

Synthèse prébiotique hydrothermale

Marie-Paule Bassez

*IUT Robert Schuman, Université de Strasbourg,
72 route du Rhin, 67400 ILLKIRCH-GRAFFENSTADEN,
<http://www-iut-schuman.u-strasbg.fr/chemphys/mpb>
marie-paule.bassez@urs.u-strasbg.fr*

Section de rattachement : 31

Secteur : secondaire

RESUME. Des observations géologiques, physico-chimiques et biologiques récentes de sites hydrothermaux sont présentées ainsi qu'un code de conduite rédigé dans le but d'un développement durable et d'une préservation de ces sites. En considérant ces données, des expériences de synthèse de molécules prébiotiques sont proposées dans l'eau sous haute pression et dans l'eau supercritique. Les conditions de température, de pression, d'acidité, de minéraux, de champ magnétique, de source d'énergie sont celles des systèmes hydrothermaux.

MOTS-CLES : origine de la vie, systèmes hydrothermaux, développement durable.

1. Introduction

L'existence de systèmes vivants dans les profondeurs des océans n'est pas encore expliquée. La définition même du mot « vie » n'est pas déterminée de manière définitive non plus. Il semblerait qu'une transition encore inexpliquée se soit produite entre une évolution chimique prébiotique et une évolution biochimique caractéristique du vivant. Nous nous intéressons ici à la synthèse éventuelle de molécules prébiotiques au niveau des cheminées hydrothermales terrestres.

2. Observations géologiques, physico-chimiques et biologiques

Une caractéristique importante des sites hydrothermaux tels que ceux de la dorsale médio-atlantique, mid-atlantic ridge (MAR), situés à l'ouest du Portugal, au sud ouest des Açores, Menez Gwen (37°50'N, 850m), Lucky Strike (37°17'N, 1700m) et Rainbow (36°14'N, 2300m), est la grande abondance d'espèces vivantes découvertes : moules, crevettes, crabes, sans compter la multitude d'archées, de bactéries et de virus (Forterre 2007, Wommack 2007). Une similarité dans les espèces apparaît avec les autres sites, Broken Spur (29°N, 3250mm), TAG (26°N, 3670m) et Snake Pit

(23°N, 3500m) situés à l'ouest de l'Afrique. La composition des systèmes biologiques semble en relation avec les caractéristiques des fluides émis par les cheminées. Le site Rainbow, découvert en 1997 (Fouquet et al., 1997) est constitué de dix fumeurs noirs, riches en Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag et Au. Les fluides non mélangés avec l'eau environnante (endmember fluids) ont été analysés de 1997 à 2001 (Charlou et al., 2002). Les conditions physico-chimiques sont les suivantes : 365°C, pH 2,8 (le plus acide de tous les sites), une grande abondance en Rb, Cs, Ca, Sr, Fe, Mn, Cu, Zn et en Cl : 750 mmol/kg. Ces analyses comparées avec d'autres sites de la MAR montrent pour le site Rainbow, une faible abondance en silicates calculée en acide orthosilicique Si(OH)_4 : 6,9 mmol/kg et en H_2S : 1,20 mmol/kg, et une forte abondance en H_2 : 16 mmol/kg, CO : 5 $\mu\text{mol/kg}$, CO_2 : 16 mmol/kg, N_2 : 1,8 mmol/kg et CH_4 : 2,5 mmol/kg. De l'éthane : 1097 nmol/kg et du propane : 48 nmol/kg ont également été détectés ainsi que d'autres hydrocarbures saturés de C_{16} à C_{29} . Le site Logatchev (14°N45'N sur la MAR, 2970m), constitué de 6 fumeurs noirs, a une composition similaire de ses fluides. Comme le site Rainbow, il est situé dans un environnement géologique ultramafique, la roche du manteau étant la péridotite, composée essentiellement d'olivine et de pyroxène, silicates de fer et de magnésium. Des observations effectuées en 2004 et 2005 sur ce site Logatchev montrent une stabilité de ce système hydrothermal par rapport aux valeurs trouvées 9 années auparavant (Schmidt et al., 2007). La mission Serpentine (mars 2007) a confirmé la présence de molécules organiques dans des fluides de la MAR : hydrocarbures saturés (C_8 à C_{18}), acides carboxyliques et esters méthyliques, mais sans toutefois affirmer avec certitude une origine abiotique (Konn et al., 2008). Les fluides (endmembers) de nouveaux sites actifs (Fouquet et al., 2007) Ashadze 1 (actuellement le plus profond : 4080m), Ashadze 2 et Logatchev 2, découverts durant cette mission, indiquent : 310-370°C, pH 3,5-4,0, Cl : 150-620 mmol/kg, une grande abondance en H_2 (70% des gaz), en CO_2 et en CH_4 ainsi que la présence d'hydrocarbures saturés (C_1 à C_4). Une origine abiotique est confirmée pour le méthane et les hydrocarbures (Charlou et al., 2007).

