

Réflexions sur la fin du monde qui aurait « du » se produire le 21 décembre 2012

Jérôme Perez

29 août 2015

Table des matières

1 Les problèmes calendaires	1
2 Les problèmes d'alignements cosmiques	3
2.1 Le trou noir galactique	3
2.2 Les résonances	4
3 Des problèmes avec le soleil ?	7
3.1 Pouvons-nous compter sur le soleil ?	7
3.2 Le scénario du film 2012	9
4 Impacts	10

La fin du monde aura lieu le 21 décembre 2012. Qui n'a pas entendu parler de ce genre de prophétie !

Les raisons qui poussent un certain nombre de personnes à s'intéresser à ces questions sont multiples et touchent généralement à la psychologie, voire même dans certains cas à la psychiatrie, mais les éléments invoqués pour mettre fin au monde sont souvent scientifiques. L'objectif de ce texte est d'y voir un peu plus clair à travers toutes ces prévisions ...

Dans le cas d'espèce du 21 décembre 2012, les évènements susceptibles d'être à l'origine de la fin du monde sont particuliers et regroupés en trois thèmes : les problèmes de calendriers (notamment celui des mayas), les alignements planétaires ou galactiques et un dérèglement du soleil. Nous proposons dans ce texte de passer en revue ces différents problèmes en rajoutant pour la fine bouche un véritable problème qui pourrait bien se produire un jour, aussi bien qu'il s'est déjà très souvent produit dans le passé, l'impact sur terre d'une météorite de bonne taille.

1 Les problèmes calendaires

Un calendrier est un système de repérage des dates en fonction du temps. Un tel système a été inventé par les hommes pour recenser de façon logique les jours successifs en correspondance avec les mouvements répétitifs observés du soleil et/ou de la lune (déplacement quotidien de l'ombre, retour des saisons, cycle lunaire qui servent de références pour organiser la vie agricole, sociale et religieuse des sociétés). Dans le référentiel terrestre la lune décrit une orbite approximativement képlérienne[†]

avec un grand axe moyen $a = 384\,399$ km et une excentricité $e = 0,05$. Cette orbite s'effectue dans un plan faisant un angle $i = 5,145^\circ$ avec l'écliptique[†]. La période de son mouvement est $T_L = 27\,j\,7\,h\,43\,mn$. C'est cette période qui est à l'origine du mois que nous utilisons dans nos calendriers issus des civilisations méditerranéennes, l'année étant simplement la mesure de la période du soleil dans ce même référentiel géocentrique. Il est à noter que ces différents mouvements ne sont képlériens qu'en première approximation. Les différentes perturbations conduisent à des variations de ces durées qui peuvent être périodiques et/ou séculaires.

Par exemple la dissipation d'énergie lors des déformations induites par les marées imposées par la lune sur la terre conduit à une diminution de la vitesse de rotation de la terre, donc à une augmentation de la durée du jour, et par conservation du moment cinétique à une augmentation de la distance terre-lune...

L'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de l'écliptique, d'environ 23° , donne lieu à de nombreux phénomènes astronomiques et climatiques. Elle est par exemple à l'origine de l'existence de deux cercles sur la terre correspondant à la présence du soleil au zénith à midi le jour du solstice : Il s'agit du tropique du cancer dans l'hémisphère nord, et du tropique du capricorne dans l'hémisphère sud sur lesquels le soleil est respectivement au zénith à midi aux alentours du 21 juin et du 21 décembre. A l'extérieur de la bande des tropiques le soleil ne passe jamais au zénith, alors qu'à l'intérieur de cette bande il y passe deux fois.

Cette position particulière du soleil au zénith est utilisée dans les calendriers de nombreuses civilisations pour lesquelles le soleil représentait une divinité toute particulière et atteignait ainsi une hauteur maximale. Dans l'une des capitales de la civilisation Maya, Xukpi, située actuellement aux alentours de Copan dans la république de Honduras, le passage au zénith du soleil a lieu chaque année le 30 avril et le 13 août de notre calendrier. La période de 105 jours située entre ces deux dates correspond à la saison des pluies dans cette région du globe, elle correspondait à la période de plantation et de croissance des semences pour cette civilisation agricole. La période complémentaire sur l'année, composée de 260 jours correspondait aux périodes de récoltes et de fêtes religieuses. Les mayas ont donc construit un système de calendrier permettant de repérer chacun des jours de cette période, le Tzolkin ou cycle court. Le nombre 260 se décompose en $260 = 2^2 \times 5 \times 13$, ainsi les mayas repèrent chaque jour du Tzolkin par un couple d'entiers (n, p) le premier étant défini modulo 13 et le second modulo 20. En incrémentant chaque nouveau jour chacun de ces deux nombres, le début des festivités était le jour $(0, 0)$ premier passage au zénith, suivit du $(1, 1)$ et ainsi de suite. Les mayas retournaient au travail lors du passage au zénith suivant, le lendemain du $(12, 19)\dots$ Ils travaillaient alors jusqu'au prochain retour au zénith du soleil, pour lequel un nouveau Tzolkin était initialisé... Munis de ces deux nombres (20 et 13), les mayas ont construit un cycle long leur permettant de repérer les dates au-delà du Tzolkin et sur des échelles de temps plus grandes. Un mois maya (uinal) est composé de 20 jours (kin). L'année ne peut pas être décomposée en 13 ou 20, les mayas ont donc défini l'année (tun) comme un assemblage de 18 uinal, auxquels il fallait rajouter 5 kin, dits épagomènes et considérés comme néfastes par les mayas. Le katun représente 20 tun, le baktun 20 katun et le compte long, appelé aussi soleil par les mayas est une période de 13 baktun qui représente donc 144 000 jours. Une date du compte long maya est ainsi composée de 5 nombres entiers $(a[13], b[20], c[20], d[18], e[20])$.

