

ROLE ET IMPORTANCE DES BACTÉRIES DANS L'EAU

par A. WURTZ

Chef de travaux à la *Station Centrale d'Hydrobiologie appliquée.*

En Hydrobiologie appliquée, le problème qui se pose et le but que l'on poursuit sont les mêmes qu'en Agronomie : le produit terminal que l'on cherche à obtenir dans les lacs, les étangs, les rivières et les fleuves, est toujours, en dernier ressort, comme dans un pré ou dans un champ, de la « chair animale ». La synthèse de cette « chair animale », que ce soit du bœuf ou du poisson, que cela se passe dans un champ ou dans l'eau, est toujours réalisée à partir de substances minérales très simples (eau, gaz carbonique, nitrates, phosphates, sels minéraux divers : sulfates, carbonates ou chlorures de Calcium, de Sodium, de Potassium, de Magnésium, de Fer, etc., par l'intermédiaire des Végétaux.

Mais les Végétaux sont seuls capables de réaliser la synthèse de la matière vivante à partir des substances minérales simples ; les Animaux en sont incapables et ont besoin, pour se nourrir, du règne végétal. Tout le monde connaît maintenant le cycle classique de la matière vivante qui peut se résumer, dans les eaux, de la manière suivante :

Les Végétaux aquatiques (Phanérogames littorales, flottantes ou submergées, Algues benthiques, Algues flottantes du Phytoplancton) utilisent les substances minérales simples de l'eau et font la synthèse de leur matière vivante, — puis les petits Crustacés, les Rotifères du Zooplancton mangent les Algues, les petits Vers se nourrissent de détritux végétaux de toutes sortes, les Mollusques broutent les feuilles et les tiges submergées, les Insectes et leurs larves aquatiques font de même, ou, s'ils sont carnivores, attrapent des proies plus petites qu'eux, — finalement tout ce monde microscopique qui s'entre-tue et s'entre-dévore, sert de nourriture aux Poissons.

Toute action sur l'un de ces facteurs, toute cause extérieure modifiant l'un de ces éléments aura une répercussion sur le produit terminal : le Poisson. Il est inutile de rappeler que l'introduction rationnelle d'engrais (chaux, azote, phosphore) dans un étang, favorise considérablement le développement des Algues du Phytoplancton, et augmente indirectement, à la fin du cycle, la production en Poissons. On peut bien dire que les Animaux dépendent étroitement des Végétaux.

Sans le règne végétal, il n'y aurait pas de règne animal !

Mais il faut compléter cette phrase en disant : sans les Bactéries, il n'y aurait à la fois ni règne végétal, ni règne animal !

Cette affirmation peut paraître surprenante aux personnes non averties, qui voient dans les Bactéries surtout des « microbes » pathogènes, responsables de toutes sortes de maladies. S'il existe, en effet, des Bactéries patho-

