

02- Le système solaire, un peu d’astrophysique

FormAction Changements climatiques

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

*Groupe de recherche en technologie de l’énergie et en efficacité énergétique (t3e) École de technologie supérieure* | *Université du Québec*

# Vrai ou faux

* Il fut un temps où l’atmosphère terrestre ne contenait pas d’oxygène.
* Il fut un temps où il y avait dans l’atmosphère plus de 250 fois la concentration actuelle en dioxyde de carbone (dit CO2).
* L’intensité du rayonnement solaire s’est accrue d’environ 30-40% au cours des 4,5Ga précédentes.

# Plan de la présentation

* + Introduction et objectifs
  + L’évolution du soleil
  + Les caractéristiques de l’orbite de la terre
  + Conclusion

Les séparateurs de section de cette capsule proviennent d’œuvres du Musée National des Beaux-Arts du Québec



Ces œuvres sont des extraits de peintures de Marc-Aurèle de Foy Suzor-Coté Elles sont rognées et adaptées en format 16:9

Marc-Aurèle de Foy Suzor-Coté, Jacques Cartier rencontre les Indiens à Stadaconé (1535), 1907, 1910-1913

**21 janvier 2025**

# Plan de la présentation

## *Introduction et objectifs*

* + L’évolution du soleil
  + Les caractéristiques de l’orbite de la terre
  + Conclusion

# Introduction

* + Il existe plusieurs causes qui induisent des variations climatiques terrestres depuis des milliards d’années.
  + Les présenter exhaustivement dans une seule présentation pourrait provoquer une certaine aversion!
  + Cette présentation aborde les causes qui sont assez loin de nous.
  + Elle introduit les effets climatiques du soleil, de l’orbite de la terre et de sa rotation sur elle-même.

# Objectifs

* Pouvoir expliquer sommairement l’évolution du Soleil et ses variations ainsi que les variations de l’orbite de la Terre.
* Préparer lentement les gens à situer les changements climatiques dans un vaste ensemble de causes.



Marc-Aurèle de Foy Suzor-Coté, Les fumées, port de Montréal, 1914

**21 janvier 2025**

# Plan de la présentation

* + Introduction et objectifs

## *L’évolution du soleil*

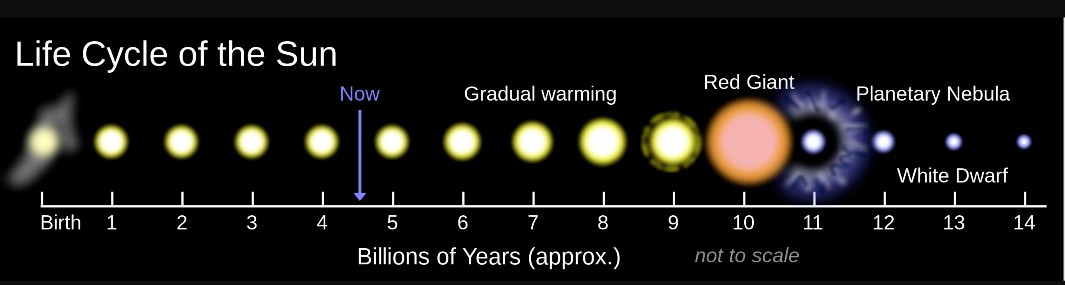
* + Les caractéristiques de l’orbite de la terre
  + Conclusion

# Question



L’évolution du soleil

* Évolution de notre soleil sur une période 14 Ga



# L’évolution du soleil

* Pourquoi brille-t-il?
* Le cœur a une température de plusieurs millions de K, ce qui est suffisamment chaud pour fusionner l'hydrogène.
* Les rayons gamma générés au cœur deviennent progressivement de la lumière visible en cheminant vers la surface (jusqu’à 100 000 ans).
* L’énergie chemine vers la surface par radiation, puis par convection, puis de nouveau par radiation en quittant la surface.

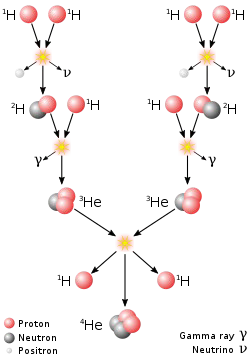
# L’évolution du soleil

**21 janvier 2025**

**13**

**FormAction Changements climatiques**

Le Soleil

* + Pourquoi brille-t-il?
    - Quatre noyaux d’hydrogène (1 proton) sont fusionnés en un seul noyau d’hélium (2 neutrons + 2 protons)
    - La masse de 4He est légèrement inférieure à celle des quatre 1H (0,7%)
    - Relation masse-énergie: E=mc2
    - 1g de matière contient l‘équivalent en énergie de

**15 000** barils de pétrole

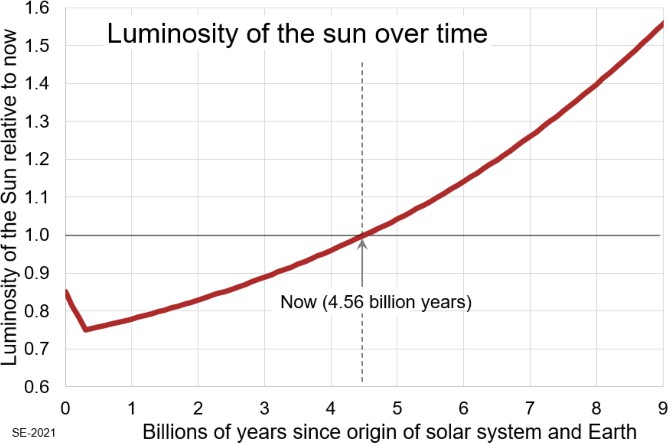
* + - 500 millions tonnes d’hydrogène par seconde
    - Il reste au Soleil pour environ 5 x 109 ans de combustible (5 milliards d’années).

# L’évolution du soleil

* Évolution de notre soleil sur une période 14 Ga
* Il y a 4,6 Ga, une masse de gaz s’est donc concentrée sous l’effet de la gravité (de l’hydrogène et quelques autres éléments).
* Lorsque la densité fut suffisante, les atomes de H2 furent forcés si densément, qu’ils ont fusionnés en He. A star was born!
* Cette fusion libère de l’énergie depuis lors…et il se réchauffe en raison de cette réaction.
* Plus d’He induit une plus grande densité ce qui contracte le cœur du soleil et rapproche davantage les atomes de H2. Une boucle positive.

