

EDITORIAL

IL est souvent rapporté que, dans la Bible, il est fait allusion à ce que la vie est issue du « limon de la Terre », notion s'accordant bien avec la conception scientifique qui assigne à la naissance de la vie un berceau fait d'un sol et d'eau, c'est-à-dire d'une boue riche en éléments chimiques divers, à partir desquels dans des conditions physiques déterminées, des réactions fondamentales permirent aux molécules organo-biologiques de se constituer, celles-ci procédant des plus simples aux plus complexes. Toutefois, on sait, que grâce aux progrès des méthodes spectrales en astronomie, il préexiste dans les espaces intersidéraux des molécules et radicaux organiques et ceci conduit à penser que la biogénèse n'a pas forcément un caractère terrestre exclusif.

Quoiqu'il en soit, si la phase initiale de la constitution du Globe fut essentiellement à partir du magma primitif de nature minérale, son évolution vers l'état dans lequel les hommes que nous sommes le connaissent, a été elle-même, plus ou moins tributaire des êtres vivants qui l'ont peuplé. Non seulement, dans de nombreux étages des grands systèmes géologiques, on rencontre de puissants dépôts organiques fossiles (ou d'origine organique) houilles, pétroles, guanos, coprolithes, dépôts phosphatés, calcaires, mais en outre, au quaternaire, aussi bien qu'aux époques très lointaines, les animaux et les végétaux ont contribué grandement à l'élaboration des terrains superficiels ou profonds.

D'autre part, l'altération et la désagrégation des roches par les êtres vivants, au cours des temps, est continue. Les lichens, les mousses, les algues s'attaquent aux matériaux les plus résistants de la lithosphère.

Mais, ce sont les êtres les plus petits, unicellulaires, universellement présents sur toute l'étendue de notre planète en altitude et en profondeur, dans les eaux et dans les sols, depuis trois milliards d'années, c'est-à-dire les bactéries, qui, à coup sûr ont contribué le plus largement que souvent on l'imagine, à façonner la lithosphère de la manière la plus prodigieuse.

Après PASTEUR, on a pensé durant longtemps que la cellule bactérienne était d'organisation très simple. On sait maintenant que malgré sa petitesse relative, il n'en est absolument rien ; pourtant on peut s'étonner de ce que dans le si faible volume d'espace qu'occupe une bactérie, il puisse exister un attirail aussi considérable que celui qui donne à celle-ci la possibilité de construire en des temps très courts, quelques heures, voire quelques dizaines de minutes, les molécules les plus compliquées. Pour ne pas risquer l'insomnie, il suffit de

ÉDITORIAL

réfléchir à ce que la matière vivante, comme la matière inanimée, est formée d'atomes constitutifs de molécules à raison de 6.10^{23} molécules vraies dans une molécule-gramme ; il y a correspondance d'échelle. Les microbes sont un monde dans le Monde terrestre ; ils y existent comme le médiateur fondamental de l'univers bio-minéral, grâce aux possibilités que, essentiellement, leur donnent leur équipement enzymatique et le milieu hydrique qui les héberge. La trilogie minéraux-bactéries-eau aboutit à ce qu'il n'y a pas d'Hydrologie sans Bactériologie.

Les relations entre les bactéries et l'Homme sont étroites. Malheureusement, certaines espèces bactériennes sont, toujours ou occasionnellement, pathogènes pour lui (les virus ne sont pas évoqués ici), mais il y a une coopération très largement favorable entre le minuscule être vivant unicellulaire et le Maître (actuel (?)...) de la Nature.

Les pastoriens les plus glorieux de l'Histoire sont ceux qui, avec ROUX, KOCH, LÖFLER, EBERTH, SHIGA, YERSIN, HANSEN, METCHNIKOFF, NICOLLE, NOGUCHI et bien d'autres, ont délivré l'humanité scuffrante de tant de maladies infectieuses, mais la bactériologie a permis aussi le développement d'activités d'un énorme intérêt au service de la vie quotidienne normale.

