

## Habitabilité de la planète UMMO gravitant autour de l'étoile Ioumma

Auteur : Rémy Galli

Le 2/02/2021

### Introduction

Il existe de nos jours des simulateurs disponibles en ligne pour estimer l'habitabilité d'une exoplanète, mais encore faut-il avoir les paramètres nécessaires à la simulation.

Dans le cas du couple {Ioumma, Ummo}, nous disposons d'un corpus de données astronomiques très complet ; cependant il manque un paramètre essentiel, à savoir la luminosité absolue de l'étoile Ioumma, dont on connaît toutefois la masse et la température effective.

Pour estimer cette luminosité à partir des théories actuelles, il nous faudrait en plus des paramètres précédents ce qu'on appelle l'indice de métallicité de l'étoile Ioumma.

De ce paramètre crucial dépend l'habitabilité de Ummo comme on le montre ci-après.

1) **La métallicité d'une étoile** est un paramètre très important pour estimer sa luminosité.

On peut se rapporter à ce sujet à l'article suivant, qui concerne les étoiles naines dont l'indice B-V est compris entre 0.7 et 1.2. (Indice B-V de Ioumma=1.15, celui du soleil 0.65).

**Luminosity–metallicity relation for stars on the lower main sequence**  
Eira Kotoneva, Chris Flynn, and Raul Jimenez 2002

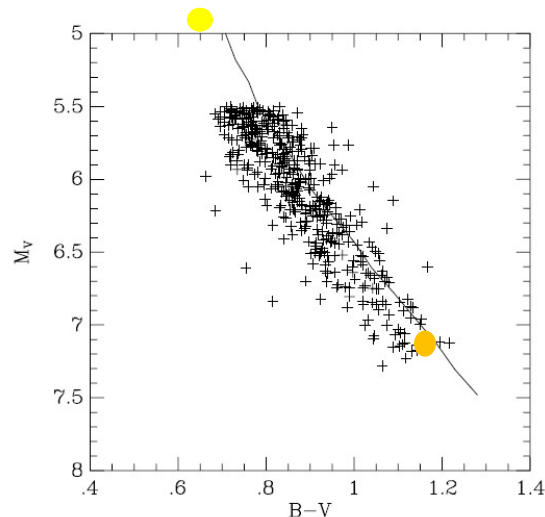


Figure 1. The colour–magnitude diagram of single stars of the data set (433 stars). The single stars form a clear main sequence. The line shows a solar metallicity 11-Gyr isochrone from Jimenez et al. (1998).

Le graphique ci-dessus montre que pour un indice donné, la dispersion sur la magnitude est importante et peut aller jusqu'à un écart de 0.5 en magnitude, soit un facteur de 1.6 en luminosité.

Cela peut paraître peu important, mais une baisse d'un facteur 1.6 peut suffire à sortir une planète de la zone d'habitabilité.

Les auteurs de l'article ci-dessus mettent en évidence sur cette gamme d'indice B-V une loi de correction de la magnitude absolue qui s'écrit comme suit et ne dépend pas d'ailleurs de l'indice BV mais uniquement de la métallicité [Fe/H] comme suit :

$$\Delta M_V = 0.04577 - 0.84375 \times [\text{Fe}/\text{H}]. \quad (1)$$

Nous utiliserons cette relation (1) plus loin, ainsi que la dispersion obtenue par les auteurs sur la magnitude ci-dessus (écart de +/- 0.08).

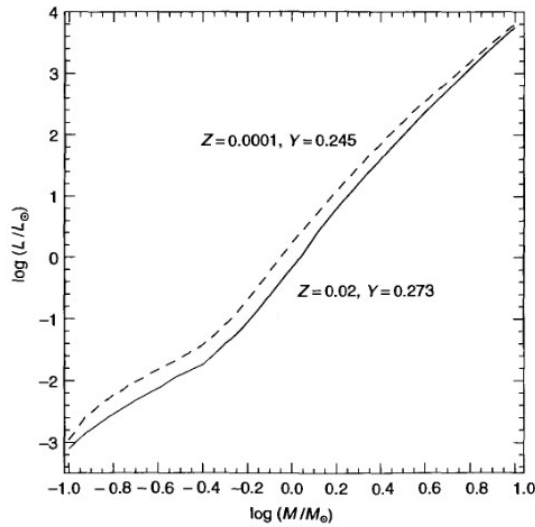
## 2) Relation Masse luminosité et effet de la métallicité sur la luminosité

Il existe un ensemble de relations communément admises pour trouver la luminosité d'une étoile par rapport à celle du soleil en fonction de sa masse rapportée à celle du soleil, et qui prend en compte également sa composition chimique et sa métallicité.

