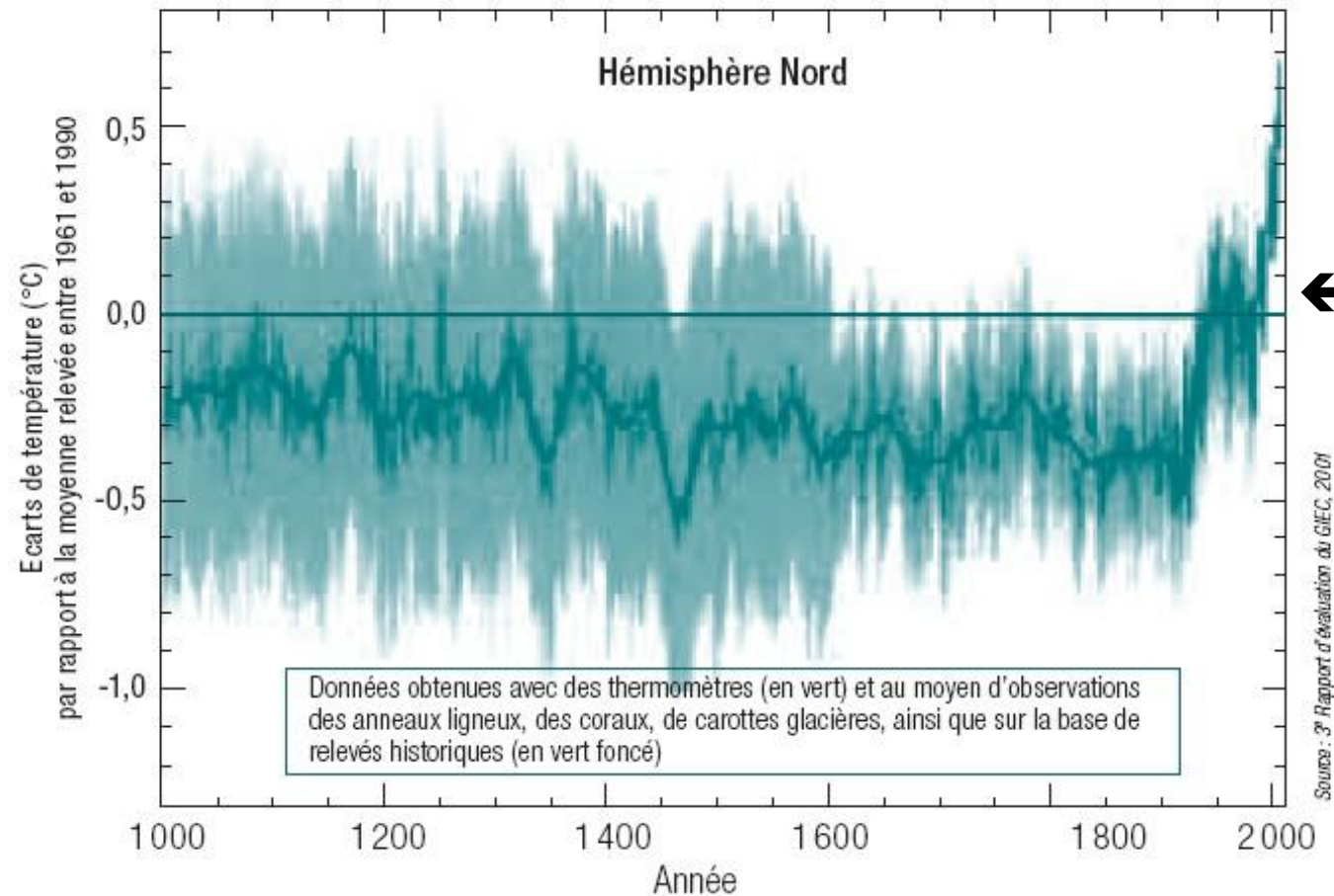
Evolution de la température terrestre quels responsables?

Température à la surface de la Terre



L'évolution de la température terrestre

Les variations de la température à la surface de la terre au cours du dernier millénaire



← Que se passe-t-il ici?

Malgré les marges d'incertitude plus importantes au fur à mesure que l'on s'éloigne dans le passé (zone vert clair du graphique), les résultats montrent que la rapidité et la durée du réchauffement ont été beaucoup plus élevées au 20^e siècle qu'au cours de n'importe lequel des neuf siècles précédents.

Pourquoi ces différences de climat?

→ les atmosphères des planètes telluriques

	Vénus	Terre	Mars
Distance au Soleil (km)	108 000 000	150 000 000	228 000 000
Pression à la surface	92	1	0.007
Composition de l'atmosphère (%)			
Gaz carbonique (CO ₂)	96.5	0.0345	95.3
Azote (N ₂)	3.5	78.08	2.7
Oxygène (O ₂)	0.0001-0.0020	20.95	0.000013
Vapeur d'eau (H ₂ O)	0.0001-0.0050	1-3	<0.01
Méthane (CH ₄)	Le méthane ne reste pas dans l'atmosphère des planètes telluriques Terre: environ 0.0001 émis par les plantes		

Les températures comparées des planètes telluriques

	Vénus	Terre	Mars
Distance au Soleil (km)	108 000 000	150 000 000	228 000 000
Pression à la surface	92	1	0.007
Température au sol			
Chaleur reçue du Soleil ($W\ m^{-2}$)	2620	1382	594
Chaleur arrivant au sol ($W\ m^{-2}$)	367	842	499
Température due à cette chaleur	230K (-43°C)	253K (-20°C)	212K (-61°C)
Température réelle au sol	735K (462°C)	288K (15°C)	218K (-55°C)
Augmentation de température due à l'effet de serre avant le « réchauffement climatique »	+505°	+35°	+6°



