CHAMPIGNONS, BACTÉRIES ET ALGUES DES EAUX POLLUÉES (Suite) ⁽¹⁾

par A. WURTZ

Chef de travaux des Eaux et Forêts,
chargé de la Station d'Hydrobiologie appliquée du Paraclet.

Position systématique. Affinités avec les Ferrobactéries.

Le caractère le plus important des *Sphærotilus* est l'existence d'une gaine, plus ou moins épaisse, constamment présente, ce qui permet de les ranger dans l'ordre des Chlamydo bactériales ou Bactéries à gaine. Comme on est en présence de faux-filaments, avec simplement un alignement de cellules bactériennes à l'intérieur des gaines, les caractères de ramification, le nombre de rangées longitudinales de chapelets de cellules, la disposition même des cellules dans les gaines, sont des caractères secondaires.

Ceci nous amène à parler des affinités entre les *Sphærotilus* et les Ferrobactéries, en particulier *Leptothrix ochracea* KUTZ., dont la position systématique, le fonctionnement physiologique et par conséquent l'écologie, présentent encore bien des points obscurs.

Jusqu'à ces dernières années, on croyait pouvoir séparer d'une manière assez claire au sein des Ferrobactéries celles qui étaient strictement autotrophes, opérant par chimiosynthèse (telles les *Leptothrix*, *Clonothrix*, *Crenothrix* et même, dans une certaine mesure, les *Gallionella*) de celles qui n'étaient que facultativement des Ferrobactéries, où dominait la nutrition hétérotrophe (comme, par exemple, les *Sphærotilus*).

On distinguait :

1°) les Ferrobactéries au sens strict du mot, qui oxydent les sels ferreux en sels ferriques, déposent de l'hydroxyde ferrique $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ couleur de rouille dans leurs gaines, vivent dans les eaux pures, n'ont pas besoin de matières organiques, et sont même incapables d'en utiliser les plus petites quantités.

(1) Voir *Bull. français de Pisc.* n° 182, Juillet-Sept. 1956.

2°) les Chlamydobactériales telles que les *Sphærotilus* qui utilisent surtout des matières organiques, mais sont parfois capables de précipiter également les sels de fer dans leurs gaines sous forme d'hydroxyde ferrique, et qui sont, par conséquent, des Ferrobactéries au sens large du mot.

A la lumière de travaux tout à fait récents (HOHN, 1955, en particulier), cette distinction ne résiste pas à l'expérimentation. MOLISCH le présentait en écrivant dès 1910 : « Les Ferrobactéries sont hétérotrophes comme la plupart des saprophytes habituels. Si on les différencie, c'est simplement parce que les Ferrobactéries ont la faculté de produire une gaine de substance mucilagineuse et d'y fixer l'oxyde de fer. »

Il semble de plus en plus démontré que les « Ferrobactéries » *sensu stricto* ne sont pas strictement autotrophes et que dans les eaux pures, ou du moins définies comme telles (par exemple, des ruisseaux de montagne sur terrains anciens, granitiques ou éruptifs) elles utilisent les matières organiques présentes en quantités très faibles. Leur autotrophie, qui peut être à l'occasion très faible, est toute relative. De nouvelles expériences extrêmement précises demandent à être faites pour savoir si l'autotrophie par chimiosynthèse chez certaines Ferrobactéries est bien une réalité physiologique. Pour l'instant, les preuves expérimentales formelles manquent encore.

Par contre, *Sphærotilus* est capable de pousser dans des solutions nutritives extrêmement pauvres en matières organiques, indosables même au point de vue analytique. Son hétérotrophie est donc aussi relative. La présence du fer (ou accessoirement du manganèse) n'est pas indispensable à sa croissance. Mais s'il y a des sels ferreux dans l'eau, *Sphærotilus* les oxyde en précipitant l'hydroxyde ferrique, et se comporte, comme je l'ai dit plus haut, en Ferrobactérie facultative. La question se complique lorsqu'en culture les deux organismes, la « vraie » Ferrobactérie *Leptothrix ochracea*, et la « fausse » Ferrobactérie *Sphærotilus natans* se comportent de la même manière et se transforment l'une en l'autre. Nous nous trouvons alors en pleine confusion systématique ; on commence seulement à voir clair dans la systématique de ces organismes en utilisant des méthodes expérimentales de culture et de physiologie, et non pas seulement des descriptions morphologiques.

On peut résumer nos connaissances actuelles sur l'ensemble des Chlamydobactériales qui sont donc toutes à des degrés divers des Ferrobactéries en un tableau provisoirement simplifié que voici :

<i>Sphærotilus natans</i> KUTZ.	{	= <i>Cladothrix dichotoma</i> COHN.
		= <i>Leptothrix ochracea</i> KUTZ. (fig. 11 A)
		et les espèces <i>sideropous</i> , <i>pseudovacuolata</i> (fig. 11 B et C), <i>lopholea</i> , etc...
		— <i>Chlamydothrix</i> MIG.
		= <i>Clonothrix</i> (faussement <i>Crenothrix</i>) <i>fusca</i> ROZE.
<i>Sphærotilus</i> (anciennement <i>Leptothrix</i>) <i>discophorus</i> (SCHWERS) PRINGSH.	{	= <i>Megalothrix discophora</i> SCHWERS.
		= <i>Leptothrix crassa</i> CHOLODNY.
		= <i>L. meyeri</i> ELLIS.

Sphaerotilus (anciennement *Leptothrix*) *trigogenes* CHOLODNY.
Crenothrix polyspora COHN.