On trouve ces explications par exemple dans le livre suivant :

**Evolution of stars and stellar populations. Salaris Mars 2005**, dont voici un extrait :

Due to the several approximations made in this sketchy derivation, one has to expect that the relation  $L \propto M^3$  is only roughly followed by 'real' stars. Empirical data for stars of approximately solar chemical composition provide  $L \propto M^{3.6}$  for masses between  $\sim 2$  and  $20M_{\odot}$ ,  $L \propto M^{4.5}$  in the range between  $\sim 2$  and  $0.5M_{\odot}$ , and  $L \propto M^{2.6}$  in the range between  $\sim 0.5$  and  $0.2M_{\odot}$ . Figure 5.11 shows a theoretical mass–luminosity relation for ZAMS stars in the mass range  $0.1M_{\odot}$ – $10M_{\odot}$  provided by detailed evolutionary computations, that displays trends with mass roughly consistent with the observations.



**Figure 5.11** The mass–luminosity relation for ZAMS stars in the mass interval  $0.1M_{\odot}$ – $10M_{\odot}$ , for two initial chemical compositions

La loi du type  $M^{4.5}$  s’applique aux étoiles de masse comprise entre 0.5 Msol et 2 Msol et nous concerne donc directement.

Le graphe suivant présente cette loi en rouge, les échelles étant logarithmiques.

En abscisse, la masse de l’étoile entre 0.5 et 1 masse solaire ( $1$  à  $2 \times 10^{30}$  kg).

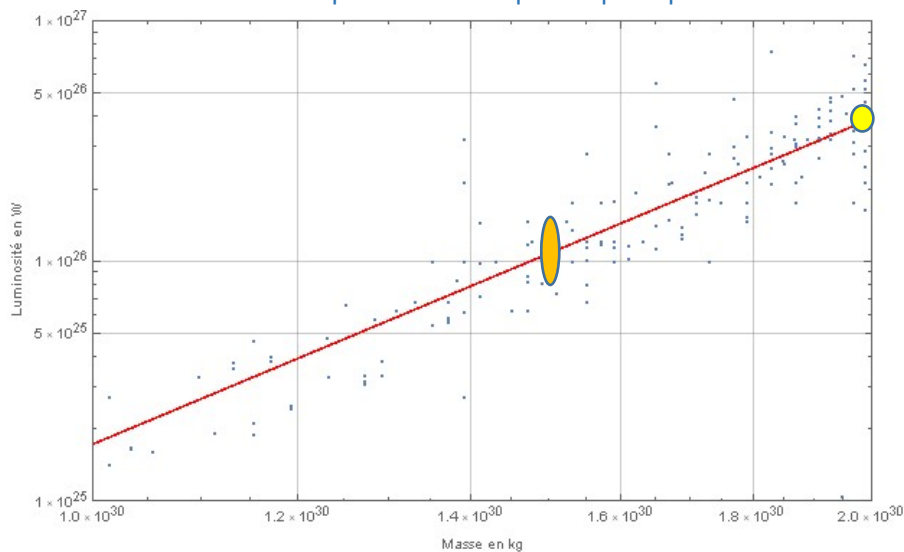
En ordonnée, la luminosité en W. Le soleil se situe au point  $\{1.99 \times 10^{30}$  kg,  $3.83 \times 10^{26}$  W} en jaune.

loumma se situe autour du point  $\{1.48 \times 10^{30}$  kg,  $1 \times 10^{26}$  W} en orange, sachant que nous ne connaissons pas la dispersion autour de cette valeur.

Cette dispersion est confirmée lorsqu’on interroge les catalogues d’étoiles disponibles en ligne.

