

Introduction

Je me suis toujours demandé pourquoi les limites d'habitabilité des exoplanètes étaient aussi larges, conduisant par exemple à positionner Mars dans la zone habitable du Soleil.

A force de chercher, j'ai trouvé quelques réponses intéressantes, sachant que celles-ci peuvent s'appliquer à la planète Ummo autour de son étoile Ioumma.

Mais avant tout, il faut éplucher la bibliographie, ce qui n'est pas une mince affaire.

Etude bibliographique : article de base.

L'enquête démarre avec le texte suivant de 2018 : il possède lui-même une bibliographie de 284 références !



Review

A more comprehensive habitable zone for finding life on other planets

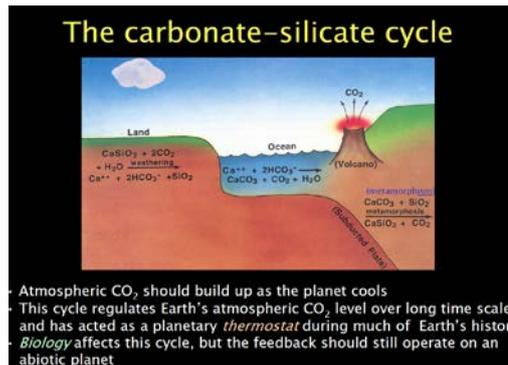
Ramses M. Ramirez ^{1*}

Voici le résumé :

La zone habitable (ZH) est la région circulaire autour d'une ou plusieurs étoiles où des plans d'eau liquide pourraient exister à la surface d'une planète rocheuse. Les missions spatiales utilisent la ZH pour sélectionner des cibles prometteuses pour l'évaluation de leur habitabilité. La définition classique de la ZH suppose que les gaz à effet de serre les plus importants pour les planètes habitables en orbite autour des étoiles de la séquence principale sont le CO₂ et le H₂O. Bien que la ZH classique soit un outil efficace, les formulations récentes démontrent qu'elle ne peut pas décrire complètement la diversité des exoplanètes habitables. Ici, on passe en revue les processus planétaires et stellaires pris en compte dans les formulations classiques et les plus récentes. Compléter la définition classique avec des considérations supplémentaires de ces nouvelles formulations améliore notre capacité à filtrer les mondes qui sont peu susceptibles d'héberger la vie. De tels outils améliorés seront nécessaires pour les missions actuelles et à venir visant à détecter et à caractériser des exoplanètes potentiellement habitables.

Je me suis surtout intéressé dans cet article à ce qu'on appelle la zone habitable extérieure (ZHE), c'est-à-dire le côté froid de la zone habitable : la Terre, par exemple est du côté chaud dit intérieur de la ZH, alors que Mars serait à la limite de la ZH du côté extérieur. En vérité, ce dernier point est troublant car chacun sait que Mars n'est pas habitable ! Et puis, il semblerait qu'Ummo soit plutôt du côté de la ZHE de Ioumma, comme estimé en Annexe 1, mais nous reviendrons plus tard sur ce point.

Concernant donc cette ZH, la plupart des auteurs pensent qu'il faut un cycle du carbonate-silicate opérationnel pour réguler le CO₂ dans l'atmosphère. Ce cycle peut provenir de la tectonique des plaques, mais aussi d'un volcanisme actif, comme le montre la figure suivante. Sans rentrer dans le détail, ce cycle joue un rôle de thermostat sur de grandes échelles de temps.



La ZH classique se situerait (pour différents types d'étoiles de la séquence principale) comme l'indique la figure suivante, avec des limites empiriques larges, et une zone un peu plus conservatrice, dans laquelle on trouve par exemple la Terre (ZH intérieure) et Mars (ZH extérieure) :

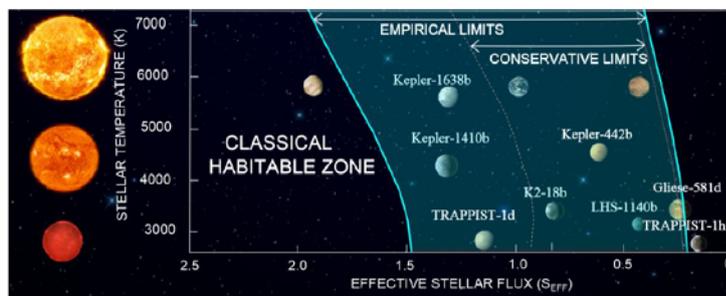


Figure 3: The classic CO₂-H₂O habitable zone with stellar effective temperature ($T_{eff} = 2,600 - 7,200$ K) as a function of the effective stellar flux (S_{eff}). From left to right, the “Recent Venus” and “early Mars” limits (solid blue curves) are the empirical (optimistic) classical HZ limits whereas the “Leconte et al” and “Maximum Greenhouse” limits compose the conservative (pessimistic) classical HZ limits. Some solar system planets and confirmed exoplanets are shown. Based on work from Kopparapu et al. [26,49].

Mars serait donc à la limite de la zone habitable extérieure (ZHE). Umma serait quant à elle en plein milieu de la ZH de Ioumma (température de l'étoile 4580 °K), car l'irradiation au niveau de Umma vaut environ $S_{eff} = S_{sol}/2$: sur la figure, cela correspond en gros à la position approximative de Kepler 442 b.

Ces limites tendent à expliquer que Mars est habitable, pourtant ce n'est pas le cas.

Why isn't Mars habitable?