# L’évolution du soleil

* Évolution de l’intensité du rayonnement solaire



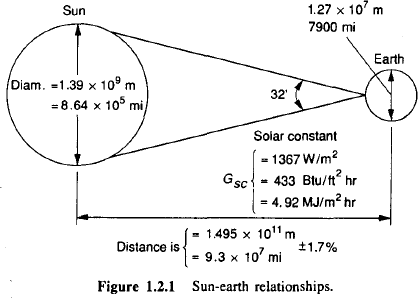
# L’évolution du soleil

* + Le soleil aujourd’hui:
    - Étoile au centre du système solaire
      * Diamètre: 1,391 x 106km = >100 x Terre
      * Centre: Densité ≅ 150 x eau, T > 106K
      * Moteur : Fusion de l'hydrogène
      * T surfacique : 5 777 (5 800) K
    - Composition
      * 73% d’Hydrogène / 25% d’Hélium / 2% Oxygène, Carbone, …
    - Distance
      * Distance : 1,5 x 1011 m

(notez que les proportions de sont pas respectées sur l’image ci-contre)

* + - * Variation de distance: ± 1,7 %
      * Temps: 8 min 20 sec (en moyenne)

# L’évolution du soleil

* + Constante solaire aujourd’hui – valeur moyenne sur une année

𝐺𝐺𝑆𝑆𝑆𝑆 1367 𝑊𝑊/𝑚𝑚2

(hors de l’atmosphère)

Cette valeur varie pendant l’année en raison de la forme elliptique de l’orbite

Réf : Duffie et Beckman, 2006

# L’évolution du soleil

* + Constante solaire aujourd’hui – valeur moyenne sur une année
    - La valeur de 1367 peut être sujette à discussion. On voit aujourd’hui dans la littérature qui varie autour de 1355 à 1370. En fait, peu importe, ça ne change rien à la physique du problème.
    - Depuis 1980, des satellites mesurent en permanence le flux radiant extraterrestre aussi appelé irradiance et exprimé en W/m2.
    - Pour les besoins de vous détendre un peu les esprits, je vous propose un calcul théorique de la constante solaire.

# L’évolution du soleil

* + Constante solaire aujourd’hui – valeur moyenne sur une année
    - Pour ce faire, il faut utiliser
      * La distance terre-soleil de Lts = 1,495 x 1011m (assez pour faire nos 10 000 pas par jour).
      * Le diamètre du soleil, une bagatelle de Ds = 1,39 x 109 m.
      * La température de surface du soleil soit T = 5770K
      * Et une loi que certain.e.s d’entre vous emploient dans des cours de physique (ou non) et qui porte le nom de deux jeux drilles: Ludwig Boltzmann (théoricien exemplaire) et Josef Stefan (expérimentaliste de renom)

𝐺𝐺𝑠𝑠 = 𝜎𝜎 𝑇𝑇4 𝑊𝑊/𝑚𝑚2

𝑠𝑠

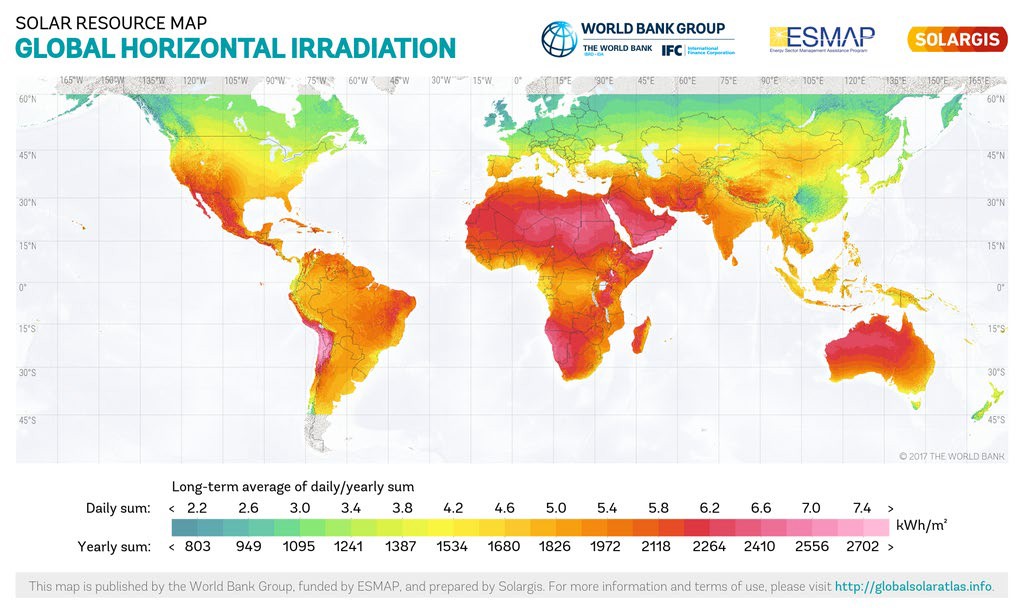
Où  = 5.67 x 10-8 /m2K4

# L’évolution du soleil

* + Constante solaire aujourd’hui – valeur moyenne sur une année
    - Joyeux drilles est peut-être exagéré



# L’évolution du soleil



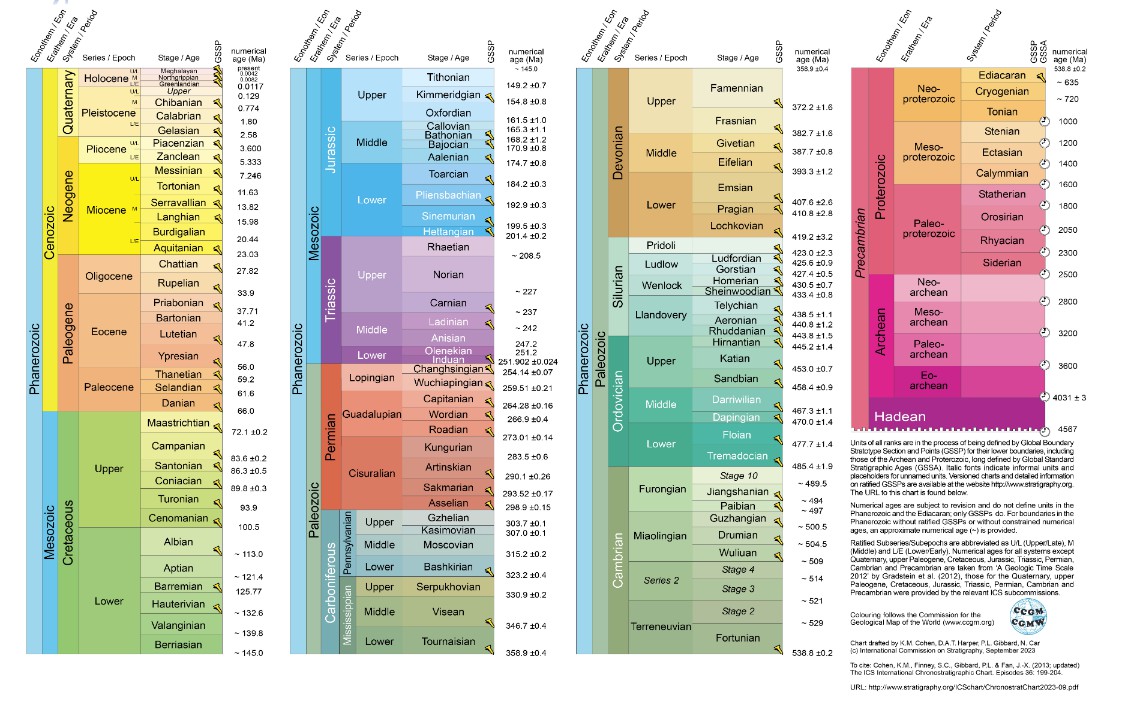
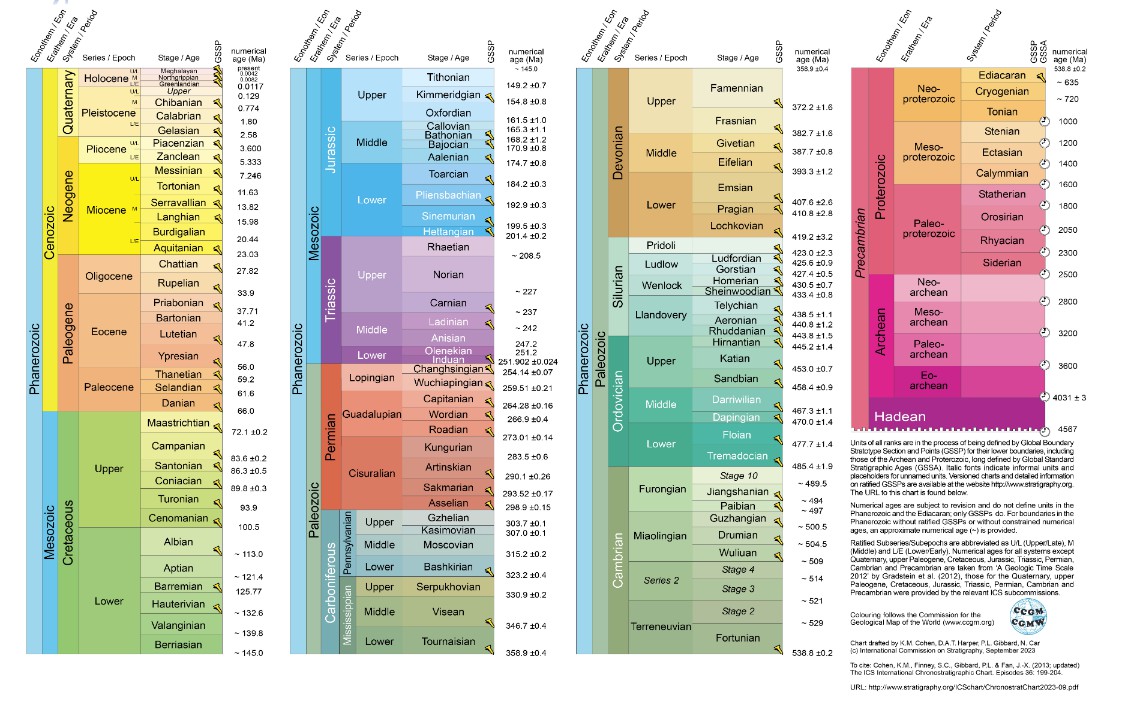
L’évolution du soleil

