

## « Exoplanètes habitables, mais qui plus est fertiles ? »

**Résumé** La théorie de la différenciation chimique des planètes conforte l'origine profonde de l'hydrogène naturel sur Terre, mais elle a d'autres conséquences : elle prédit ainsi un rapport atomique N/P de 16 pour notre planète dans son ensemble, singulier dans le système solaire. Il se trouve coïncider avec le rapport nitrates/phosphates prévalent partout dans nos océans, découvert par Redfield en 1934, et lié à leur fertilité : transposée à un système stellaire quelconque, la prédiction permet de proposer, une condition de fertilité des exoplanètes situées à l'intérieur de la zone habitable de leur étoile-hôte. Un tri de la base de données sur des exoplanètes tenue à jour par la NASA permet d'identifier à date une cinquantaine d'exoplanètes habitables et potentiellement fertiles.

**Mots-clés** Rapport de Redfield, exobiologie, azote, phosphore, exoplanètes, ADN.

**Abstract** "Habitable exoplanets: are they fertile?"

The theory of chemical differentiation of planets argues in favour of a deep origine of natural hydrogen on Earth. However other consequences follow: for instance an atomic ratio N/P of 16 is predicted globally for our planet, a singularity in the Solar System. This ratio happens to coincide with the nitrates/phosphates ratio discovered by Redfield in 1934, ubiquitous in our oceans, and linked to their fertility. Transposed to any stellar system, the prediction allows to formulate a condition of fertility of exoplanets inside the habitable zone of their host star. Screening the NASA exoplanets archive with this criterion allowed to sort out a subset of 50 potentially fertile analogs of the Earth.

**Keywords** Redfield ratio, exobiology, nitrogen, phosphorus, exoplanets, DNA.

Dans cet article, je reviens sur les résultats de mon travail récemment publié dans « The Astrophysical Journal » [1] : c'est une conséquence du modèle « photophysique » de la différenciation chimique des planètes [2]. En effet cette théorie me permet de prévoir la composition chimique globale de la Terre, qui n'est pas mesurable directement, faute d'accès en profondeur sous la croûte terrestre superficielle. En autres, ce modèle donne le rapport atomique global azote sur phosphore (N/P) des planètes du système solaire en fonction de leur distance orbitale  $d$  au soleil (*figure 1*).

Ce profil radial dans le système solaire s'avère très particulier, avec un minimum prononcé (mathématiquement un point de rebroussement) pour la Terre, à  $d = 1$  unité astronomique (u.a.). N/P croît rapidement pour  $d < 1$ , et  $d > 1$ . Aux confins du système solaire, ce rapport tend vers une valeur qui correspond à celle de la couronne solaire, que l'on admet représentative de la composition du nuage atomique primordial à l'origine de ce système.

Cette position singulière de la Terre dans le système solaire peut encore être illustrée par la *figure 2*, qui exprime que selon ce modèle « photophysique » notre planète est, au sein du système solaire, la plus différenciée de toutes sur le plan chimique par rapport à la composition primordiale : l'origine de cette situation est discutée en détails dans [2].

Au minimum correspondant à la position de la Terre, N/P vaut 16 : cette valeur coïncide de manière remarquable avec le rapport quasi constant que l'on mesure partout dans les océans, appelé du nom de son découvreur « rapport de Redfield » [3]. Ce rapport est associé au développement du plancton végétal (phytoplancton). Il en reflète la composition chimique, ainsi que sa dépendance en nutriments chimiques essentiels que sont les ions nitrates et phosphates. Ces derniers sont par exemple les constituants de base, avec le potassium, des engrais agricoles couramment désignés sous le sigle « NPK ». La mémoire chimique des êtres vivants, codée dans l'ADN, et transcrite par l'ARN en vue de la reproduction

cellulaire, repose sur la structure de ces biopolymères, dont le squelette est constitué d'un enchaînement de phosphates, « branche » qui porte les « feuilles » que sont les molécules azotées Adénine, Thymine, Guanine et Cytosine, véritables lettres du code génétique universel de la vie [4]. Il a été montré que le rapport  $N/P = 16$  correspond bien à la composition chimique de cette machinerie fondamentale de la vie [5]. Pour revenir au phytoplancton, constitué d'algues unicellulaires, il faut réaliser qu'il est la base de la pyramide alimentaire marine, et par ailleurs à l'origine, et toujours le principal acteur, de la photosynthèse productrice de l'oxygène atmosphérique sur Terre.