- The problem with Mars is its small *size* compared to Earth
 - Mar's has half Earth's diameter and $1/10^3$ its mass
- Volcanism and plate tectonics (?) ended early, and the carbonate-silicate cycle feedback didn't work
- Also, Mars' small size allowed it to lose heavy elements (C, N, and O) to *space*

Les scientifiques expliquent alors que Mars n'est pas habitable malgré sa position dans la ZH pour plusieurs raisons :

- Gravité de Mars trop faible laissant filer les éléments lourds (C, N, O) vers l'espace, ce qui n'est pas le cas de Umma avec une gravité plus forte que sur Terre,

- Pas de cycle carbonate-silicate opérationnel sur Mars : ni tectonique des plaques, ni volcanisme, ni océan. Certes Umma n'a pas de tectonique des plaques, mais un fort volcanisme, et un océan, ce qui indiquerait un cycle carbonate-silicate opérationnel.

Autrement dit, on comprend bien pourquoi Mars n'est pas habitable, et on devine pourquoi Umma, qui se situe en plein milieu de la ZH, aurait bien plus de chances d'être habitable, avec une gravité de 11.9 m/s^2 , un fort volcanisme, et un taux de CO_2 élevé dans l'atmosphère (1.8 %).

Mais ces tendances favorables sont-elles suffisantes pour décréter que Umma est habitable ?

Car il existe aussi d'autres paramètres à considérer, comme par exemple le spectre de l'étoile : les étoiles de type F, G, K, M n'ont ni le même spectre ni la même luminosité.

Il peut être utile à ce stade de rappeler que la ZH est une notion dynamique, qui dépend aussi de la vie de l'étoile et de sa luminosité en fonction du temps comme le montre le graphe ci-après. Ce graphe permet de voir la luminosité des étoiles en fonction du temps (en milliards d'années). Les écarts de luminosité entre par exemple une étoile de type M et d'autres de type G / K peuvent atteindre un facteur 10 à 1000. Cela signifie qu'une planète dans la ZH d'une étoile de type M5 par exemple, sera située très près de son étoile avec des conséquences certainement néfastes pour l'apparition de la vie.

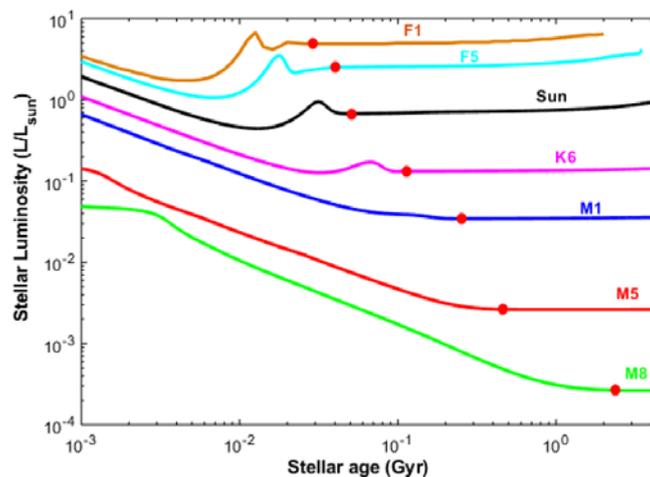


Figure 10: Evolution of stellar luminosity for F – M stars (F1, F5, Sun, K6, M1, M5, and M8) using Barrafe et al. [184] stellar evolutionary models. When the star reaches the main-sequence (red points) the luminosity curve flattens (updated from Ramirez and Kaltenegger [51]).

Beaucoup de paramètres interviennent donc pour définir la ZH : le spectre et la luminosité de l'étoile, la quantité d'eau présente sur la planète (et par conséquent l'humidité relative), la quantité de CO_2 dans l'atmosphère et les différents mécanismes équilibrant le CO_2 , la fraction de nuages dans l'atmosphère, l'albédo de la planète, etc....

Pour progresser sur ce sujet, il faut des outils de simulation comme par exemple GCM-1D que nous avons beaucoup utilisé auparavant. On trouvera d'ailleurs en Annexe 1 une simulation GCM-1D du climat de Umma avec les dernières valeurs de luminosité de l'Umma.

Les modèles 1D sont très intéressants pour faire des études paramétriques car ils sont en général peu gourmands en puissance de calcul et donnent des résultats moyens en général corrects par

rapport aux modèles 3D. Et on peut les coupler facilement à d'autres études paramétriques (par exemple pour étudier l'effet de sources de chaleur magmatiques).

Mais les modèles 1D ne prennent en général pas en compte finement l'effet des nuages, ni des phénomènes atmosphériques comme les cellules de Hadley ; ils ne donnent pas par définition de cartographie sur la surface de la planète, comme par exemple la température en fonction des latitudes.

Il faut alors se tourner vers des outils plus sophistiqués et employer des simulations 3D.

Comparaison des modèles 1D et 3D dans le but d'évaluer l'habitabilité d'une exoplanète

Cet autre texte de 2018 s'attaque à cette problématique, à savoir l'évaluation de l'habitabilité d'exoplanètes à partir de simulations 1D et 3D, dans le but de mieux comparer ces deux types de modélisation.

Astronomy & Astrophysics manuscript no. 28413
November 8, 2018

©ESO 2018

Assessing the habitability of planets with Earth-like atmospheres with 1D and 3D climate modeling

M. Godolt^{1,2}, J. L. Grenfell², D. Kitzmann³, M. Kunze⁴, U. Langematz⁴, A. B. C. Patzer¹, H. Rauer^{1,2}, and B. Stracke²

La zone habitable (ZH) décrit la gamme des distances orbitales autour d'une étoile où l'existence d'eau liquide sur la surface d'une planète semblable à la Terre est en principe possible. L'applicabilité des modèles climatiques unidimensionnels (1D) pour l'estimation des limites de la ZH a été remise en question par de récentes études climatiques en trois dimensions (3D). Les études 3D peuvent calculer le taux de la vapeur d'eau, l'albédo de la glace et la rétroaction des nuages de manière cohérente et permettent donc une compréhension plus profonde et l'identification de processus climatiques pertinents. En revanche, les études de modèle 1D reposent sur moins d'hypothèses et peuvent être plus facilement appliquées à des études paramétriques complexes pour les planètes extrasolaires.