Passons sur des industries telles que la brasserie et la vinification ou la production de métabolites avec, pour exemples, le glycérol ou des substances médicamenteuses.

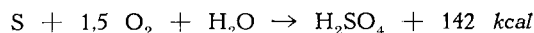
Ne nous arrêtons pas non plus à l'épuration biologique des eaux d'égouts, qui constitue une véritable industrie de fermentation fort complexe. Toutefois, ici il ne faut pas manquer de noter la production d'énergie sous forme de méthane à partir de toutes sortes de matières organiques, aussi bien les déchets organiques des ordures et des eaux polluées que de la paille et du fumier de ferme, par l'intervention de nombreuses bactéries, au cours d'un cycle écologique où prédominent processus aérobies et anaérobies ; le méthane se forme à partir soit de diverses molécules carbonées complexes, soit de radicaux carboxyliques, soit tout simplement d'une molécule minérale, le dioxyde de carbone.

Dans les sols et, à peu près semblablement, dans les eaux, un biochimisme bactérien d'importance capitale, sujet essentiel d'un cours d'Hydrologie portant sur l'analyse de potabilité, est celui de la nitrification et de la dénitrification. Les agents responsables sont, dans un sens, des bactéries aérobies autotrophes, sans besoin de carbone organique, qui font passer l'ion ammonium aux stades hydroxylamine, acides hyponitriques, nitreux et nitrique, c'est-à-dire les Nitrosomonas et les Nitrosococcus, puis les Nitrobacter ; elles fixent l'oxygène atmosphérique sur les substrats successifs selon des mécanismes nécessitant l'intervention du calcium, du phosphore, du fer, etc. En sens inverse, des bactéries anaérobies, également autotrophes, Pseudomonas, Achromobacter, Sporovibrio, en l'absence d'aération suffisante, ramènent l'azote à l'état d'ion nitreux, voire ion ammonium ; ce métabolisme nécessite l'intervention d'une enzyme telle que la nitrate-réductase contenant du molybdène.

S'il y a longtemps que les bactéries du soufre et celles du fer et du manganèse ont fait l'objet de travaux très approfondis, depuis une époque plus récente, notamment, sous l'influence des minéralogistes et des géochimistes, on se préoccupe beaucoup des relations existant entre les bactéries et la matière minérale inanimée dont l'étude est actuellement promise à un bel avenir pratique. L'intervention de la vie en géochimie et en minéralogie a d'ailleurs été pressentie scientifiquement, il y a bien deux cents ans par l'Écossais JAMES HUTTON. On considère maintenant que la solubilisation et le dépôt des minéraux dans les terrains sont tributaires, pour une grande part, du facteur microbiologique, l'eau étant le premier agent géochimique de leurs transformations.

Les bactéries sont capables, essentiellement à cause de leur équipement enzymatique, d'une réactivité anorganique extraordinaire, en premier lieu oxydante et réductrice ; certaines sont des agents de concentration sélective, non seulement des éléments, mais parfois même des isotopes. C'est ainsi que le soufre, sous l'influence de l'énorme pouvoir de transfert énergétique des bactéries est l'objet d'un chimisme minéral intense, bien connu d'ailleurs des hydrologues thermalistes ; ce biochimisme du soufre a, en outre, des conséquences importantes en géochimie par suite de son interférence avec les transformations minéralogiques des autres éléments. Le genre *Thiobacillus*, lequel groupe de nombreuses espèces, presque toutes autotrophes et généralement aérobies, possède une aptitude remarquable à l'oxydation du soufre et de ses dérivés inférieurs en anion sulfate. *Thiobacillus thioparus* dont le pouvoir oxydant est considérable, dans les calcaires transforme le soufre en sulfate de calcium, l'oxygène provenant du CO₂ du carbonate de calcium ; l'ion phosphate est nécessaire, car le terme intermédiaire thiosulfate fournit le sulfate par un mécanisme faisant intervenir l'adénosinemonophosphate.