La condition nécessaire à l'émergence puis à l'évolution de la vie quelque part dans l'univers serait donc l'existence d'un océan stable, contenant nitrates et phosphates dans ce rapport optimal, lequel inversé s'écrit P/N maximal : un monde déficitaire en phosphore par rapport à l'azote serait donc impropre à l'apparition de la vie comme au processus évolutif, même s'il leur offrait en surface des étendues océaniques suffisamment irradiées par la lumière stellaire, c'est-à-dire une niche habitable au sens envisagé jusqu'à présent par les exobiologistes. Ce rapport N/P particulier peut donc bien être vu comme indispensable à la fertilisation d'une exoplanète pour peu qu'elle soit située dans la zone habitable de son étoile, c'est à dire soumise à une température de surface compatible avec l'existence d'eau liquide.

Concernant la « niche de naissance » initiale de la vie sur notre planète, il est souvent proposé (voir par exemple [6]) qu'elle soit située au fond des océans, au voisinage des bouches hydrothermales ou « fumeurs » parsemant les rides médio-océaniques, ces joints d'expansifs des plaques tectoniques d'où s'épanche le matériel magmatique issu du manteau, en basaltes constitutifs des planchers océaniques. Les fluides chauds (300 à 400 °C) émis par ces fumeurs constituent en effet les sources d'énergie et de nutriments qui ont permis, très tôt dans l'histoire géologique, à des écosystèmes

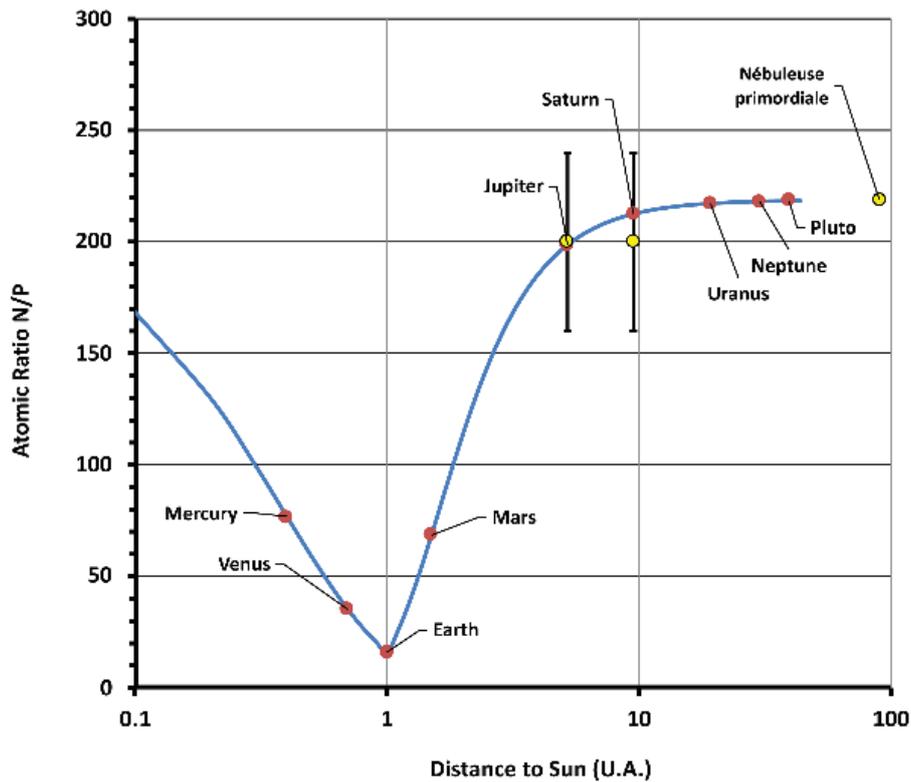


Figure 1 - Rapport atomique N/P en fonction de la distance au Soleil : en trait plein, la prédiction théorique du modèle « photophysique » ; les prédictions pour les planètes de notre système solaire sont repérées par les cercles pleins rouges. Les valeurs expérimentales des rapports molaires N/P sont repérées par les cercles pleins jaunes, avec une barre d'erreur dans les cas de Jupiter et Saturne, pour lesquels ces rapports sont approximés par les rapports molaires  $\text{NH}_3/\text{PH}_3$  moyens dans les atmosphères. La comparaison théorie-expérience est satisfaisante quand elle est possible. Le rapport Théorique N/P prédit pour la Terre est exactement 16.