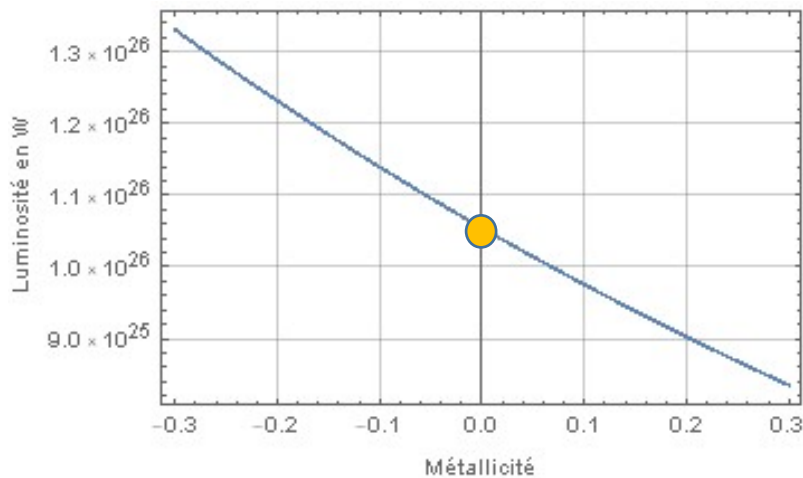
Les points bleus figurant sur le graphe sont un extrait des couples {Masse, Luminosité} des 20000 étoiles les plus proches de nous (distance <100 parsec).

Points bleus : étoiles <100 parsec de la séquence principale de 0.5 à 1 Masse solaire.



Comme on l'a expliqué au chapitre 1, cette dispersion de luminosité ou de magnitude a été identifiée comme étant due à l'indice de métallicité de l'étoile.

Si donc maintenant on veut estimer la variation possible de cette luminosité pour Ioumma, il faut utiliser la relation (1) ci-dessus, et on obtient la courbe suivante.



Cette courbe montre une variation possible de la luminosité de Ioumma d'un facteur 1.5 entre une métallicité de -0.3 et une autre de +0.3. Cela paraît peu, mais cela fait une très grosse différence quand on va estimer le climat qui en découle sur la planète Ummo.

### 3) Simulation du climat sur Ummo en fonction de la luminosité de Ioumma

Pour faire cette simulation, on utilise le programme 1 D disponible à l'adresse suivante :

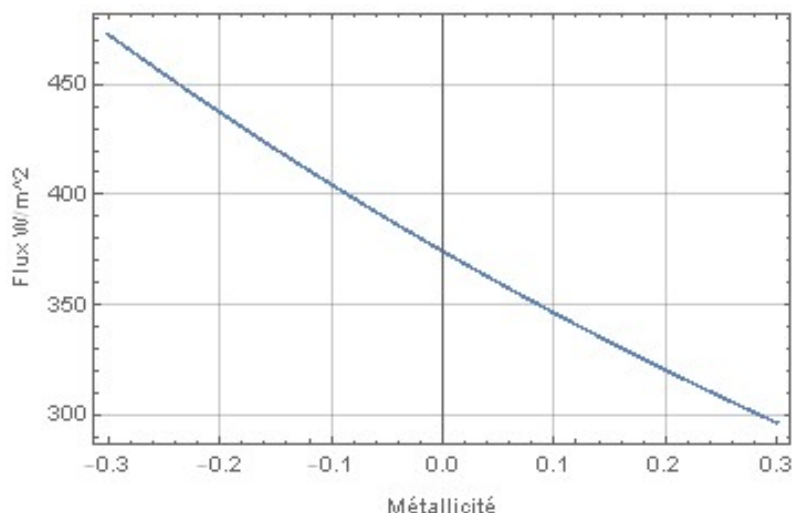
<http://exoplanet.eu/GCM1D/>

GCM-1D: A tool to simulate an Earth-like atmosphere

---

Pour alimenter cette simulation, nous avons besoin de nombreux paramètres (précisés ci-après), qui sont heureusement quasiment tous disponibles sur Ummo Wiki.

Un seul paramètre très important et manquant est le flux de Ioumma incident sur Ummo exprimé en  $W/m^2$  à une distance standard de 1 Unité Astronomique. C'est ce qu'on pourrait nommer la constante « solaire » de Ioumma. Grâce aux résultats ci-dessus donnant une plage possible de luminosité pour Ioumma, et en supposant que sur Terre nous avons  $1362 W/m^2$  incidents à une distance de 1 UA (cette valeur étant la constante Solaire, qui n'est pas tout à fait constante comme on le précise en Annexe 2), nous pouvons estimer le flux que recevrait une planète située à une distance de 1 UA de Ioumma, ce que montre le tracé suivant.



Ummo étant plus proche de Ioumma que la Terre du Soleil (0.664 UA), le code GCM-1D prend cette donnée en compte pour calculer le flux incident à la surface de Ummo.

C'est en entrant différentes valeurs de flux dans la simulation que l'on se rend compte que la luminosité de Ioumma (et en conséquence le flux incident sur Ummo) est un paramètre très important.