* + Questions
    - Quel est le rayonnement maximal théorique que peut recevoir une surface de 100 m2 (un pan de toiture d’un bungalow de quelque 17’ x 66’ exposé au sud, par exemple) en kW?
    - Quelle serait alors la puissance électrique maximale générée par des panneaux de cette taille (note: l’efficacité de conversion est de 20%)?
    - D’après la carte de distribution de l’irradiation horizontale globale, quelle serait (environ) la quantité d’énergie produite par un collecteur solaire constitué de panneaux horizontaux totalisant 100m2 au sud du Québec?
    - Que vaut cette électricité sur le marché québécois?

# L’évolution du soleil

* + Quelles influences ont cette évolution du soleil sur l’histoire de la Terre?
    - La Terre est passée par plusieurs éons (éonothèmes), ères (érathèmes), périodes ou systèmes, époques ou séries et âges ou étages.
    - La commission internationale de stratigraphie détermine les divers passages de l’un.e à l’autre par l’étude des couches sédimentaires.
    - Nous sommes présentement dans l’holocène. Mais, depuis 1784, sous l’impulsion de Paul Crutzen, prix Nobel de chimie, nous serions passé à l’époque Anthropocène, à suivre… pour le moment, regardons l’histoire de la Terre…sous l’évolution du Soleil.

Vous êtes ici



Snowball

Rodinia Pangée

Apparition de la vie sur terre

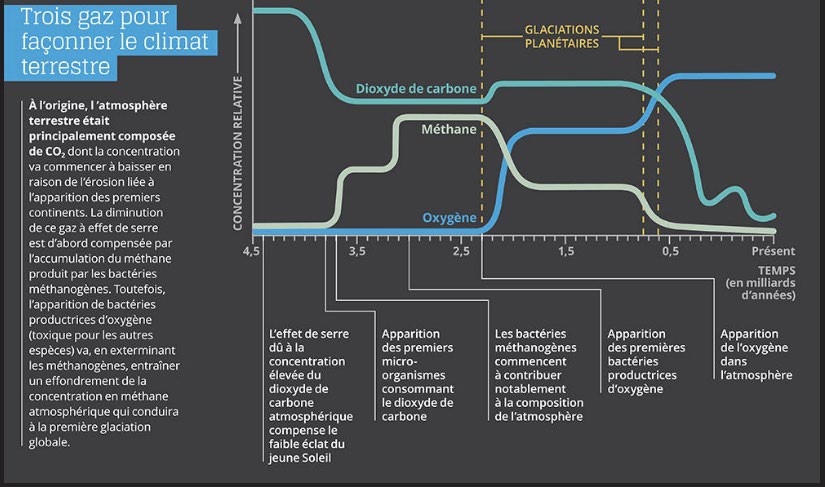
**21 ja 25**

**nvier 2025 FormAction Changements climatiques**

# L’évolution du soleil

* + Évolution de la vie sur terre
    - Il y environ 4 Ga, le soleil était environ 20% moins brillant, donc moins puissant.
    - Avec une atmosphère telle que la nôtre, la terre d’alors aurait été congelée en permanence. Pas d’eau liquide en surface.
    - L’atmosphère Archéenne était donc très différente de celle d’aujourd’hui, plus épaisse, plus dense, et riche en CO2!
    - Il y avait environ 10% de CO2 atmosphérique alors qu’aujourd’hui, ça vient de passer le cap de 0.04%! Donc, y a-t-il de quoi paniquer avec 400 ppm de CO2?

# L’évolution du soleil

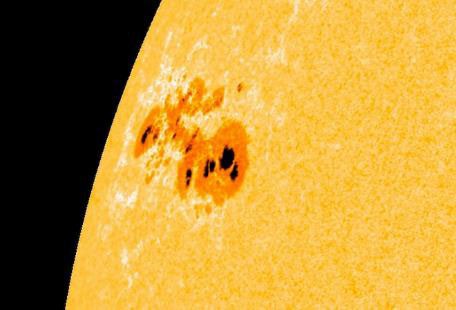
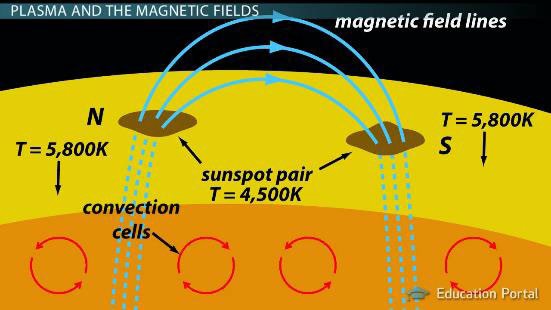
* + Évolution de la vie sur terre

# L’évolution du soleil

* + Les variations à court terme
    - Une baisse d’émission de soleil entraîne immédiatement une baisse de l’apport en énergie radiante.
    - Le soleil adolescent, était plus ou moins stable en termes d’émissions.
    - Mais, depuis quelques centaines de millions d’années, son activité moyenne est stable.
    - Son cycle principal varie aujourd’hui sur une période très courte de 11 ans!
    - Durant ce cycle, l’amplitude de la variation du rayonnement extraterrestre est de 1,5 W/m2 et celle de l’absorption par le sol de 0,25 W/m2.