La correspondance entre le compte long des mayas et le calendrier d'autres civilisations précolombiennes est attestée par de nombreux documents. Le calage avec notre calendrier grégorien[†] ou julien est plus controversé et ne repose que sur des interprétations. L'une d'elles fait correspondre la date $(9, 12, 11, 5, 18)$ du compte long maya au mercredi 29 août 683 du calendrier grégorien. Il n'est alors plus très difficile de calculer que, selon ce calage, le lendemain du 20 décembre 2012 sera le début d'un nouveau soleil dans le calendrier maya. C'est pour cela que certains esprits fragiles pensent que ce sera la fin du monde !

2 Les problèmes d'alignements cosmiques

Le mouvement des planètes autour du soleil est approximativement circulaire et plan à l'échelle du système solaire. Ces orbites sont donc caractérisées par leur demi-grand axe a et période T , elles mêmes reliées par la loi de Kepler.

	mercure	vénus	terre	mars	jupiter	saturne	uranus	neptune
T [j]	88,96	223,14	365,25	684,5	4331	10762	30680	60200
a [ua]	0,39	0,72	1	1,52	5,2	9,54	19,18	30,05

Comme on peut le voir sur les données de la table ci-dessus, un alignement parfait des 8 planètes est quasiment impossible, un alignement assez fin se produit tous les 63 000 ans et un alignement approximatif tous 82 ans ! Contrairement à ce que l'on peut parfois lire, les planètes ne seront d'ailleurs pas alignées en 2012... Le soleil, comme beaucoup d'étoiles de notre galaxie est en orbite quasi-circulaire autour du centre galactique. Le rayon caractéristique de cette orbite (25 000 années-lumière), sa vitesse tangentielle (de l'ordre de 220 km.s⁻¹) et la distance caractéristique entre deux étoiles (de l'ordre de l'année lumière au sein d'une galaxie comme la ntre) assurent, à l'échelle d'une civilisation humaine, une grande stabilité à notre ciel nocturne rempli des étoiles de notre galaxie. L'un des arguments des tenants de la fin du monde prochaine est le fait qu'aux environs du 20 décembre 2012, la terre, le soleil et le centre de notre galaxie seront approximativement alignés. Le plus étonnant est que cette dernière affirmation est vraie ! Aux alentours de midi dans le courant du mois de décembre prochain, le soleil viendra effectivement culminer dans la constellation du Sagittaire, non loin du centre de notre galaxie lorsqu'on l'observe depuis la terre. Ce qui est plus rassurant est le fait que cette situation se produit tous les 6 mois depuis plusieurs milliers voire millions d'années... Oublions néanmoins ce détail, et étudions ce qu'il peut se passer lors de l'alignement d'objets en interaction gravitationnelle.

2.1 Le trou noir galactique

Depuis longtemps les astronomes suspectaient que le centre des galaxies abritait un bien étrange objet. Un travail en collaboration de plusieurs équipes européennes s'étalant sur plus de 10 ans a fini par lever un coin du voile au début des années 2000. Au centre, les étoiles sont plus rapides que partout ailleurs dans la galaxie. En faisant tous les mois pendant 10 ans des photos à très grande résolution de la région centrale de notre galaxie, ces astronomes ont pu surprendre une étoile (S2) accomplissant une orbite complète de type képlerien autour d'un point invisible nommé Sgr A*.

La période de S2, $T_{S2} = 15,2$ ans, et son demi-grand axe $a_{S2} = 132,3$ heures-lumière permettent de calculer la masse m_\bullet de Sgr A*, sachant que $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$ l'application numérique donne pour m_\bullet une masse de plus de 3 millions de masses solaires ! Cela faisait plus d'un quart de siècle que l'on soupçonnait le centre des galaxies d'abriter de tels objets connus sous le nom de trous noirs supermassifs. En effet, depuis l'avènement de la radioastronomie dans les années 1960 on avait observé de puissants jets très collimatés émanant de la région centrale de nombreuses galaxies. L'un des exemples les plus impressionnantes de ce genre de phénomène est observable par exemple pour le quasar[†] 3C175 où le jet s'étend bien au-delà du point central caractérisant la galaxie !

Ces jets semblent présents dans de nombreuses galaxies. L'explication de ce phénomène est assez complexe et repose sur la formation d'un disque d'accrétion[†] de matière autour du trou noir supermassif présent au centre des galaxies. Une partie de la matière formidablement accélérée au voisinage du centre parvient à s'échapper sous forme d'un jet polaire selon un axe orthogonal au plan du disque d'accrétion.