Nous évaluons dans cet article l'applicabilité des modèles climatiques 1D pour estimer l'habitabilité potentielle des planètes extrasolaires semblables à la Terre en comparant les résultats de notre modèle 1D à ceux des études climatiques 3D de la littérature. On fait varier deux propriétés planétaires importantes dans le modèle 1D : l'albédo de surface et l'humidité relative. Ces propriétés dépendent de rétroactions climatiques qui ne sont pas traitées de manière cohérente dans la plupart des modèles 1D.

Nous avons appliqué un modèle climatique radiatif-convectif 1D sans nuages pour calculer le climat des planètes semblables à la Terre autour de différents types d'étoiles de la séquence principale avec un albédo de surface et un profil d'humidité relative variables. Nous avons comparé les résultats à ceux de modèles 3D disponibles dans la littérature et étudié dans quelle mesure le modèle 1D peut approximer les températures de surface calculées par les modèles 3D.

L'étude des paramètres 1D aboutit à une large gamme de climats possibles pour une planète de la taille de la Terre avec une atmosphère semblable à la Terre, un océan comparable, le tout avec une certaine luminosité stellaire. À certaines insulations stellaires, le spectre complet des états climatiques est réalisé, c'est-à-dire aussi bien des conditions inhabitables dues à des températures de surface trop élevées ou trop basses, jusqu'à des conditions de surface habitable, selon seulement l'humidité relative et l'albédo de surface supposés. Lors du traitement de l'albédo de surface et du profil d'humidité relative comme paramètres dans les études de modèles 1D et en utilisant les contraintes d'habitabilité trouvées dans les études de modélisation 3D récentes, les mêmes conclusions sur l'habitabilité potentielle d'une planète peuvent être tirées de calculs 1D que celles obtenues par les modèles 3D.

De cet article, j'ai retenu les deux enseignements suivants :

- Concernant la comparaison des simulations 1D et 3D, objectif de l'article, on constate que les écarts donnant la température de surface moyenne de la planète avec les deux types de simulation sont de +/- 5 à 10 %, mais qu'il existe parfois des écarts pouvant aller jusqu'à +/- 30 à +/- 40 %. C'est ce que montre la figure suivante. On remarquera que pour les étoiles de type K, les valeurs de température moyenne données par les codes 1D sont ici toujours inférieures à celles données par les codes 3D d'environ -5 % à -10 %. Les meilleurs résultats sont obtenus quand l'albédo de la planète et son humidité relative ressemblent à ceux de la Terre.

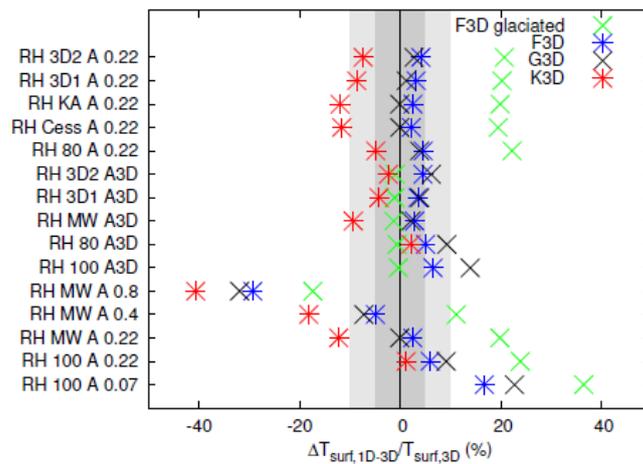


Fig. 4. Deviation of surface temperatures calculated by the 1D model from the surface temperatures calculated by a 3D model (as in Fig. 3) by Godolt et al. (2015) in percent. The gray shaded areas indicate differences of 5 and 10 %.

- *Le second enseignement est que les auteurs considèrent la planète habitable lorsque sa température moyenne dépasse 235 °K et reste en dessous de 340 °K. Il en résulte, à partir de leurs calculs paramétriques 1D, le graphe suivant. Celui-ci montre que l'éclairement de la planète par son étoile doit dépasser 0.5 S₀ du côté de la ZHE, S₀=1360 W/m² étant la constante solaire. J'ai rajouté sur ce graphe deux courbes parallèles en tirets noirs qui représenteraient la limite de la ZHE obtenues avec des valeurs d'albédo et d'humidité encadrant celles de la Terre. Et j'ai placé Ummo sur ce graphe (S=0.5=680 W/m² et T_{eff}=4580 °K) : nous sommes juste à la limite de la ZHE ! Autrement dit, puisque nous serions à la limite, il devrait faire très froid sur Ummo, et la température moyenne y serait proche de 235 °K.*

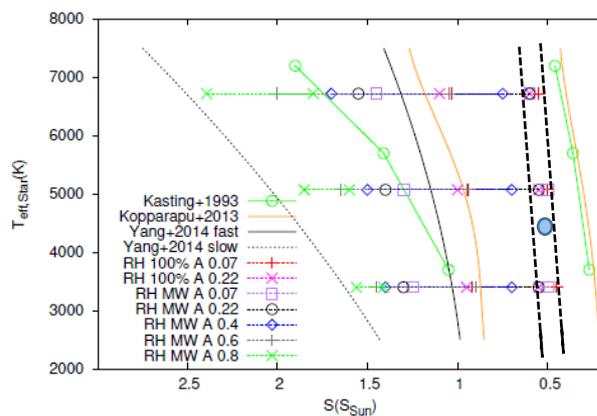


Fig. 1. Range of stellar insulations (S) for which 1D model scenarios result in habitable surface temperatures between about 235 and 340 K compared to HZ boundaries by Kasting et al. (1993), Kopparapu et al. (2013), and Yang et al. (2014) for fast and slow planetary rotation.