L'effet de serre

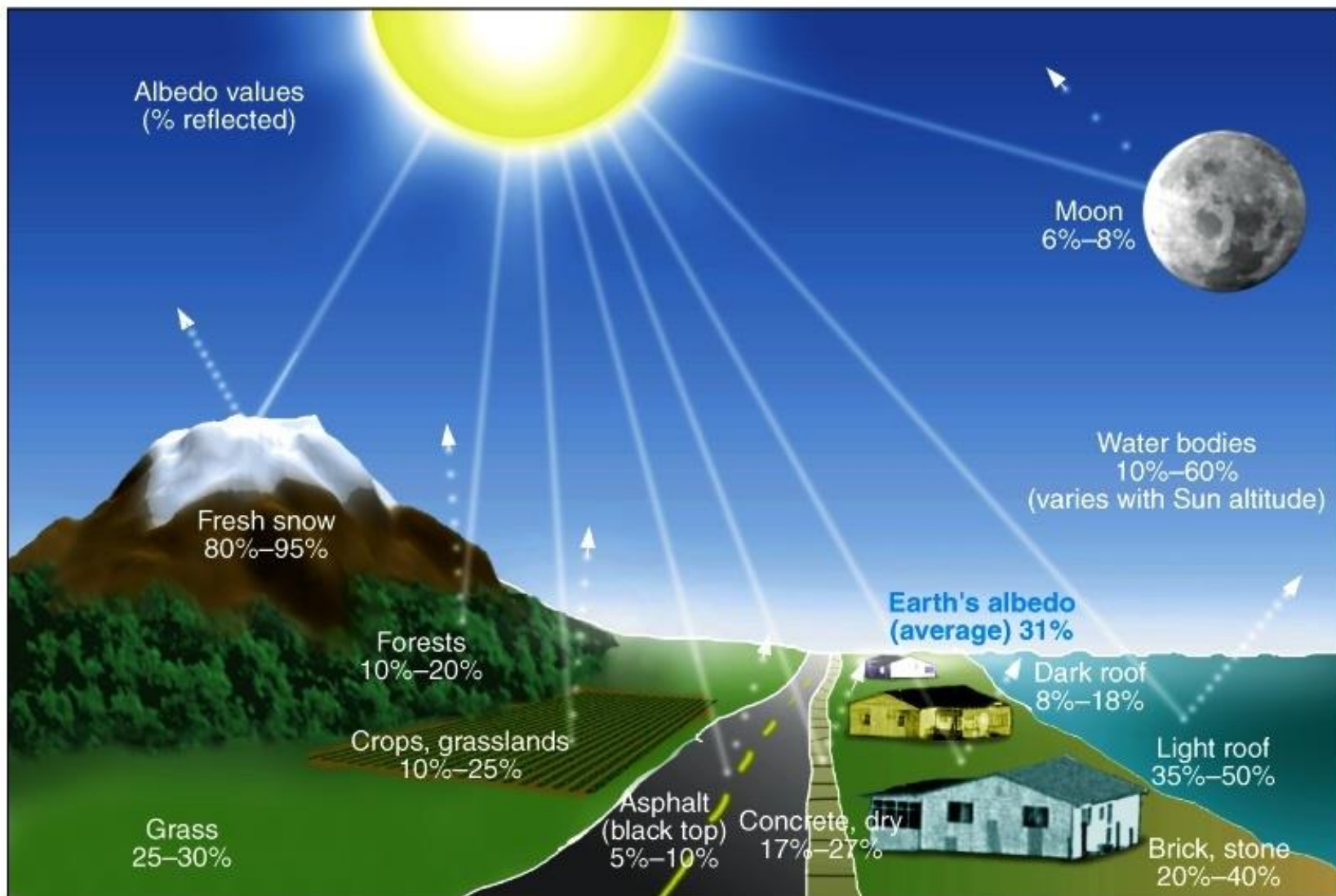
L'atmosphère
laisse arriver au sol
50 % du rayonnement
reçu du soleil.

Le rayonnement absorbé par le sol et
l'atmosphère est finalement réémis vers
l'espace en infrarouges, après de multiples
interactions avec les composants de
l'atmosphère, contribuant ainsi à en
réchauffer les couches inférieures.

Agissant telles les vitres d'une serre,
certains gaz présents naturellement en
faible quantité dans l'atmosphère (vapeur
d'eau, gaz carbonique, éthane, ozone)
interfèrent avec les rayons infrarouges en
les empêchant directement de s'échapper
vers l'espace. Cela provoque une hausse
des températures.