Thiobacillus thiooxydans vit et se développe dans des milieux à pH très bas pouvant descendre à 0,5 ; l'oxydation aboutit à l'acide sulfurique en fournissant une grande quantité d'énergie :



Il est capable de supporter la plus forte concentration en acide sulfurique qu'aucun autre micro-organisme connu ; il élabore un inositolphosphatide, agent mouillant qui facilite la réactivité vis-à-vis du substrat.

Thiobacillus ferroxydans, qui fonctionne également à faible pH, non seulement oxyde les sulfures, mais il oxyde aussi les minerais pyriteux et le fer.

Ces bactéries se rencontrent dans divers milieux naturels, les eaux, les sols, les eaux d'exhaure minières, notamment des mines de houille ; on sait les cultiver sur des milieux artificiels ; elles ont une grande activité chimique. Le travail de l'homme, tant scientifique pour la mise au point de l'acide sulfurique de contact au platine, puis au vanadium, que pratique, dans la fabrication moderne de routine, nous paraît plus pénible et fatigant !...

Il est difficile ici de ne pas faire allusion aux bactéries photosynthétisantes oxydant le soufre à l'aide de l'oxygène du dioxyde de carbone sous l'action de la lumière : ce sont les bactéries vertes et les bactéries pourpres du sous-embanchement des algobactéries, entièrement anaérobies en présence de la lumière et, au moins, partiellement hétérotrophes, car elles ont besoin de facteurs de croissance organiques.

Inversement un certain nombre de bactéries de la classe des sporulales et qui sont le plus souvent des anaérobies strictes, ont un énorme pouvoir réducteur et transforment les sulfates en sulfures ; ce sont d'une part des Clostridiales telles que *Clostridium nigrificans* et, d'autre part, des Sporovibrionales ; parmi ces dernières, *Desulfovibrio desulfuricans* réduit, avec grande facilité, les sulfates en hydrogène sulfuré à pH voisin de 4 ; des métabolites tels que l'adénosinetriphosphate doivent être présents, ce qui signifie une hétérotrophie au moins partielle et l'équipement enzymatique bactérien comprend le cytochrome C. De nombreux minerais sulfurés n'ont pas d'autre origine ; ils se forment dans l'eau de mer par métabolisation des sulfates et réaction avec les carbonates et les oxydes tels que FeCO₃ et CuO.

Il existe toute une microbiologie du fer qui a joué ou continue à jouer un rôle capital dans les dépôts minéralogiques de cet élément ; à partir des eaux, le fer ferreux dissous est oxydé par les bactéries et le fer ferrique en résultant, insoluble, se concrétise ; en l'absence d'air, le fer ferreux reste en solution et se dépose sous forme de carbonate ferreux ; toutes les eaux contenant du fer à un taux de quelques millièmes renferment des bactéries ferrugineuses.

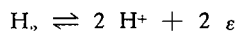
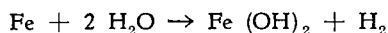
Si Thiobacillus thiooxydans qui intervient dans le cycle du soufre, oxyde également le fer, Thiobacillus ferroxydans, aérobie strict, lequel fonctionne entre pH 6 et pH 2, oxyde le sulfate ferreux en sulfate ferrique $Fe_2 (SO_4)_3$ et, même, par élévation métabolique du pH et hydrolyse, en sulfate basique $Fe (OH) (SO_4)$.

A ces faits est liée la corrosion biologique ; la vie bactérienne, grâce à la respiration cellulaire active l'oxygène moléculaire O_2 et là où l'oxydation purement chimique du fer nécessite un certain temps, l'intervention des microbes accélère considérablement l'attaque.