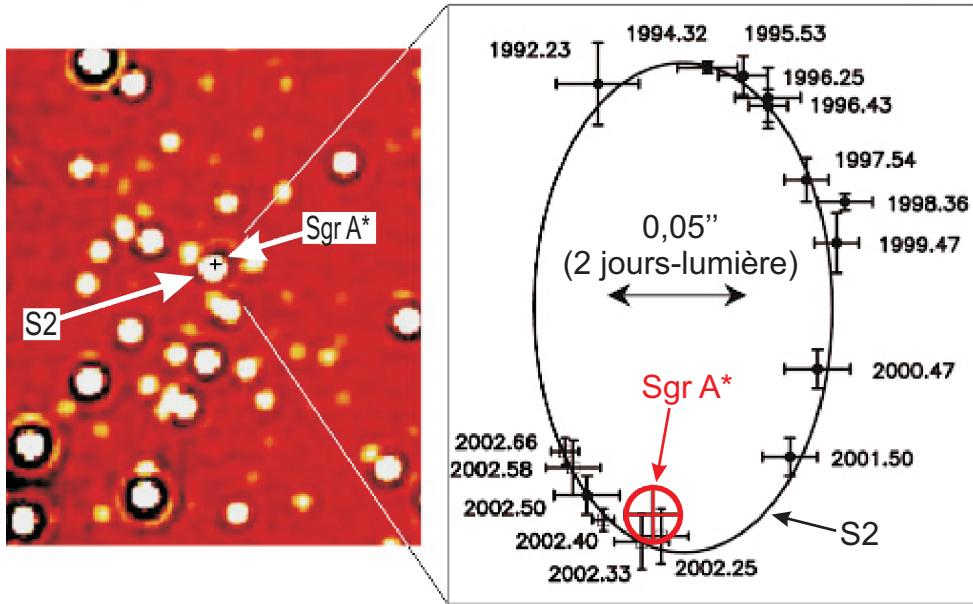


FIGURE 1 – Vue du centre galactique et détail de l'orbite de *S2*

Comment un « alignement galactique » pourrait-il provoquer la fin du monde ?

Une explication possible est la suivante : si la terre, le soleil et le centre de la galaxie sont alignés, il est possible que le jet galactique soit aussi dans cette direction. Mais si ce genre d'argument peut impressionner des esprits fragiles découvrant des photos de jets galactiques et des illustrations de trous noirs, il ne tient pas longtemps contre un peu d'esprit critique. Mis à part le caractère périodique de l'alignement, il faut noter que soleil fait un tour autour du centre galactique en un peu plus de 200 millions d'année, la lenteur de ce déplacement est donc incompatible avec un événement se déroulant sur des échelles de temps humaines. Enfin, notre galaxie ne possède malheureusement (ou heureusement...) pas de jet car il n'y a pas suffisamment de matière autour de notre trou noir supermassif pour former un disque d'accrétion... Nous ne risquons donc rien de ce côté !

2.2 Les résonances

Le problème képlerien à deux corps *A* et *B* de masses m_A et m_B est comme nous l'avons dit plus haut une approximation de la réalité dans laquelle se trouvent toutes les planètes du système solaire. Dans le référentiel centré sur *A*, les équations du mouvement s'écrivent

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\mu \frac{\vec{r}}{| \vec{r} |^3} \quad \text{avec} \quad \vec{r} = \overrightarrow{AB} \quad \text{et} \quad \mu = G(m_A + m_B)$$

Il est bien connu que dans le cas d'un mouvement lié (c'est-à-dire d'énergie totale négative), la trajectoire de *B* est une ellipse de demi grand axe a et d'excentricité e , contenue dans un plan P_e . Ce plan est incliné d'un angle i par rapport à un plan P_r de référence contenant *A*. L'intersection de P_e et P_r constitue la ligne des noeuds. L'angle entre la droite de référence Ax (direction du point vernal) et la ligne des noeuds constitue l'argument Ω de la ligne des noeuds. Le périastre de l'orbite est le point *P* de l'ellipse qui minimise la distance AB . L'angle entre la ligne des noeuds et la droite AP est la longitude ω du périhélie. On repère le point *B* sur l'ellipse en indiquant l'angle $f = (\widehat{AP}, \widehat{AB})$ appelé anomalie excentrique en astronomie. Un dernier paramètre de ce problème est l'instant τ du dernier passage au périastre dans un calendrier quelconque. Dans la pratique, on peut aussi utiliser

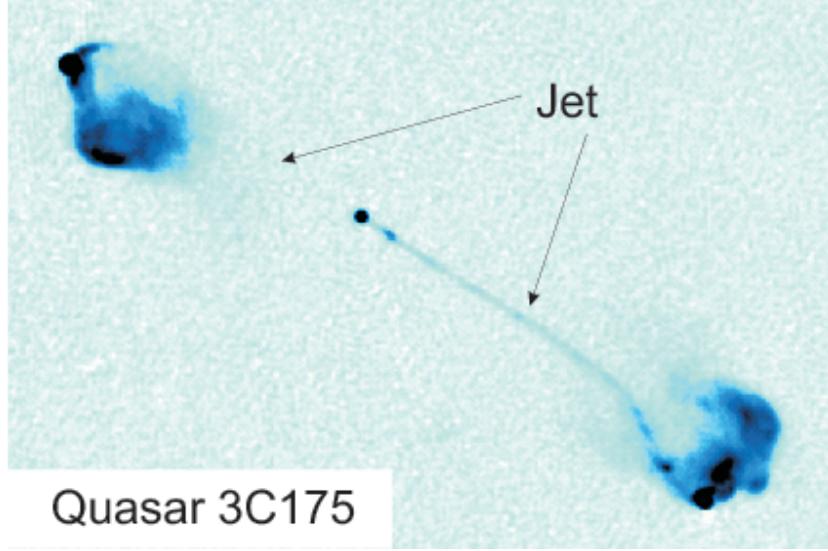


FIGURE 2 – Le quasar 3C175 et son jet, l'image est dans le domaine des ondes radio

l'anomalie moyenne $M = n(t - \tau)$, où $n = 2\pi/T$ est le moyen mouvement, T la période et t l'instant considér. Les 6 constantes $(a, e, i, \Omega, \omega, \tau)$ constituent les éléments elliptiques du problème à deux corps céleste.

