

Des étoiles à la vie

Rôle de la photochimie dans les origines et le développement de la vie

Marie-Christine Maurel

« Mais si (et oh ! quel grand si) nous pouvions concevoir, dans quelque petite mare chaude, en présence de toutes sortes de sels d'ammoniaque et d'acide phosphorique, **de lumière**, de chaleur, d'électricité, etc., qu'un composé de protéine fût chimiquement formé, [...], aujourd'hui [il] serait instantanément dévoré ou absorbé, ce qui n'aurait pas été le cas avant l'apparition des créatures vivantes », **Charles Darwin** à Joseph Hooker, 1871.

Résumé Au moment de l'apparition de la vie (3,8-3,5 milliards d'années), le Soleil était moins brillant qu'aujourd'hui et la présence d'eau liquide, indispensable à la vie, ainsi que la formation des premiers organismes sur la Terre archéenne sont à corrélés avec cet environnement de lumière. La biomasse primitive a bénéficié de photosynthèses primaires dont on retrouve les traces fossiles dans les stromatolithes du précambrien. La plupart des théories sur les origines de la vie propose qu'à partir de molécules organiques simples, présentes dans l'environnement primordial, les briques élémentaires se sont organisées pour produire d'abord le monde ARN puis le monde vivant actuel. Cet article examine le rôle de la photochimie au cours du passage du monde prébiotique au biologique.

Mots-clés Chimie prébiotique, origines de la vie, photochimie, monde ARN.

Abstract **Role of photochemistry in the origin and development of life**
At the time of the appearance of life (3.8-3.5 Ga), the Sun was less brilliant than it is today, and the presence of liquid water, essential for life, as well as the formation of the first living organisms on the archaean Earth, are to be correlated with the light conditions in the environment. The primitive biomass benefited from primary photosynthesis as attested by fossil tracks in pre-cambrian stromatolites. Most theories on the origins of life propose that from simple organic molecules, present in the primordial environment, the elementary building blocks of life organized themselves, first forming the RNA world and then today's life. This paper examines the role of photochemistry in the passage from the prebiotic world to the biological world.

Keywords Prebiotic chemistry, origins of life, photochemistry, RNA world.

La Terre est la seule planète du système solaire sur laquelle on a trouvé de la vie à ce jour. Les planètes internes, dites telluriques – Mercure, Vénus, Terre et Mars – et les planètes externes, géantes et gazeuses – Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune – qui gravitent autour du Soleil constituent notre système solaire. On détecte de grandes quantités d'eau dans l'espace, et l'on sait aujourd'hui que l'eau et la vie sont intimement liées. L'eau est présente partout dans l'Univers, dans les nuages protoplanétaires autour d'étoiles jeunes, sous forme de gaz (nuages, vapeur) dans les atmosphères et dans l'espace, sous forme solide dans les comètes (glace) et sur Terre (glaciers, icebergs). Mais l'eau sous forme liquide est rare, et la Terre est la seule planète du système solaire où l'on trouve de l'eau à l'état liquide en surface et en abondance puisqu'elle recouvre plus des deux tiers de l'étendue du globe. C'est pour cela que la recherche de vie extraterrestre se focalise essentiellement sur les planètes où il y a et où il y a eu de l'eau.

Si la distance de la Terre au Soleil (1 UA) a contribué au fait que l'eau soit maintenue sous forme liquide, Mars (1,5 UA) aurait pu bénéficier de cet avantage lié à la proximité. Mais la

planète rouge a perdu son atmosphère car, probablement trop peu massive pour avoir un champ magnétique permanent, elle ne possède pas de bouclier magnétique protégeant l'atmosphère contre l'érosion due aux particules chargées du vent solaire.