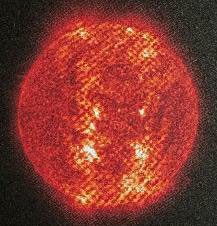
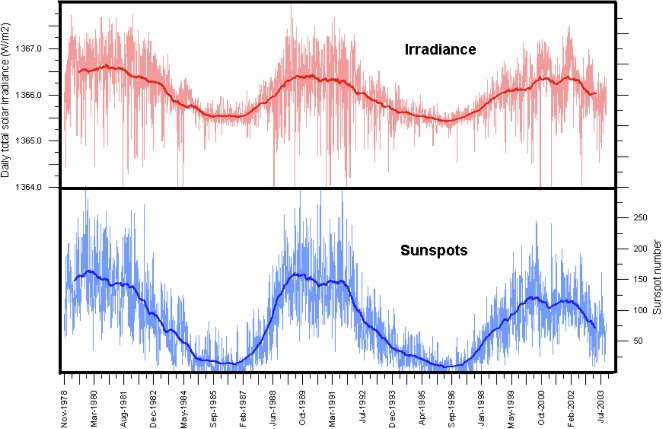
# L’évolution du soleil

* + Les variations à court terme
    - Les taches solaires sont causées par des perturbations du champ magnétique sur la surface du soleil.

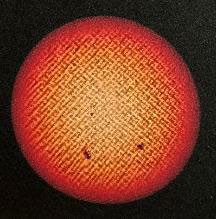


Study .com NASA Solar Dynamics Observatory

# L’évolution du soleil

* + Les variations à court terme

NASA https://spacemath.gsfc.nasa.gov/weekly/Earth8.pdf

Un forçage radiatif de 0,25 W/m2 induit un accroissement de T de 0,2oC, non significatif.

# L’évolution du soleil

* Que conclure?
* Le soleil achemine de nos jours en moyenne 1367 W/m2 d’énergie à la surface de l’atmosphère dans un plan perpendiculaire à sa direction (sur une sphère imaginaire qui recoupe l’orbite de la terre) .
* L’intensité du rayonnement solaire a augmenté de quelques 33% depuis sa formation il y a 4,6 Ga.
* Les variations sporadiques ou irruptions solaires n’ont pas d’effet significatif sur les variations de température en surface. De plus, leur effet est de très courte durée.
* La vie a commencé il y a environ 4 Ga dans une atmosphère sans oxygène.

# L’évolution du soleil

* Que conclure?
* La commission internationale de stratigraphie a déterminé différentes périodes de temps afin de décrire comment était déterminé le climat sur terre.
* Est-ce que ce qui découle de la lente évolution du soleil peut expliquer que la terre se soit réchauffée de 1oC entre 1920 et 2020? C’est une question à laquelle nous allons tenter de répondre dans le thème suivant.

# Question

* + Quel type d’activité pourrait-on réaliser en lien avec ce contenu?
    - Dans une classe de primaire
    - Dans une classe de secondaire
    - Au service de garde
  + Si vous avez une (des) suggestion(s) faites nous-en part! Nous sommes preneurs!



Marc-Aurèle de Foy Suzor-Coté, Après midi d’avril, 1920

**21 janvier 2025**

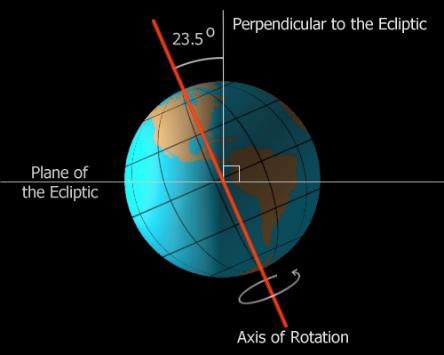
# Plan de la présentation

* + Introduction et objectifs
  + Qu’est-ce que le climat?
  + Similitudes et différences entre climat et météorologie
  + L’évolution du soleil

## *Les caractéristiques de l’orbite de la terre*

* + Les boucles de rétroaction
  + Conclusion

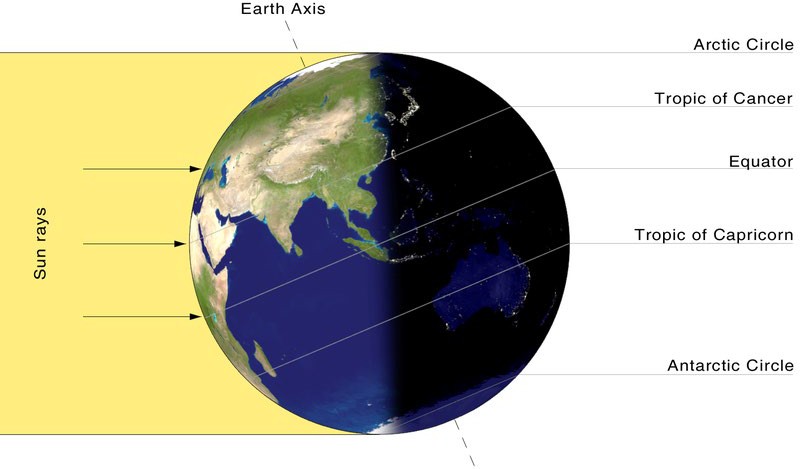
# L’orbite de la Terre

* Saviez vous que l’axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite (écliptique) autour du Soleil fait un angle, appelé obliquité, **qui n’est pas droit**?

Cette position est-elle représentative de l’hiver ou de l’été chez nous?