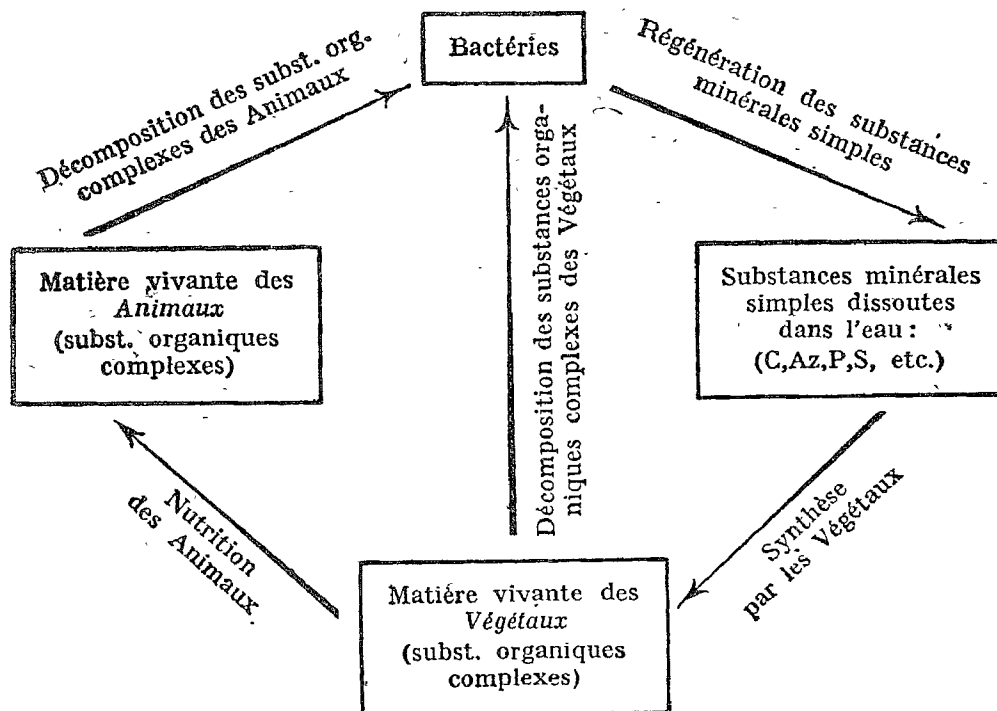


FIG. 11. — Résumé schématique du cycle de la matière vivante dans l'eau.
Les Bactéries décomposent les substances organiques complexes des Animaux*
et des Végétaux et régénèrent les substances minérales simples.

gènes, il en est d'autres, au contraire (et leur nombre est prodigieux) qui jouent un rôle primordial dans la Biologie des eaux.

On se rend bien compte que, dans le cycle dont je viens de parler, il manque quelque chose. Il est évident que les substances minérales simples ne peuvent pas durer indéfiniment et qu'elles seraient fatalement épuisées par la consommation qu'en font les Végétaux, et indirectement les Animaux. Il faut que ces substances simples (carbone, azote, soufre, phosphore, etc.) soient régénérées. Or, qu'advient-il des cadavres des êtres vivants après leur mort ? Ils sont attaqués et décomposés par les Bactéries : les composés organiques formés, synthétisés dans les cellules vivantes à partir des substances minérales simples, sont détruits par des réactions chimiques compliquées (oxydations, réductions) et ramenés à

l'état de substances minérales simples. Les Bactéries referment ainsi le cycle en régénérant ces substances.

On peut schématiser très grossièrement ce cycle par la figure 11.

Il est donc utile de préciser l'importance et le rôle considérable des Bactéries en Hydrobiologie. Mais le métabolisme de ces Bactéries, c'est-à-dire l'ensemble des transformations de matière dont elles sont le siège, étant très complexe, il est nécessaire d'en dire auparavant quelques mots.

I. — MÉTABOLISME DES BACTÉRIES DE L'EAU

On se rend difficilement compte de l'importance considérable des Bactéries qui forment un règne à elles seules et dont le nombre dépasse largement celui de tous les autres êtres vivants réunis. Un grand nombre d'entre elles se trouvent dans l'eau. Leur rôle dans le cycle du Carbone, de l'Azote, du Soufre, du Phosphore, etc., dans les fermentations aérobies et anaérobies de la vase (on commence même à entrevoir leur rôle possible dans la formation du charbon et du pétrole), dans les maladies parasitaires des Plantes, des Animaux et de l'Homme, justifie le développement d'une science nouvelle : l'Hydrobactériologie.

Les Bactéries sont à la fois les organismes les plus simples et les plus diversifiés. Simples parce que leurs cellules, généralement isolées, globuleuses ou filiformes ont un diamètre ne dépassant pas 2μ , ne possèdent pas de noyau défini, n'ont pas de pigment respiratoire animal ou végétal (ni hémoglobine, ni chlorophylle) et ne présentent pas de sexualité.

Diversifiés parce que l'on y rencontre des types de métabolisme (Rhodothiobactéries et autres Sulfuraires, Nitrifiantes, Dénitrifiantes, Bactéries anaérobies, etc.) qui n'existent pas ailleurs.

Le métabolisme des Bactéries permet de classer ces organismes en deux grandes catégories : Bactéries autotrophes et Bactéries hétérotrophes.