Soulignons enfin que la quantité d'eau liquide terrestre a été fortement enrichie, il y a 4 milliards d'années, par des apports provenant de comètes et autres astéroïdes. Pour que ces objets entrent dans le système solaire interne, il a fallu que celui-ci soit soumis à de fortes instabilités, et en particulier à une migration importante de Jupiter et de Saturne. Ce chaos originel est-il propre au système solaire ou se produit-il ailleurs dans notre galaxie (ou dans notre Univers ?) ?

Dès les premiers instants, un environnement de lumière

Au moment de l'apparition de la vie (il y a 3,8 à 3,5 milliards d'années), le jeune Soleil émettait 70 % de la lumière actuelle [1]. La présence d'eau liquide, les étapes prébiotiques et la formation de proto-vies concurrençaient donc d'autres cieux, une

dynamique géophysique propre au Soleil et à la Terre archéenne.

Au fur et à mesure de son activité, l'hydrogène qui compose notre étoile se transforme en hélium, le cœur solaire devient plus dense, plus lourd, plus chaud, augmentant ainsi progressivement son éclat. Ainsi, pour que l'eau soit maintenue à l'état liquide, la zone « tempérée », appelée parfois zone « d'habitabilité », est relativement large, entre 1 et 1,5 UA, distances respectives qui séparent, comme nous l'avons vu plus haut, le Soleil de la Terre et de Mars. Cela justifie que l'on recherche des traces de vie passée sur Mars, mais hélas pas de vie présente, car il n'y a actuellement pas d'atmosphère autour de la planète rouge.

Le Soleil, de l'énergie directement utilisable

Toute vie nécessite une capture d'énergie chimique ou physique pour réaliser les transformations nécessaires aux processus biologiques. Les formes de vie qui se développent dans la croûte terrestre, loin de l'influence directe de la lumière, dépendent d'une énergie chimique qui doit être sans cesse renouvelée.

Le Soleil émet quant à lui un rayonnement électromagnétique qui contient de l'énergie utilisable. Cette source d'énergie continue et relativement inépuisable fournit des photons qui transfèrent aux électrons l'énergie requise pour les synthèses et les différents actes biochimiques du vivant : c'est la *photosynthèse* (voir l'article de N. Kaeffer *et coll.* dans ce numéro [2]). Apparue tôt dans l'évolution de la vie, la photosynthèse est actuellement la principale source d'énergie sur Terre. Par ce procédé métabolique extraordinaire, l'énergie lumineuse des photons (de longueur d'onde allant de 400 à 1 200 nanomètres), captée par les plantes vertes et par certaines bactéries *photo-autotrophes*, est transformée en énergie chimique par activation des électrons immédiatement utilisée ou « mise en réserve » dans la molécule d'ATP (adénosine triphosphate). Le carbone du CO₂ atmosphérique assimilé par les organismes photosynthétiques est réduit à travers une chaîne de réactions d'oxydo-réduction, constituant ainsi le squelette des composés bio-organiques (par exemple des sucres). La photosynthèse est aujourd'hui à l'origine de la formation de pratiquement toute la biomasse de la planète.

Mais les photons de lumière ne participent pas seulement à la construction de molécules. Certains rayonnements, comme les rayons gamma ou les ultraviolets (UV), de longueurs d'ondes plus courtes que la lumière visible, peuvent dissocier aussi des molécules et/ou réorganiser des agencements moléculaires. C'est pourquoi certaines formes de vie primitives ont dû se développer à l'abri de ces rayonnements, en étant nichées au sein de roches ou dans des zones intertidales.

Des stromatolithes nous livrent un scénario possible...