Ce tableau appelle les commentaires suivants, à la lumière de ce que nous venons de dire dans les paragraphes précédents :

1° *Cladothrix dichotoma* et *Leptothrix ochracea* sont des modifications réversibles de *Sphaerotilus natans*. Le nom de *Sphaerotilus* étant le premier

Planche IV. — FERROBACTÉRIES

Fig. 11. — Ferrobactéries appartenant à l'ancien genre *Leptothrix*.
 A) *Leptothrix ochracea*, espèce devant être conservée, mais identifiée avec *Sphaerotilus natans* encore discutée. Gross. env. 800 ×.
 B) *Leptothrix sideropous*, espèce probablement à supprimer. Gross. env. 800 ×.
 C) *Leptothrix pseudovacuoleta*, également à supprimer. Gross. env. 800 ×.
 Fig. 12. — *Sphaerotilus* (anciennement *Leptothrix*) *discophorus*. Gross. env. 1.000 ×.
 Fig. 13. — *Sphaerotilus* (anciennement *Leptothrix*) *trichogenes*. Gross. env. 1.000 ×.
 Fig. 14. — *Crenothrix polyspora*. Gross. env. 1.000 ×.

en date, il est le seul à devoir être maintenu ; tous les autres noms peuvent être supprimés, même *Leptothrix ochracea*. Cela peut paraître surprenant pour ceux qui ont l'habitude de récolter ces deux formes dans des stations totalement différentes au point de vue écologique : *Leptothrix ochracea*, par exemple, dans des eaux pures légèrement ferrugineuses, des ruisseaux ou des rivières de montagnes, et *Sphaerotilus natans* dans des rivières polluées par des égouts ou des déversements d'eaux résiduaires de sucreries. Pour le moment, il faut s'incliner devant les expériences qui montrent que ce sont deux formes qui peuvent se transformer l'une dans l'autre.

2° *Sphærotilus* (anciennement *Leptothrix*) *discophorus* semble devoir être maintenu, car il se distingue par des caractères morphologiques et physiologiques assez nets : gaines plus épaisses, jusqu'à 10 à 20 μ d'épaisseur, souvent confluentes ; fausses ramifications rares ; souvent fixées sous la surface de l'eau par la gaine élargie en un petit disque (fig. 12) ; à l'extrémité, la gaine s'amincit, donnant à l'ensemble des filaments l'aspect de fouets ; il supporte des teneurs assez élevées en matières organiques (humiques, le cas échéant), fixe dans ses gaines sélectivement le manganèse et prend dans ce cas une couleur brun sépia foncé.

3° *Sphærotilus* (anciennement *Leptothrix*) *trichogenes*, est une forme sûre, assez facile à distinguer : ses gaines sont formées de fibrilles longitudinales qui se déchirent au moment de la croissance des filaments et prennent des courbures en U caractéristiques (fig. 13).

4° *Crenothrix polyspora*, répandu dans les eaux de fontaines ferrugineuses, les puits, les canalisations, est toujours fixé par une base mince, qui va s'épaississant légèrement en forme d'entonnoir aux extrémités, chez les filaments âgés (fig. 14).

Il va sans dire que cette simplification extrême, qui ne conserve que quatre Chlamydo bactériales (réparties en deux genres : *Sphærotilus* avec trois espèces, et *Crenothrix* avec une espèce) paraît provisoire. Des travaux sont actuellement en cours pour mieux comprendre le fonctionnement de ces organismes. S'il est vrai que, dans l'état actuel de nos connaissances, toutes les formes autres que les quatre précitées peuvent être supprimées parce que mal ou insuffisamment décrites, il n'en est pas moins possible qu'à la suite d'expériences plus poussées de nouvelles formes puissent prendre rang d'espèces ou même de genres stables.

Cet exposé sur les Ferrobactéries, indispensable pour comprendre la position des *Sphærotilus*, semble nous éloigner des eaux polluées. En réalité, les Ferrobactéries (surtout les filamenteuses d'eaux pures décrites sous le nom de *Leptothrix ochracea*) peuvent devenir aussi envahissantes et gênantes que les *Sphærotilus* dans les eaux polluées. Sans parler des problèmes d'alimentation en eau potable (sources et eaux ferrugineuses), les Ferrobactéries sont considérées comme nettement nuisibles dans les installations hydro-électriques. En effet, elles se développent abondamment dans les conduites d'amenée d'eau, et par leurs enduits plus ou moins épais, provoquent des « pertes de charge » bien connues des ingénieurs-électriciens, notamment dans les installations hydro-électriques des Alpes, du Massif-Central et, comme j'ai pu le constater récemment, de la Forêt Noire, pertes de charges qui se traduisent à la fin de l'année par une perte de quelques millions de francs de courant électrique non produit. Comme on ne connaît pas encore assez bien les conditions écologiques du développement de ces Ferrobactéries, on n'a pas trouvé de procédé chimique pour les éliminer. Le seul moyen pour s'en débarrasser consiste en des procédés mécaniques de grattage, lesquels sont toujours fastidieux et coûteux, quelle que soit la méthode employée, car ils obligent à pénétrer dans les galeries,

à arrêter le fonctionnement de celles-ci pendant le temps nécessaire, et ceci à des intervalles d'autant plus rapprochés que les enduits de Ferrobactéries se reforment plus vite (dans certaines galeries hydro-électriques, le grattage est nécessaire tous les 5 à 6 mois).

Il ne sera pas question ici des Ferrobactéries en forme de coques, telles les *Siderocapsa* qui appartiennent à un autre groupe de Bactéries.

Conditions écologiques du développement des *Sphaerotilus*.