Ummo serait donc juste à la limite de la ZHE de loumma, avec une température moyenne de surface de l'ordre de 235 °K, et déclarée ainsi habitable : l'estimation de cette température moyenne de surface, faite avec un code 1D, est sans doute légèrement sous-estimée (5 à 10 % ?) par rapport à ce

que donnerait un code 3D. Avec une température de 245 °K à 255 °K, les conclusions restent les mêmes.

Mais pourquoi ce seuil de 235 °K permettant de déclarer la planète habitable, alors que nous sommes bien en dessous de la température de changement de phase de l'eau en glace de 273 °K ? Pour répondre à cette question, il faut rentrer plus en détail sur les capacités des modèles 3D.

Pourquoi fixer une limite basse vers 235 °K ?

1) Pour comprendre cela, il faut d'abord examiner les possibilités d'un modèle 3D.

L'article très instructif suivant ne traite pas d'exoplanètes, mais du problème dit de notre jeune Soleil « faible », tel qu'il était il y a plusieurs milliards d'années, et de la Terre. La luminosité du Soleil était plus faible de 20 % environ, et la Terre aurait dû ressembler à une boule de neige. Or, ce n'est pas ce que disent les preuves géologiques....



Investigating the early Earth faint young Sun problem with a general circulation model

M. Kunze^{a,*}, M. Godolt^b, U. Langematz^a, J.L. Grenfell^b, A. Hamann-Reinus^a, H. Rauer^{b,c}

Le problème du jeune Soleil « faible », c'est-à-dire la contradiction entre une luminosité solaire réduite de 15 à 25 % pendant l'Archéen d'une part et les preuves géologiques de températures de surface relativement élevées qui ont permis la présence d'eau liquide d'autre part, est encore largement ouvert.

Il est suggéré que le refroidissement induit par un soleil plus faible était compensé par des niveaux plus élevés de gaz à effet de serre (GES) au cours de l'archéen, mais atteindre les quantités de dioxyde de carbone (CO₂) qui sont nécessaires pour résoudre ce problème ne peut être consolidé ni par les données indirectes ni par les estimations avec d'autres GES supplémentaires.

Dans notre étude, nous étudions ce problème en utilisant le modèle climatique EMAC avec un ensemble de données d'irradiance résolu spectralement et valide pour l'époque archéenne de la Terre. Notre corpus comprend une série de simulations qui permettent d'étudier le rôle des continents, de la teneur en ozone et en oxygène de l'atmosphère, de la luminosité solaire et de la concentration en CO₂ sur le climat de l'archéen.

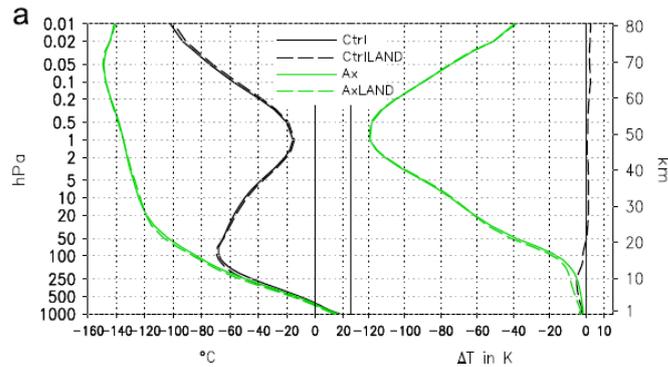
Remplacer les continents actuels par un océan global entraîne un réchauffement de la surface de + 3°K et un cycle hydrologique intensifié. La génération d'ondes planétaires et leur propagation dans la moyenne atmosphère est réduite, ce qui intensifie le jet polaire nocturne et décélère la circulation Brewer-Dobson. Des températures moyennes annuelles légèrement inférieures peuvent être trouvées pour une atmosphère anoxique. L'absence de réchauffement par l'ozone dans la moyenne atmosphère conduit à des températures très basses de cette moyenne atmosphère et un jet nocturne polaire en voie de disparition, tandis que les jets subtropicaux et la circulation de Hadley s'intensifient. La réduction de la luminosité solaire à 82% conduit à une planète recouverte de glace et à des conditions très sèches. Augmenter d'un facteur 10 le niveau atmosphérique actuel de CO₂ avec la même luminosité solaire conduit à une large ceinture équatoriale d'eau liquide tout au long de l'année, bien que la température moyenne annuelle soit inférieure au point de congélation de l'eau. En réduisant la luminosité solaire à 77% de la valeur actuelle avec la même quantité de CO₂, la zone d'eau de mer libre de glace se rétrécit, mais suggère toujours une surface habitable durant l'Archéen pour une concentration en CO₂ conforme aux données « paléosol ».

La figure et le tableau de la page suivante illustrent les résultats du modèle 3D utilisé dans l'article.

Cela concerne le Soleil et la Terre, avec différentes hypothèses de luminosité du Soleil et de concentration en CO₂ de l'atmosphère. Remarquons dans le tableau la prise en compte des nuages.

On va examiner par exemple la simulation notée « Ax3.5CO₂ », considérant la Terre comme un océan global : Ax vaut pour anoxique (pas d'O₂ ni d'O₃), 3.5 pour 77 % de la luminosité actuelle du Soleil, et CO₂ pour signifier que la proportion de CO₂ dans l'atmosphère est 10 fois la concentration actuelle soit 3670 ppmv. L'article montre que considérer la Terre comme une planète océan, sans

oxygène, ne change pas fondamentalement la température moyenne au sol ni la courbe de température dans la troposphère. Cela joue sur quelques degrés d'écart comme le montre la figure suivante : la figure de gauche donne la température en fonction de l'altitude ou ce qui revient au même en fonction de la pression atmosphérique. La figure de droite donne l'écart des températures entre la Terre réelle, une Terre de type WaterWorld (en tirets noirs), et enfin une Terre anoxique en vert. Evidemment, à partir de la tropopause et dans la stratosphère, il en va différemment comme le montre le graphique suivant. Mais ici, on s'intéresse à la température au sol.