De la microbiologie du fer est à rapprocher celle du manganèse, élément de transition comme le fer et se situant à côté de lui dans la quatrième période de Mendéléeff et étroitement associé à celui-ci dans la Nature. D'importants dépôts d'origine marine de carbonates ou surtout d'oxydes de manganèse, notamment de pyrolusite MnO_2 , se rencontrent dans diverses régions du monde notamment en Russie ; on les considère comme étant de nature paléobactériologique ; ils se présentent souvent en nodules formés par concentration biologique à partir des eaux douces ou marines ; le mécanisme est à base de solubilisation, par réduction anaérobie du dioxyde MnO_2 , en monoxyde MnO , lequel est ensuite réoxydé en aérobie avec finalement, à nouveau, précipitation. L'oxyde ferrique peut oxyder, corrélativement, des éléments à leurs valences inférieures tels que le vanadium ou l'uranium. On se rend compte ainsi de ce que les micro-organismes, au nombre desquels il faut compter les moisissures outre les bactéries, apportent à la géochimie.

Mais si le bilan microbiologie et géochimie, peut probablement, du moins d'un certain point de vue, s'avérer, positif ou, en tous cas, ni négatif, ni positif, il n'en est pas de même dans le domaine d'une malédiction qui pèse sur le genre humain, celui de la corrosion ; la corrosion sévit tant vis-à-vis des matériaux métalliques que vis-à-vis des matériaux pierreux et dans ces deux perspectives, les microbes y tiennent une très grande place, parfois prédominante. Si le lecteur le veut bien, nous nous en tiendrons à la corrosion métallique.

Celle-ci est avant tout, un phénomène de micropiles transformant réciproquement de l'énergie chimique en énergie électrique. Il y a électrolyse, ce qui est dû à toute hétérogénéité interne structurale, soit physique, soit chimique, du métal, ou bien externe ce qui est dû au milieu ambiant, par suite de compositions quantitatives différentielles de celui-ci ou, surtout, de la présence dans ce dernier de substances agressives : oxygène, dioxyde de carbone, hydrogène sulfuré, acides minéraux ou organiques, électrolytes ; l'eau bien entendu, joue le premier rôle. Or, les métabolismes bactériens y coopèrent presque toujours, du moins dans le milieu naturel, par les substances réactives libérées. Il s'agit de bactéries souvent très banales comme Escherichia Coli, Proteus vulgaris, Welchia perfringens, lesquelles possèdent des hydrogénases dissociant les molécules H_2 en atomes H ionisables :



Les bactéries ferrugineuses, qui d'ailleurs assimilent le manganèse, aussi bien que le fer, et les bactéries sulfato-réductrices y figurent aussi au premier plan. Les canalisations de fonte ou d'acier, dans des sols humides, sont attaquées extérieurement en anaérobie. Les procédés anticorrosion les plus perfectionnés n'empêchent pas toujours les dégâts de se produire. Dans l'eau aérée circulant dans les canalisations, sous l'influence de diverses algobactéries, les Gallionella, Leptothrix et Crenothrix, Sphaerotilus, Siderobacter, Caulobacter, il y a attaque progressive des parois avec dépôt de concrétions très gênantes. La corrosion réduit à néant les produits que fournit, au prix de laborieux efforts, l'industrie métallurgique, disons surtout la sidérurgie.