Les *Sphaerotilus* présentant une analogie morphologique assez marquée avec les *Leptomitilus*, en particulier le même aspect « en queue de mouton » dans les cours d'eaux pollués, on s'explique la confusion qui régnait jusqu'à présent, et l'opinion que *Sphaerotilus* se développe dans les mêmes conditions écologiques que *Leptomitilus*. Le but de cet article étant justement de lever la confusion, il convient de préciser les particularités des deux organismes.

Il y a d'abord un mythe qu'il faut détruire : c'est celui du développement spontané des *Sphaerotilus* dans les rivières propres, sans apport d'eaux résiduaires. Il n'est pas possible qu'un pareil développement ait lieu sans qu'une pollution organique ne se trouve à l'origine. J'ai entendu souvent des industriels mis en présence d'une quantité abondante de *Sphaerotilus* en aval de leur usine prétendre que ces développements se faisaient « naturellement », parce que la température de l'eau s'élevait en été, parce qu'il y avait des fermentations dans l'eau, sans aucun rapport avec l'activité de l'usine. Comme les *Leptomitilus*, les *Sphaerotilus* ne se développent que lorsqu'il y a une surcharge constante des rivières en eaux résiduaires ; ils constituent une preuve juridique de la pollution organique chronique, une preuve que l'on peut même considérer comme ineffaçable. Dans de nombreux cas de pollutions organiques chroniques, où il est déversé de l'eau surchargée en matières organiques fermentescibles, mais non toxique, l'analyse chimique ne prouve rien. Ce sont les modifications de la faune et de la flore qui démontrent alors la pollution, et surtout l'installation massive des *Sphaerotilus*. Dans ce cas, ceux-ci sont des indicateurs de pollution beaucoup plus valables que les caractères de toxicité de l'eau résiduaire, caractères souvent fugaces auxquels on attache une importance juridique trop grande.

Quelles sont donc les substances responsables du développement de *Sphaerotilus natans*? Leur diversité est extraordinairement grande ; les travaux de physiologie pour préciser les conditions de développement des *Sphaerotilus* ont été commencées il y a peu de temps seulement ou sont encore en cours.

Comme substances responsables, il convient d'étudier soit les sels minéraux seuls, soit associés à une source de carbone ou d'azote qui joue le rôle d'aliment. Nous passerons successivement et rapidement en revue les sels minéraux, les hydrates de carbone, les acides organiques et les matières organiques azotées.

1. *Sels minéraux.* — La teneur en sels minéraux, susceptible de provoquer la croissance de *Sphærotilus*, peut être extrêmement variable. D'après LACKEY et WATTIE, des concentrations en sels minéraux de l'ordre de 0,03% inhiberaient déjà la croissance de *Sphærotilus*. Pour SCHEURING, cette limite se trouve, avec des solutions équilibrées de sels ou de chlorure de sodium (en présence d'extrait de viande), à 0,2%. A la suite de ces expériences, logiquement on ne devrait donc pas trouver de *Sphærotilus* dans les eaux saumâtres ou les estuaires renfermant plus de 2 pour 1.000 de sels. Ce qui reste à prouver sur le terrain.

En présence de glucose comme source de carbone, les sels minéraux azotés peuvent servir d'aliment; les nitrates provoquent une bonne croissance, les sels ammoniacaux une croissance moyenne, les nitrites aucune croissance.

Dans certains cas, les sels ammoniacaux peuvent arrêter la croissance.

2. *Hydrates de carbone.* — Inversement en présence de nitrates (ou d'une autre bonne source d'azote), certains hydrates de carbone, en particulier un très grand nombre de sucres, constituent un excellent aliment et sont susceptibles de provoquer des développements massifs de *Sphærotilus*. Les sucres les mieux utilisés sont le glucose, le mannose et le maltose. Puis viennent dans l'ordre descendant : galactose, fructose (lévulose), saccharose qui ne sont que lentement utilisés, puis ribose, xylose et arabinose qui le sont fort peu. Le cellobiose, sucre entrant dans la composition de la cellulose, n'est pas utilisé, de même que l'amidon qui ne peut pas être décomposé directement.

On comprend pourquoi *Sphærotilus* ne s'installe pas sur des végétaux supérieurs en train de se décomposer dans l'eau (faucardage) : les sources de carbone, cellulose, amidon, cellobiose sont inutilisables, et les sources d'azote ne sont pas assez riches.

La vitesse de décomposition des sucres est variable; ainsi une même quantité de *Sphærotilus* peut décomposer en un temps donné trois fois plus de glucose que de xylose. Compte tenu de la composition des eaux résiduaires de l'industrie du papier (renfermant 30 à 35 g./litre de « substances réductrices totales » pour les eaux résiduaires des pâtes à papier provenant d'épiceas, et 50 à 70 g./litre pour celles provenant de hêtres) sachant qu'il y a 65% d'hexoses, 35% de pentoses dans le premier cas, et une composition inverse dans le deuxième cas, SCHEURING a calculé que sur un mètre cube d'eau résiduaire de pâte d'épicea il pourrait pousser 5 à 6 kilogrammes de *Sphærotilus*, tandis que sur celle provenant de pâte de hêtre, il en pousserait 7 à 10 kilogrammes.

La teneur la plus faible en sucres, pour laquelle la croissance de *Sphærotilus* est encore possible, se trouve entre 0,02 et 0,07 mg./litre.

3. *Acides organiques.* — Les acides organiques servant de meilleure source de nourriture pour *Sphærotilus* sont l'acide acétique, l'acide lactique, l'acide malique, et, dans une certaine mesure, l'acide butyrique. Moins bons sont l'acide tartrique, succinique, fumarique et gluconique. Inutilisables sont les glycuronates, citrates et propionates. Dans des condensats de distilleries renfermant 6,6 grammes par litre d'acides

organiques, en majorité de l'acide acétique et 1,35 g./litre de substances réductrices, la croissance de *Sphærotilus* est encore possible à une dilution de 1 : 9.000, ne renfermant plus que 0,7 milligramme d'acide acétique, et 0,15 milligramme de substances réductrices.