Les plus anciens microfossiles datant de 3,5 milliards d'années ont été trouvés dans des formations rocheuses, les

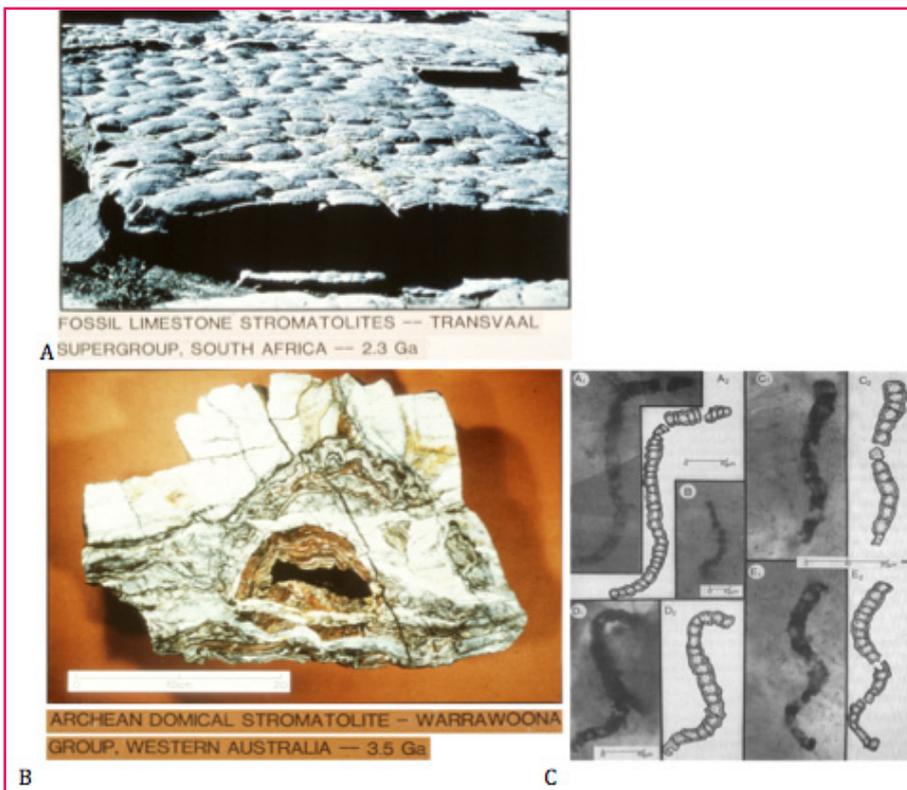
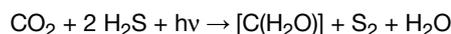


Figure 1 - A) Paysage de stromatolithes d'Afrique du Sud datant de 2,3 Ga. B) Stromatolithe silicifié. C) Filaments bactériens ressemblant aux cyanobactéries, trouvés dans des cherts de 3,45 milliards d'années, et schématiquement représentés.

Remerciements à William Schopf (UCLA) pour son aimable envoi des photos de stromatolithes [3].

stromatolithes (du grec *strôma*, tapis, et *lithos*, pierre) (figure 1). Ils sont constitués de restes de tapis bactériens qui précipitent les bicarbonates solubles en carbonates de calcium insolubles, en entraînant des débris minéraux. Les couches de sédiments empilées forment une lamination successive élaborant peu à peu un monticule. Dans les stromatolithes silicifiés, les microfossiles observés sont morphologiquement proches des cyanobactéries actuelles, et pour s'assurer qu'il ne s'agissait pas d'artefacts présents au sein de la roche, les paléontologues spécialistes du précambrien ont effectué des mesures de rapports isotopiques ¹³C/¹²C. L'ensemble des résultats obtenus par différentes méthodes a permis de conclure que les stromatolithes trouvés dans les cherts australiens (roches sédimentaires siliciques) datant de 3,43 milliards d'années sont bien d'origines photochimique et biogénique [3].

La photosynthèse peut se faire avec ou sans dégagement d'oxygène. Les bactéries les plus anciennes réalisaient probablement une photosynthèse anoxygénée (sans production d'oxygène) car l'oxygène est apparu tardivement sur la Terre (figure 2). Il pouvait s'agir de bactéries photo-autotrophes, qui utilisent l'hydrogène sulfureux H₂S, accepteur final d'électrons, pour réduire le CO₂ en glucides et H₂O selon :



Des globules de soufre se retrouvent dans la cellule, comme c'est le cas par exemple aujourd'hui de la bactérie sulfureuse pourpre *Rhodospseudomonas palustris*. Ce type de photosynthèse est considéré comme ancestral en raison de l'importante quantité de H₂S qui était présente dans l'atmosphère primitive et à proximité des volcans.