### Exemple de simulation

Pour illustrer ce dernier point, voici une simulation qui utilise la valeur maximale de 480 W/m<sup>2</sup> du graphe ci-dessus.

Les autres paramètres figurent dans le tableau de la page suivante ; toutes les données utiles autres que le flux à 1 UA proviennent de UMMO WIKI, à quelques détails près.

- La profondeur des océans a été mise au maximum du curseur, mais ce paramètre influe peu sur les résultats.
- L'excentricité (parfois 0.078, parfois 0.0078) induit une correction négligeable d'où la valeur nulle choisie.
- La proportion de CO<sub>2</sub> n'est pas réglable continuellement dans le code. Les pas utilisables et pertinents pour notre étude sont {400 ppm, 900 ppm, 1% et 10 %}. On propose une méthode en Annexe 3 qui permet d'interpoler la température moyenne en fonction du taux d'équivalent CO<sub>2</sub>. Cela conduit à rajouter +4 °C si on prend un taux d'équivalent CO<sub>2</sub> de 2.3 % (1.8 % pour le CO<sub>2</sub> + 0.5 % équivalent CO<sub>2</sub> pour le méthane).

### Parameters

Flux at 1 AU:  
**480 W/m<sup>2</sup>**

Distance:  
**0.664 UA**

Eccentricity:  
**0**

Period: **232 days**

Quantity of CO<sub>2</sub>:  
**1 %**

Star Type:  
Blackbody ▼

Temperature:  
**4580 °K**

### Initial parameters

Quantity of liquid water at surface:  
**2000 m**

Oceanic coverage:  
**62 %**

Gravity: **11.88 m.s<sup>-2</sup>**

Pressure:  
**2.8 bar**

La simulation montre au bout de quelques milliers de jours une stabilisation de la température en surface de Ummo de l'ordre de +15°C avec les paramètres ci-dessus. Si on corrige du taux de CO<sub>2</sub>, on obtient +19 °C. C'est une valeur élevée pour une valeur moyenne, surtout si on la compare à la valeur de +12 °C disponible sur Ummo Wiki à l'équateur de Ummo : ce n'est pas une valeur moyenne. La valeur terrestre pour mémoire obtenue par GCM 1D est correcte et vaut +13 °C en moyenne.

Ce résultat est plutôt encourageant du point de vue des ordres de grandeur, pour une métallicité de l'ordre de -0.3.

Une autre simulation, pour une métallicité identique à celle du Soleil donc nulle, induit un flux de 375 W/m<sup>2</sup> pour la simulation, qui donne à son tour une température certes stabilisée mais glaciale de l'ordre de -24°C qui se ramène à -20°C après correction.

#### 4) La métallicité de Ioumma et la température moyenne à la surface de Ummo

*Les données suivantes ont été obtenues le 1<sup>er</sup> février 2021.*

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.0854 \text{ dex}; [\alpha/\text{Fe}] = +0.0591 \text{ dex}$$

- a) Si on injecte la valeur de  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.0854$  dans le modèle ci-dessus, on obtient un flux de  $400 \text{ W/m}^2$  à la distance de 1 UA. Cette valeur est 20 % plus faible que dans la simulation précédente.

La simulation GCM 1D pour  $400 \text{ W/m}^2$  donne alors les résultats suivants :

Température moyenne en surface de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  pour 1 % de  $\text{CO}_2$ .

**En interpolant ces résultats (voir Annexe 3), on obtient une température moyenne de  $-14^\circ \text{C}$  environ pour un équivalent  $\text{CO}_2$  de 2.3 %.**

Pour mémoire, la température moyenne sur Terre calculée par GCM1D avec les conditions standards du code est de  $+13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Il s'agit d'une température moyenne : si on recherche les températures de la mer sur Terre selon les latitudes, on obtient les graphiques fournis en Annexe 1 (meteociel.fr).

On en déduit qu'entre la température moyenne et la température maximale à l'équateur, on peut trouver un écart allant jusqu'à  $+18 \text{ }^\circ\text{C}$ , au moins sur Terre.

A partir des résultats « terrestres » précédents, et en les transposant à Ummo, **on trouverait une température de  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'équateur, donc de l'eau liquide.**

- b) On considère maintenant la dispersion de  $\pm 0.08$  magnitude sur la relation (1) comme précisé par les auteurs, soit une dispersion en luminosité entre 1.076 et 0.929. En partant de la valeur centrale de  $400 \text{ W/m}^2$ , on obtient une fourchette de possibilités entre  $430 \text{ W/m}^2$  et  $372 \text{ W/m}^2$ .