4. *Matières organiques azotées.* — Avec les matières organiques azotées, nous sommes en présence des meilleurs « aliments », ceux qui sont les plus répandus dans les effluents d'eaux résiduaires et qui provoquent en définitive les développements les plus importants de *Sphærotilus* dans les cours d'eau. Ce sont surtout les acides aminés, qui peuvent servir dans certains cas soit comme source d'azote par leur radical aminé NH_2 , soit comme source de carbone par leur radical acide COOH . Les meilleurs acides aminés utilisés sont l'asparagine, l'alanine, la glutamine, l'acide aspartique, l'acide glutamique et l'arginine (concentrations optimales : 0,1 à 0,2%). Ont été reconnus moins bons ou peu utilisables : méthionine, tyrosine, cystine, tryptophane et leucine, mais pouvant encore servir de source d'azote aux concentrations élevées de 100 mg./litre. Ces chiffres sont en contradiction avec ceux de WUHRMANN : pour ces derniers acides aminés, d'après lui, des concentrations de l'ordre de 0,2 à 0,5 mg./litre inhibent déjà fortement la croissance de *Sphærotilus*.

L'accord n'est donc pas encore réalisé sur les concentrations optimales d'acides aminés responsables dans les eaux résiduaires des proliférations de ces Bactéries. Compte tenu des dilutions connues et de mes propres mesures, je pense que dans les cours d'eau pollués des teneurs en acides aminés de l'ordre de 0,5 à 5 mg./litre (exceptionnellement sans doute jusqu'à 10 mg./litre) sont responsables des développements massifs de *Sphærotilus*. Cette teneur en acides aminés représente environ 10 à 20% de l'azote total de l'effluent dont on sait que la teneur limite permise est de 10 mg./litre. On peut en déduire la part prise par les acides aminés. Mais les acides aminés ne sont pas les seules sources d'azote organique possibles ; les dipeptides, polypeptides et peptones sont également utilisés et décomposés en éléments plus simples par des diastases oxydantes. En culture, la gélatine est même liquéfiée, ce qui est le meilleur exemple de protéolyse.

De cette notion de dilution à laquelle il a été souvent fait allusion, se dégage une conclusion très importante. Dans les cours d'eau fortement pollués par des eaux résiduaires concentrées, le développement des *Sphærotilus* n'a pas lieu dans la majorité des cas au point de déversement même. Au contraire, il faut que les substances organiques dont il a été question aient atteint un certain stade de décomposition, de dégradation (ce qui est l'œuvre d'un certain nombre d'autres organismes hétérotrophes, comme par exemple les Bactéries protéolytiques) ou de dilution pour que les *Sphærotilus* commencent à s'installer. On ne voit donc les proliférations de *Sphærotilus* qu'à une certaine distance des déversements, distance pouvant aller jusqu'à 500 mètres ou 1 kilomètre. Ce qui constitue un sujet d'étonnement pour les industriels, lesquels ne voient souvent pas le rapport entre leurs déversements nocifs d'eaux résiduaires et ces développements « lointains » de *Sphærotilus*, et les

incite à dégager leur responsabilité. Un peu de réflexion et de connaissance des phénomènes chimiques de décomposition aidera à comprendre ce qui peut sembler paradoxal à certains.

Les limites de pH entre lesquelles *Sphærotilus* se développe le mieux sont variables. Pour certains auteurs cette limite se situe entre 5,5 et 8 ; pour d'autres, il n'y a plus de croissance à un pH inférieur à 6,8. SCHEURING a fixé les limites entre 5,8 et 9, et obtenu d'excellentes croissances en culture entre 6 et 7. Avec une réaction acide et une forte concentration en matières nutritives, il se forme des stades *Cladothrix*, forme de famine (comme il a déjà été montré) ; il en est de même avec un pH optimum alcalin, mais, par contre, une faible concentration en matières nutritives ; ce qui tend à montrer que *Sphærotilus* se développe mieux en milieu alcalin. Dans la nature, je pense que ses limites de pH optimum sont plutôt comprises entre 6,5 et 8. De toute manière, le pH optimum pour *Sphærotilus* est supérieur à celui de *Leptomit*us, qui se développe de préférence dans les eaux à tendance acide. *Sphærotilus natans* trouvant son optimum de développement à un pH supérieur à 7, et s'accommodant d'un nombre invraisemblable de substances nutritives, on comprend qu'il soit beaucoup plus répandu que *Leptomit*us et qu'on le trouve dans presque toutes les pollutions organiques chroniques, en aval de toutes sortes d'usines.

Il est impossible d'énumérer tous les établissements industriels à déversements d'eaux résiduaires en aval desquels on peut s'attendre à trouver des proliférations massives de *Sphærotilus* ; ne citons que les principales, où l'on trouve ces Bactéries avec une prédilection décroissante : industries traitant le bois et la cellulose (papeteries et fabriques de textiles artificiels), sucreries, distilleries, laiteries-fromageries, féculeries, abattoirs, brasseries, égouts, etc. La composition des eaux résiduaires variant dans de très fortes proportions, il est difficile, sinon impossible, de prévoir quelles substances sont responsables de l'installation de *Sphærotilus* ; les sucres, les acides organiques, les acides aminés ne sont jamais seuls, mais mélangés à d'autres substances les unes favorables, les autres défavorables. Les « interactions » dans les eaux résiduaires sont des phénomènes très complexes et nos modes d'expression habituels, tels que matières organiques totales, azote total, B.O.D. et même potentiel d'oxydo-réduction sont insuffisants pour en rendre compte. Néanmoins, à la lumière de ce qui vient d'être dit dans les paragraphes précédents, connaissant les préférences physiologiques et écologiques de *Sphærotilus*, on saura quelles sont la ou les substances qu'il faut éliminer en premier lieu dans les eaux résiduaires, pour réaliser les premiers stades de l'épuration ou favoriser l'auto-épuration naturelle.