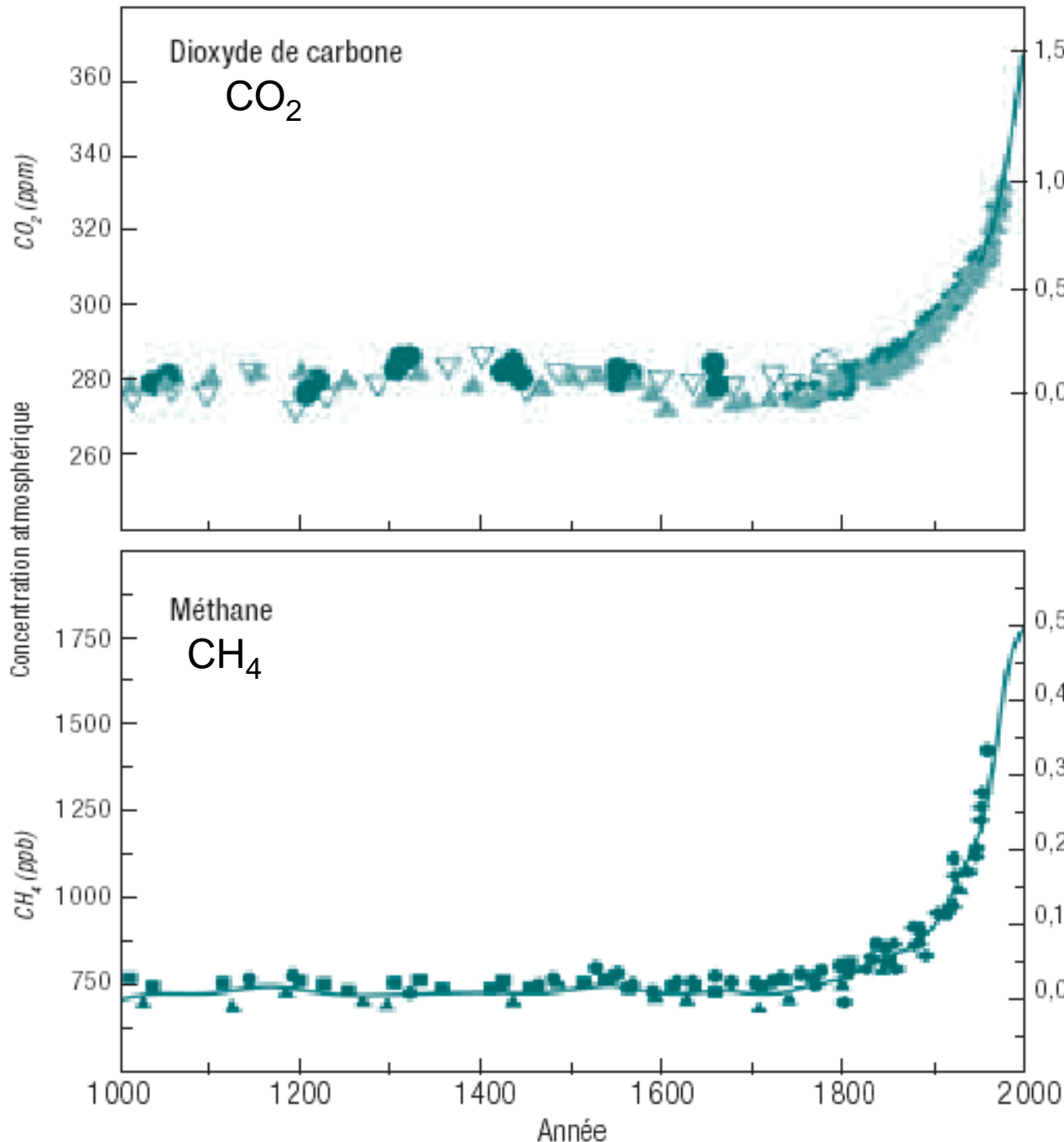


Le problème de l'albédo (ou « réflectivité des sols »)



Des sols clairs ou blancs réfléchissent la lumière et refroidissent la Terre.

Concentrations atmosphériques globales de deux gaz à effet de serre bien mélangés