Cette simulation Ax3.5CO2 donne une température au sol et à l'équateur de l'ordre de 5 °C, pour une température moyenne globale de -8.7 °C. Elle montre qu'il existe une bande tropicale entre 30 °S et 30 °N dans laquelle on peut trouver de l'eau liquide.

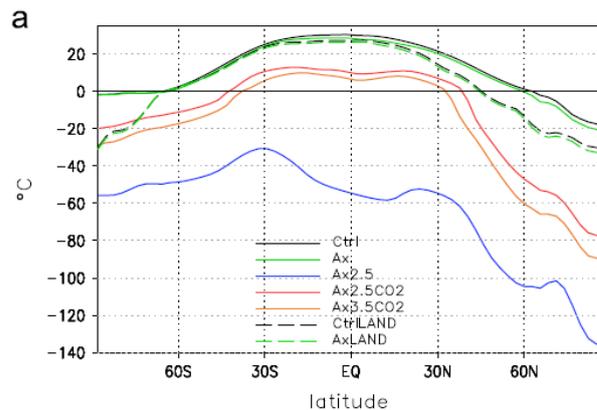


Table 4

Global mean annual averages of the surface temperature (T_{sf}), the surface albedo (A_{sf}), the planetary albedo (A_{pl}), the cloud cover, the cloud radiative forcing at the top of the atmosphere ($F_{cl/TOA}$), the surface downward directed thermal radiation ($\downarrow F_{lw/sf}$), the net solar radiation at the surface (net $F_{sw/sf}$), the surface sensible (F_{sens}) and latent (F_{lat}) heat fluxes, and the outgoing longwave radiation (OLR). The negative values indicate an energy loss.

Model runs	CtrlLAND	AxLAND	Ctrl	Ax	Ax2.5	Ax2.5CO2	Ax3.5CO2	Ax2.5CO2sc
T_{sf} (°C)	15.4	14.5	18.7	17.2	-57.1	-2.7	-8.7	-1.4
A_{sf}	0.16	0.16	0.11	0.12	0.75	0.29	0.34	0.28
A_{pl}	0.35	0.36	0.34	0.36	0.68	0.40	0.40	0.39
Cloud cover (%)	64.5	61.9	70.7	68.5	50.6	66.9	64.8	68.0
$F_{cl/TOA}$ ($W m^{-2}$)	-28.8	-26.3	-33.8	-31.0	2.8	-13.0	-3.9	-16.0
$\downarrow F_{lw/sf}$ ($W m^{-2}$)	346.7	337.1	374.0	360.6	58.7	254.2	226.8	261.2
Net $F_{sw/sf}$ ($W m^{-2}$)	154.7	163.7	153.2	162.1	62.7	126.3	122.0	123.7
F_{sens} ($W m^{-2}$)	-17.6	-18.6	-8.0	-9.4	-11.0	-19.2	-20.6	-18.0
F_{lat} ($W m^{-2}$)	-84.5	-87.8	-105.1	-108.0	-0.8	-54.3	-44.9	-54.7
OLR ($W m^{-2}$)	-231	-226.9	-232.9	-229.2	-108.8	-174.3	-183.3	-185.1

Ainsi, la simulation 3D va plus loin dans le détail dans la notion de ZH qu'avec une simulation 1D, car elle permet de mettre en évidence l'existence de zones planétaires où l'eau liquide peut exister même si la température moyenne de la planète est négative en °C. Mais il ne faut tout de même pas descendre trop bas en température moyenne si on veut avoir de l'eau liquide à l'équateur...

2) Le pourquoi de la limite vers 235 °K

Le sujet de l'article suivant est de mieux comprendre l'évolution du climat des exoplanètes de type boule de neige, cette fois ci en fonction du spectre de la lumière émise par leur étoile, en se restreignant ici aux étoiles de type F, G ou M.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 785:L9 (6pp), 2014 April 10
© 2014. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/2041-8205/785/1/L9

SPECTRUM-DRIVEN PLANETARY DEGLACIATION DUE TO INCREASES IN STELLAR LUMINOSITY

AOMAWA L. SHIELDS^{1,5}, CECILIA M. BITZ², VICTORIA S. MEADOWS^{1,5}, MANOJ M. JOSHI³, AND TYLER D. ROBINSON^{4,5}

Le climat des exoplanètes de type boule de neige (c'est-à-dire complètement recouvertes de glace) peut évoluer en fonction de l'augmentation de la luminosité de leur étoile, et les rendre ainsi aptes à accueillir la vie en surface. À l'aide d'un modèle de circulation générale, nous avons simulé la réponse climatique d'une planète à une gamme d'éclaircissements issus d'étoiles naines de type F, G ou M. Cette gamme d'éclaircissements, qui part de la planète « boule de neige » en passant par une planète avec des zones non glacées et va jusqu'à une planète chaude, fournit une mesure de l'hystérésis climatique qu'une planète peut présenter. Une planète couverte de glace avec une hystérésis climatique élevée montrerait une plus grande résistance à la perte de sa couverture de glace de surface quand on augmente l'éclaircissement puis une perte soudaine de glace une fois la déglaciation commencée. Nos simulations indiquent que l'hystérésis climatique dépend sensiblement du spectre de l'étoile hôte. Dans des conditions fixes de concentration en CO₂, une planète orbitant autour d'une étoile de type M présenterait une hystérésis climatique plus petite, nécessitant un éclaircissement plus faible pour initier la déglaciation, que les planètes en orbite autour d'étoiles plus chaudes et plus brillantes. Ceci est dû à l'absorption plus élevée du rayonnement infrarouge par la glace à la fois sur les surfaces, par les gaz à effet de serre et par les nuages dans l'atmosphère de cette planète autour d'une naine de type M. L'augmentation supplémentaire du CO₂ atmosphérique abaisse encore l'hystérésis climatique, car les planètes « boule de neige » autour d'une étoile de type M présentent une réponse radiative plus importante que les planètes « boule de neige » orbitant autour d'étoiles de type G, ceci pour la même augmentation du CO₂. Avec une hystérésis plus petite, les planètes proches du bord extérieur de la zone habitable décongèleront plus tôt dans leur histoire évolutive, et feront une transition moins abrupte quand elles sortiront de leur état boule de neige.