En ce qui concerne la température, on a donné des chiffres de développement possible compris entre 4 et 40°, avec un optimum entre 10 et 15°. Rien de plus précis ne peut être dit pour la température, si ce n'est qu'il semble y avoir, dans les conditions expérimentales réalisées, diverses souches adaptées à différentes températures.

De même que les *Leptomit*us, les *Sphærotilus* ne se développent pas en eau stagnante. Il leur faut un apport constant de matières nutri-

tives toujours renouvelées, conditions qui ne sont réalisées que dans les eaux courantes polluées chroniquement par des eaux résiduaires. Le facteur oxygénation de l'eau n'intervient donc que secondairement. Nous arrivons à la même conclusion que celle déjà énoncée pour les *Leptomitul* : il peut y avoir de l'oxygène dans les cours d'eau tapissés de *Sphærotilus*. Une surcharge d'un cours d'eau en acides aminés par exemple ne s'accompagne pas automatiquement d'une absorption de l'oxygène. Celle-ci n'a lieu que si les fermentations s'installent, en cas d'élévation de température ou de prolifération de Bactéries protéolytiques. Et là aussi on peut répéter ce qui a été dit pour les *Leptomitul* ; les *Sphærotilus* sont simplement des indicateurs de la surcharge d'un cours d'eau en matières organiques fermentescibles, donc des indicateurs sûrs de la pollution. Ils constituent en quelque sorte une sonnette d'alarme.

Un autre fait paradoxal, qui peut être rapproché du problème de l'oxygène, et qui a déjà intrigué de nombreux biologistes, est la présence de Gammares, Animaux d'eaux pures, parmi les touffes de *Sphærotilus*, Bactéries d'eaux polluées. Le cas n'est pas fréquent, mais il existe. De là à conclure que le système des saprobies n'a aucune valeur, il n'y a qu'un pas. Que des êtres ayant des exigences écologiques aussi différentes puissent vivre ensemble peut évidemment être troublant : ou bien les Gammares peuvent vivre dans les eaux polluées, ou bien les *Sphærotilus* ne caractérisent rien et se développent aussi dans les eaux pures. En réalité, l'explication de cette association occasionnelle est assez simple : les *Sphærotilus* ne sont pas toxiques par eux-mêmes pour les Gammares et ne caractérisent nullement des déversements toxiques. Ils indiquent la surcharge d'un cours d'eau en eaux résiduaires fermentescibles et le danger des fermentations possibles. Tant qu'il n'y a pas de fermentations, il peut y avoir de l'oxygène, et s'il y a de l'oxygène et de l'eau courante, les Gammares peuvent s'installer ; mais ils se trouvent dans une zone dangereuse à la limite de leurs possibilités. J'insiste sur ce point parce qu'il ne faut pas donner aux zones de saprobies une valeur absolue et surtout parce que les « sondages » en vue de l'étude biologique d'un cours d'eau sont délicats et ne doivent pas être faits à la hâte. Il s'agit d'écologie et de relevés d'Animaux, de Plantes et de Bactéries formant des associations souvent encore peu connues, mais pourtant caractéristiques d'un milieu donné. Des relevés rapides de quelques Animaux ou Plantes ne peuvent pas suffire ; il faut chercher les dominantes caractéristiques, les différentielles, les compagnes principales, etc., comme dans toute étude phyto- ou zoosociologique. Et le fait de trouver occasionnellement des Gammares parmi des touffes de *Sphærotilus* ne change rien au fait que la rivière est surchargée en matières organiques toutes prêtes à entrer en fermentation au moindre changement de la composition des eaux résiduaires ou à la moindre élévation de température.

LIEBMANN a étudié récemment la composition des flocons flottants de *Sphærotilus* ; il y domine des Infusoires se nourrissant de Bactéries, tels surtout : *Colpidium colpoda*, *Glaucoma pyriformis* et *scintillans*, *Lionotus fasciola*, *Chilodonella cucullata*, *Aspidiscia lynceus*, *Stentor*

ræseli, accompagnés de filaments de la Bactérie sulfuraire *Beggiatoa alba*, de quelques Diatomées (*Melosira*, *Navicula*, *Synedra* et *Nitzschia*) et de Rotifères du genre *Rotifer*.

Les touffes blanches, jaunes ou brunâtres (brun foncé lorsque l'incrustation par l'hydroxyde de fer est forte) de *Sphærotilus*, le plus souvent fixées en couches gluantes plus ou moins épaisses sur le fond des cours d'eau pollués, peuvent se détacher et flotter au gré du courant. On voit alors de gros flocons qui donnent non seulement aux rivières un aspect très désagréable, mais sont encore nuisibles parce qu'ils colmatent les branchies des Poissons, ainsi que les filets de pêche et rendent la rivière inexploitable s'ils n'ont pas déjà tué la population piscicole. C'est le « Pilztreiben » des Allemands, ou « flottaison des Champignons au gré du courant », terme impropre puisqu'il s'agit en l'occurrence de Bactéries. Mais cette flottaison de flocons de *Sphærotilus* est mesurable dans les cours d'eau avec des filets spéciaux de 50 centimètres de côté, à mailles assez grosses (2,5 cm.) et donne une idée de l'importance de la pollution. On l'exprime par la densité de flocons de Bactéries en grammes de Bactéries par mètre cube d'eau, ou encore par le poids total de Bactéries passant en un jour dans une section donnée du cours d'eau. A titre d'exemple, une quantité de 6 g./m³ de *Sphærotilus* indique une forte pollution. Dans le Main, on a mesuré, par section de fleuve, des chiffres énormes de flottaison de *Sphærotilus* allant de 72 à 325 tonnes par jour. On comprend que, dans ce cas, les processus de décomposition sont accélérés, la formation de vase putride très importante et l'absorption d'oxygène à peu près totale.