Considérons un problème à 2 corps dont la solution non perturbée dépend des paramètres elliptiques $C = (\vec{u}, \vec{v})$ avec $\vec{u} = (a, e, i)$ et $\vec{v} = (\Omega, \omega, M)$. Supposons que ce problème est perturbé par un troisième corps en orbite céleste elliptique de paramètres $C' = (\vec{u}', \vec{v}')$ autour du centre de masse des deux premiers corps. La perturbation associée à ce troisième corps introduit un terme supplémentaire dans les équations du mouvement qui deviennent

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\mu \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3} + \text{grad}(R)$$

On suppose finalement que la fonction perturbatrice R ne dépend ni de \vec{u} ni de \vec{u}' et que l'on peut l'écrire

$$R = R(\vec{v}, \vec{v}') = \text{Re} \left(\sum_{\vec{k}, \vec{k}' \in \mathbb{Z}} A_{\vec{k}, \vec{k}'} \exp[j\vec{k} \cdot \vec{v} + j\vec{k}' \cdot \vec{v}'] \right) \quad \text{avec } j^2 = -1$$

où $\vec{k} = (k_1, k_2, k_3)$ et $\vec{k}' = (k'_1, k'_2, k'_3)$ sont des triplets d'entiers, le terme $A_{\vec{k}, \vec{k}'}$ est une sorte de coefficient de Fourier de la décomposition de R . À la fin du XVIII^e siècle, le génial Lagrange montra qu'alors les paramètres elliptiques C du problème non perturbé devenaient des fonctions du temps si R était suffisamment petit devant le potentiel gravitationnel des deux corps principaux. Dans cette théorie, le demi grand axe du mouvement perturbé vérifie l'équation différentielle (dite planétaire)

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2}{n^2 a} \frac{\partial R}{\partial \tau} = \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M}$$

un simple calcul montre alors que

$$\frac{\partial R}{\partial M} = \text{Re} \left(\sum_{\vec{k}, \vec{k}' \in \mathbb{Z}} jk_3 A_{\vec{k}, \vec{k}'} \exp[j\vec{k} \cdot \vec{v} + j\vec{k}' \cdot \vec{v}'] \right)$$

On suppose que les seules variables temporelles sont $a(t)$, $M(t) = n(t - \tau)$ et $M'(t) = n'(t - \tau')$, les moyens mouvements tant supposse constants. L'équation planétaire peut dans ces conditions être intégrée et l'on trouve

$$\frac{a^2}{2} + cste = \frac{2}{n} \operatorname{Re} \left(\sum_{\vec{k}, \vec{k}' \in Z} \frac{k_3 A_{\vec{k}, \vec{k}'}}{k_3 n + k'_3 n'} \exp [j \vec{k} \cdot \vec{v} + j \vec{k}' \cdot \vec{v}'] \right)$$

Cette équation montre bien que si $k_3 n + k'_3 n' \simeq 0$ la composante de Fourier correspondante de a diverge... C'est la résonance de moyen mouvement ou de demi grand axe. Les exemples du travail de sape réalisé par ce mécanisme sont légions dans les cieux. On citera par exemple la division de Cassini dans les anneaux de saturne provoquée par le satellite mimas (figure 3), ou bien les lacunes de Kirkwood (figure 4) dans la distribution des corps au sein de la ceinture d'astéroïdes, provoquée quant elle par jupiter.

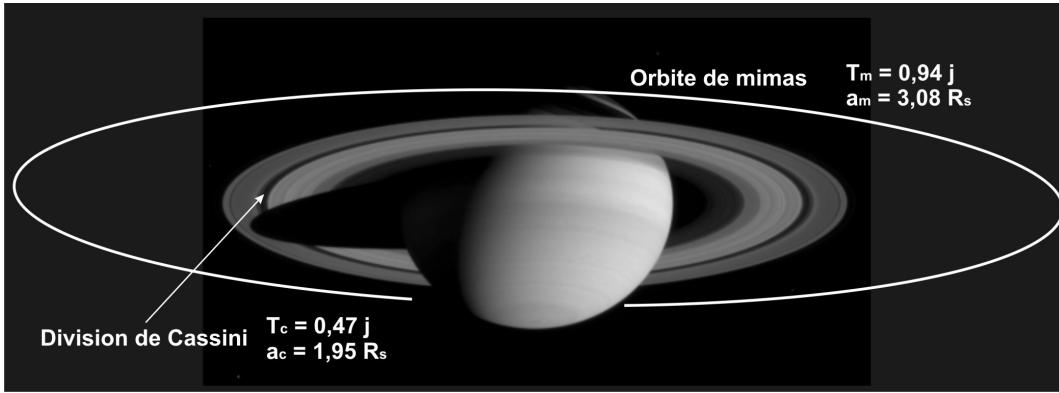


FIGURE 3 – La division de Cassini dans les anneaux de saturne et l'orbite de mimas