1. — *Bactéries autotrophes*. Le terme « autotrophe » s'applique à des organismes capables de synthétiser leurs aliments, de fabriquer leur matière vivante à partir de substances purement minérales. Leurs éléments nutritifs sont le gaz carbonique, l'eau, et quelques sels minéraux. Deux modes sont possibles pour réaliser cette synthèse.

La photosynthèse. C'est le cas de toutes les Plantes vertes pourvues de chlorophylle et de quelques rares Bactéries de l'eau (Rhodothiobactéries ou Bactéries sulfuraires pourpres) qui utilisent l'énergie des radiations lumineuses. Ces organismes ont donc besoin de la lumière solaire pour se développer.

La chimiosynthèse. C'est le cas des Bactéries nitreuses ou nitriques, de certaines Sulfuraires, etc., qui utilisent non pas l'énergie lumineuse, mais l'énergie de certaines réactions chimiques exothermiques. Ces réactions sont, par exemple, pour les Sulfuraires, l'oxydation de l'Hydrogène sul-

furé. Les Bactéries de ce groupe ne sont donc pas liées à la lumière et peuvent se développer à l'obscurité.

2. — *Bactéries hétérotrophes*. Les organismes hétérotrophes consomment la matière organique élaborée par d'autres cellules ; on peut les subdiviser en :

Saprophytes qui se nourrissent des produits de décomposition d'autres organismes morts (Bactéries de la putréfaction) et en :

Parasites (1) qui se nourrissent aux dépens d'un hôte vivant nettement défini, et souvent incommodé par leur présence.

2. — LES BACTÉRIES DE L'EAU DANS LE CYCLE DU CARBONE ET DES MATIÈRES ORGANIQUES

Le Carbone est un des constituants essentiels de la matière vivante. La principale source de Carbone nécessaire à tout être vivant dans l'eau est le gaz carbonique (CO_2) dissous dans l'eau. Les composés du Carbone constituant la matière vivante sont appelés d'un terme très vague et très général : « matières organiques ». Sous ce nom on comprend toutes les substances carbonées synthétisées et accumulées par les organismes lorsqu'ils sont vivants, ou décomposées lorsqu'ils sont morts. Pour ne citer que les plus importantes, signalons : — les *hydrates de Carbone* (amidon, sucres des Végétaux, cellulose formant l'enveloppe des cellules végétales), — les *lignines* des tissus végétaux lignifiés, — les *composés protéiques* capables de libérer du gaz carbonique par décomposition, — la *chitine* formant la carapace des Crustacés (Ecrevisses, Cladocères et Copépodes du Plancton), — les *corps gras*, abondants surtout dans les cellules des Diatomées et dans le corps des Copépodes, etc..

Or, les Bactéries sont capables de décomposer toutes ces substances. D'un côté nous avons la synthèse des matières organiques par les Végétaux chlorophylliens et par certaines Bactéries (autotrophes), de l'autre côté nous avons la décomposition de ces matières par les Bactéries.

On sait que l'amidon et la plupart des sucres sont décomposés par les Bactéries. Ce sont de notions de Chimie biologique courantes sur lesquelles il est inutile d'insister.

La décomposition de la cellulose est particulièrement intéressante ; je n'ai pas besoin de rappeler que le rouissage du Chanvre est tout simplement la décomposition des tissus cellulosiques par les Bactéries cellulolytiques extrêmement nombreuses dans les eaux croupissantes des étangs de rouissage.

Lorsque la décomposition de la cellulose est aérobie, c'est-à-dire lors-

(1) Je n'étudierai pas ici les Bactéries parasites qui sont du domaine de la Pathologie et sortent de ma compétence.

qu'elle ce fait en présence d'oxygène, les Bactéries (*Cytophaga*, *Cellvibrio*, *Cellfascicula*) se chargent de la transformer en eau et en gaz carbonique. Dans des conditions anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène, la décomposition de la cellulose produit du Méthane (gaz des marais) et de l'Hydrogène. C'est ce qui a lieu dans la vase de beaucoup d'étangs encombrés de débris de Végétaux et dans les marécages. Lorsque les Végétaux supérieurs poussant dans les lacs et les étangs meurent, ou lorsqu'on les faucarde, le même phénomène se produit : les Bactéries cellulolysantes commencent immédiatement à attaquer les tissus cellulosiques. Cette première attaque libère ensuite la matière vivante protéique des cellules qui est attaquée et décomposée à son tour ; il est difficile et même impossible d'isoler un cycle, car tous les phénomènes s'entre-pénètrent dans l'eau ; les décompositions que nous essayons d'isoler pour les comprendre sont, en effet, étroitement liées les unes aux autres.