Peut-on enfin distinguer macroscopiquement *Sphaerotilus* et *Leptomit*us?

La lecture des chapitres précédents aura laissé croire au lecteur que seul le microscope et une grande « spécialisation » peuvent répondre à cette délicate question. Nous allons voir qu'avec un certain nombre de tours de main, les non-spécialistes peuvent distinguer macroscopiquement *Leptomit*us et *Sphaerotilus*.

Pour arriver à distinguer les deux organismes, il faut les étaler sur une grande plaque de verre ou une boîte de Pétri, ce qui peut être réalisé sur les bords mêmes des rivières. Dans ce cas :

1° *Leptomit*us s'étale en gardant l'aspect de gros flocons, conservant une certaine consistance, que l'on ne peut pas mieux décrire que de les comparer à du coton hydrophile mouillé. En laissant se dessécher cet étalement, on se rend compte que la structure des flocons est assez délicate, l'ensemble de la masse est peu gluant, et il apparaît très difficilement une structure plumeuse. De plus, sans que l'on puisse baser la systématique sur une question d'odeur, les *Leptomit*us, lorsqu'ils sont en peuplements purs, dégagent une odeur nauséabonde de vase en décomposition ;

2° Les flocons de *Sphaerotilus*, par contre, sortis de l'eau, ont une consistance plus solide, ils tiennent mieux ensemble parce qu'ils sont

Planche V.

Fig. 15 A.

Fig. 15 B.

Fig. 16.

Fig. 17.

Fig. 18 A.

Fig. 18 B.

(Photos A. Wurtz.)

- Fig. 15. — *Sphaerotilus natans*, macrophotographies. Gross. env. 2 ×.
 A) Aspect normal des touffes, étalées sur une plaque de verre.
 B) La même touffe, légèrement écrasée entre deux lames de verre, mettant nettement en évidence l'aspect plumeux.
- Fig. 16. — *Saprolegnia* (eaux polluées), macrophotographie. Gross. env. 2 ×. Remarquer l'aspect de gazon court, en boule. Les flocons de *Saprolegnia* sont plus compacts que ceux de *Leptomitius*.
- Fig. 17. — *Leptomitius*, macrophotographie. Gross. env. 2 ×. Remarquer l'aspect de coton hydrophile mouillé, nettement caractéristique.
- Fig. 18. — Microphotographies au même grossissement (env. 100 ×).
 A) *Sphaerotilus natans*, les filaments bactériens ont 2 à 3 μ de diamètre.
 B) *Leptomitius lacteus*, les filaments mycéliens ont 15 à 20 μ de diamètre.

plus gluants et glaireux que les *Leptomit*us. On voit des axes principaux formés d'une chevelure de fins filaments réunis, s'inscrustant souvent de cristaux de carbonate de calcium, et surtout, caractère essentiel, les flocons de *Sphaerotilus* étalés sur une lame de verre, ne gardent pas la structure de coton hydrophile mouillé, mais prennent un aspect plumeux caractéristique. Cet aspect plumeux est encore mieux mis en évidence lorsqu'on écrase légèrement les flocons entre deux lames de verre. Des-séchés sur lame, les *Sphaerotilus* accusent l'aspect plumeux sous forme d'une sorte de squelette axial dont les éléments sont reliés par une pellicule mince qui représente les parties gluantes séchées. Au point de vue odeur, les peuplements purs de *Sphaerotilus* ont une odeur douçâtre, plutôt répugnante, rappelant celle qui se dégage des sucreries au moment des campagnes sucrières (laquelle est due en partie à la bêtaïne).

Ces distinctions macroscopiques paraissent un peu subtiles, mais lorsque l'on a bien vu une fois sur une plaque de verre l'aspect de « coton hydrophile mouillé » de *Leptomit*us et l'aspect plumeux de *Sphaerotilus*, on ne s'y trompe plus.

Les photographies de la planche V essayent de rendre compte de ces distinctions. La photographie de la figure 17 représente un *Leptomit*us sur un fond noir, tout à fait caractéristique, récolté en aval d'une laiterie, grossi deux fois. Les photographies des figures 15 A et B montrent au même grossissement *Sphaerotilus* récolté en aval d'une sucrerie, diversement étalé, présentant l'aspect plumeux caractéristique. La photographie de la figure 16 représente *Saprolegnia* récolté à la sortie d'un égout ; les *Saprolegnia*, beaucoup moins répandus, se reconnaissent macroscopiquement à leur aspect de petits gazons ou même de boules, beaucoup plus courts et plus drus que *Leptomit*us et *Sphaerotilus*.

Évidemment, lorsque dans la nature *Leptomit*us et *Sphaerotilus* sont mélangés, ce qui arrive assez souvent, la distinction macroscopique n'est plus possible, et il faut l'aide d'un microscope. Les microphotographies des figures 18 A et B, représentant *Sphaerotilus* et *Leptomit*us au même grossissement, montrent cependant que la distinction est facile.