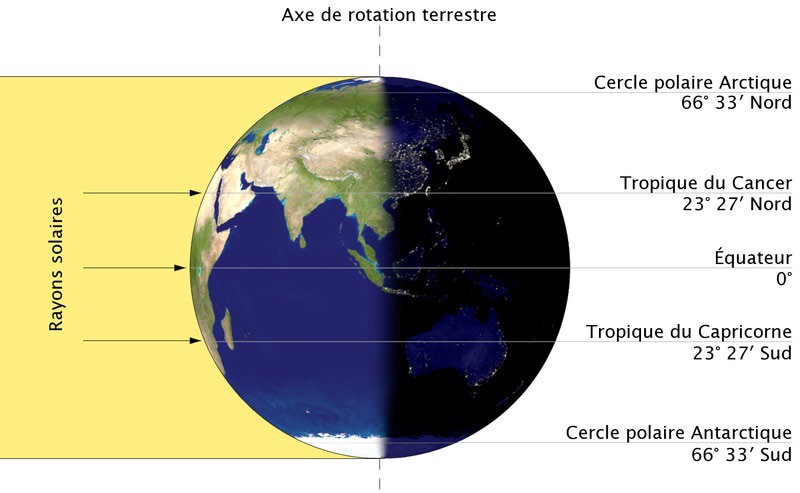
# L’orbite de la Terre

* + Solstice d’été (jour le plus long de l’année 20-22 juin) et δ =23,45°



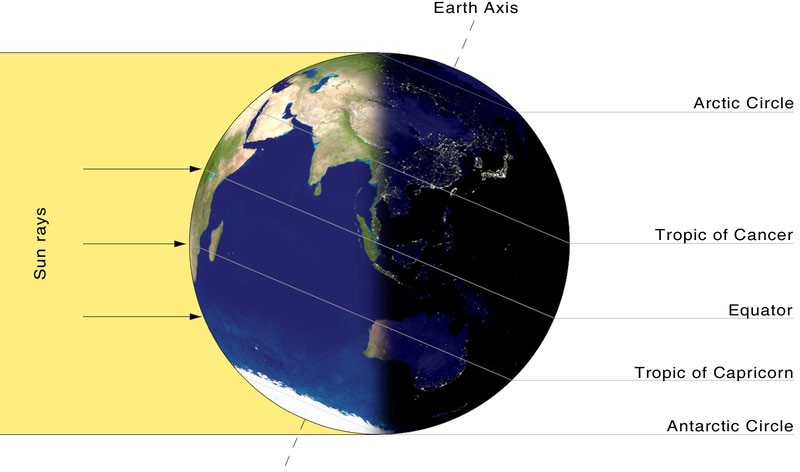
*δ*

# L’orbite de la Terre

* + Équinoxes de printemps 21 mars et d'automne 23 septembre (jour = nuit) et δ = 0°

# L’orbite de la Terre

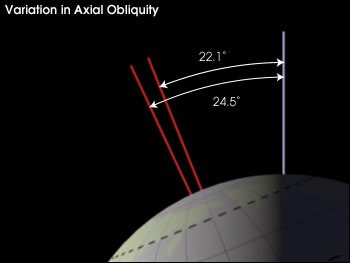
* + Solstice d’hiver (jour le plus court de l’année 20-22 décembre) et δ = −23,45°



*δ*

# L’orbite de la Terre

* Saviez vous que l’obliquité de l’axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil **n’est pas constante**?

La variation de l'inclinaison de l'axe de la Terre (obliquité) influe sur l'ampleur des changements saisonniers.

Lorsque l'inclinaison est élevée, les saisons sont plus extrêmes et lorsque l'inclinaison est faible, elles sont plus douces.

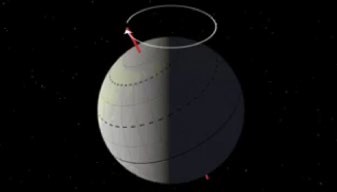
L'inclinaison axiale actuelle est de 23,5°. Image de Robert Simmon, NASA GSFC)

# L’orbite de la Terre

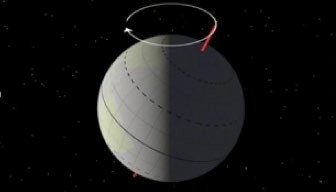
* Pourquoi lorsque l'inclinaison est élevée, les saisons sont-elles plus extrêmes et lorsque l'inclinaison est faible, sont-elles sont plus douces?
* Lorsque l’obliquité est élevée, le soleil apparait plus haut dans le ciel en été et la densité du rayonnement, W/m2, est **plus** élevée. Alors qu’en hiver, c’est l’inverse, le soleil apparait moins haut dans le ciel et la densité du rayonnement, W/m2, est **moins** élevée.
* Lorsque l’obliquité est plus faible, c’est l’inverse.
* Et fait, si l’angle était vertical 0o, il n’y aurait pas de saisons.

# L’orbite de la Terre

* Pourquoi lorsque l'inclinaison est élevée, les saisons sont-elles plus extrêmes et lorsque l'inclinaison est faible, sont-elles sont plus douces?



* Été, si on accentue l’obliquité, on diminue l’angle ci-contre.
* Hiver, si on accentue l’obliquité, on augmente l’angle ci-contre.



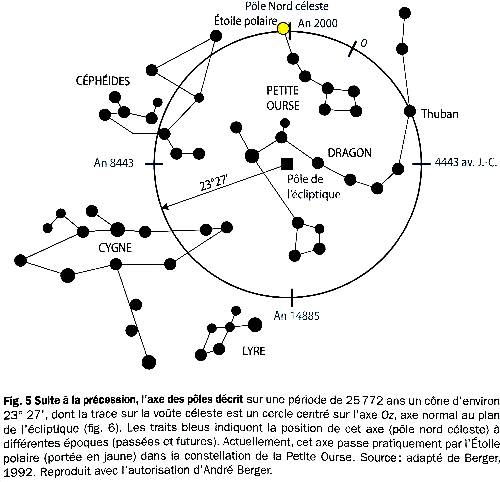
# L’orbite de la Terre

* Savez-vous ce qu’est la précession?

– Non seulement l’obliquité de l’axe de rotation la Terre varie avec le temps (un cycle dure 41 000 ans), mais il change de direction!



# L’orbite de la Terre

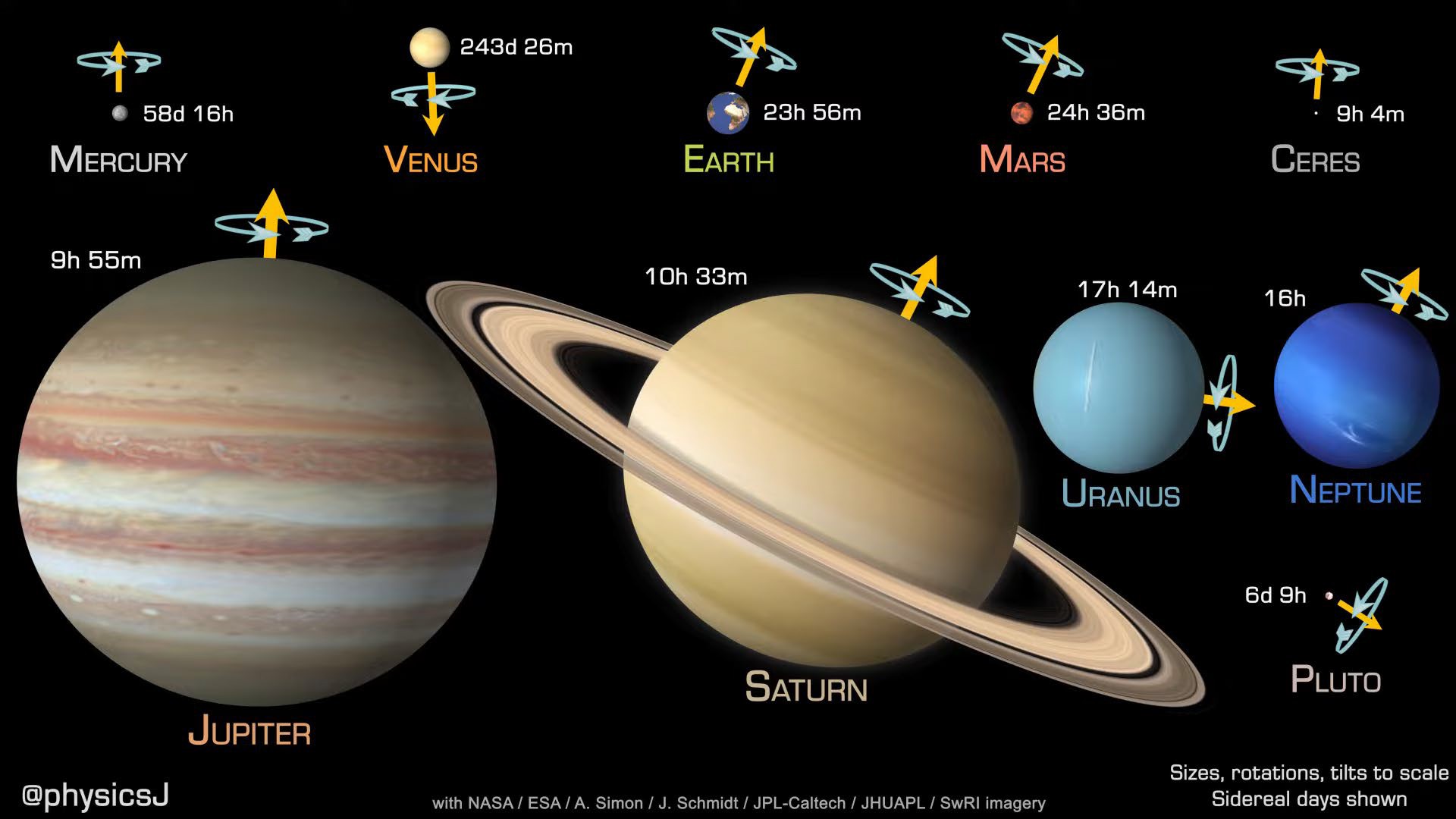
* Savez-vous ce qu’est la précession?