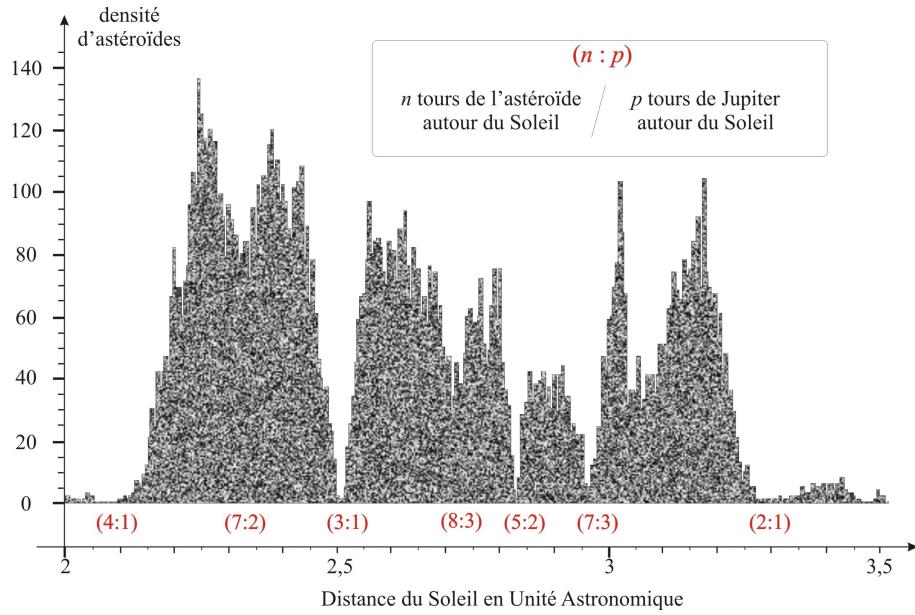


FIGURE 4 – Les lacunes de Kirkwood dans la distribution des astéroïdes situés entre mars et jupiter

On comprend bien que ces exemples de rsonances se produisent lorsque les alignements parfaits 3 corps sont trop frquents (periodiques), et que le troisième corps est de masse petite devant les

deux autres. L'effet de cette résonance n'est cependant pas dramatique et contribue à vider l'orbite potentiellement occupée par le corps de faible masse. On ne voit donc pas bien comment un alignement planétaire pourrait provoquer la fin du monde !

3 Des problèmes avec le soleil ?

3.1 Pouvons-nous compter sur le soleil ?

En physique comme ailleurs la pression P est une grandeur qui représente une force F exercée sur une surface S , soit $P = F/S$. Dans le cas d'une étoile sphérique et de la force de gravitation de Newton, on peut tenter d'écrire une pression gravitationnelle sous la forme

$$P_g = -\frac{GM^2}{R^2}/4\pi R^2 = -\frac{GM^2}{4\pi R^4} \quad (1)$$

où M et R représentent respectivement la masse et le rayon de l'étoile considérée. Pour s'opposer à cette pression, on peut faire appel à une pression d'origine cinétique ou thermique due à l'agitation des particules qui constituent l'étoile. En assimilant cette dernière à un gaz parfait formé de N particules occupant un volume V à la température T , on a la relation bien connue

$$PV = NkT \quad (2)$$

ou k est la constante de Boltzmann. Si l'étoile est sphérique et principalement constituée d'hydrogène, si m_p représente la masse du proton (en négligeant la masse de l'électron) on a $N = M/m_p$ et $V = 4\pi R^3/3$. Ainsi

$$P_t = \frac{3MkT}{4\pi R^3 m_p} \quad (3)$$

L'équilibre entre ces deux pressions antagonistes permet d'obtenir la température en fonction de la masse et du rayon de l'étoile considérée

$$T = \frac{1}{3} \frac{GMm_p}{k R} \quad (4)$$

pour le soleil, on trouve une température de l'ordre de quelques millions de kelvins. C'est bien l'ordre de grandeur de la température centrale du soleil. Une autre pression peut aussi jouer son rôle, il s'agit de la pression de radiation donnée par la formule de Stefan-Boltzmann

$$P_r = \sigma T^4 \quad \text{avec } \sigma = \frac{\pi^2 k^4}{45 \hbar c^3} \quad (5)$$

Elle n'intervient globalement que pour 1% de la pression totale, mais elle demeure fondamentale dans les régions centrales où la température est la plus élevée. De plusieurs millions de Kelvins au centre, la température du soleil décroît jusqu'à 5700 Kelvins en surface. Cette température centrale et le confinement gravitationnel sont suffisants pour déclencher des réactions de fusion thermonucléaire, c'est le cycle pp.

Dans cette réaction en chaîne, deux noyaux d'hydrogène ionisé (protons) fusionnent en 3 étapes indiquées sur la figure ci-dessus pour former un atome d'hélium. Les photons de très haute énergie, produits de cette réaction, sont à l'origine du rayonnement solaire¹. Une fois tout l'hydrogène consommé

1. Les divers processus de transport à travers le Soleil permettent de calculer que les photons gamma créés au centre du soleil, mettent environ un million d'années pour atteindre la surface au niveau de laquelle ils sont émis sous la forme d'un rayonnement de corps noir à 5700 Kelvins.