Cependant toutes les substances organiques ne sont pas attaquées avec la même vitesse ou la même intensité. Ainsi la lignine est oxydée lentement par les Bactéries. Un exemple frappant est fourni par la décomposition bactérienne des eaux résiduaires bisulfiteuses provenant des usines de fabrication de pâtes de bois et de cellulose. On sait que dans l'extraction chimique de la cellulose à partir des pâtes de bois, il reste une lessive noire, résidu encombrant, qu'il est interdit de déverser dans les rivières ; où il empoisonnerait les Poissons. Cette lessive renferme les résidus de bois à l'état de lignosulfate de Calcium, essentiellement composé de lignine. En inoculant cette lessive avec des boues riches en Bactéries décomposant la lignine, on obtient une fermentation produisant du gaz carbonique, du Méthane, et de l'Hydrogène sulfuré. Il y a là peut-être une application intéressante des décompositions bactériennes à la lutte contre les pollutions des eaux par les déchets industriels.

En général, les hydrates de Carbone et certains composés protéiques sont attaqués plus rapidement. La chitine de la carapace des Crustacés et des insectes est attaquée lentement par certaines Bactéries comme *Bacillus chitinivorus*.

Les graisses et les huiles que renferment les Diatomées, les Copépodes, les Invertébrés supérieurs, etc., sont attaquées par des Bactéries lipolytiques. Dans la décomposition des acides gras (désoxygénation et décarboxylation) par les Bactéries, on obtient du gaz carbonique et des carbures d'hydrogène supérieurs, entrant dans la composition des pétroles.

Quoi qu'il en soit, certains composés organiques ont tendance à s'accumuler dans l'eau, parce qu'ils sont plus résistants à l'action bactérienne, ils tombent sur le fond des étangs ou des lacs, constituant un « humus organique », ou bien restent dans l'eau, en solution, sous forme d'humus colloïdal, plus ou moins bien défini.

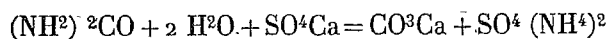
3. — LES BACTÉRIES DE L'EAU DANS LE CYCLE DE L'AZOTE

Le cycle de l'Azote, constituant essentiel de la matière vivante (matières protéiques) est très compliqué dans l'eau, mais il est éclairé par des faits déjà bien connus pour ce même cycle dans le sol. L'Azote, fixé et immobilisé par la matière vivante sous forme de matières protéiques (acides aminés, amides) est remis en circulation par les Bactéries à la suite de réactions bien définies qui sont l'ammonisation et la nitrification (nitrosation, nitratation). Certaines Bactéries sont capables, dans l'eau comme dans le sol, de fixer l'Azote gazeux, et il en est d'autres qui viennent contrecarrer les réactions précédentes : ce sont les dénitrifiantes.

Ammonisation.

L'ammonisation consiste en l'attaque des matières protéiques des organismes animaux ou végétaux (cadavres des organismes du Plancton, Végétaux supérieurs ayant déjà subi un commencement de décomposition par les cellulolyzantes, déchets organiques de toute sorte, cadavres d'Animaux supérieurs) par décarboxylation et désamination, avec libération d'ammoniaque. Un certain nombre de Champignons sont capables d'effectuer ces transformations, mais ce sont surtout les Bactéries qui en sont responsables : *Bacillus subtilis*, *B. coli*, *B. mycoïdes*, *B. megatherium*, *B. fluorescens* (Bactéries protéolytiques aérobies). WAKSMAN a pu mettre en évidence la libération très rapide d'ammoniaque dans la décomposition des Copépodes planctoniques par les Bactéries.