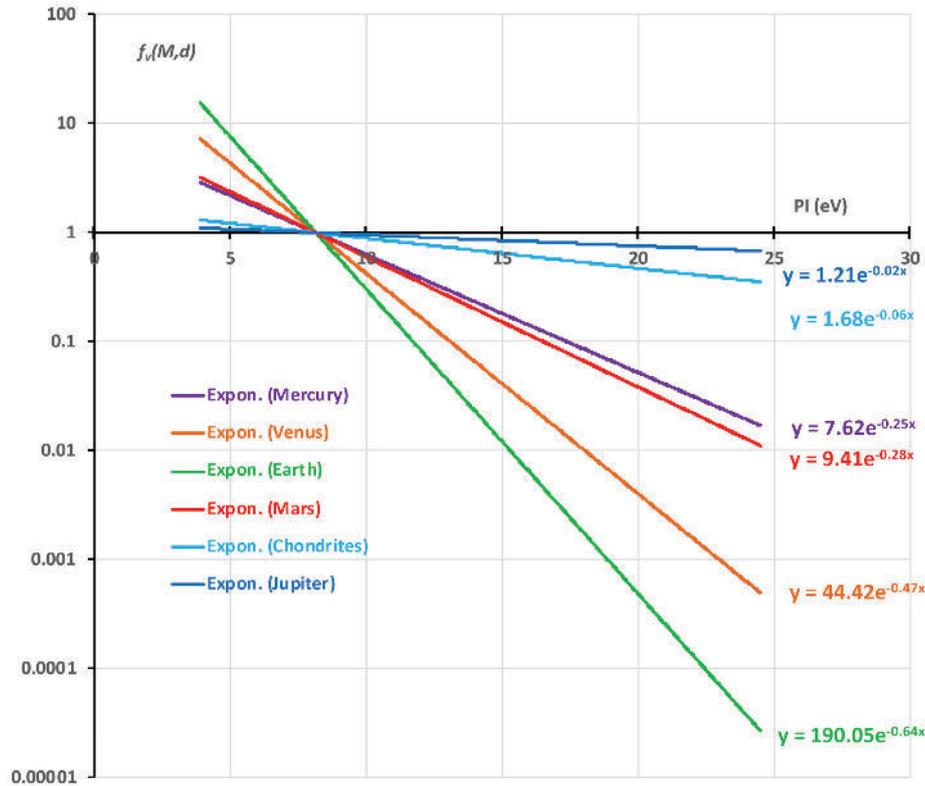


Figure 2 - En ordonnées (échelle logarithmique) les abondances relatives des éléments normalisées par rapport au silicium, prévues par le modèle photophysique pour les 5 premières planètes du système solaire et les météorites issues de la ceinture d'astéroïdes. En abscisses le premier potentiel d'ionisation des éléments chimiques. La Terre est la planète la plus différenciée par rapport à la nébuluse primitive (de composition identifiable à celle de la couronne solaire). Au-delà de Jupiter, il n'y a pratiquement plus de différenciation chimique. En deçà de la Terre, la différenciation décroît (pentes des droites décroissantes dans l'ordre Terre > Vénus > Mercure). Entre la Terre et les confins du système solaire elle décroît à nouveau (pentes des droites décroissantes dans l'ordre Terre > Mars > Astéroïdes > Jupiter, etc...).