La simulation GCM1D pour  $375 \text{ W/m}^2$  a été faite ci-dessus et donne une température moyenne de  $-24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La simulation GCM1D pour  $430 \text{ W/m}^2$  donne les résultats suivants :

Température moyenne en surface de  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$  pour 1 % de  $\text{CO}_2$ .

**Soit une température moyenne de  $-7^\circ \text{C}$  environ pour 2.3 % de  $\text{CO}_2$  à la surface de Ummo. Et à partir de ce qui se passe sur Terre et en le transposant à Ummo, on trouverait une température de  $+11 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'équateur, donc de l'eau liquide.**

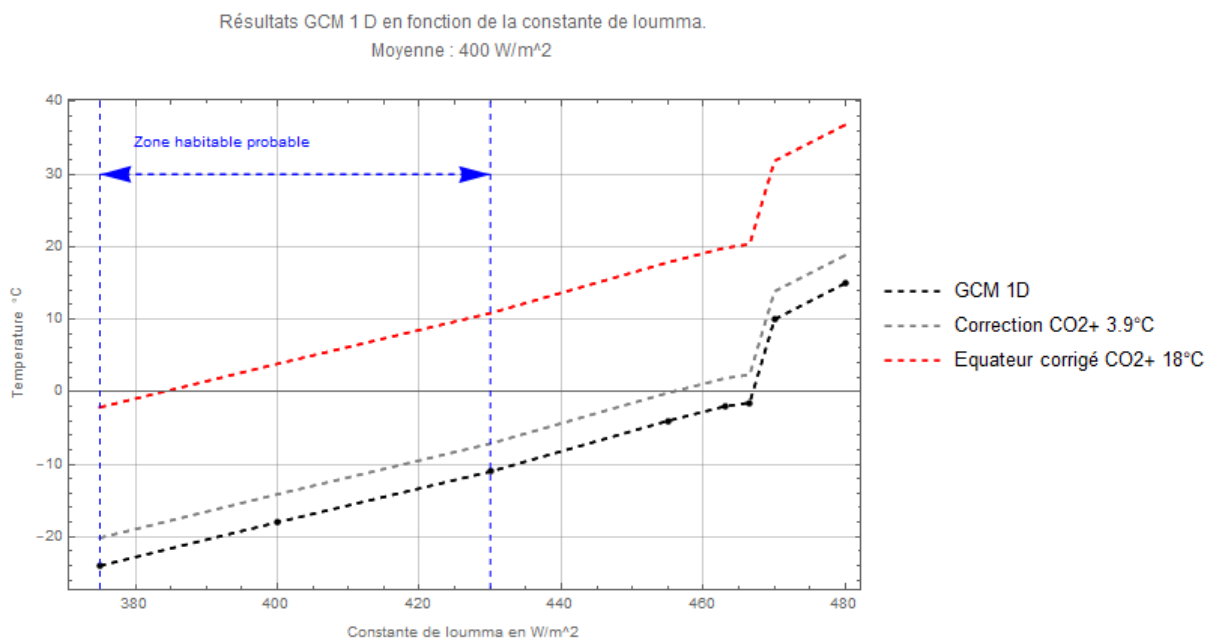
## 5) Synthèse des simulations GCM 1D

Le graphe suivant illustre les résultats obtenus grâce à GCM 1D : les points bruts calculés figurent en noir et fournissent une température moyenne pour 1% de CO<sub>2</sub>. Les paramètres de la simulation sont identiques au tableau ci-dessus, le seul paramètre qui change étant le flux à 1UA.

Si on fait une correction de +4°C pour tenir compte des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> 1.8%, CH<sub>4</sub> 0.5 % en équivalent CO<sub>2</sub>) on obtient la courbe grise, qui donne là encore la température **moyenne** sur Ummo.

Si on applique ensuite une correction de +18 °C, on obtiendrait en rouge la température maximale à l'équateur de Ummo.

Notons qu'à la limite de la zone possible supérieure de 430 W/m<sup>2</sup> selon notre modèle, on obtiendrait +11 °C à l'équateur, ce qui est très proche de la valeur obtenue sur Ummo Wiki donnant une température équatoriale de +12 °C.



Ce dernier graphique montre l'importance de connaître précisément la constante de lousma : on passe en effet rapidement d'une planète glaciale à une planète de type terrestre.