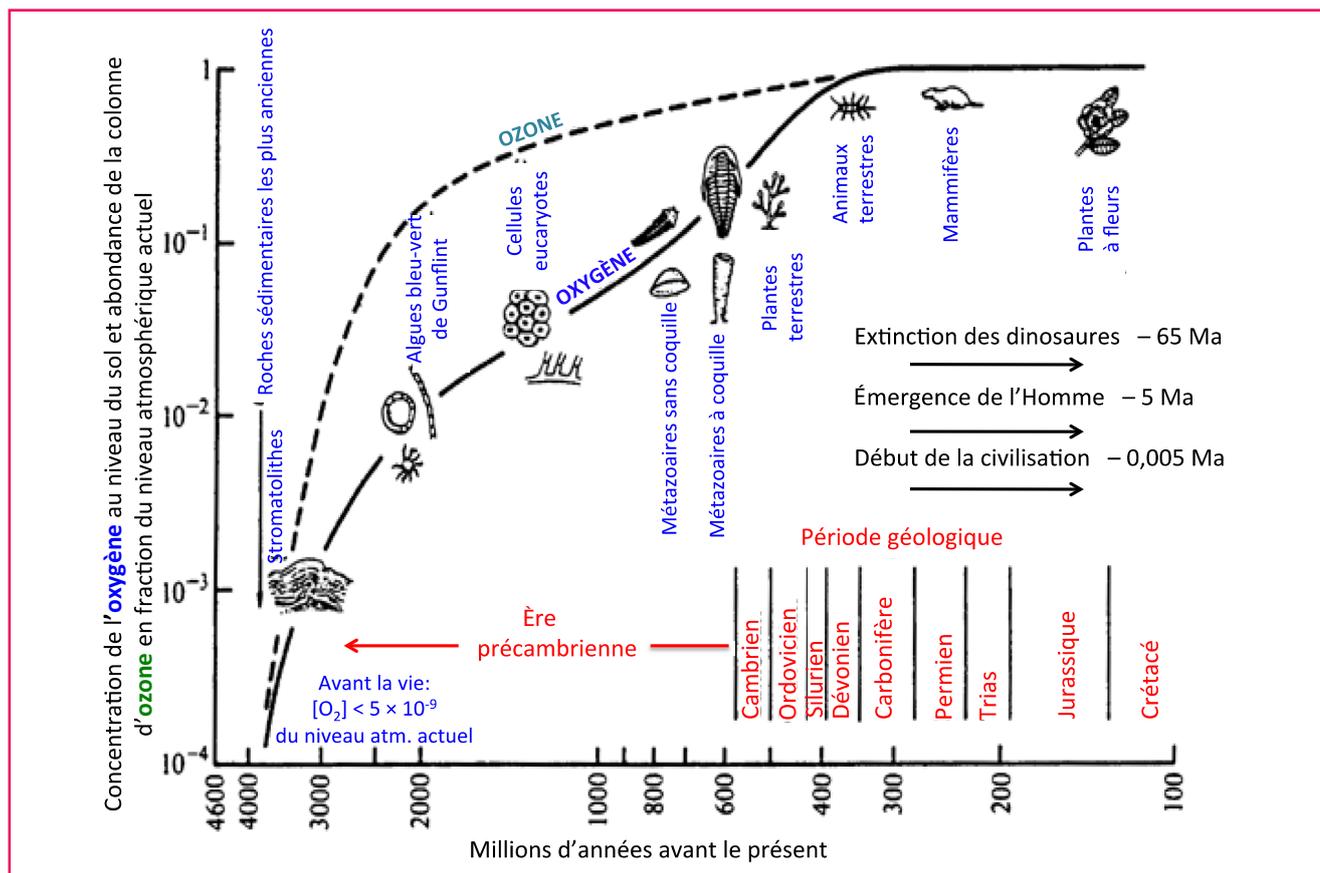
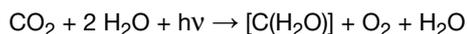