Marie Antoinette Mélières, Chloé Maréchal,

Climats : Passé, Présent, Futur, Belin, 2020

# L’orbite de la Terre

* Comment la Terre se compare-t-elle à ses sœurs solaires?

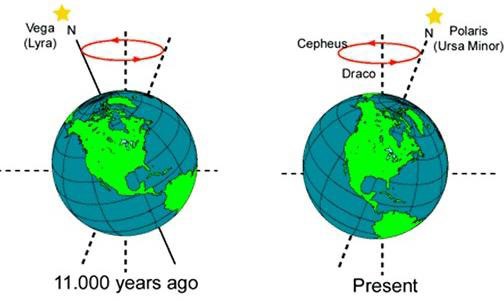


# L’orbite de la Terre

* Savez-vous ce qu’est la précession?

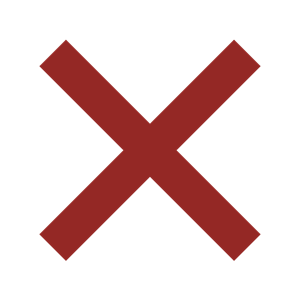
– Non seulement l’axe de rotation la Terre varie avec le temps (un cycle dure 41 000 ans), mais il change de direction sur un cycle de

19 000 à 24 000 ans environ!



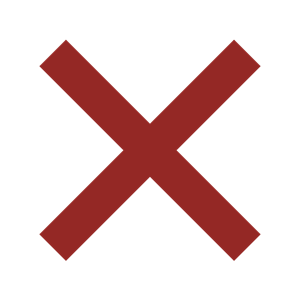
# Coche avec un remplissage uniL’orbite de la Terre

* L’orbite de la Terre autour du Soleil est-elle circulaire?



# L’orbite de la Terre

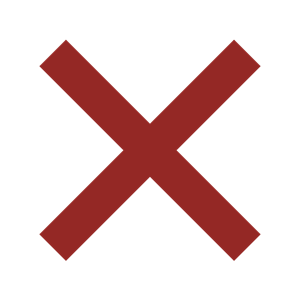
* Le Soleil est-il au centre de l’orbite elliptique?





# L’orbite de la Terre

* + La terre est-elle plus près du soleil en été ou en hiver au nord?





Été

Hiver



Hiver au nord

Été au sud

Été au nord

Hiver au Sud

# Fermer avec un remplissage uniL’orbite de la Terre

* + La terre est-elle plus près du soleil le 21 décembre?



21 septembre

21 décembre

*périhélie*

3 janvier

3 juillet

*aphélie*

21 juin

21 mars

*axe des équinoxes*

*axe des solstices*



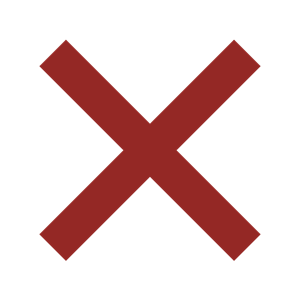
21 décembre

21 juin

# L’orbite de la Terre

* + La Terre évolue à vitesse constante autour du soleil?

Durée de 6 mois



Durée de 6 mois

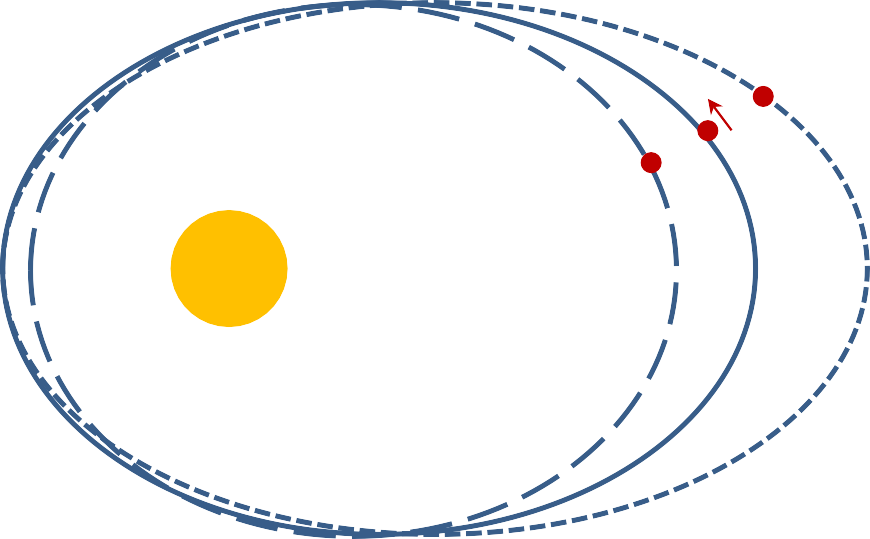
Deux distances égales entre les deux positions opposées = vitesse constante

*axe des équinoxes*

Deux distances inégales entre les deux positions opposées = vitesse plus élevée en hiver qu’en été au nord

# L’orbite de la Terre

* + L’ellipse que la Terre parcoure est-elle de forme constante?

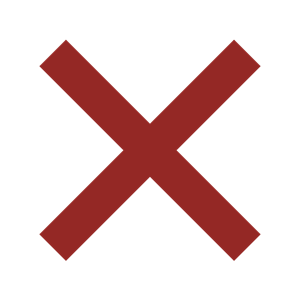
Orbite plus elliptique

Orbite moins elliptique

Les variations de produisent sur des périodes de 100 000 ans

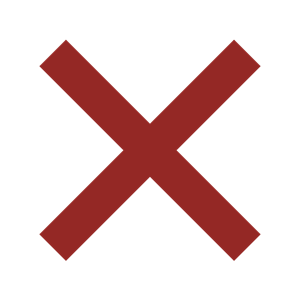
# L’orbite de la Terre

* L’orbite de la Terre autour du Soleil est-elle circulaire?