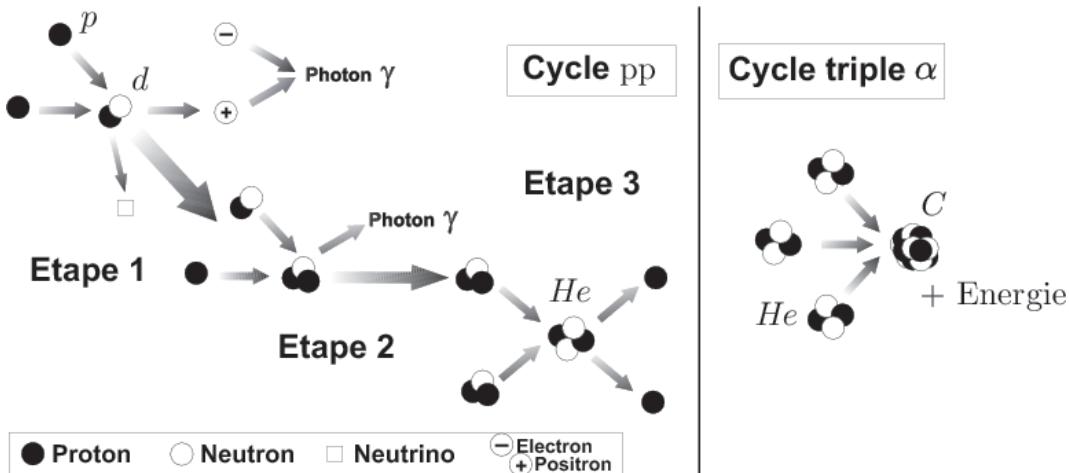


FIGURE 5 – Cycles pp et triple α

le cycle pp s'arrête. On dit que l'étoile quitte la séquence principale. La pression de radiation associée aux photons ne permet plus d'assurer la stabilité du cœur de l'étoile : plus rien ne s'oppose à la pression gravitationnelle qui fait donc s'effondrer ce cœur et du même coup augmenter sa température. Une fois la centaine de millions de Kelvins atteinte, une nouvelle réaction thermonucléaire peut s'amorcer : le processus triple α .

Dans cette réaction, trois atomes d'hélium (particule α) forment un atome de carbone et libèrent de l'énergie : c'est le flash de l'hélium. Pendant que le cœur se contracte, les enveloppes externes de l'étoile s'étendent et se refroidissent, le nouvel équilibre est appelé géante rouge. Le rayon du soleil aura alors atteint les environs de l'orbite de la terre qui évoluera donc au sein de l'atmosphère solaire dans un plasma dont la température avoisinera 3000 K. Ce sera la fin du monde !

La question que l'on peut se poser est dans combien de temps cela arrivera-t-il ? La réponse précise à cette question nécessite la construction d'un modèle du soleil.

La luminosité L d'une étoile est une puissance qui représente la quantité d'énergie rayonnée par celle-ci par unité de temps. On peut aussi définir son flux radiant F qui quantifie la puissance reçue par unité de surface. Dans le cas du soleil, différentes expériences permettent de mesurer un flux radiant $\Phi_{\oplus} = 1400 \text{ W.m}^{-2}$ au niveau de la haute atmosphère terrestre. Connaissant l'unité astronomique[†], on peut donc déterminer la luminosité L_{\odot} du soleil ! Seule la région centrale, la plus chaude et représentant 14% de sa masse, participe à la production de cette énergie qui est ensuite transportée vers la surface du soleil, d'abord de façon radiative puis de façon convective. Comme on le voit sur le diagramme du cycle pp, chacune des réactions de fusion convertit 4 atomes d'hydrogène en un atome d'hélium et fournit l'énergie $\varepsilon_f = 26 \text{ MeV}$.

Par définition de la puissance, l'énergie δE produite par le soleil pendant l'intervalle de temps δt s'écrit $\delta E = L_{\odot} \delta t$. En considérant l'équivalence masse-énergie donnée par la célèbre relation d'Einstein, cette énergie est tirée de la masse δm telle que $\delta m = \delta E / c^2$. Si cette masse est entièrement associé aux réactions de fusion nucléaire, on en déduit que le nombre n_f de ces réactions pendant δt s'écrit $n_f = \delta E / \varepsilon_f$. Chaque réaction consomme 4 atomes d'hydrogène, ainsi le nombre n_H d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pendant δt s'écrit $n_H = 4n_f$. On peut donc évaluer la masse d'hydrogène participant à ces réactions pour la production d'énergie du soleil en son cœur. On peut estimer par ailleurs que seulement 3/4 de la masse du cœur est susceptible de fusionner en hélium. Dans ces conditions, connaissant la masse du soleil $M_{\odot} = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$ et la masse molaire de l'hydrogène $m_H = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$, on peut estimer la durée pendant laquelle le soleil va fusionner de l'hydrogène ; elle est d'un peu plus de 10 milliards d'années...

L'âge actuel du soleil peut être estimé en déterminant la concentration en hélium de son cœur : il est à peu de choses près au milieu de sa vie sur la séquence principale ! L'âge de la terre peut être évalué de plusieurs manières et donnent deux familles de résultats assez distincts :

- En appliquant les règles de la doctrine créationiste James Husher a établi en 1654, par le décompte des générations bibliques, que la terre avait été créée en 4004 av. J.C. En y additionnant nos deux millénaires, la terre aurait donc quelques 6000 ans ! Cette théorie compte plus de 60 millions d'adeptes de nos jours dans le monde, essentiellement aux Etats-Unis ;
- Les modèles géologiques, basés sur un scénario de formation du système solaire et étayés par des mesures d'abondance d'éléments radioactifs, donnent un âge de 4,54 milliard d'années pour la terre. Le plus vieux minéral est un zircon ZrSiO₄ formé à partir d'un granite vieux de 4,4 milliards d'années qui a été découvert dans l'ouest de l'Australie.

Si nous ne faisons pas trop de bêtises, il nous reste donc un peu de temps avant que la terre ne disparaisse dans le soleil !

3.2 Le scénario du film 2012

Le scénario du film 2012 de R. Emmerich est basé sur le fait que la terre serait chauffée par une augmentation de la production de neutrinos par le soleil. Sa température augmentant, l'activité interne de la terre serait alors multipliée et cela se manifeste en surface par une recrudescence de l'activité tectonique et volcanique... Étudions de plus près ce scénario d'un point de vue scientifique.

Les neutrinos sont des particules élémentaires de la famille des leptons. Leur existence a été postulée par W. Pauli en 1930 pour palier à une apparente non conservation d'un certain moment cinétique dans des expériences de collisions de particules. Leur première confirmation expérimentale remonte à 1956.