Figure 2 - Lente évolution de l'atmosphère montrant la formation de l'oxygène et de la couche d'ozone et l'apparition de différentes formes de vie. D'après R.P. Wayne [5].

Formé à la surface de sables volcaniques, un tapis microbien contenant des indications minéralogiques de photosynthèse a été extrait de terres archéennes d'Afrique du Sud orientale datant de 3,3 milliards d'années [4].

Aujourd'hui, la masse des procaryotes photosynthétiques vivant dans les océans fournit une grande partie de l'oxygène que nous respirons et qui compose l'atmosphère terrestre. Leur organisation comparable à celle des bactéries non photosynthétiques se différencie par la présence d'un réseau très développé de membranes internes formant des lamelles, les thylakoïdes, qui portent des pigments photosynthétiques, dont la chlorophylle donnant aux cyanobactéries leur teinte bleu-vert (figure 3). Leur métabolisme est autotrophe. Les algues bleu-vert captent dans l'eau le CO_2 qu'elles transforment, sous l'action de la lumière, en glucides et en oxygène qui se dégage. L'eau, accepteur final des électrons transportés, est l'agent réducteur :



L'abondance de l'eau sur Terre a donné à ces organismes un grand espace de colonisation. Le dégagement d'oxygène (O_2) lié à leur activité a profondément transformé l'atmosphère terrestre et a permis que se développe la vie aérobie. La couche d'ozone qui nous protège des UV s'est formée, car dans l'atmosphère, le dioxygène (O_2) dissocié par les ultraviolets se recombine massivement en ozone, O_3 .

Le diagramme de la figure 2 décrit un scénario possible privilégié par des astrophysiciens [5] qui

tiennent compte avant tout des données géophysiques du Soleil, de la Terre archéenne et des contraintes liées aux interactions entre l'atmosphère et l'activité biologique. Selon ce scénario, des organismes microscopiques du type bactéries méthanogènes (produisant du méthane CH_4 à partir de H_2 et CO_2), auraient contribué à l'installation d'un premier effet de serre (aux alentours de 3- 2,8 milliards d'années) et donc à



Figure 3 - Cyanobactérie *Anabaena* sp. PCC7120. Les cyanophycées ou cyanobactéries ou algues bleues sont des procaryotes photosynthétiques qui vivent aujourd'hui dans les mares ou dans les eaux salées. Elles sont unicellulaires et cependant très souvent regroupées en filaments d'une longueur qui peut atteindre quelques centaines de millimètres.

Remerciements à Amel Latifi (Marseille) pour la photo aimablement fournie.

l'établissement d'une zone « tempérée » sur Terre. Lorsque la luminosité du Soleil a atteint 90 % de sa valeur actuelle, il y a 2 milliards d'années, et que l'effet de serre dû au dioxyde de carbone est devenu suffisant pour éviter la glaciation des océans, les cyanobactéries photosynthétiques proliférèrent, ce qui permit à l'atmosphère, entre - 2,2 et - 1,9 milliards d'années, de s'enrichir en dioxygène.