Les fluides analysés sont issus de roches ultramafiques et leur contenu résulte d'une interaction entre la roche péridotite et l'eau de mer comme sur les autres sites de la MAR. La forte abondance en H_2 provient très probablement d'un processus de serpentinisation qui est une conséquence de réactions de l'eau de mer avec l'olivine et le pyroxène pour former de la serpentine (un silicate de magnésium), de la magnétite (Fe_3O_4), de la brucite (un hydroxyde de magnésium), du dihydrogène et du méthane. Les réactions eau-silicates sont complexes et dépendent du pH, de T, de P, de la composition de la roche péridotite, de sa porosité, des conditions d'oxydo-réduction... (Charlou et al., 2002; Mével 2003; Bach et al., 2004; Sleep et al., 2004 et ref. incluses). Il est à noter que le site Rainbow est associé à une magnétisation très forte ($> 28 \text{ A/m}$) (Dyment et al., 2005). La magnétisation peut avoir diverses origines dont la variation à court terme du champ magnétique terrestre, la formation de magnétite lors du processus de serpentinisation ou la présence de magnétite localisée dans les sulfures.

Afin de protéger ces sites d'une éventuelle dégradation, un texte préparant un code de conduite pour le développement et l'utilisation durable des sites hydrothermaux par les chercheurs et les organismes de tourisme sous-marin, a été rédigé en 2003. Le code doit reconnaître la demande de la communauté scientifique ainsi que la nécessité de préservation et de conservation de ces sites et proposer des recommandations (InterRidge 2003, Devey et al., 2007). Il est prévu que ce code soit réactualisé après cinq ans, en tenant compte des nouvelles données des missions. Il apparaît important d'ajouter des règles concernant les exploitations minières, la pêche, les câbles des télécommunications. Le 31 décembre 2008, certaines recommandations devraient être appliquées (European Parliament 2007).

3. Expériences de synthèse prébiotique hydrothermale

La MAR n'existait pas il y a 3,8 milliards d'années, date estimée pour l'apparition de la vie sur la Terre. Mais il est possible d'imaginer des sites semblables où des synthèses prébiotiques ont pu se produire, d'autant plus que l'activité volcanique et les sources de radioactivité étaient plus nombreuses à cette époque. Depuis 1953 (Miller 1998), divers mélanges en phase gaz, de H₂O, H₂, N₂, CH₄, CO₂, très réducteur jusqu'à très oxydant, ont été soumis à diverses sources d'énergie et ont abouti à la formation de molécules biochimiques, dont les acides aminés des protéines des systèmes vivants, les deux sucres et les cinq bases des acides nucléiques ARN et ADN. Ces même molécules, avec en plus H₂S, sont présentes dans les fluides hydrothermaux. Dans les conditions de température et de pression (~400°C et ~23 MPa) du site Rainbow par exemple, ces molécules sont dans l'état supercritique et sont toutes de moment dipolaire nul. L'eau supercritique (sc) (T_c = 374°C, P_c = 22,1 MPa; T_c > 374°C et P_c > 22,1 MPa pour l'eau de mer, en fonction de la concentration en sel) a un pouvoir d'hydratation ionique qui diminue très fortement ce qui conduit à une solubilité des composés ioniques et polaires qui décroît beaucoup. L'eau sc est connue expérimentalement pour se comporter comme un solvant organique. Elle dissout les composés organiques apolaires. Il a été montré une relation entre la structure de l'eau sc ainsi qu'éventuellement celle de l'eau sous haute pression (HP) et la concentration de molécules apolaires (Bassez 1999 et 2003). Les molécules citées ci-dessus pourraient trouver un milieu de concentration dans l'eau sc ou HP. Une synthèse prébiotique pourrait alors être déclenchée dans un environnement hydrothermal.