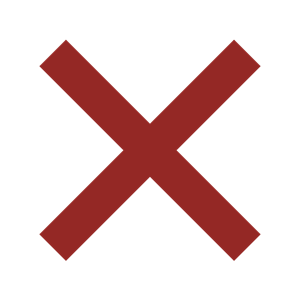
# L’orbite de la Terre

* Le Soleil est-il au centre de l’orbite elliptique?



# L’orbite de la Terre

* + La terre est-elle plus près du soleil en été ou en hiver au nord?





Été

Hiver



Hiver au nord

Été au sud

Été au nord

Hiver au Sud

# Fermer avec un remplissage uniL’orbite de la Terre



21 septembre

21 décembre

*périhélie*

3 janvier

3 juillet

*aphélie*

21 juin

21 mars

*axe des équinoxes*

*axe des solstices*



21 décembre

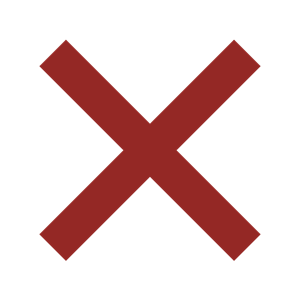
21 juin

* La terre est-elle plus près du soleil le 21 décembre?

L’orbite de la Terre

* + La Terre évolue-t-elle à vitesse constante autour du soleil?

Durée de 6 mois



Durée de 6 mois

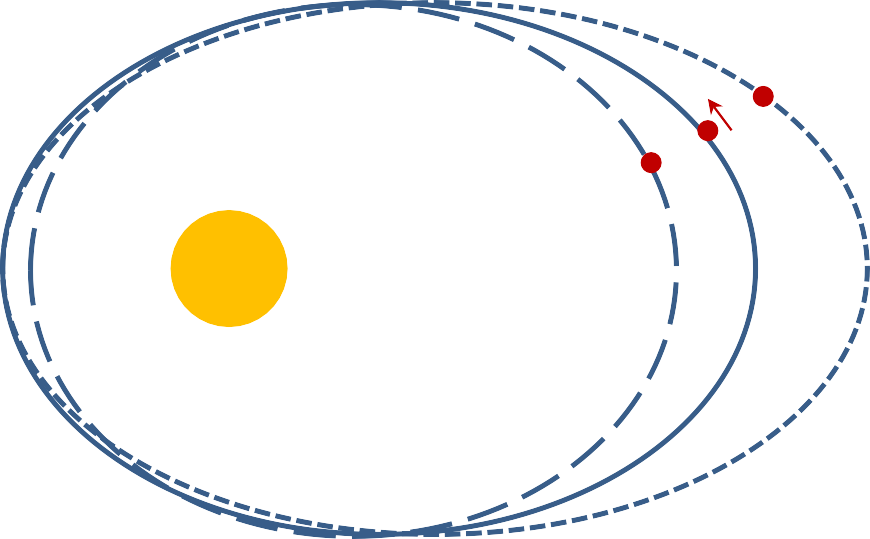
Deux distances égales entre les deux positions opposées = vitesse constante

*axe des équinoxes*

Deux distances inégales entre les deux positions opposées = vitesse plus élevée en hiver qu’en été au nord

# L’orbite de la Terre

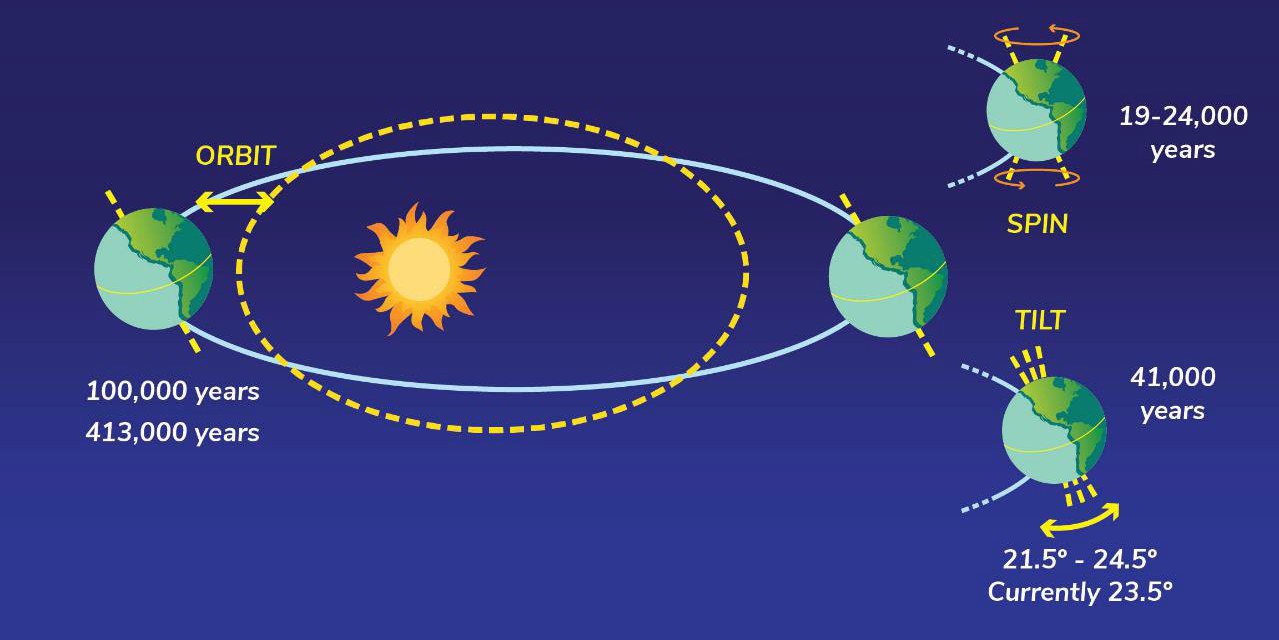
* + L’ellipse que la Terre parcoure est-elle de forme constante?