De la chimie prébiotique à la vie : une origine photochimique de la vie [6]

S'appuyant sur les travaux de Daniel Berthelot et d'Henry Gaudechon, qui se proposaient de produire *in vitro* les synthèses de sucres à partir d'eau et de gaz carbonique soumis aux rayonnements UV d'une lampe en quartz à vapeur de mercure, Alexandre Dauvillier et Étienne Desguin ont développé dans les années 1940 une hypothèse photochimique de photosynthèses originelles « s'étant effectuées à la surface des eaux marines primitives » [7]. D'innombrables expériences ont été répertoriées par ces auteurs, parmi lesquelles la synthèse du formamide, H_2NCOH , dont nous savons aujourd'hui qu'il est un agent incontournable de la synthèse prébiotique des bases azotées des acides nucléiques, ADN et ARN. On trouve de plus du formamide dans l'espace, et notamment dans l'environnement des étoiles de type solaire en formation.

Les bases puriques adénine (A), guanine (G), et pyrimidiques cytosine (C) et uracile (U), ont été récemment obtenues en chauffant du formamide ($HCONH_2$) en présence de catalyseurs minéraux (silice, argiles, carbonates de calcium, etc.) et d'irradiation UV à 350 nm [8-12] ! Les quatre bases de l'ARN ont donc pu se former à partir de formamide sur une Terre primitive dépourvue de couche d'ozone et sous l'influence directe du rayonnement UV.

L'hypothèse d'un monde ARN qui serait apparu très tôt dans l'évolution biochimique repose sur les propriétés informationnelles et catalytiques de la molécule d'ARN [13-14]. La majorité des enzymes protéiques actuelles sont assistées de cofacteurs dont la plupart sont des coenzymes ribonucléotidiques. On peut citer le nicotinamide adénine dinucléotide (NAD) qui peut être phosphorylé (NADP), les riboflavines et les FAD (flavine adénine dinucléotide) et FMN (flavine mononucléotide). La synthèse prébiotique de la nicotinamide a été obtenue à partir d'éthylène et d'ammoniac par Friedmann *et coll.* en 1971 [15]. La flavine est un hétérocycle à trois cycles, basé sur un noyau de ptéridine. Purines, dérivés de nicotinamide et ptéridines sont obtenus par réarrangement photochimique, par excitation aux alentours de 350 nm, d'acide cyanhydrique (HCN) dont on connaît l'abondance partout dans l'Univers. Les cofacteurs et coenzymes sont considérés comme des fossiles moléculaires d'un ancien monde ARN, et une origine commune à partir de HCN peut être retenue. La proximité structurale des purines et des ptéridines (où un cycle pyrazine remplace la moitié imidazole de la purine) (figure 4) est également très intéressante. La ptéridine est rencontrée dans les pigments, dans les flavines et dans les folates, cofacteurs biochimiques indispensables, connus pour être sensibles à la lumière. Les folates (précurseurs du tétrahydrofolate THF) interviennent également dans la biosynthèse des nucléotides puriques. Sans entrer dans le détail des voies biochimiques, soulignons la parenté métabolique entre tous ces composés sensibles à la lumière, et qui interviennent aujourd'hui à des degrés divers dans des réactions d'oxydo-réduction biologiques productrices d'énergie. Très récemment, la stratégie de transfert d'électrons des

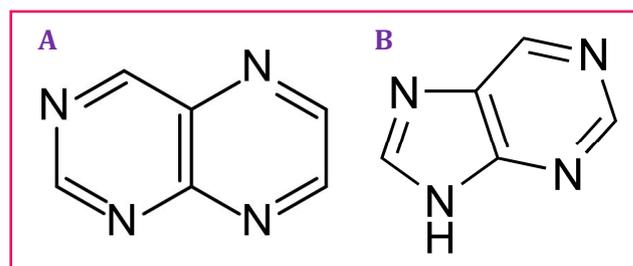


Figure 4 - A) Composée d'un noyau de pyrazine fusionné avec un cycle de pyrimidine, la ptéridine se rencontre dans les pigments, dans l'acide folique, dont les sels folates sont des cofacteurs biochimiques de transferts de groupes. Elle intervient également dans les transferts d'énergie. La synthèse cellulaire de ptéridine se fait à partir de GTP (guanosine triphosphate). B) Purine, composé d'un cycle de pyrimidine fusionné à un cycle imidazole.

ptéridines a été utilisée pour construire sur mesure des piles bio-inspirées rechargeables [16].