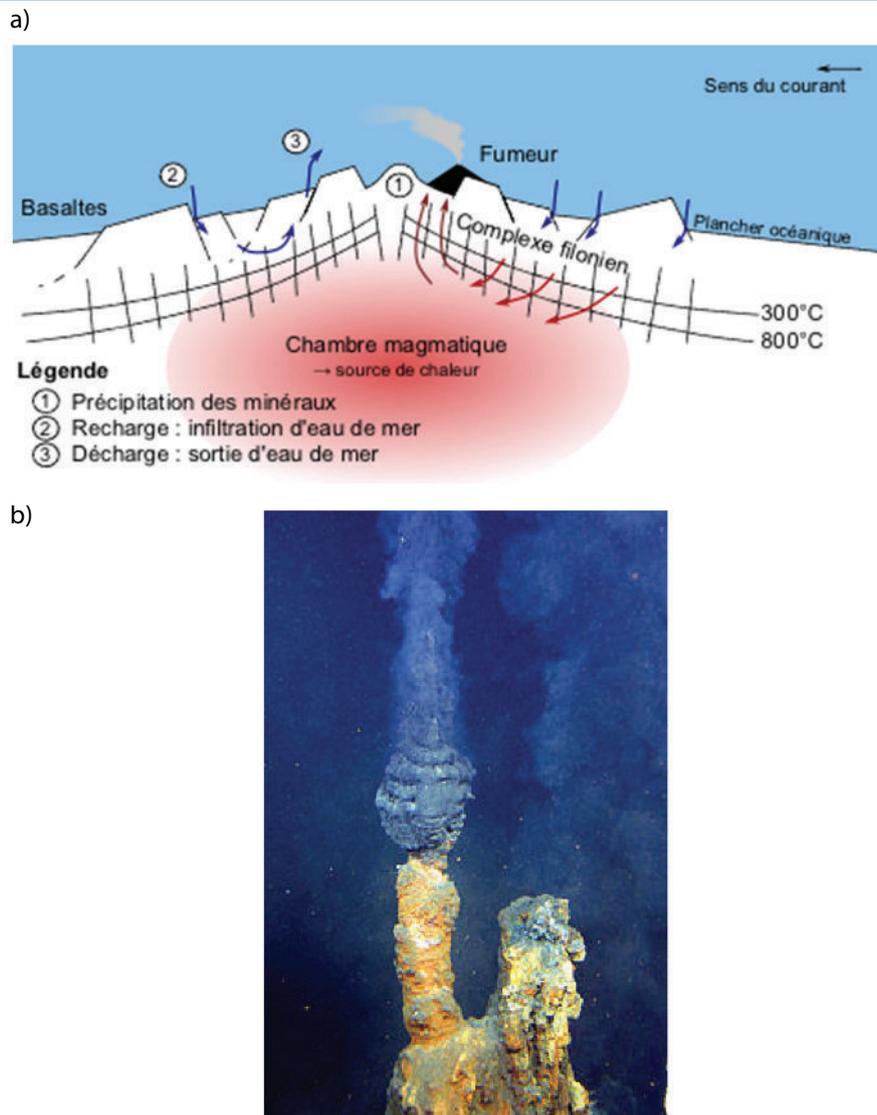


Figure 3 - Les « fumeurs » profonds des rides médio-océaniques.

A) Coupe d'une ride ; B) Photographie sous-marine d'un événement hydrothermal ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Mont\\_hydrothermal](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mont_hydrothermal)).

endémiques très riches de se constituer et se diversifier isolément, sans aucun apport de lumière solaire (figure 3). Pour ma part j'y souscris d'autant plus volontiers que le rapport N/P que je prédis reflète la composition chimique globale de la planète, et son empreinte au sein des océans implique des canaux de communication entre ces derniers et le volume intérieur : les rides médio-océaniques sont à coup sûr une de ces portes d'entrée, les volcans sous-marins peuvent en être d'autres. C'est pourquoi, en vue de tester mes prédictions, j'ai exploité les milliers d'analyses chimiques de ces fluides hydrothermaux sous-marins compilées dans la base de données MARHYS [7]. Le tableau I témoigne d'un excellent accord entre prédictions et valeurs moyennes observées pour les rapports atomiques C/O, C/N et N/P. Au-delà des écosystèmes profonds, la fertilisation d'ensemble des océans par l'apport continu de nutriments via les fumeurs profonds paraît donc tout à fait plausible.

Dès lors, il était légitime de chercher à généraliser ces considérations à un système stellaire quelconque, le modèle photophysique n'étant a priori pas particulier à notre système solaire. Pour cela, il était nécessaire de transposer le rayon orbital particulier de la Terre aux conditions d'une autre étoile hôte. Cette distance critique,  $d^*$  ne dépend que de deux paramètres, la

Tableau I - Comparaison des rapports molaires prédits avec ceux déduits, en moyenne, des analyses chimiques des fluides hydrothermaux profonds émis par les « fumeurs » des rides médio-océaniques, fournies par la base de données MARHYS [7].