Ainsi l'activité bactérienne a pour résultat tantôt de concentrer les matériaux minéraux à des taux parfois très élevés, tel est le cas des nodules de manganèse, tantôt au contraire de les solubiliser, de les disperser, de les détruire. Il y a un autre aspect, du rôle des bactéries vis-à-vis des matériaux minéraux en milieu aqueux, encore dû aux produits de leur métabolisme, c'est la complexation ou chélation des éléments chimiques; les molécules complexantes sont diverses protéines dont les enzymes ne sont pas exclues, des composés phénoliques, des polyalcools et autres composés à fonctions mixtes, qui ont souvent un pouvoir chélatant considérable. Les structures ioniques font place à des structures covalentes de coordination; il en résulte des conséquences importantes dans les propriétés des éléments dont les solubilités et les réactivités chimiques ioniques sont extrêmement modifiées. La stabilité des complexes organo-métalliques ne dépend pas seulement de la nature des molécules organiques complexantes, mais aussi des conditions du milieu, par exemple des facteurs de compétition chimiques ou biologiques ou du pH. La chélation des matériaux minéraux est là encore responsable tant de leur solubilisation et donc de leur transport dans les eaux que de leur dépôt dans certains sites. Beaucoup de formations minéralogiques n'ont pas d'autre origine.

Il faut joindre à ce phénomène de la chélation celui de la formation, sous l'influence des micro-organismes, de dérivés organiques covalents vrais de certains éléments. C'est le cas par exemple de la formation, sous l'action d'une moisissure Ascomycète, voisine des pénicilliums, Scopulariopsis brevicaulis, de dérivés méthylés, ou plus généralement alkylés, de l'arsenic, triméthylarsine, méthyldiéthylarsine, diméthyl-n-propylarsine, etc. Un autre exemple est lié à une affaire de pollution retentissante, celle du mercure en Suède et au Japon; il y a méthylation microbienne ou fongique dans les boues et sédiments marins ou d'eau douce.

Ainsi à l'activité bactérienne est liée la géochimie du soufre et du fer, mais il existe encore une véritable microbiogéochimie d'éléments tels que le manganèse, le cuivre, le zinc, le cobalt, l'uranium, des silicates, des halogénures, etc.; de nombreuses bactéries métabolisent et précipitent le calcium dans les eaux continentales ou marines (*).

Le pouvoir réactionnel bactérien est considérable: concentration sélective des éléments, résistance aux facteurs de l'environnement extérieur, tels que la température, dans de larges marges. Il n'est pas possible de s'étendre davantage dans le cadre de cet éditorial.

Le règne minéral est inséparable de la vie et il est remarquable que la vie unicellulaire, de façon plus ou moins prépondérante, a présidé depuis des centaines de millions d'années et davantage à l'élaboration d'une grande partie de la lithosphère telle qu'elle se présente de nos jours (ou se présentait encore récemment!...).

(*) B.R.G.M., Bull. Soc. Fr. Minér. Crist., 1973. — S. LAMBIN et A. GERMAIN, Précis de Microbiologie, 1969. A.R. PRÉVOT, Systématique Bactérienne, 1961. — J.E. ZAJIC, Microbial Biogeochemistry, 1969.

ÉDITORIAL

Depuis quelques décennies, semble-t-il, la recherche dans ces domaines s'intensifie, d'abord en ce qui concerne les phénomènes naturels. Mais aussi des méthodes particulières ont été mises au point au laboratoire : adaptation étroite des milieux de culture, sélection des souches sur le terrain, extraction des métabolites microbiens suivie de leur expérimentation directe sur le matériel minéral, recherche des facteurs d'inhibition, techniques de biolixiviation. Il existe déjà des procédés microbiologiques industriels, mis en œuvre dans des exploitations minières, qui permettent de traiter sur place des minerais pauvres.

Il est facile d'imaginer l'avenir de ce travail puisque dans toute la philosophie qui se dégage de la conjoncture contemporaine, une chose est sûre, c'est la tendance majeure à la consommation des gîtes naturels à grande concentration avec, pour corollaire, la dilution générale des éléments chimiques. Les applications de ces faits deviendront progressivement une nécessité impérative dans la Société Humaine.

Bactéries et matière minérale inanimée, quoiqu'il en soit, forment avec l'eau, sur notre planète Terre, un système qui est probablement une explication fondamentale, ô combien sommaire, parmi toutes celles dont nous sommes ici-bas si anxieusement avides.

A. M.