L'urée, substance de déchet azoté existant dans l'urine est également décomposée par les Bactéries. Il ne faut pas s'étonner qu'on la trouve dans l'eau. BAVENDAMM a pu montrer que les Bactéries décomposant l'urée, du type *Micrococcus ureæ* découvert par PASTEUR, sont largement répandues dans l'eau et dans la vase. Il est probable qu'en présence de sulfate de Calcium (gypse), ces Bactéries sont capables de précipiter le carbonate de Calcium, tout en décomposant l'urée, d'après la réaction suivante :



Les Bactéries de l'ammonisation préfèrent les milieux neutres ou légèrement alcalins, c'est-à-dire à pH > 7. On comprend que dans les eaux acides, l'attaque des matières organiques et protéiques soit plus ou moins bloquée. Les composés humiques, non attaqués, s'accumulent. Cette accumulation souvent considérable de débris végétaux détermine la formation d'une matière compacte et noire qui est la tourbe. Les eaux acides arrêtent donc la décomposition bactérienne ; les eaux alcalines la favorisent, d'où l'introduction de chaux pour activer la décomposition bactérienne et la libération de l'Azote protéique.

Nitrification.

La nitrification se fait en deux étapes. Il y a d'abord une *nitrosation*, c'est-à-dire une transformation chimiosynthétique des sels ammoniacaux en nitrites par les Bactéries de la nitrosation ou *Bactéries nitreuses* (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*), suivie d'une *nitration*, oxydation des nitrites en nitrates par des *Bactéries nitriques* (*Nitrobacter*).

Ces deux groupes de Bactéries nitrifiantes sont les mêmes dans les eaux que dans les sols ; elles sont autotrophes, car elles fabriquent leurs cellules par chimiosynthèse à partir de solutions exclusivement minérales (sels ammoniacaux, nitrites). Elles sont même tellement liées aux substances minérales pures que des traces de matières organiques leur sont nuisibles. La nitrification, c'est-à-dire l'oxydation de l'ammoniaque ne peut avoir lieu que dans des couches d'eau suffisamment pures pour que les matières organiques présentes ne puissent pas nuire aux Bactéries nitrifiantes. L'énergie nécessaire à l'utilisation du gaz carbonique par ces Bactéries provient finalement de l'oxydation des nitrites en nitrates.

Bactéries dénitrifiantes.

Ces curieuses Bactéries, le plus souvent anaérobies, sont capables de réduire les nitrates, d'utiliser l'oxygène de la liaison NO^3 , d'effectuer le retour en arrière aux nitrites et de provoquer même un dégagement gazeux d'Azote (*Pseudomonas azotogena*). La réduction peut être poussée plus ou moins loin.

Cette dénitrification vient contrecarrer la chaîne des réactions précédemment établie dans la nitrification. Elle peut avoir lieu dans les eaux pauvres en oxygène et riches en matières organiques. D'ailleurs un certain nombre de Bactéries pathogènes (*Vibron du Choléra*, *Bacille pyocyanique*, *B. coli*) sont aussi des dénitrifiantes. Dans les lacs tropicaux et dans l'eau de mer, certaines dénitrifiantes (*Pseudomonas calcis*, *P. calciprecipitans*) provoquent encore la précipitation du Carbonate de calcium.

Bactéries fixatrices d'Azote.

Les Végétaux verts ne peuvent utiliser l'Azote que sous forme de nitrates, et accessoirement, de sels ammoniacaux. Les Bactéries que nous venons de voir régénèrent les nitrates ; les dénitrifiantes attaquent les nitrates pour en faire des nitrites et quelquefois de l'Azote libre comme produit terminal. En dehors de ce dernier cas où il est un produit terminal exceptionnel, l'Azote libre, gaz inerte, ne semble pas jouer un rôle dans le cycle.

Il existe cependant des Bactéries tout à fait singulières, capables de fixer l'Azote libre dissous dans l'eau. Cet Azote, qui resterait toujours un gaz inerte et inutilisable, est fixé par des Bactéries anaérobies (*Clostridium*

pasteurianum) ou aérobie (*Azotobacter chroococcum*, *A. agilis*) et entre ainsi dans le cycle. On ne sait pas si ces espèces sont indigènes dans les lacs et les étangs, ou si elles proviennent simplement du sol environnant où on les rencontre fort communément. Beaucoup de problèmes restent encore à résoudre dans ce domaine.