Remarque : On note une sorte de saut fourni par la simulation lorsque la température moyenne s'approche de 0°C. Ce saut, en dehors de la zone qui nous intéresse, traduit sans doute le besoin d'énergie nécessaire pour la transition solide-liquide de l'eau.



## 5) Aparté sur l'apport de l'indice $[\alpha/\text{Fe}]$ .

Les éléments alpha sont appelés ainsi car leurs isotopes les plus abondants sont des multiples entiers de quatre, c'est-à-dire ceux de la particule alpha (noyau d'He). Les éléments alpha stables sont: [C](#), [O](#), [Ne](#), [Mg](#), [Si](#) et [S](#).

Si on exploite l'information supplémentaire obtenue sur  $[\alpha/\text{Fe}]$ , on obtient une indication intéressante sur l'âge possible de l'oumma qui serait de 6.3 milliards d'années comme montré ci-après, grâce à la publication suivante de 2019.

MNRAS 489, 1742–1752 (2019)  
Advance Access publication 2019 August 17

doi:10.1093/mnras/stz2221

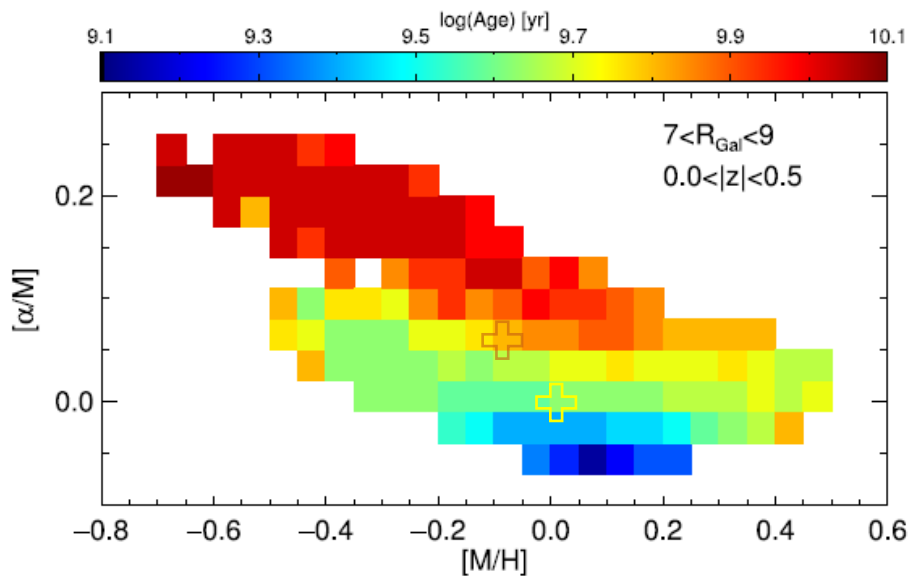
### Spatial variations in the Milky Way disc metallicity–age relation

Diane K. Feuillet<sup>1,\*</sup>, Neige Frankel<sup>1</sup>, Karin Lind<sup>1,2</sup>, Peter M. Frinchaboy<sup>3</sup>,  
D. A. García-Hernández<sup>4,5</sup>, Richard R. Lane<sup>6,7</sup>, Christian Nitschelm<sup>8</sup>  
and Alexandre Roman-Lopes<sup>9</sup>

En identifiant la métallicité  $[M]$  de la publication à celle du Fe (c'est le cas en général), alors le graphique suivant donne un indice sur l'âge possible de l'oumma.

La croix marron est positionnée sur les valeurs

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.0854 \text{ dex}; [\alpha/\text{Fe}] = +0.0591 \text{ dex}$$



La couleur du graphique au niveau de la croix marron donne une idée de l'âge de l'oumma : on lit environ 9.8 sur l'échelle des couleurs soit 6.3 milliards d'années.

Pour le soleil, les valeurs étant  $\{0,0\}$  par définition, on a bien au niveau de la croix jaune une couleur conduisant vers 9.65 soit 4.5 milliards d'années.

## Conclusion

Pour estimer l'habitabilité de UMMO, nous avons besoin du flux délivré par l'étoile Ioumma à la distance de 1 UA ; ce flux constitue ce qu'on pourrait appeler la constante Ioumma en référence à ce que nous nommons la constante solaire ( $1360 \text{ W/m}^2$  à 1 UA) ; ce flux peut être calculé à partir d'informations en notre possession telles que la masse et la température de l'étoile, mais aussi en prenant en compte la métallicité de Ioumma.