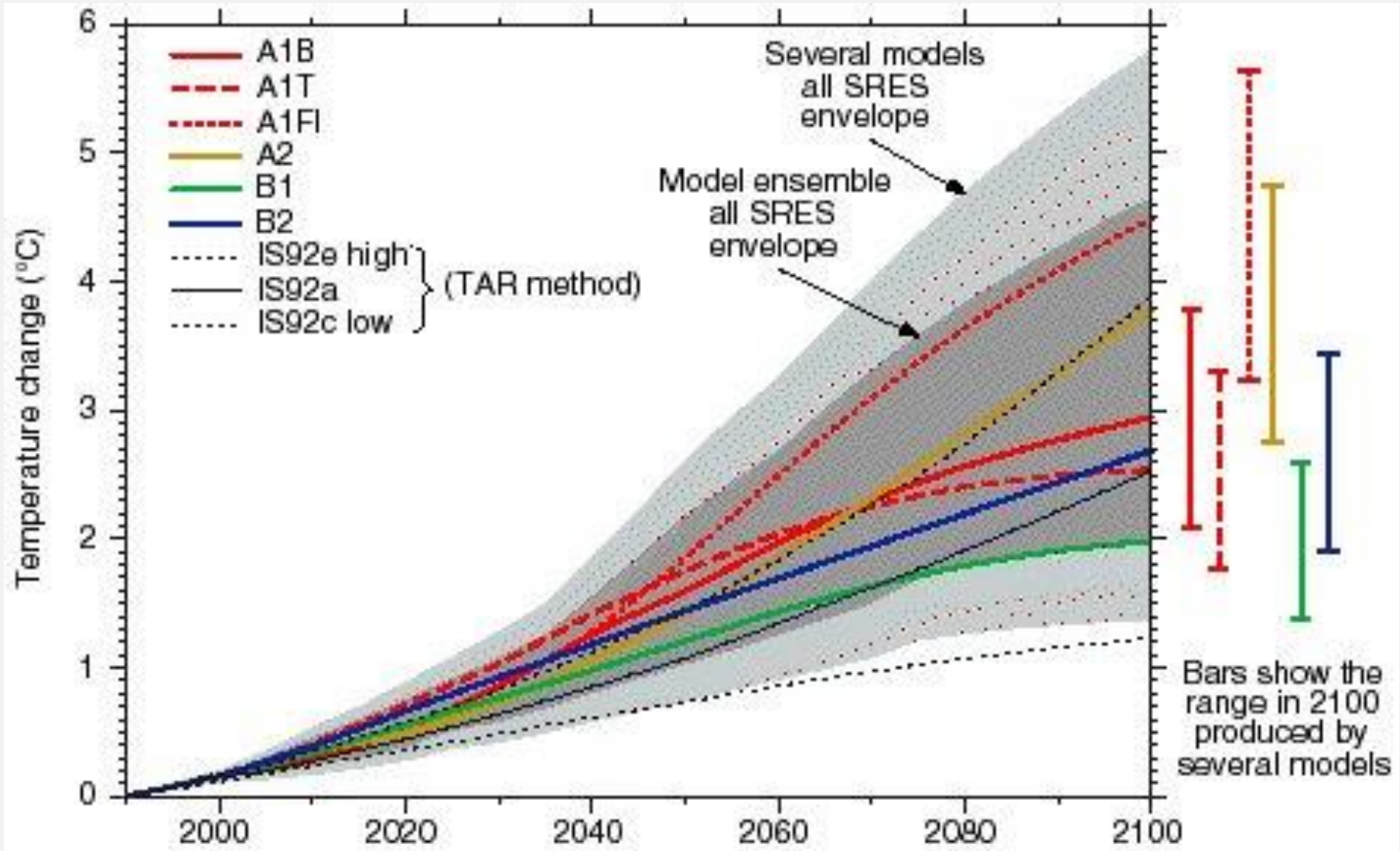


Source : 3^e Rapport d'évaluation du GIEC, 2007.

Forçage radiatif (Wm⁻²)

La nature anthropique de l'augmentation de CO₂ est prouvée par la simultanéité avec la baisse de la concentration en oxygène.

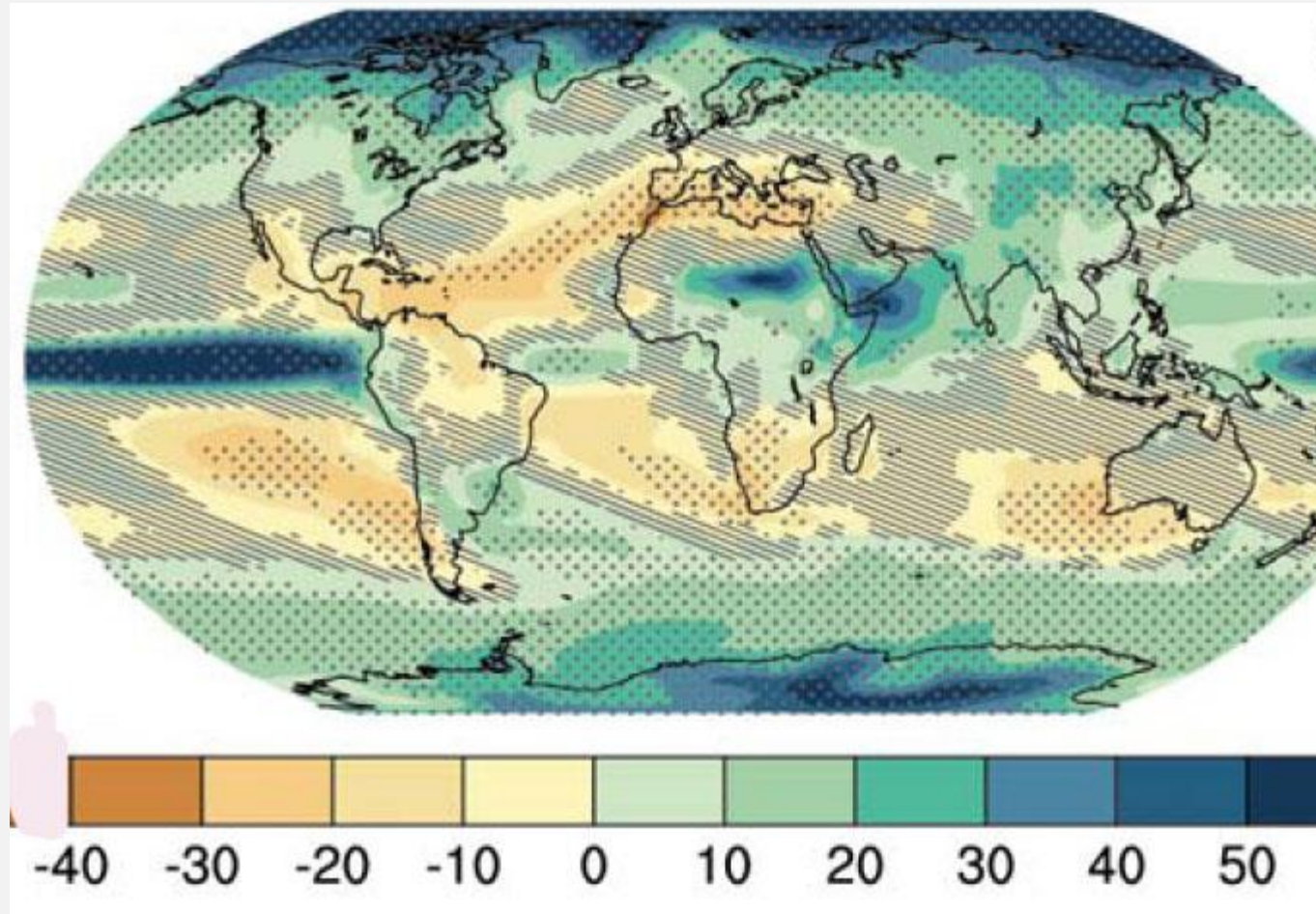
La Terre se réchauffe-t-elle? Va-t-on vers Mars ou vers Vénus?