L'apparition de la vie sur la Terre au fond des océans, au niveau des sites hydrothermaux est actuellement présentée comme « une évidence ». Mais aucune expérience n'a réussi à le démontrer (Brack 2008). Pour que des systèmes vivants puissent exister, il faut premièrement que les molécules constituant ces organismes soient formées. Les expériences de Miller ont abouti à construire ces molécules essentielles. Or l'état sc est, de manière simplifiée, un état gaz qui, comprimé, ne revient pas à l'état liquide. Les observations effectuées sur les sites hydrothermaux et

reportées ci-dessus (Charlou et al., 2002, Schmidt et al., 2007) montrent que ces molécules sont présentes dans les fluides hydrothermaux qui n'ont pas encore été en contact avec l'eau de mer (endmembers). Ces « gaz » des fluides hydrothermaux devraient donc comme ceux des expériences de Miller aboutir à la synthèse des molécules prébiotiques. Le contact avec l'eau de mer refroidit très rapidement les molécules formées et un gradient de température permet de continuer les synthèses vers des molécules plus complexes. Il faut remarquer que des acides aminés, des bases azotées nucléiques, des sucres et des acides organiques ont également été observés après bombardement d'une cible de graphite par des jets moléculaires de H₂, N₂, et O₂ à basse P (Devienne et al., 2002).

Une expérience de synthèse prébiotique a été envisagée par l'auteur en collaboration avec le Pr Dr H. Vogel, à l'Institut für Chemische Technologie de Darmstadt, en 2000, mais des problèmes de corrosion ont été rencontrés avec H₂Set l'acier Inconel 625 du réacteur. Les résultats des observations récentes effectuées sur les sites confirment l'urgence de renouveler ces expériences, à la fois dans l'eau sc et dans l'eau HT-HP. Deux collaborations avec des laboratoires spécialisés dans la HP et dans l'eau sc sont actuellement en préparation (Daniel et al., 2006 et Wernet/Testemale 2005, Testemale/Brugger 2006). Les concentrations en gaz des fluides Rainbow sont par ordre décroissant: H₂ = CO₂, CH₄, N₂, H₂S et pour Logatchev : H₂, CO₂, N₂, CH₄, H₂S. Il faudrait donc choisir un mélange de gaz réunissant tout ou partie de ces molécules au cours de diverses expériences à pH 2,8 à 4 (Charlou et al., 2002 et 2007) avec addition éventuelle de Cl, Rb, Cs, Ca, Sr, Fe, Mn, Cu, Zn. Des gradients de température et des variations brutales de température du style trempe pourraient être appliquées. Les gaz « endmembers » des fluides hydrothermaux contiennent des hydrocarbures saturés abiotiques. Il est raisonnable de penser que des molécules résistantes à ces HT-HP soient formées. Les gaz choisis pourraient être introduits en considérant leurs origines géologique et chimique. De la péridotite, au contact de l'eau de mer sous HT-HP conduirait à la formation de H₂ et CH₄ ainsi qu'à de la magnétite. En ajoutant de l'azote liquide et/ou de la carboglace et/ou quelques métaux, des ingrédients à l'état solide et liquide pourraient ainsi être placés dans réacteur qui serait ensuite ajusté en pression et en température. Une banque de données de spectres Raman de molécules d'intérêt biologique (De Gelder et al., 2007), des spectres Raman d'acides aminés et des bases de nucléotides (Guicheteau et al., 2006) et une analyse Raman de l'eau autour du point critique (Ikushima et al., 1998) permettraient l'analyse in-situ des molécules synthétisées. Un inconvénient expérimental est la cinétique d'interaction entre l'eau et la surface de la roche. Des variations de la composition chimique d'une solution de péridotite dans l'eau de mer ont été mesurées à 200°C et 500 bar pendant 8000h (Seyfried et al., 2007, Hellevang, 2008). Bien que la quantité en H₂ dissout soit plus faible que celle prévue théoriquement, elle augmente rapidement et atteint ~70mmol/kg d'eau après ~2000h. Des traces de magnétite et de serpentine sont mesurées et la formation de Fe-chrysotile est suggérée. Notre expérience pourrait utiliser une roche très finement broyée, ce qui induirait une plus grande interaction eau-roche. Elle pourrait également partir d'un mélange d'olivine et