L'avenir se construira peut-être sur les mimés de ces molécules bio-organiques pour la conception d'électrodes et de systèmes de stockage d'énergie « verts » plus performants que les batteries strictement chimiques lithium/sodium.

Références

- [1] Gounelle M., Meynet G., The solar system genealogy revealed by meteorites, *Astron. Astrophys.*, **2012**, 545, p. A4.
- [2] Kaeffer N., Queyriaux N., Chavarot-Kerlidou M., Fontcave M., Artero V., Carburants solaires : photosynthèse artificielle et procédés photo-électrochimiques, *L'Act. Chim.*, **2015**, 397-398, p. 63.
- [3] Schopf W., Microfossils of the early archaean apex chert: new evidence of the antiquity of life, *Science*, **1993**, 260, p. 640.
- [4] Allwood A.C., Walter M.R., Kamber B.S., Marshall C.P., Burch I.W., Stromatolite reef from the early Archaean era of Australia, *Nature*, **2006**, 441, p. 714.
- [5] Wayne R.P., *Chemistry of Atmospheres*, Oxford Science Publications, Clarendon Press, **1985**.
- [6] Maurel M.-C., *D'où vient la vie ?*, Collection Les plus grandes petites Pommés, Le Pommier, **2014**.
- [7] Desguin E., Dauvillier A., *La genèse de la vie, phase de l'évolution géochimique*, Hermann, Paris, **1942**.
- [8] Westall F. *et al.*, Implications of in situ calcification for photosynthesis in a 3.3 Ga-old microbial biofilm from the Barberton greenstone belt, South Africa, *Earth and Planetary Sci. Lett.*, **2011**, 310, p. 468.
- [9] Saladino R., Crestini C., Costanzo G., Negri R., Di Mauro E., A possible prebiotic synthesis of purine, adenine, cytosine, and 4(3H)-pyrimidinone from formamide: implications for the origin of life, *Bioorg. Medic. Chem.*, **2001**, 9, p. 1249.
- [10] Barks H.L., Buckley R., Grieves G.A., Di Mauro E., Hud N.V., Orlando T.M., Guanine, adenine, and hypoxanthine production in UV-irradiated formamide solutions: relaxation of the requirements for prebiotic purine nucleobase formation, *ChemBioChem*, **2010**, 11, p. 1240.
- [11] Ferris J., Orgel L.E., An unusual photochemical rearrangement in the synthesis of adenine from hydrogen cyanide, *J. Am. Chem. Soc.*, **1966**, 88, p. 1074.
- [12] Ferris J., Kuder J., Catalano A., Photochemical reactions and the chemical evolution of purines and nicotinamide derivatives, *Science*, **1969**, 166, p. 765.
- [13] Gilbert W., Origin of life: the RNA world, *Nature*, **1986**, 319, p. 618.
- [14] Meli M., Vergne J., Maurel M.-C., In vitro selection of adenine-dependent hairpin ribozymes, *J. Biol. Chem.*, **2003**, 278, p. 9835.
- [15] Friedmann N., Miller S.L., Sanchez R.A., Primitive earth synthesis of nicotinic acid derivatives, *Science*, **1971**, 171, p. 1026.
- [16] Hong J., Lee M., Lee B., Seo D.-H., Park C.B., Kang K., Biologically inspired pteridine redox centres for rechargeable batteries, *Nature Comm.*, **2014**, 5, p. 5335.



Marie-Christine Maurel

est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et chercheur à l'UMR 7205 (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris)*.

* ISYEB, UMR 7205 CNRS/MNHN/UPMC, 45 rue Buffon, F-75005 Paris.
Courriel : marie-christine.maurel@upmc.fr.