Il existe trois types de neutrinos (ν_e , ν_μ , ν_τ) associés aux trois types de leptons chargés que sont l'électron (e^-), le muon (μ^-) et le tau (τ^-), et de même pour les 6 antiparticules respectives.

Les réactions de fusion se tenant au cœur du soleil produisent dans un premier temps du deutérium (d), un anti-électron (e^+) et un neutrino électronique (ν_e) à partir d'atomes d'hydrogène ionisés (p)

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e + 1,172 \text{ Mev}$$

Chacun de ces neutrinos produits par le soleil possède une énergie $\varepsilon_\nu = 0,27 \text{ Mev}$, le flux associé à cette source principale (85% de la production neutrino-solaire) est tel que nous recevons en permanence sur terre $\phi_{pp} = 65 \cdot 10^9$ de ces neutrinos par cm^2 et par seconde. Il existe d'autres réactions se produisant au cœur du soleil qui émettent des neutrinos plus énergétiques (allant jusqu'à une dizaine de Mev) mais le flux associé est 10^5 plus faible que la source principale.

La section efficace d'une particule quantifie, pour une réaction donnée, la probabilité d'interaction de cette particule. La section efficace des neutrinos produits par le cycle pp est si faible qu'il faudrait disposer un écran en plomb d'une année-lumière d'épaisseur pour interagir (c'est-à-dire arrêter) avec la moitié des neutrinos produits dans une direction...

Nous pouvons à présent nous livrer à un petit calcul d'ordre de grandeur sur le scénario du fameux film.

Supposons que la terre soit un cylindre en plomb de hauteur $h = d_\oplus = 10\,000 \text{ km}$ (alignée avec un axe radial du soleil) et de surface $s_\oplus = \pi d_\oplus^2$, en admettant que tout soit proportionnel, une règle de 3 permet de voir que le nombre n_\oplus de neutrinos issus du cycle pp qui sont stoppés par la terre chaque seconde s'écrit $n_\oplus = \frac{\pi}{2} d_\oplus^3 \phi_{pp} (1 \text{ al})^{-1}$.

En supposant que lorsqu'elle intercepte un neutrino, la totalité de l'énergie ε_ν est récupérée par la terre (supposée uniformément plombée, de masse $M_\oplus = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ et de température

uniforme...), sa température doit donc augmenter chaque seconde de $\Delta T = n_{\oplus} \varepsilon_v m_{pb} (M_{\oplus} c_{pb})^{-1}$ où $c_{pb} = 26 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est la capacité thermique molaire moyenne du plomb et $m_{pb} = 0,207 \text{ kg.mol}^{-1}$ sa masse molaire. L'application numérique $\Delta T = 6,21 \cdot 10^{-21} \text{ K.s}^{-1}$ est sans équivoque ! Le flux de neutrinos ϕ_{pp} est proportionnel au taux de réactions de fusion nucléaire, lui-même fixé par la masse du soleil, il ne peut pas augmenter dans de grandes proportions. L'énergie de ces neutrinos (et donc leur section efficace) est quant à elle fixée par la nature des réactions et donc par la composition du soleil qui ne peut pas évoluer à court terme. Quand bien même ce ΔT augmenterait d'un facteur 10^6 (ce qui paraît énorme et difficilement explicable...), il faudrait encore attendre 200 millions d'années pour voir la température moyenne de la terre augmenter d'un seul petit degré !

Voilà un film bien ambitieux pour compter sur les neutrinos pour réchauffer la terre...

4 Impacts

Cette histoire a commencé lorsque l'on a découvert dans les dépôts sédimentaires, une couche d'environ $e = 3 \text{ mm}$ d'épaisseur présente assez uniformément sur terre et contenant une densité d'iridium 30 fois plus importante que dans les autres couches de la croûte terrestre. Cette couche est appelée KT car elle marque la transition entre les ères géologiques du crétacé et du tertiaire, elle remonte donc à 65 millions d'années, date à laquelle la terre a également vu disparaître subitement la plupart de ses habitants d'alors, les dinosaures.

Curieusement, cette différence de densité d'iridium correspond assez bien à celle observée entre la croûte terrestre et les météorites habituelles ! L'anomalie d'iridium ne change pratiquement pas la masse volumique dans la couche que l'on peut supposer égale à la moyenne $\rho_{\oplus} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ de la terre. Avec $R_{\oplus} = 6400 \text{ km}$, la masse totale de cette couche supposée uniforme est donc $M_c = 4\pi R_{\oplus}^2 e \rho_{\oplus} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ kg}$. En conservant la même masse volumique, cela correspond à un corps sphérique de rayon $R_c = \sqrt[3]{3R_{\oplus}^2 e} = 7,1 \text{ km}$ qui aurait été pulvérisé puis saupoudré uniformément sur terre il y a environ 65 millions d'années...

Comment l'impact d'une telle comète peut-il éliminer quasiment toute trace de vie à la surface de la terre ?