Autant dire que nous sommes en plein dans le sujet qui nous préoccupe, c'est-à-dire que se passe-t-il à la limite de la ZHE, et comment passe-t-on de l'état boule de neige de la planète à un état permettant d'avoir quelque part de l'eau liquide sur la planète ?

Précisons que les simulations qui seront présentées plus loin ont été faites avec les hypothèses suivantes :

- Paramètres astronomiques identiques à la Terre : jour de 24h, obliquité de 23.5°
- Planète « océan » (pas de terres), avec une profondeur de 50 m
- Pas d'ozone
- O₂ et CO₂ identiques aux taux actuels de la Terre.

Ces conditions sont acceptables pour restituer la température au sol de la planète comme nous l'avons vu lors de l'article précédent.

Le graphique suivant est particulièrement instructif. La simulation démarre par une planète « boule de neige », puis on atteint la décongélation totale en augmentant progressivement la luminosité de l'étoile (points bleus). On revient ensuite en arrière (points rouges) en diminuant la luminosité de l'étoile jusqu'à l'état « boule de neige » : ceci permet de mettre en évidence une hystérésis du comportement du climat plus ou moins prononcée selon le spectre de l'étoile (F2V, G2 (Soleil), M3V).

On remarque l'absence d'étoiles de type K dans les simulations, mais les conclusions générales leur seront de toute manière applicables et on pourra toujours interpoler.

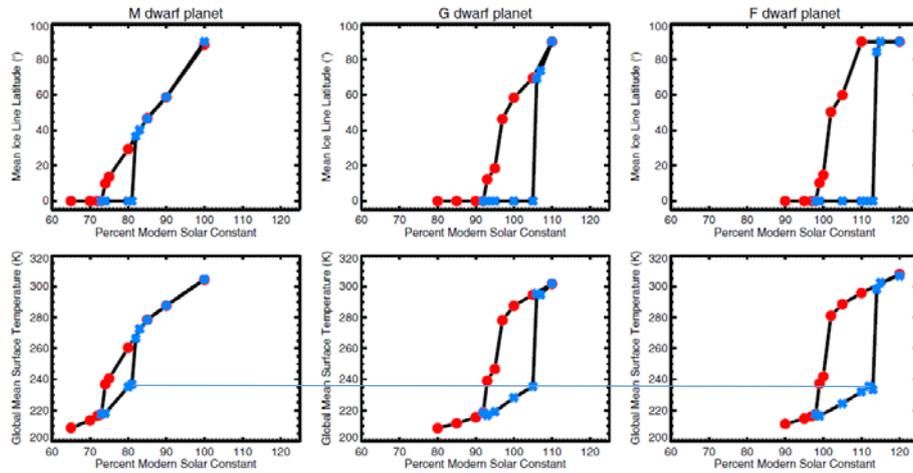


Figure 1. Mean ice line latitude (top) and global mean surface temperature (bottom) as a function of stellar flux for an aqua planet orbiting an M-, G-, and F-dwarf star. Simulations assuming an initial warm start are in red (circles). Initial cold start simulations are in blue (asterisks).

J'ai rajouté sur la figure la ligne fine en bleu correspondant à une température de 235 °K : à cette température, et quel que soit le type d'étoile, l'ajout d'un peu d'énergie supplémentaire (1% si j'en crois l'article) provenant de l'étoile fait alors basculer soudainement l'état de boule de neige de la planète vers une planète qui présente une bande équatoriale ou existe de l'eau liquide! Cela rejoint en quelque sorte la simulation Ax3.5CO₂ de l'article précédent, pour laquelle on avait une température moyenne négative (264 °K), avec une bande équatoriale (entre 30 ° S et 30 ° N) de température positive d'environ 278 °K. Ces données correspondent d'ailleurs étrangement au cas obtenu ci-dessus pour une planète autour d'une étoile de type spectral M mais il s'agit certainement d'une pure coïncidence.

Il semblerait donc d'après cette étude qu'il y ait un effet à seuil de décongélation à partir de 235 °K qui conduit rapidement à augmenter la température moyenne de la planète d'une valeur importante ΔT (+30 °K pour une étoile de type M à + 50 °K pour une étoile de type G), autorisant l'apparition de l'eau liquide sur une bande équatoriale de largeur $\pm\theta$ ($\pm 30^\circ$ pour une étoile de type M à $\pm 70^\circ$ pour une étoile de type G).

⇒ Prendre 235 °K comme limite basse de l'habitabilité d'une exoplanète se base donc sur l'hypothèse que la planète (alors en forme de boule de neige), va soudain décongeler partiellement (*) et basculer vers un état de température moyenne de 235 °K + ΔT , la valeur minimum atteinte étant de 265 °K.

Les valeurs de ΔT et de θ dépendent du type spectral de l'étoile. Il est bon de rappeler ici que tout ceci s'applique à une planète de type Terre actuelle, avec les données d'entrée telles que listées plus haut, et avec un taux de CO₂ correspondant à celui de la Terre actuelle.

(*) L'article fournit des explications claires et détaillées sur ce qui se passe au moment de la décongélation : pour ne pas alourdir cette partie, j'ai placé ces explications en Annexe 2.

Conclusion

La notion de zone habitable d'une étoile évolue régulièrement en fonction des progrès des codes de simulation 3D, cette connaissance étant nécessaire pour bien choisir les cibles d'observation intéressantes parmi les exoplanètes déjà recensées.