de pyroxènes : ortho et clinopyroxène, constituants de la péridotite.

La série d'expériences ci-dessus se fonde sur l'explication théorique et expérimentale de l'abondance en dihydrogène et en méthane en provenance du processus de serpentinisation de la roche péridotite du manteau et donc des suites de réactions complexes qui aboutissent à la transformation de l'olivine et des pyroxènes en serpentine, brucite, chrysotile, magnétite, dihydrogène et en méthane (Charlou et al., 2002 et ref. incluses). Mais le méthane peut aussi trouver son origine dans le magma. Les interactions eau-péridotite ou eau-olivine et pyroxènes pourraient ne pas produire suffisamment de méthane. Il pourrait alors être envisagé d'introduire le méthane directement dans le réacteur sous forme d'hydrate de méthane, de « glace de méthane » ou clathrate de méthane. Cette méthode pour introduire les gaz pourrait être appliquée également au dioxyde de carbone et au sulfure d'hydrogène. Toutefois, une autre source d'hydrogène moléculaire pourrait provenir de la radioactivité terrestre. La radiolyse de l'eau par rayonnement gamma produit des espèces très réactives de courte durée de vie et également H_2 , H_2O_2 et O_2 . Il a été montré expérimentalement que la radiolyse de l'eau se induit une production exponentielle d'hydrogène et que la recombinaison $OH-H_2$ de l'eau diminue très fortement pour $T > 350^\circ C$ (Argonne et al., 2004). A partir des abondances en ^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th , il a été calculé qu'une production radiolytique d'hydrogène pourrait contribuer au développement d'écosystèmes sous-marins (Blair et al., 2007) et une communauté de microbes se développe dans le « Witwatersrand basin » d'Afrique du Sud, en utilisant l'hydrogène moléculaire produit par la radiolyse de l'eau (1nM/an) (Onstott et al., 2006). Des hydrocarbures C_1-C_4 abiotiques ont été détectés dans cette mine à pH élevé. Une série d'expériences devrait donc inclure la radiolyse de l'eau. Les travaux expérimentaux de synthèse prébiotique en considérant la radioactivité terrestre n'ont pas encore été réalisés. Ils sont toutefois extrêmement importants. La preuve est la collaboration récente entre le Danish National Research Foundation (DNRF), la Max Planck Society (MPS) et l'University of Aarhus (AU) pour créer le Centre de Géomicrobiologie. Ce centre a démarré le 1er octobre 2007 pour une période de 5 ans (Center for Geomicrobiology 2007). Un domaine de recherche important de ce centre sera la formation de H_2 par radiolyse de l'eau et son impact sur le développement des écosystèmes. L'abondance et le mode de production de l'hydrogène sera également un domaine important de recherches en Suède (Hellevang 2007).

L'auteur propose un premier type d'expériences qui consisterait à mélanger à P_{atm} et T ambiante de l'eau de mer, de la péridotite et de l'azote pendant au moins 1000h. Dans le cas d'un réacteur où seuls des réactifs gazeux et liquides pourraient être introduits, de l'azote liquide serait choisi. Ainsi les réactifs H_2O , H_2 , CH_4 et N_2 qui donnent la plus grande abondance en composés organiques d'intérêt biologique dans les expériences de Miller, seraient réunis. Une montée en température et en pression pourrait ensuite être réalisée. Une source d'excitation comme le rayonnement gamma pourrait être envoyée à travers une fenêtre de la cellule induisant ainsi la radiolyse de l'eau et une étude in-situ en spectroscopie Raman permettrait l'analyse des produits synthétisés. D'autres types d'expériences pourraient éventuellement être envisagées. Il