La modification des précipitations (et de l'albédo)

plus de pluie au nord →

moins de pluie au sud →



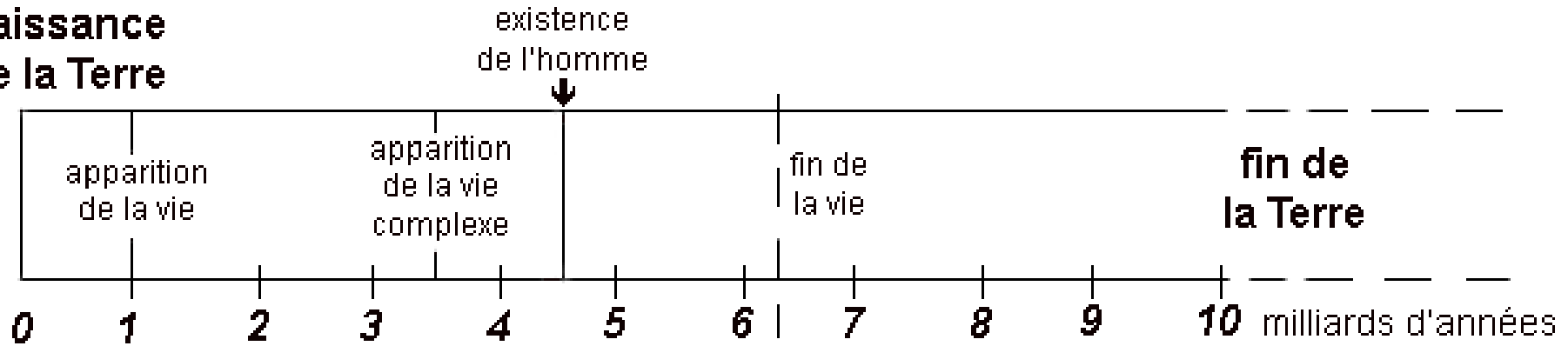
La Terre n'est plus en équilibre thermique...



L'injection de gaz carbonique dans l'atmosphère est beaucoup trop rapide.

- À plus long terme, nous allons vers une période glaciaire mais la constante solaire augmente et le Soleil chauffe de plus en plus! L'eau disparaîtra de la surface de la Terre dans ... plusieurs centaines de millions d'années.

**naissance
de la Terre**



← Atmosphère
trop chaude →

← Soleil trop chaud →

- Le Soleil a encore du carburant pour
4 à 5 milliards d'années...



Un danger peut-il venir des étoiles...?



Les supernovae (mort des étoiles massives)