Dans le système solaire, en première approximation la vitesse d'un corps ne dépend que de sa distance au soleil, au niveau de la terre la gravité du soleil impose des vitesses de l'ordre de 20 km.s^{-1} que nous prendrons donc comme vitesse relative (lors d'un choc à peu près frontal) de la comète par rapport à la terre. Avant d'entrer verticalement dans l'atmosphère la comète possède ainsi une énergie cinétique $E_c = 8 \cdot 10^{23} \text{ J}$ dans le référentiel terrestre. Pour atteindre le sol la comète doit traverser l'atmosphère ; avec sa vitesse, cela dure moins d'une dizaine de secondes... Lors de sa descente dans l'atmosphère, la comète expulse la totalité de l'atmosphère dans une colonne cylindrique de rayon R_c . On peut raisonnablement estimer que cet exploit ne consomme que 0,03 % de son énergie cinétique ! Pour ajouter un peu de piquant à l'histoire, supposons que l'impact se produise en un endroit de la terre recouvert par une mer de profondeur h_e (70% de la surface de la terre est immergée...). Il est facile de se convaincre que l'énergie E_{vap} nécessaire pour vaporiser le cylindre d'eau de mer de masse volumique densité $\rho_e = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ se trouvant sous la comète s'écrit $E_{vap} = h_e \rho_e \pi R_c^2 L_v$ où $L_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ est l'enthalpie de vaporisation massique de l'eau. Pour une mer d'un kilomètre de profondeur, on constate ainsi que la moitié d'un pour mille de l'énergie de la comète peut ventuellement être consacrée à cette activité... Il n'y a donc pas eu de vague, tout au moins dans un premier temps...

C'est donc avec la quasi-totalité de son énergie cinétique que la comète heurte enfin quelque chose d'aussi dur qu'elle. Compte-tenu de la masse de la terre, ce choc a pour effet de littéralement pulvériser la comète. Considérons qu'après l'impact, environ 90 % de l'énergie cinétique de la comète

est convertie en émission de projectiles divers. Après être remontés à travers la colonne de vide créée par la chute de la comète, ces projectiles se répartissent de façon quasi-uniforme sur toute la surface de la haute atmosphère, à une altitude de l'ordre de $h = 60$ km. Une fois au dessus de l'atmosphère ces débris ne peuvent que retomber au sol par gravité. La combustion de ces projectiles lors de cette retombée convertit la totalité de l'énergie cinétique en énergie thermique au niveau du sol. La durée totale de la combustion peut être estimée à une heure. Quand on sait que la puissance disponible en plein soleil en plein été est de l'ordre du kilowatt par mètre carré, on comprend alors assez vite que tous les dinosaures sont morts grillés !

Peut-on évaluer la fréquence de tel impacts sur terre ?

La réponse n'est pas très claire. Du point de vue sédimentaire, il n'existe apparemment pas d'autre trace aussi claire que la transition KT. Par contre, on dénombre clairement 5 évènements d'extinction massive au cours desquels une proportion significative des espèces animales et végétales présentes sur la terre disparaît :

- 500 Ma, à la limite du Cambrien et de l'Ordovicien, l'extinction du Cambrien a éliminé beaucoup de brachiopodes, conodontes, et un grand nombre d'espèces de trilobites ;
- 435-440 Ma, à la limite entre l'Ordovicien et le Silurien, deux extinctions massives se produisent, peut-être suite à une grande glaciation qui aurait entraîné des désordres climatiques et écologiques rendant difficile l'adaptation des espèces et écosystèmes au recul de la mer sur des centaines de kilomètres, puis à son retour en fin de phase glaciaire ;
- 365 Ma, l'extinction du Dévonien élimine 70 % des espèces, non pas brutalement, mais en une série d'extinctions sur une période d'environ 3 Ma ;
- 245-252 Ma, l'extinction du Permien est la plus massive. Près de 95 % de la vie marine disparaît ainsi que 70 % des espèces terrestres (plantes, animaux)
- 65 Ma, les extinctions du Crétacé tuent 50 % des espèces, dinosaures non-avien compris, c'est la transition KT.

Une explication assez controversée à cet enchaînement très approximativement périodique serait l'existence d'une étoile, Némésis, formant un couple binaire avec le soleil. De faible masse, cette étoile serait en orbite très excentrique dans le référentiel barycentrique et traverserait périodiquement le système solaire. Némésis pourrait trimballer dans son sillage tous les débris qu'elle pourrait rencontrer notamment en traversant le nuage de Oort, réservoir cométaire situé aux confins du système solaire...

Par contre si l'hypothétique Némésis, déesse grecque de la vengeance, était de retour pour la fin de l'année nous le saurions déjà depuis très longtemps !

Glossaire

- Orbite képlérienne : trajectoire correspondant à la solution du problème de corps massifs en interaction gravitationnelle.
- Ecliptique : D'un point de vue géocentrique, l'écliptique est le grand cercle sur la sphère céleste représentant la trajectoire annuelle du soleil vue de la terre, le plan de l'écliptique est celui contenant ce cercle.
- Calendrier grégorien : calendrier basé sur une durée de la période de la terre autour du soleil définie lors de la réforme commandée par le pape Grégoire XIII à partir de 1582. L'année grégorienne dure 365,2425 jours de 24 heures.
- Unité astronomique : Demi-grand axe moyen de l'orbite de la terre autour du soleil soit $1 \text{ ua} = 149 \cdot 10^9 \text{ m}$.
- Quasar : source de rayonnement pratiquement ponctuelle qui correspond en fait à une galaxie lointaine et très énergétique. Les quasars sont parmi les objets les plus lumineux de l'univers.
- Disque d'accrétion : structure astrophysique formée par la matière en orbite autour d'un objet céleste central. Ce corps central est typiquement une jeune toile, une proto-toile, une

naine blanche, une toile de neutrons ou un trou noir. La forme de la structure est engendrée par l'action de la force gravitationnelle, attirant le matriel vers le corps central, les différentes vitesses initiales des particules, qui entraînent le matriel en forme de disque, et la dissipation d'énergie en son sein par viscosité, entraînant le matriel en spirale vers l'organe central