	Prédit	Observé
<b>C/O</b>	2,3	2,3
<b>C/N</b>	30,1	29,7
<b>N/P</b>	16,0	16,6

température de surface  $T_{PST}$  de la protoétoile correspondante, et son rayon  $R_{PST}$  : la différenciation chimique s'établit en effet au stade du disque protoplanétaire, précurseur de la condensation des planètes dans le plan écliptique. Supposant ces paramètres dans les mêmes rapports à la température  $T_{ST}$  et au rayon actuels de l'étoile  $R_{ST}$  que ceux déjà déterminés entre Protosoleil et Soleil [2] une mise à l'échelle est possible. D'expressions analytiques homologues à celles qui m'ont permis de tracer la figure 1, découle pour une exoplanète donnée une prédiction du rapport N/P fonction de sa distance orbitale  $d_{ST}$  à l'étoile hôte et de la distance critique  $d^*$  pour ce système. Une correction doit encore être apportée pour tenir compte des différences de métallicité entre les étoiles hôtes,

Tableau II - Exoplanètes sub-joviennes fertiles situées dans la zone habitable de leurs étoiles hôtes : L'éloignement de l'étoile hôte est donné en pc (parsec, 1 pc ~3,26 années-lumière) ;  $d^*$  (u.a.), distance critique à l'étoile hôte (u.a. : unité astronomique) ;  $d_{Star}$  (u.a.) : distance de l'exoplanète à son étoile hôte ;  $\rho_{N/P}^{corr}(d_{Star}/d^*)$  : rapport atomique azote sur phosphore prédit, corrigé de la métallicité ; critère de fertilité adopté  $11 \leq \rho_{N/P}^{corr}(d_{Star}/d^*) \leq 22$  ; zone habitable HZ définie par  $-0,20 \leq \text{Log}_{10}(d_{Star}/d^*) \leq 0,20$  ;  $T_{Pl_{rec}}^{eq}$  : Température d'équilibre de la planète en Kelvin ; Masse de la planète rapportée à la masse terrestre ; Densité en  $\text{g.cm}^{-3}$  ; Gravité de surface rapportée à la gravité terrestre en g ; [Fe/H] : métallicité de l'étoile hôte.

Nom de la planète	Eloignement de l'étoile hôte (pc)	$\text{Log}_{10} \left( \frac{d_{Star}}{d^*} \right)$	$\rho_{N/P}^{corr} (d_{Star}/d^*)$	$T_{Pl_{rec}}^{eq}$ (K)	Masse	Densité ( $\text{g.cm}^3$ )	Gravité (g)	[Fe/H]
55 Cnc f	12,6	-0,065	15,6	252	47,8	-	-	0,35
Kepler-1661 b	410,6	-0,056	18,0	247	17,0	1,62	1,14	-0,12
Kepler-22 b	194,6	-0,051	21,5	262	36,0	14,72	6,36	-0,29
HD 191939 g	53,6	-0,047	18,8	254	13,5	-	-	-0,15
HD 40307 g	12,9	-0,044	16,9	234	7,1	-	-	-0,32

c'est-à-dire des différences d'abondances relatives des éléments chimiques traduisant les degrés d'avancement variés de la nucléosynthèse dans les nuages interstellaires primordiaux. La métallicité d'un système stellaire est généralement décrite par l'abondance relative du fer par rapport à l'hydrogène. La métallicité notée  $M = [\text{Fe}/\text{H}]$  a pour référence 0 dans notre système solaire. Il s'avère que la proximité à la valeur 1 du rapport  $d_{ST}/d^*$ , mesurée par exemple par  $-0,2 < \text{Log}_{10}(d_{ST}/d^*) < 0,2$ , fournit un critère d'appartenance à la zone habitable de l'étoile pleinement compatible avec d'autres critères reconnus, tels ceux de Kappara et al. [8]. Pour une exoplanète appartenant à une zone habitable, un critère de fertilité sera enfin donné par une valeur de N/P contenue dans un intervalle centré sur 16, compatible avec les fluctuations connues pour la composition des diverses espèces terrestres de phytoplancton (typiquement 11 à 22). Les corrections de métallicité s'avèrent non négligeables, mais de second ordre.