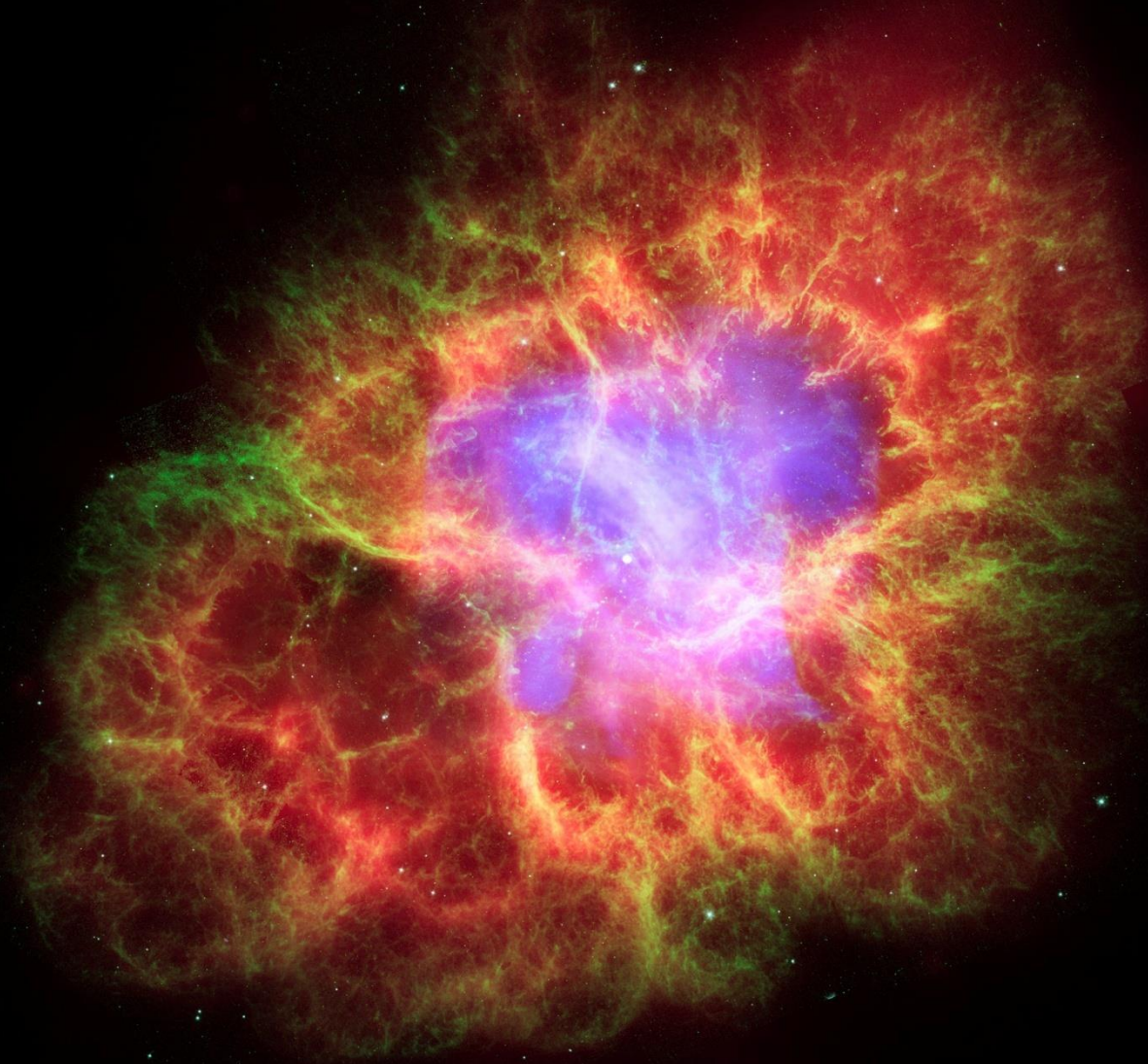


C'est la même étoile à gauche (avant) et à droite (après)