Avec une métallicité de  $-0.0854$ , nous obtenons une température moyenne de surface sur Ummo de l'ordre de  $-14 \text{ }^\circ\text{C}$ . En transposant ce qui se passe sur Terre à partir de la température moyenne, et en prenant en compte les variations en fonction de la latitude, on en déduirait l'existence d'eau liquide à l'équateur de Ummo, avec une température positive de  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ensuite, en prenant en compte les incertitudes de la loi de correction de la magnitude en fonction de la métallicité, on en vient à augmenter légèrement la magnitude et donc la luminosité d'un facteur  $1.076$ . Le flux obtenu conduit ainsi, avec le même raisonnement que précédemment, à une température équatoriale de Ummo de  $+11 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ce résultat est globalement satisfaisant car nous ne sommes pas loin de la valeur moyenne annoncée sur Ummo Wiki de  $+12 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'équateur.

Tout cela signifie qu'un écart de moins de 10 % sur l'estimation de la luminosité de Ioumma conduit à des résultats tels que l'on resterait certes dans la zone d'habitabilité de Ioumma, mais avec une planète Ummo dont le climat peut varier du type glaciaire au type terrestre.

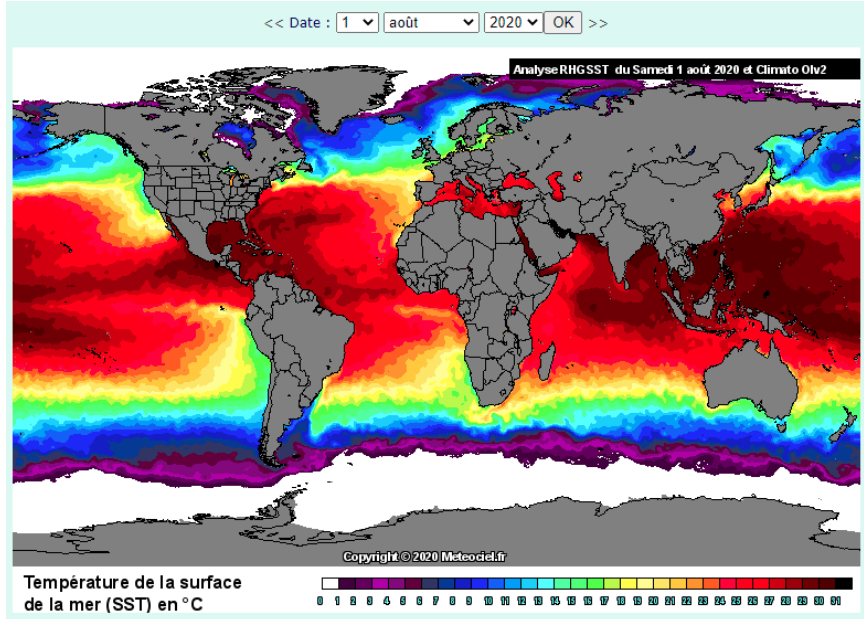
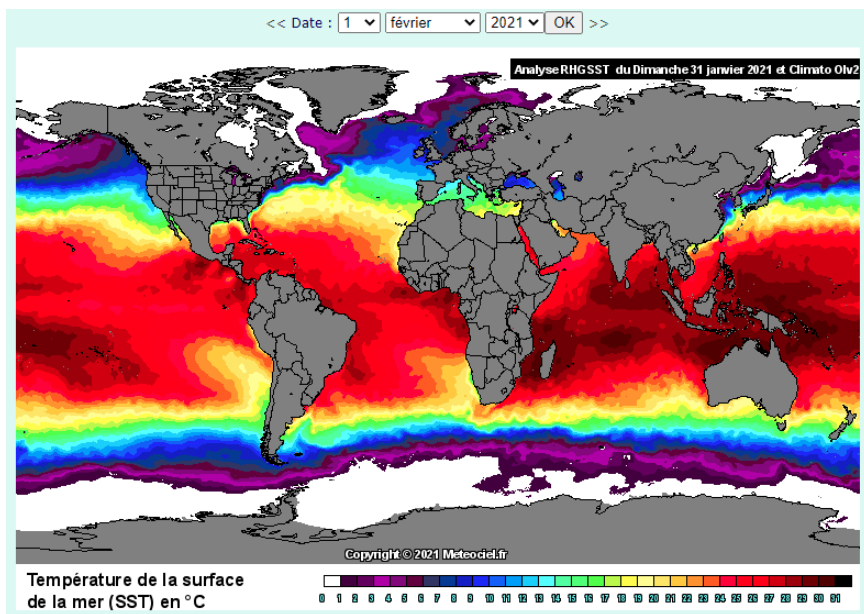
Nous sommes peut-être aux limites des barres d'incertitudes combinées des différents paramètres utilisés pour cette étude, dont celles engendrées par le code GCM1D. L'estimation des différentes barres d'incertitudes (autre que celle sur la correction de la magnitude en fonction de la métallicité) n'a pas été faite.