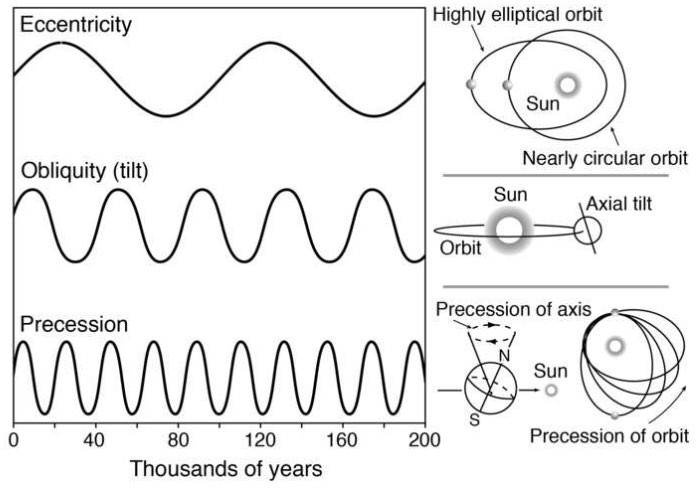
Orbite plus elliptique

Orbite moins elliptique

Les variations de produisent sur des périodes de 100 000 ans



# L’orbite de la terre

* Excentricité, obliquité et précession

100 000 – 400 000 ans

40 000 – 42 000 ans

19 000 – 24 000 ans

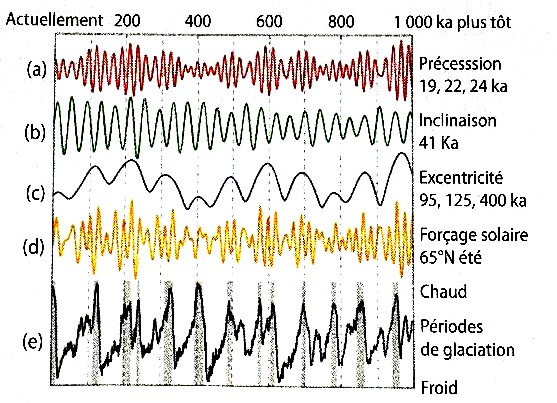
# L’orbite de la terre

* + Excentricité, obliquité et précession
    - L'axe de rotation de la terre se déplace tous les 27 000 ans. Ce phénomène est similaire aux girations de l'axe de rotation d'une toupie.
    - La précession entraîne un changement de la distance Terre-Soleil à une date donnée.
    - C’est la combinaison de plusieurs paramètres orbitaux différentes qui on mené aux deux dernières périodicités de 23 000 et 19 000 ans.
    - C’est une variation de variation de l’excentricité et de la précession qui a fait que la dernière précession a duré 19 000 ans et non davantage.

En bref, ces diverses influences extérieures se combinent pour influencer le climat global sur terre.

# L’orbite de la terre

* + Excentricité, obliquité et précession
    - Voici ce que l’avenir nous réserve!

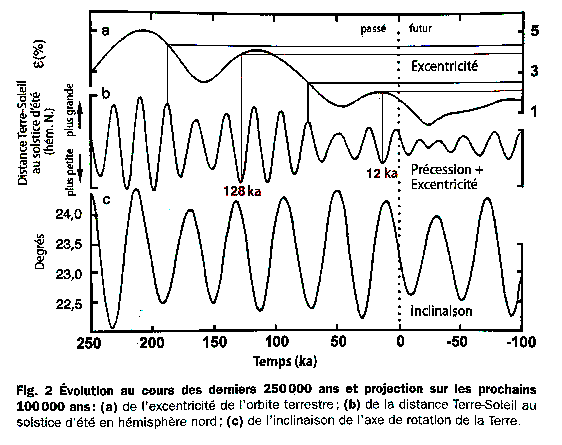


Variation des paramètres orbitaux au cours du dernier million d’années avec périodes principales.

Marie Antoinette Mélières, Chloé Maréchal,

Climats : Passé, Présent, Futur, Belin, 2020

# L’orbite de la terre

* + Excentricité, obliquité et précession
    - Voici ce que l’avenir nous réserve!

Marie Antoinette Mélières, Chloé Maréchal,

Climats : Passé, Présent, Futur, Belin, 2020

# L’orbite de la Terre

* + Que conclure?
    - L’obliquité de l’axe de rotation oscille entre 21,5o et 24,5o tous les 41 000 ans environ
    - La direction de l’axe de rotation pointe vers Vega (Lyre) et à son opposé vers l’étoile polaire (Grand Ourse) et complète un cycle de rotation tous les 19 000 à 24 000 ans.
    - La Terre orbite autour du Soleil sur une ellipse qui varie en taille tous les 100 000 à 400 000 ans, environ.
    - Est-ce que cet ensemble de phénomènes peut expliquer que la Terre se soit réchauffée de 1oC entre 1920 et 2020? C’est une question à laquelle nous allons tenter de répondre dans le thème suivant.

# Question

* + Quel type d’activité pourrait-on réaliser en lien avec ce contenu?
    - Dans une classe de primaire
    - Dans une classe de secondaire
    - Au service de garde
  + Si vous avez une (des) suggestion(s) faites nous-en part! Nous sommes preneurs!



Marc-Aurèle de Foy, Suzor-Coté, Scène d’automne, 1911

**21 janvier 2025**

# Plan de la présentation

* + Introduction et objectifs
  + L’évolution du soleil
  + Les caractéristiques de l’orbite de la terre
  + ***Conclusion***

# Conclusion

* Comprenez-vous pourquoi ce cours commence par vous parler du soleil ET de l’orbite de la terre?
* Pouvez-vous distinguer deux phénomènes solaires qui ont une incidence sur le climat?
* Quel type d’influence exerce le réchauffement du soleil sur le climat?
* Comment les éruptions solaires influencent le climat?
* Pouvez-vous nommer et explique le trois phénomènes qui ont trait à l’orbite de la terre qui influencent le climat?

# Conclusion

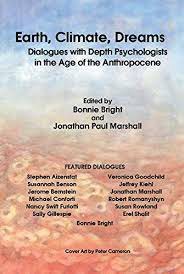
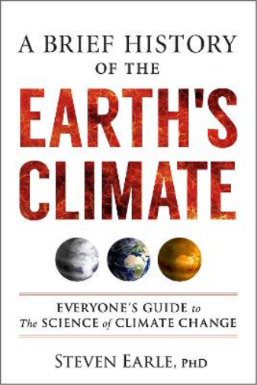
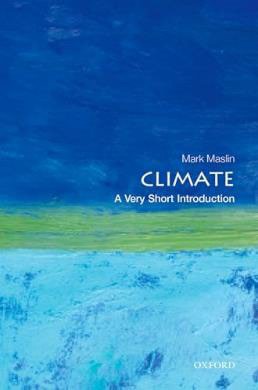
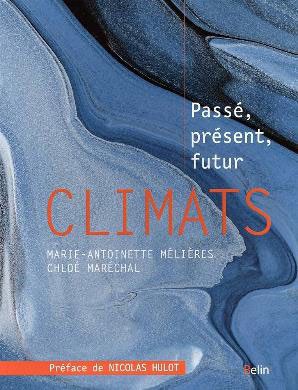
* Quand l’atmosphère terrestre à t’elle commencé a comporter une part d’oxygène?
* A quand remontent les cyanobactéries?
* Que sont la périhélie et l’aphélie?
* La vitesse de la terre sur son orbite (écliptique) est-elle constante? Si non, quand voyage-t-elle le plus vite?
* Quelle variation imputable à l’orientation et à la distance de la terre au soleil est la plus rapide? (Il faut exclure le temps requis pour parcourir l’orbite!)

# Conclusion

* + À un moment de l’année particulier, le rayonnement solaire reçu sur la couche extérieure à l’atmosphère est égal d’un jour à l’autre.
  + On a vu que la lente évolution d’un soleil de plus en plus stable et que ses sautes d’humeur provoquent de faibles variations.
  + On a aussi constaté que le fait d’avoir une terre inclinée par rapport au plan de son orbite, une variation de cette inclinaison et une variation de la direction de cet axe provoquent les saisons et bien d’autres phénomènes.
  + Dans le thème suivant, nous allons observer ce qui se passe sur le plancher des vaches, i.e. sur la terre elle-même.

# Références

* + Quelques références



# Climate — News Section | Common DreamsRéférences

**21 janvier 2025**

**FormAction Changements climatiques**

**72**

* + Quelques références

**Merci de votre attention !**

**FormAction Changements climatiques**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

**21 janvier 2025**

**FormAction Changements climatiques**

**74**