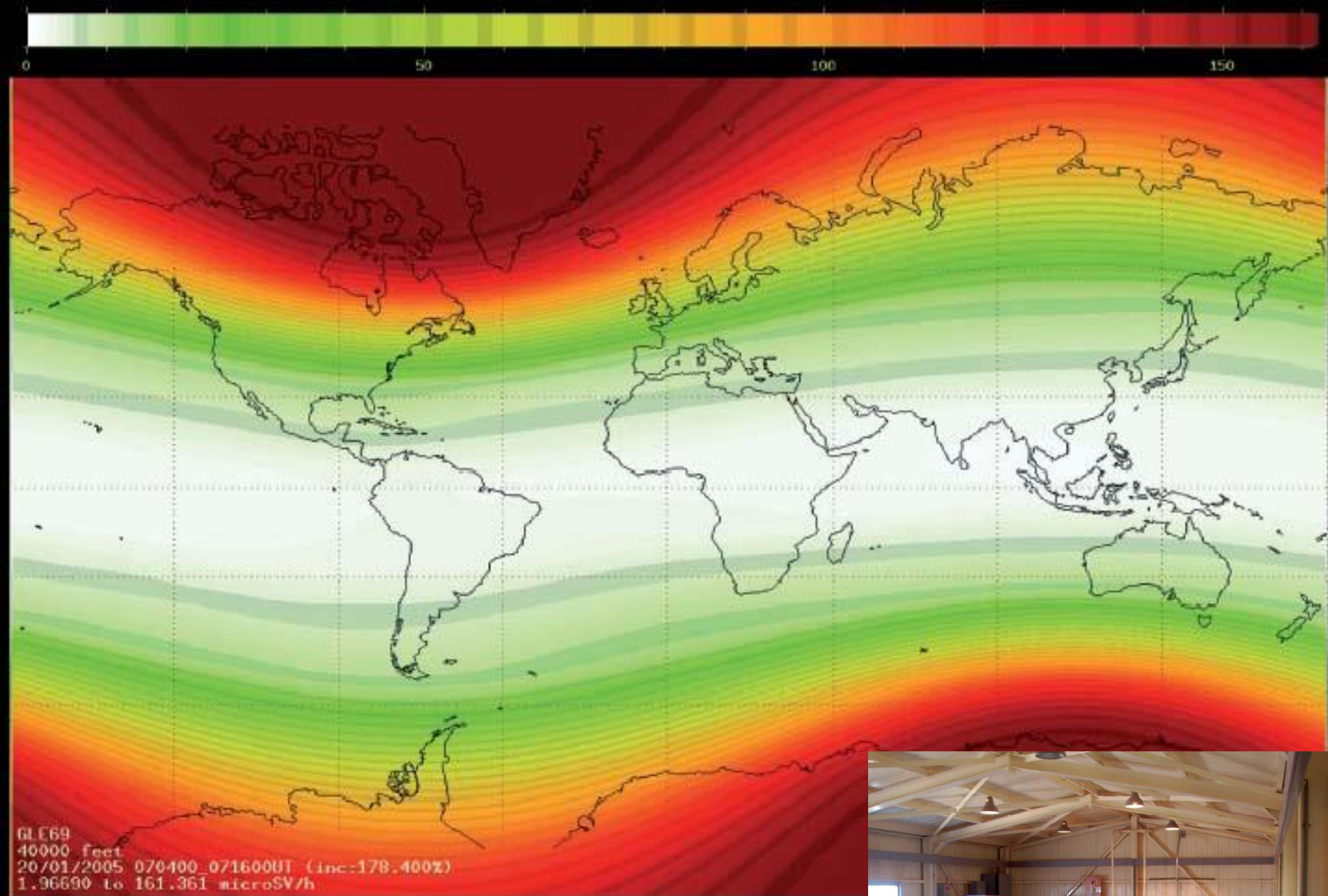


Le Soleil → X

L'explosion finale d'une étoile: une supernova générant des rayons cosmiques



La nébuleuse du Crabe: les restes d'une supernova, visible en plein jour en 1054



**Les rayons cosmiques:
un danger pour la navigation aérienne**

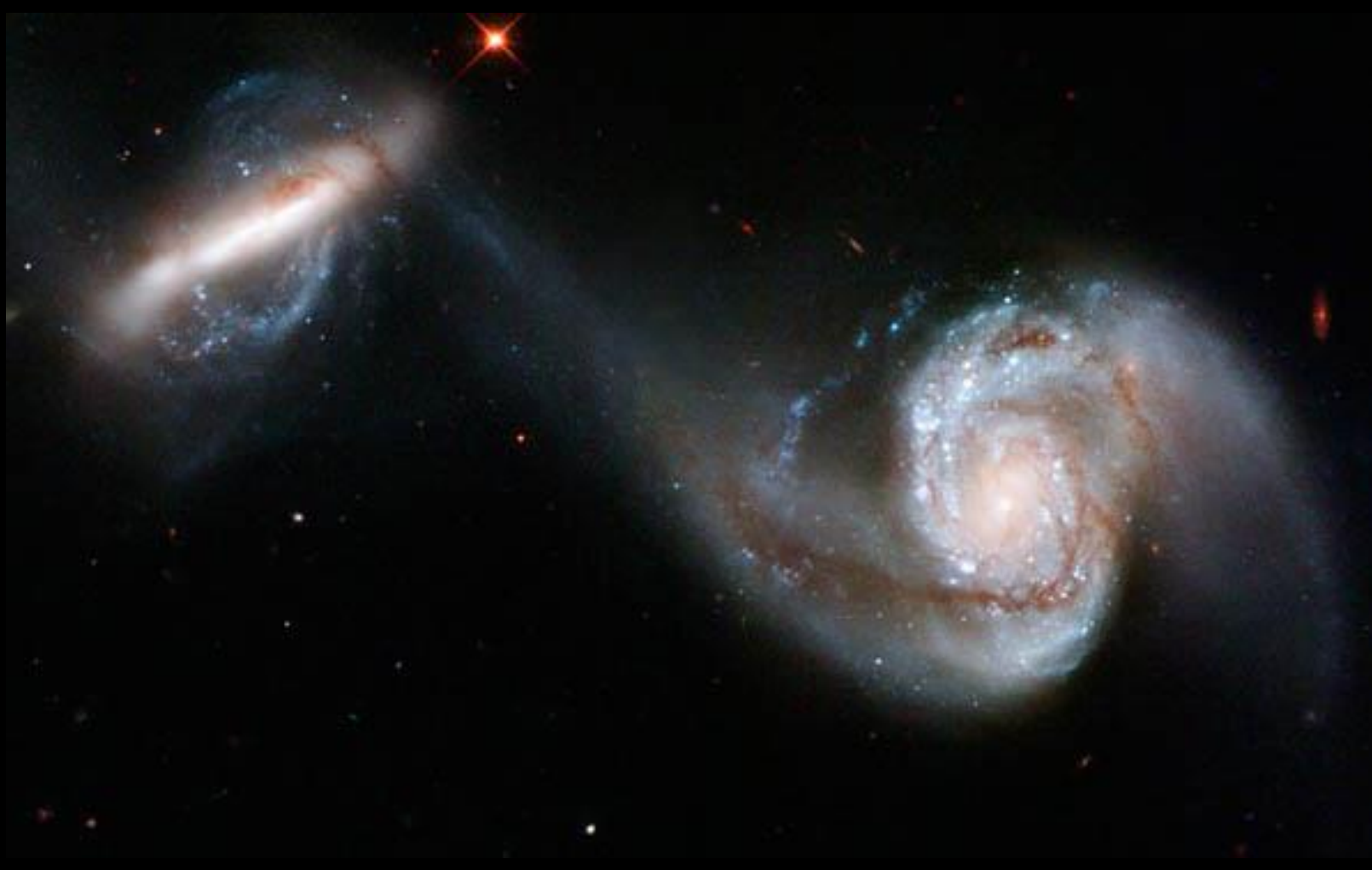


Nous sommes dans la Voie Lactée: où va-t-elle?