Tout au plus pourrait-on finalement conclure que Ummo se situe dans la zone habitable de Ioumma, quoiqu'à la limite, et qu'il faut sans doute se trouver près de l'équateur de la planète pour avoir le plus de chances d'avoir de l'eau sous forme liquide.

Il faut noter un point à éclaircir : **la composition de l'atmosphère de Ummo est incomplète**, car il manque des informations sur les « autres gaz » : 9% quand même.

Pourrait-il s'agir d'autres gaz comprenant notamment des gaz à effet de serre ? Mentionnons pour l'exemple le fait que 0.02% de méthane (valeur Ummo) peut se traduire par un équivalent  $\text{CO}_2$  de 0.5 % ce qui n'est pas négligeable.

# ANNEXE 1 Températures de surface de la mer pour les dates : 1/02/2021 et 1/08/2020

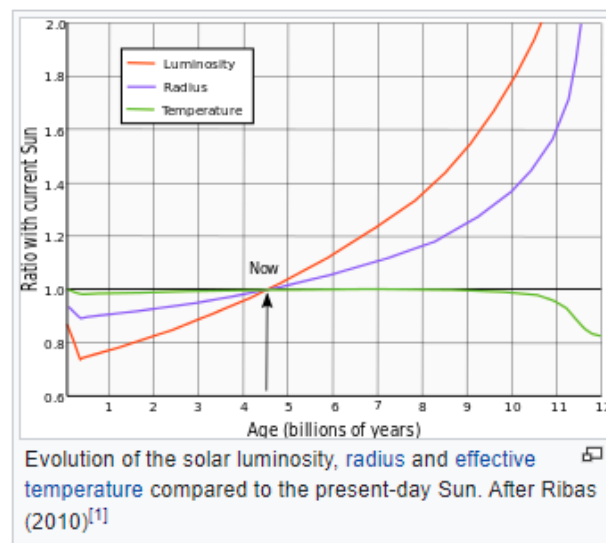


## ANNEXE 2

La valeur obtenue sur l'âge de Iouma est intéressante, car on sait que le Soleil par exemple voit sa constante solaire augmenter au cours de sa vie. Voir par exemple la publication suivante :

Ribas, Ignasi (February 2010), "[The Sun and stars as the primary energy input in planetary atmospheres](#)" (PDF), *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, **264**, pp. 3–18, [arXiv:0911.4872](#), [Bibcode:2010IAUS..264....3R](#), [doi:10.1017/S1743921309992298](#)

La courbe ci-après provenant de la référence précédente montre par exemple que la constante solaire augmentera d'environ 15% quand le soleil atteindra 6.3 milliards d'années, en raison de l'augmentation de son rayon.



Cette information pourrait peut-être induire un terme correctif à cette étude mais aucune théorie claire ne permet de l'utiliser rigoureusement à ce stade.

Cette information n'a donc pas été utilisée dans cette étude.

### ANNEXE 3

#### Interpolation des résultats en fonction du taux de CO2 et prise en compte du méthane.

La courbe suivante est construite avec le code GCM 1D et les paramètres du texte.

La valeur de flux de  $430 \text{ W/m}^2$  a été choisie pour ces simulations.

Les points rouges sont les résultats de la simulation faite pour {400 ppm, 900 ppm, 1%, 10%} de CO2.

La courbe bleue est un ajustement utilisant une loi de type  $f[x] = a + cx + b\text{Log}[x]$ , avec les paramètres  $\{a \rightarrow 253.429, b \rightarrow 2.465, c \rightarrow 1.391\}$ .

***En utilisant cette loi, on détermine une correction de  $+3.86 \text{ °C}$  à apporter à la température quand on passe de 1% de CO2 à 2.3% de CO2.***

Ces 2.3 % proviennent de la prise en compte du CO2 lui-même (1.8%) et du méthane, 25 fois plus « efficace » que le CO2, soit  $25 \cdot 0.02\% = 0.5 \%$  en plus.