est connu que FeS_2 réagit avec O_2 pour donner du Fe et SO_2 . De même il est connu que les α -aminonitrile $\text{H}_2\text{N-RCH-CN}$ réagissent avec H_2O_2 pour former des acides aminés avec production de O_2 (Commeyras 2003). Or les α -aminonitriles sont synthétisés lors des réactions de Strecker ($\text{NH}_3+\text{RCHO}+\text{HCN}$) dans les expériences de Miller. Les expériences suivantes pourraient donc être tentées:

1ère expérience: $\text{H}_2\text{O} + \text{FeS}_2 + \text{rayonnement gamma}$, qui produirait du Fe et SO_2

2ème expérience : $\text{H}_2\text{O} + \text{FeS}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2 + \text{rayonnement gamma}$, qui produirait des acides aminés et O_2 . Cet oxygène réagirait avec FeS_2 pour former du fer. Le fer pourrait éventuellement servir de marqueur de la synthèse des acides aminés. Il faut toutefois remarquer que les transformations des α -aminonitriles en acides aminés sont réalisées en milieu très basique, alors que les pH des cheminées hydrothermales semblent plutôt acides et que de plus de nombreux produits peuvent être formés. Il apparaît toutefois utile de tenter ces expériences, peut-être en étudiant la spéciation du fer par absorption de rayons-X (Testemale 2006). Que ce soit par analyse Raman ou par absorption-X, les réactifs devraient être introduits en très faible quantité afin d'éviter de grandes pressions de vapeur ainsi que des risques d'explosions.

Des catalyseurs tels que les argiles comme la kaolinite, pourraient apporter les sites tridimensionnels préférentiels à la construction d'une configuration d'énantiomères. En effet, les systèmes vivants sont caractérisés par des acides aminés de configuration L et des sucres de configuration D. Les argiles ont des structures en feuillets asymétriques. La kaolinite, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ possède une couche octaédrique et une couche tétraédrique (Harter 2005) entre lesquelles peuvent s'insérer des molécules chirales selon une certaine disposition dans l'espace en se fixant sur des surfaces à deux dimensions de structures différentes. Une synthèse asymétrique d'un précurseur de l'alanine a été réalisée sur de la kaolinite (Julg 1987). Une expérience reproduisant le champ magnétique anormalement élevé du site Rainbow est également à envisager. La radioactivité de la croûte terrestre est considérée traditionnellement comme une source d'énergie thermique. Il faut noter qu'elle est également une source d'électrons et de rayonnement gamma. Comment se comporte ce rayonnement gamma dans les lignes de champ magnétique et dans les ondes sismiques? Peut-on envisager une autre origine de l'homochiralité? Des expériences ont montré un excès d'énantiomère L après destruction par rayonnement UV de l'autre configuration et il est connu que les archées hyperthermophiles *Pyrococcus furiosus* et *Pyrococcus abyssi* survivent à de fortes doses d'irradiation gamma (Jolivet et al., 2003).

4. Conclusion

L'origine des systèmes vivants dans les profondeurs des océans est présentée comme une évidence, mais n'est pas encore démontrée expérimentalement. Les observations des sites hydrothermaux reportées dernièrement confirment la nécessité d'effectuer des expériences dans les conditions hydrothermales d'acidité, de température, de pression, de composition chimique des roches et des fluides, de

champ magnétique et de diverses sources d'énergie. Les équipements industriels et de laboratoires sont maintenant conçus pour des études expérimentales dans ces conditions. Ce type d'expérience sous HT-HP est toutefois encore très difficile à réaliser et l'auteur remercie les deux laboratoires qui ont accepté de considérer cette proposition de synthèse prébiotique concernant une évolution chimique à partir de laquelle la vie a surgi et s'est ensuite développée de manière durable.