La Terre accompagne le Soleil dans sa course dans la Voie Lactée



Le Soleil → X




La galaxie Andromède se précipite vers nous à 1000 km/s

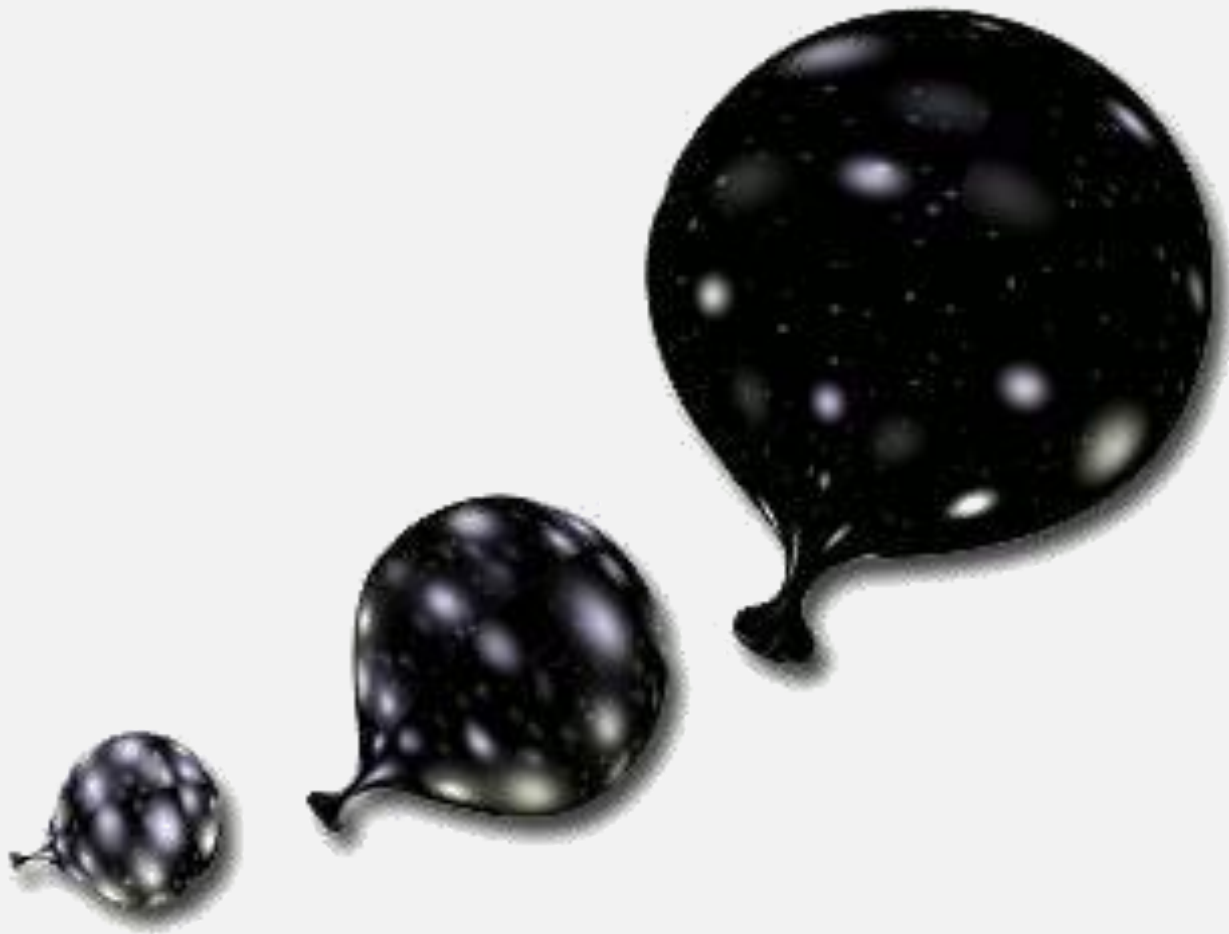
Le cataclysme est-il pour bientôt ?





A deep field image of the universe, showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, yellowish-white points of light, while others are more complex, showing spiral or elliptical structures in various colors like blue, orange, and red. The background is a deep black, punctuated by the light of distant stars and galaxies.

L'univers est-il éternel?
Pourquoi est-il en expansion?
Où nous mène cette expansion?



L'expansion s'accélère... alors?



- Fin de l'homme?
- Fin de la vie?
- Fin de la Terre?
- Fin de l'univers?



Une supercherie: les alignements Terre-Soleil-planètes ou bien Terre-Soleil-centre galactique

- Un non-sens
- Quasi-alignement annuel (quand le Soleil passe dans le plan galactique)
- Pas de véritable alignement car le centre galactique n'est pas dans l'écliptique!
- Et même s'il s'y trouvait ???
- Les alignements de planètes sont quasi-impossibles et sans effet sur la Terre

Des cycles?

- De tous temps les philosophes ont cherché des cycles dans la nature
- Périodicité des éclipses, configurations du ciel, tremblements de terre, catastrophes... → peut-on prévoir l'avenir?
- Quand une situation redeviendra comme dans le passé?
- **Jamais!**

Les menaces sur la Terre

la fin du monde pour quand?

- Les éruptions solaires: 10 ans
- Le changement climatique d'origine humaine: 100 ans
- La chute d'un petit corps (morceau de comète): 100 à 1000 ans
- La diminution du champ magnétique protecteur: 2000 ans
- La glaciation: 10 000 ans
- La chute d'un gros corps (comète, petit astéroïde): 100 000 ans
- La chute d'un très gros corps: 10 à 100 millions d'années
- L'explosion d'une supernova proche: plusieurs centaines de millions d'années
- L'augmentation de température due au Soleil: plusieurs centaines de millions d'années
- *Une collision entre planètes: plusieurs milliards d'années*
- *La mort du Soleil: plusieurs milliards d'années*
- *La fin de l'univers: des milliards de milliards d'années*

Finalemment...

- La Terre n'est pas éternelle mais son avenir proche dépend de nous
- Pas de cataclysme en vue...
- Le système solaire est très varié mais aucune autre planète ne peut nous accueillir
- L'au-delà du système solaire nous est totalement inaccessible, quel qu'il soit



En conclusion



Le ciel est plus une source de plaisir que de dangers!
Profitez-en!