Cette petite étude bibliographique montre que le côté extérieur « froid » de la zone habitable se resserre progressivement au fil des études ; si on raisonne en terme de constante solaire S_0 (1360 W/m^2), on constate qu'il faut une irradiation minimale de l'ordre $S_0/2$ pour déclarer maintenant une planète habitable. Cette valeur $S_0/2$ va de pair avec une température moyenne de la planète d'environ 235 °K , laissant penser alors à une planète de type « boule de neige », ce qui peut paraître incohérent. Mais cette température se situerait à un seuil de transition conduisant à une déglaciation partielle de la planète plus ou moins étendue selon le type spectral de l'étoile : la température moyenne de la planète augmente rapidement (à l'échelle astronomique) de telle manière qu'il commence à exister une bande équatoriale avec une température supérieure à 273 °K , et donc possédant de l'eau liquide. Ce phénomène à seuil viendrait principalement d'un changement local de l'albédo et de l'effet des nuages, le résultat étant d'augmenter l'énergie reçue au sol par la planète, qui doit alors revoir son bilan énergétique global en augmentant sa température au sol. (Voir annexe 2).

Pour Ummo, qu'en déduit-on ?

Premièrement, Ummo est juste à la limite de la ZH de Ioumma, avec une irradiation de 680 W/m^2 : nous nous attendons donc à trouver une planète avec une température moyenne de 235 °K .

Et effectivement, les simulations 1D pour le couple Ummo-Ioumma donnent une température moyenne située aux alentours de ces fatidiques 235 °K ! (Voir annexe 1).

C'est un bon début, mais :

- Si la transition décrite par la littérature n'a pas encore eu lieu, la planète est de type boule de neige.
- Si la transition a eu lieu, alors la température moyenne serait d'au moins 265 °K ($235\text{°K} + \Delta T$ avec $\Delta T = +30 \text{ °K}$ pour une étoile de type M, pouvant aller jusqu'à $+50 \text{ °K}$ pour une étoile de type G). Ceci serait compatible de l'existence d'eau liquide à l'équateur comme déjà expliqué dans l'article 36 « Habitabilité de la planète Ummo ».

Deuxièmement, cette étude bibliographique, qui donne des pistes intéressantes, ne remplace en aucun cas l'utilisation d'un code 3D alimenté par les données du couple {Ummo, Ioumma} : un tel code saurait prendre en compte de nos jours tous les paramètres utiles pour ce genre d'étude. Ce type d'outil sera-t-il bientôt disponible en ligne sur internet ?

Troisièmement, en forme plutôt de remarque : nous avons également vu que la prise en compte de l'ozone et de la stratosphère ne sont pas utiles dans les simulations 3D quand on s'intéresse à la troposphère (zone des nuages) et à ce qui se passe à la surface de la planète du point de vue atmosphérique... Les explications « stratosphériques » fournies par 312_OAY sur ce thème sont non seulement incompréhensibles mais de surcroît inutiles....

En conclusion de cette étude bibliographique, une incertitude demeure sur la température moyenne au sol de Ummo permettant de répondre à la question : Ummo, planète glaciaire ou planète habitable ? L'enquête n'est pas close et à ce stade, seul un code 3D peut trancher.

Annexe 1 : simulation du climat de la planète Ummo autour de son étoile Ioumma avec un code 1D

Le code utilisé est le programme 1 D disponible à l'adresse suivante :

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

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

Il faut alimenter la simulation avec un certain nombre d'informations.

Paramètres du couple étoile-planète

Etoile

Type K4 K5

Température 4580 °K

Luminosité 0.22 fois celle du Soleil soit $1362 \times 0.22 = 300 \text{ W/m}^2 @ 1 \text{UA}$

Planète

Distance à l'étoile 0.664 UA ce qui fait environ **$680 \text{ W/m}^2 @ 0.664 \text{ UA}$** soit $S = 680/1362 = 0.5$

Gravité à la surface 11.9 m/s^2

Couverture océanique 62 %

Pression à la surface 2.8 bars

Période de rotation autour de l'étoile 232 jours

Excentricité de l'orbite : 0.0078

Azote : 66 %

Oxygène : 23%

Quantité de CO2 : 1.8 %

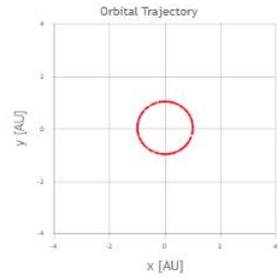
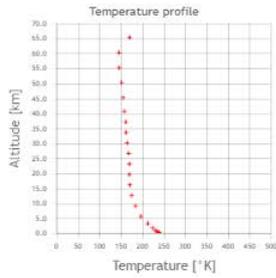
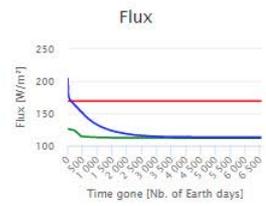
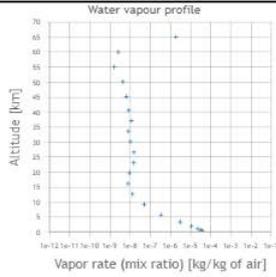
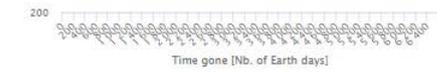
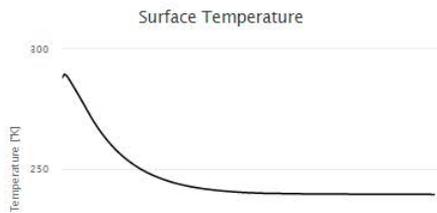
Quantité de méthane : 0.02 % (gaz correspondant à 25 fois le CO2 du point de vue de l'effet de serre, ce qui revient à rajouter 0.5% de CO2).

Vapeur d'eau : 1%

Ozone : quantité inconnue.