La base de données publique de la NASA [9] recense aujourd'hui plus de 5000 exoplanètes, avec leurs caractéristiques et celles de leurs étoiles hôtes : pour environ la moitié d'entre elles, les données sont suffisantes pour calculer les critères de tri évoqués ci-dessus. Au bout du compte, 49 exoplanètes seulement ressortent comme à la fois habitables et potentiellement fertiles. Leur liste est détaillée dans l'article original. Le tableau II en présente un extrait, limité aux planètes dites « sub-joviennes » (masse inférieure à 50 masses terrestres, à comparer à 318 pour Jupiter). Si la masse exoplanétaire est connue dans la majorité des cas, il faut en outre disposer d'une estimation de la densité pour en déduire la gravité de surface : pour notre sélection de 49 ce n'est le cas que pour Kepler-1661b et Kepler-22b, incluses dans le tableau II. En définitive, c'est la première qui pourrait s'avérer la plus hospitalière pour des êtres tels que nous. Elle est malheureusement distante de plus de 1200 années-lumière. Une analyse statistique plus détaillée des résultats de ce tri permet d'estimer la proportion d'exoplanètes potentiellement habitables et fertiles à 2,4 % du total connu, soit environ 1/3 des exoplanètes appartenant à la zone habitable de leur étoile. Les exoplanètes identifiées sont réparties jusqu'à 1000 parsecs de notre Terre, ce qui les situe dans le même bras de notre galaxie, la voie lactée, que notre Soleil. La Voie Lactée contenant de l'ordre de 300 milliards d'étoiles, ça fait tout de même de l'ordre de 7 milliards d'exoplanètes potentiellement fertiles, s'il n'y en avait ne serait-ce qu'une seule par étoile. D'autres galaxies, il y en a aussi des milliards. Mais, toujours d'après notre échantillon, ces planètes fertiles seraient espacées en moyenne d'environ 20 parsecs (65 années-lumière). Nous

sommes donc loin d'être seuls dans l'univers, mais il n'est pas étonnant que nous ne soyons pas embêtés par nos toujours très lointains voisins.

Un peu de philosophie, ou plutôt de métaphysique, en guise de conclusion : c'est comme si le Bon Dieu (ou le Grand Manitou si vous préférez), dans sa très grande sagesse, avait bien fait de mettre tant d'espace-temps entre les mondes fertiles : en effet comme les choses commencent à se gâter localement au bout de quelques milliards d'années d'évolution jusqu'à des êtres comme nous, l'anthropos, ça laisse assez de temps pour que ce dernier, en tant qu'espèce, ou bien évolue vers assez de lucidité pour surmonter sa vanité, ou bien s'auto-éradique avant d'avoir pu trouver le moyen technique de mener des guerres interplanétaires. Et si quelque part l'être vivant a suffisamment évolué pour profiter sagement de sa courte vie, en harmonie avec ses semblables et son exoplanète dont il prend grand soin, il n'a peut-être pas très envie d'aller la risquer cette bonne vie, chez des sauvages... Pour nous, les Terriens, ce n'est pas gagné, même si en principe la voie évolutive est déjà tracée [10]. Bon Dieu, je te rends donc grâce pour ta sagesse, même si tu n'existes que dans mon imagination, et même si l'humanité à laquelle j'appartiens finit stupidement par éteindre sa lumière !

[1] H. Toulhoat, Screening Earth Analog Exoplanets on the Basis of a Predicted Nitrogen over Phosphorus Ratio, *The Astrophysical Journal*, **2023**, 958(2), p. 124-139, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acfc4e> (en accès libre).  
 [2] H. Toulhoat, V. Zgonnik, Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue, *The Astrophysical Journal*, **2022**, 924(2), p. 83-101, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac300b> (en accès libre).  
 [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport\\_de\\_Redfield](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport_de_Redfield)  
 [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide\\_désoxyribonucléique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_désoxyribonucléique)  
 [5] I. Loladze, J.J. Elser, The origins of the Redfield nitrogen-to-phosphorus ratio are in a homeostatic protein-to-rRNA ratio, *Ecology Letters*, **2011**, 14, p. 244-250.  
 [6] Conférence AFA de Nathalie Cabrol « L'énigme de la vie dans l'Univers », <https://youtu.be/2z3-4c-Ekb0?si=ggoZbhjeFkDAwmH>  
 [7] A. Diehl, W. Bach, MARHYS (MARine HYdrothermal Solutions) Database: A Global Compilation of Marine Hydrothermal Vent Fluid, End Member, and Seawater Compositions, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2020**, 21, e2020GC009385, <https://doi.org/10.1029/2020GC009385>; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.921794>  
 [8] R.K. Kopparapu et al., Habitable zones around main-sequence stars: new estimates, *The Astrophysical Journal*, **2013**, 765(2), p. 131-147, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/131> (en accès libre).  
 [9] NASA exoplanets archive, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>  
 [10] <https://www.psychanalyseintrospective.org>

**Hervé TOULHOAT,**

Collaborateur émérite, Laboratoire de Réactivité de Surface (LRS, UMR CNRS 7197), Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, Paris.

\* herve.toulhoat@orange.fr