Il s'offre encore une autre possibilité un peu simpliste au non-spécialiste embarrassé pour mettre un nom sur les « queues de mouton ». Nous avons vu que *Leptomit*us avait des exigences écologiques assez précises, qu'il se développait plutôt dans les eaux qui n'étaient que moyennement polluées et qu'en somme il était assez peu courant d'en trouver des peuplements purs. *Sphaerotilus*, au contraire, s'accommode de toutes sortes de substances, caractérise les eaux assez fortement polluées et se trouve beaucoup plus universellement répandu que *Leptomit*us. L'ensemble de mes relevés m'ont même montré que dans 90 % des cas on trouvait des *Sphaerotilus*, et dans 10 % seulement des *Leptomit*us. De sorte que si le non-spécialiste appelle ses récoltes des *Sphaerotilus*, il aura 9 chances sur 10 de ne pas se tromper. Évidemment, cette devinette n'est pas toujours couronnée de succès, car nous avons vu que sur terrains granitiques, en eau acide et en aval de laiteries on a plus de chances de rencontrer des *Leptomit*us. Mais j'estime qu'il vaut

encore mieux donner aux « queues de mouton » le nom de *Sphærotilus* (Bactéries) en sachant que l'on a une chance sur dix de se tromper, plutôt que de continuer à laisser régner la confusion en écrivant « Bactéries et Champignons d'eaux polluées : *Leptomitul* et *Sphærotilus* » au choix. C'est en somme une solution commode que je propose à ceux qui n'arriveront pas à distinguer les deux organismes avec précision.

Bactéries sulfuraires.

Les Bactéries sulfuraires ou Sulfobactéries sont caractérisées par le fait qu'elles vivent dans les eaux chargées en hydrogène sulfuré. Elles sont capables d'utiliser par photosynthèse ou chimiosynthèse l'oxydation de l'hydrogène sulfuré (H^2S) comme source principale d'énergie. Du point de vue qui nous préoccupe, elles caractérisent des eaux dans lesquelles ont lieu des phénomènes de fermentations plus ou moins intenses, où se forme de l'hydrogène sulfuré, toxique pour la plupart des êtres vivants autres que certaines Algues inférieures, telles les Cyanophycées et Eugléniens et quelques rares Infusoires et Rotifères.

C'est à ce titre que nous allons les étudier. Elles ont la propriété d'emmagasiner dans leur protoplasme du soufre colloïdal, obtenu par oxydation de l'hydrogène sulfuré. Nous entrons dans un milieu spécial, celui des fermentations sulhydriques, où l'hydrogène sulfuré est toujours présent, ce qui nous permettra de créer dans le domaine des eaux polluées, la zone des « thiosaprobies », ou zone à Bactéries sulfuraires dominantes.

Parmi les Bactéries sulfuraires, groupe fort hétérogène comportant quatre subdivisions, nous n'étudierons que les principaux groupes : les Sulfuraires incolores ou Leucothiobactéries, dont les plus importantes sont filamenteuses, et les Sulfuraires pourpres ou Rhodothiobactéries, qui sont unicellulaires ou coloniales.

Leucothiobactéries.

Beggiatoa, dont les espèces les plus communes sont : *B. alba*, *B. arachnoïdea* et *B. leptomitiformis*, se présente sous forme de filaments libres de 2 à 10 μ d'épaisseur ; vues au microscope, les membranes transversales sont très difficilement visibles. Les globules de soufre, qui remplissent complètement les filaments dans les conditions normales de croissance, sont visibles sous forme de grains réfringents (fig. 19). Toutes les Bactéries sulfuraires, dont il va être question dans cet article, renferment ces granules de soufre colloïdal amorphe. Vus au microscope, ils apparaissent colorés en rose par suite des phénomènes de réfringence, ce qui permet de les identifier encore plus facilement. Les filaments de *Beggiatoa* sont doués de mouvements de reptation, d'oscillation semblables à ceux des Algues bleues du groupe des Oscillaires.

Macroscopiquement, dans les cours d'eau fortement pollués, *Beggiatoa* est facilement identifiable. Formant des voiles arachnéens blancs, ou

de minces pellicules blanches disposées librement sur la vase du fond des cours d'eau en cas de pollutions moyennes, leur épaisseur augmente dans le cas de pollutions plus fortes, pouvant former des voiles épais ou des flocons à allure de fourrure sur le fond des rivières. J'ai vu récemment dans une rivière fortement polluée par des égouts (département de la Marne) sur le fond de vase noire, putride, un développement massif de *Beggiatoa* s'étendant sur une distance de plus de 3 kilomètres. *Beggiatoa* préfère les eaux moyennement courantes ou stagnantes ; dans les eaux très courantes, les voiles de *Beggiatoa* sont déchirés et entraînés dans les endroits calmes où ils se rassemblent. Souvent, par suite du dégagement de gaz provenant de la vase putride (méthane, hydrogène sulfuré) les *Beggiatoa* montent à la surface, entraînant de grosses plaques de vase, coiffées par les filaments bactériens. L'ensemble, auquel il faut ajouter les mauvaises odeurs qui se dégagent dans ces zones gravement polluées, présente un aspect fort déplaisant. Quelquefois il y a une certaine convergence d'aspect avec *Sphærotilus* ; lorsque *Sphærotilus* se présente en pellicules minces ou que les voiles de *Beggiatoa* s'épaississent pour former des flocons, la confusion est macroscopiquement possible. Seul, le contrôle microscopique, avec mise en évidence des globules de soufre, permet dans ce cas d'avoir la certitude qu'il s'agit de *Beggiatoa*.