Bibliographie

- Argonne Lab., « Materials for supercritical water systems », http://www.wun.ac.uk/nuclearsci/pdfs_ppts/Todd-materials.pdf
- Bach W., Garrido C.J., Paulick H., Harvey J., Rosner M., « Seawater-peridotite interactions : First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N », *Geochem. Geophys. Geosyst.* vol. 5 (9), 2004, p. 1-22.
- Bassez M.-P., « La structure de l'eau supercritique et l'origine de la vie », *Science et Technologie, Regards Croisés*, Paris, éditions L'Harmattan, 1999, p. 583-591.
- Bassez M.-P., « Is high-pressure water the cradle of life? », *J. Phys. : Condens. Matter*, vol. 15, 2003, p. L353-L361, <http://stacks.iop.org/JPhysCM/15/L353>
- Blair C.L., D'Hondt S., Spivack A.J., Kingsley R.H., « Radiolytic hydrogen and microbial respiration in subsurface sediments », *Astrobiology*, vol. 7 (6), 2007, p. 951-970.
- Brack A., « Colloque Définir la vie », Musée National d'Histoire Naturelle, Paris, 4-5/02/2008. Center for Geomicrobiology, 2007, http://www.mpi-bremen.de/en/Center_for_Geomicrobiology.html
- Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y., Jean-Baptiste P., Holm N., « Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field », *Chemical Geology*, vol. 191, 2002, p. 345-359.
- Charlou J., Donval J., Konn C., Birot D., Sudarikov S., Jean-Baptiste P., Fouquet Y., « High hydrogen and abiotic hydrocarbons from new ultramafic hydrothermal sites between 12°N and 15°N on the Mid-Atlantic Ridge. Results of the Serpentine cruise (march 2007) », *Proceedings*, 2007, <http://augsvn.ethz.ch/Proceedings/AGU2007/html/T51F-04.html>
- Commeyras A., « Approche dynamique de la synthèse des peptides et leurs précurseurs sur la Terre primitive », *Les traces du vivant*, Gargaud A., Presses univ. Bordeaux, 2003, p. 158
- Daniel I., Oger Ph., Winter R., « Origins of life and biochemistry under high-pressure conditions », *Chem. Soc. Rev.*, vol. 35, 2006, p. 858-875.
- Devey C.W., Fischer C.R., Scott S., « Responsible science at hydrothermal vents », *Oceanography*, vol. 20 (1), 2007, p. 162. http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/issue_pdfs/20_1/20.1_devey_et_al.pdf
- Devienne M., Barnabe C., Ourisson G., « Synthesis of further biological compounds in interstellar-like conditions », *Comptes rendus. Chimie*, vol. 5 (10), 2002, p. 651-653.
- Dyment J., Tamaki K., Horen H., Fouquet Y., Nakase K., et al., « A positive magnetic anomaly at Rainbow hydrothermal site in ultramafic environment », *Eos Trans. AGU*, vol. 86(52), 2005.
- Edwards K. J., Bond P. L., Gihring T. M., Banfield J. F., « An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage », *Science*, vol. 287, 2000, 1796-1799.
- European Parliament, 2007, <http://www.europarl.europa.eu/oeil/FindByDocnum.do?lang=en&docnum=COM/2007/605>
- Forterre P., *Les microbes de l'enfer*, Paris, Belin-Pour la Science, 2007.
- Forterre P., Gribaldo S., « The origin of modern terrestrial life », *HFSP*, vol. 1, 2007, p. 156-168.
- Fouquet Y., Charlou J. L., Ondréas H. et al., « Discovery and first submersible investigations on the Rainbow hydrothermal field », *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 78(46), 1997, p.832.

Fouquet Y., « Résultats des campagnes océanographiques », 2004, <http://www.ifremer.fr/flotte>

Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J., Ondreas H., Cannat M., Bortnikov N., , et al., « First submersible studies on Ashadze, Logatchev 2 and Krasnov vent fields during the Serpentine cruise », Proc. 2007, <http://augsvn.ethz.ch/Proceedings/AGU2007/html/T51F-04.html>

Harter, 2005, <http://pubpages.unh.edu/~harter/crystal.htm>

InterRidge, 2003, <http://www.interridge.org/WG/biology/2003update>

Hellevang H., « The H₂ driven deep biosphere », astrobiology conference, 02/2008, <http://agenda.albanova.se/conferenceDisplay.py?confId=532>

Jolivet E., Matsunaga F., Ishino Y., Forterre P., Prieur D., Myllykallio H., « Physiological responses of the hyperthermophilic archeon *Pyrococcus abyssi* to DNA damage caused by ionizing radiation », J. Bacteriology, vol. 185 (13), 2003, p. 3958-3961..