4. — LES BACTÉRIES DE L'EAU DANS LE CYCLE DU SOUFRE

Le Soufre est aussi un constituant chimique fondamental de la matière vivante. On le rencontre dans le protoplasme, combiné à des acides aminés : cystine, cystéine, méthionine, etc. La mort et la décomposition de la matière vivante libère des composés sulfurés attaqués par des Bactéries. Les Bactéries qui transforment le Soufre et ses composés peuvent avoir des répercussions importantes sur le pH, la couleur de l'eau, la teneur en gaz carbonique ou en Oxygène, rendre l'eau inhabitable pour d'autres organismes ou, au contraire, favoriser leur croissance.

Sous quelle forme trouve-t-on les composés du Soufre dans l'eau ? A l'état de sulfates et d'Hydrogène sulfuré. Les grandes étapes de la destruction des composés du Soufre organique dans la matière vivante et la régénération du Soufre minéral par les Bactéries sont les suivantes :

1° Formation d'Hydrogène sulfuré par des Bactéries au cours de la putréfaction de matières protéiques combinées au Soufre.

2° Oxydation de l'Hydrogène sulfuré en sulfates par les Bactéries sulfoxydantes.

3° Réduction des sulfates par les Bactéries sulforéductrices.

La première étape se comprend assez facilement, car elle est voisine de l'ammonisation : les Bactéries de la putréfaction, attaquant les matières protéiques, libèrent aussi les composés organiques du Soufre sous forme d'Hydrogène sulfuré. Toutes les Bactéries ne sont évidemment pas capables de libérer de l'Hydrogène sulfuré, mais cette faculté est si largement répandue dans l'eau qu'elle peut être considérée comme universelle et non-spécifique.

Bactéries sulfoxydantes.

La deuxième étape est plus complexe et nécessite une étude plus détaillée, en fonction des Bactéries qui l'accomplissent. Deux grands groupes sont à considérer : Rhodothiobactéries et Leucothiobactéries.

Rhodothiobactéries ou *Bactéries sulfureuses pourpres*. — Ces Bactéries, souvent très grandes (*Chromatium okenii* : 6 μ de diamètre), généralement flagellées, sont colorées en rouge par l'association de deux pigments : bactériopurpurine et bactériochlorine, dont le deuxième, encore mal connu, est peut-être voisin de la chlorophylle. Elles sont anaérobies et se déve-

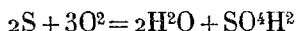
loppent en présence d'Hydrogène sulfuré, à la lumière. L'Hydrogène sulfuré est oxydé et s'accumule dans les cellules bactériennes sous forme de Soufre colloïdal, C'est le seul groupe de Bactéries capables de réaliser ainsi à la lumière une photosynthèse.

La réaction d'oxydation de l'Hydrogène sulfuré (H^2S), peut s'écrire de la manière suivante :



Le dépôt de Soufre dans les cellules bactériennes correspond à l'émission d'oxygène dans la photosynthèse des plantes vertes.

Mais les choses ne s'arrêtent pas là. Lorsque l'Hydrogène sulfuré existant dans le milieu est épuisé, les Sulfuraires pourpres commencent à oxyder le Soufre déposé dans leurs cellules d'après la réaction :



Cet acide sulfurique est excrété à l'extérieur des cellules, dans l'eau, où il se combine immédiatement aux bases toujours présentes (chaux, oxyde de fer) pour former des sulfates, par exemple du sulfate de Calcium (gypse).

Les Sulfuraires pourpres ont été très souvent signalées dans les eaux douces où elles forment quelquefois des nuages rouges. Des lacs entiers peuvent être colorés en rouge par leur présence (« lacs de sang ») ; UTERMOHL a compté jusqu'à 10.000 cellules de *Thiopedia rosea* par cm^3 d'eau dans certains étangs. Parmi les plus intéressantes d'entre elles, signalons : *Thiopedia rosea*, *Rhabdomonas rosea*, *Amœbobacter roseum*, etc. Les colorations rouges se rencontrent aussi profondément dans la vase.

(A suivre.)