Voici un exemple de simulation GCM-1D ci-après, sachant qu'on ne peut pas régler finement la quantité de CO2 (valeur de l'exemple 10%) et que l'ajustement via les curseurs reste perfectible !

La température moyenne de surface obtenue dans cet exemple est de 239 °K. On notera que la température au niveau de la stratosphère est simulée sans ozone (voir le texte), mais que la température de la troposphère et au sol sont bien simulées. ***L'estimation par interpolation de la température au sol pour le taux de CO2 donné additionné du taux de méthane se situe vers 232 °K.***



Parameters

Flux at 1 AU:
676.93 W/m²

Distance:
1 UA

Eccentricity:
0

Period:
232.265 days

Quantity of CO2:
10 %

Star Type:
Blackbody

Temperature:
4584 °K

Initial parameters

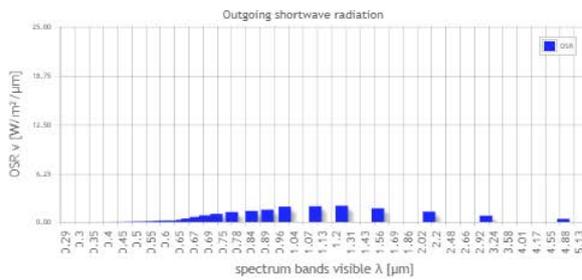
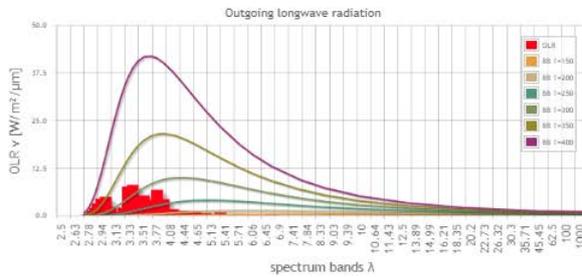
Quantity of liquid water at surface:
1000 m

Oceanic coverage:
62 %

Gravity:
11.906 m.s-2

Pressure:
2.8 bar

Start Stop Restart



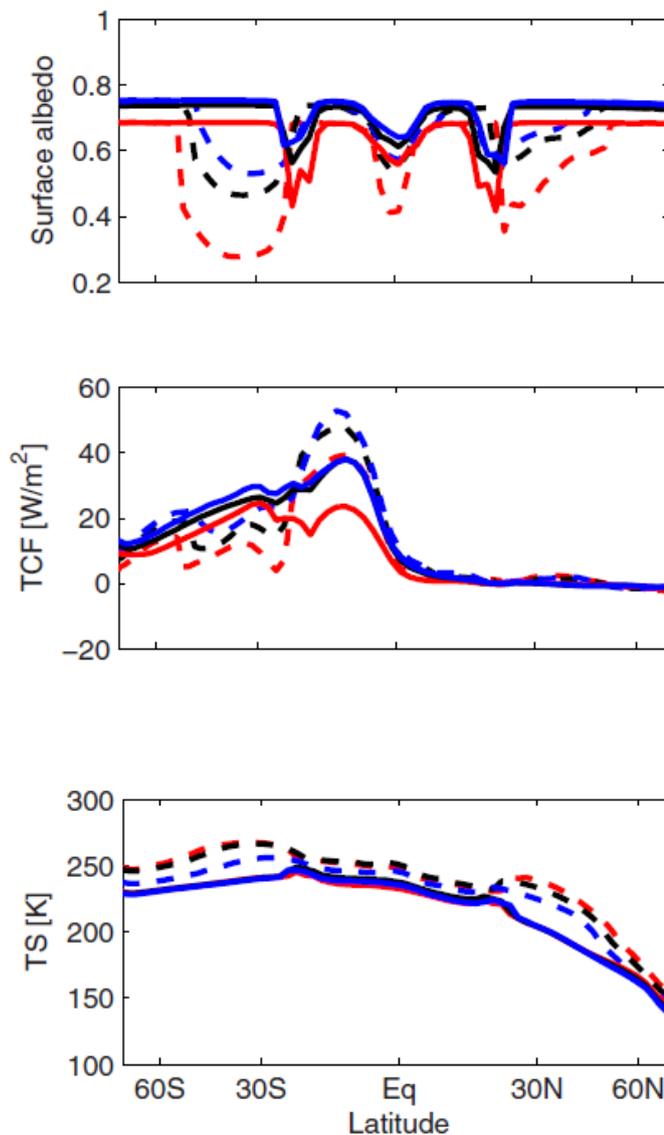
Annexe 2 Décongélation d'une planète de type boule de neige.

Cette annexe se base sur l'article de Shields (2014) cité dans le texte. Les figures suivantes comparent différents paramètres, calculés pendant l'hiver dans l'hémisphère Nord. Ces paramètres sont principalement l'albédo, l'effet des nuages et finalement la température de surface, le tout en fonction de la latitude.

Les figures comparent l'état « boule de neige » (en traits pleins), et ce qui se passe juste au moment de la déglaciation (tirets). Les couleurs rappellent le type spectral de l'étoile : {rouge, M3}, {noir, G2}, {bleu, F2}.

La décongélation se passe essentiellement dans l'hémisphère Sud puisque c'est l'été.

L'albédo chute de manière significative entre 20 °S et 50 °S : cela signifie que plus d'énergie de l'étoile arrive au sol. L'apparition des nuages a pour effet de fournir un bilan radiatif (TCF) meilleur, surtout entre le tropique Sud et l'équateur. L'ensemble de ces deux facteurs a pour effet d'augmenter globalement la température de surface de la planète TS, avec un plus pour l'hémisphère Sud.



Au moment de la décongélation, dans l'hémisphère Sud et à la latitude de 30 °S, on passe d'une température « boule de neige » de 238°K à une température de 266 °K, sous l'effet conjugué de la chute de l'albédo et de la présence des nuages. On voit bien l'augmentation générale de la température de surface quelle que soit la latitude.