Jorissen A., Cerf C., « Asymmetric photoreactions as the origin of biomolecular homochirality : a critical review », Orig. Life Evol. Biosph., vol. 32 (2), 2002, p. 129-142.

Julg A., « Synthèse asymétrique sur la kaolinite de l' α -amino-propionitrile, précurseur de l'alanine et homochiralité des acides aminés des protéines », C. r. Acad. sci., Sér. 2, Méc. phys. chim. sci. univers sci. terre, vol. 305, n° 7, 1987, p. 563-565.

Konn C., Charlou J.L., Donval J.P., Holm N.G., Dehairs F., Bouillon S., « Organics in hydrothermal fluids from 4 ultramafic-hosted vents of the MAR. Results from the Serpentine cruise (2007) », Geophysical Research Abstr., 2008, vol. 10, EGU2008-A-01497.

Mével C., « Serpentinisation des péridotites abyssales aux dorsales océaniques », Comptes Rendus Geosciences, vol. 335 (10-11),2003, p. 825-852.

Miller S., « The endogenous synthesis of organic compounds », *The molecular origin of life*, Brack A., Cambridge University Press, 1998, p. 59-85.

Onstott T.C., Lin L.H., Davidson M., Mislowack B., Borcsick M., Hall J., Slater G., Ward J., Sherwood Lollar B., Lippmann-Pipke J., Boice E., Pratt L.M., Pfiffner S., Moser D., Gihring T., Kieft L.T., Phelps T.J., et al., « The origin and age of biogeochemical trends in deep fracture water of the Witwatersrand basin, South Africa, Geomicrobiol. J. 2006, vol. 23, p. 369-414.

Sagalevich A., Bogdanov Yu., Bortnikov N., Silantsev S., Galkin S., Lein A., and shipboard party, « A comparative study of MAR hydrothermal fields found in different geodynamic settings : Preliminary results of the 50th cruise (08-09 2005) of R/V Akademik Mstislav Keldysh, InterRidge News, vol. 14, 2005, p. 16-18.

Schmidt K., Koschinsky A., Garbe-Schönberg D., M. de Carvalho L., Seifert R.
 « Geochemistry of hydrothermal fluids from the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field, 15°N on the Mid-Atlantic Ridge », Chemical Geology, vol. 242 (1-2), 2007, p. 1-21.

Seyfried W.E.Jr., Foustoukos D.I., Fu Qi, « Redox evolution and mass transfer during serpentinization : 200°C, 500 bar with implications for ultramafic-hosted hydrothermal systems at Mid-Ocean Ridges », Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 71 (15), 2007, p. 3872-3886.

Sleep N.H., Meibom A., Fridriksson Th., Coleman R.G., Bird D.K., « H₂-rich fluids from serpentinization : Geochemical and biotic implications », PNAS, vol. 101 (35), 2004, p. 12818-12823. <http://www.pnas.org/cgi/reprint/101/35/12818>

Testemale D., Brugger J., et al., « Speciation of FeII in hydrothermal saline brines by X-ray absorption techniques », Geochimica et cosmochimica acta, vol. 70 (18), 2006, p. A646.

Wernet Ph., Testemale D., Hazemann J.-L., Argoud R., Glatzel P., Petterson L.G.M., Nilsson A., Bergmann U., « Spectroscopic characterization of microscopic hydrogen-bonding disparities in supercritical water », J. Chem. Phys., vol. 123, 2005, p. 154503-1-7.

Wommack K., « Metagenomic exploration of virus-host interactions in deep-sea hydrothermal vent, grant of 1,2 M\$ », 2007-2012
http://www.researchcrossroads.com/index.php?option=com_dbquery&Itemid=60&task=ExecuteQuery&qid=18&grant_id=3493680