Le problème des rapports entre l'oxygène et l'hydrogène sulfuré, trop complexe pour pouvoir être traité à fond dans cet article, sera simplement évoqué pour comprendre la biologie particulière des Bactéries sulfuraires. Logiquement, il n'est pas normal de trouver ensemble de l'oxygène et de l'hydrogène sulfuré dans l'eau ; les *Beggiatoa* vivent en principe à la limite des zones renfermant H^2S et dépourvues d'oxygène et de celles dépourvues d' H^2S mais renfermant encore de l'oxygène : elles sont à la limite de l'anaérobiose et de l'aérobiose, et c'est l'hydrogène sulfuré qui est déterminant. C'est pourquoi on ne trouve pas les *Beggiatoa* dans la vase anaérobie, mais sur la surface de celle-ci.

Lorsque le milieu s'appauvrit en H^2S , *Beggiatoa* a tendance à perdre ses globules de soufre et à ressembler à une Oscillaire incolore, ce qui en rend l'identification assez difficile. D'ailleurs, il faut le souligner, *Beggiatoa* n'est pas lié à de fortes teneurs en hydrogène sulfuré ; elle se trouve dans les eaux renfermant 0,005 à 0,5 mg. d' H^2S par litre. Ce sont les Bactéries sulfuraires pourpres qui vivent à des concentrations beaucoup plus élevées en H^2S . *Beggiatoa* caractérise en définitive des secteurs de rivières polluées par des déversements organiques, où les fermentations sont intenses et le dégagement d'hydrogène sulfuré moyennement important. On peut donc les rencontrer en aval de la plupart des usines que nous avons déjà citées au cours de cet article, partout où les phénomènes de décomposition sont en cours, et particulièrement dans les stations d'épuration surchargées (bassins de décantation, lits bactériens) où les flocons peuvent rendre l'épuration impossible. Notons encore que l'on peut rencontrer des filaments de *Beggiatoa* parmi des touffes d'Algues flottant à la surface des étangs, ou des Charas en décomposition. Il ne faut pas, dans ce cas, crier à la pollution, mais

Planche VI. — BACTÉRIES D'EAUX POLLUÉES : SULFURAIRES ET AUTRES

Leucothiobactéries. Fig. 19. *Beggiatoa alba*. — Fig. 20. *Thiothrix nivea*. — Fig. 21. *Achromatium oxaliferum*.

Rhodothiobactéries ou Bactéries sulfuraires pourpres. Fig. 22. *Chromatium okenii*. — Fig. 23. *Thiospirillum sanguineum*. — Fig. 24. *Thiopedia rosea*. — Fig. 25. *Rhabdochromatium roseum*. — Fig. 26. *Thiocapsa roseo-persicina*. — Fig. 27. *Thiocystis violacea* (une colonie au repos, une autre colorée pour montrer les flagelles.) — Fig. 28. *Thiosarcina*. — Fig. 29. *Thiovolum*. — Fig. 30 (A et B). *Lamprocystis roseo-persicina*.

Autres Bactéries. Fig. 31. — *Zoogloea ramigera*.

Toutes les figures au gross. env. 1.000 × (sauf 30 B env. 1.500 ×).

considérer simplement qu'il s'agit d'un « microclimat » agissant très localement sur des associations qui ne sont à leur tour que des « microbiocénoses ».

Thiothrix a la même structure que *Beggiatoa*, mais s'en distingue parce qu'elle est fixée par une petite base mucilagineuse sur les objets immergés. Les filaments prennent l'aspect de flocons courts, remarquables par leur blancheur (*T. nivea*). La confusion avec d'autres organismes, en particulier *Leptomit*, n'est pas possible car les filaments épais de 1,5 à 3 μ sont toujours bourrés de globules de soufre (fig. 20). Alors que *Beggiatoa* préfère les eaux tranquilles, *Thiothrix* se développe mieux dans les eaux courantes. Bien entendu, *Thiothrix* caractérise comme *Beggiatoa* des eaux renfermant de l'hydrogène sulfuré, donc assez fortement polluées. J'ai eu l'occasion d'en récolter récemment d'abondants flocons en aval d'une laiterie, dans une rivière à Truites du département de la Somme.

Achromatium oxaliferum est une Sulfuraire unicellulaire, une des plus grosses Bactéries connues car elle atteint la dimension respectable de 50 μ ; les cellules sont bourrées de globules de soufre et de nombreux grains d'oxalate ou de carbonate de calcium (fig. 21). Elle vit dans les eaux plutôt riches en calcaire, et caractérise une vase putride, riche en H^2S . Malgré l'absence de flagelles, elle est douée de mouvements tremblants autour de son axe, et malgré sa lourdeur, elle peut même faire de lentes culbutes sur la vase. Elle vit en principe sur la vase, mais, étant anaérobie, elle peut aussi s'y enfoncer profondément. Je l'ai trouvée récemment dans une pièce d'eau courante et pure au Paraclet sur le fond de vase rendue putride par la chute d'abondantes feuilles de peuplier en décomposition; la teneur de la vase en H^2S nettement décelable à l'odeur, était de l'ordre de 0,0005 pour mille.

Rhodothiobactéries ou Bactéries sulfuraires pourpres.

Les Rhodothiobactéries ou Bactéries sulfuraires pourpres sont caractérisées par le pigment rouge ou bactériopurpurine qui les colore; elles oxydent l'hydrogène sulfuré, déposent du soufre dans leurs cellules, lequel est un produit intermédiaire, oxydé en cas de nécessité en sulfates, suivant la réaction classique suivante :

L'acide sulfurique formé et excrété se combine immédiatement aux bases présentes dans l'eau et dans la vase (carbonates et bicarbonates de calcium) pour donner des sulfates de calcium, avec libération de gaz carbonique. L'énergie libérée sert à l'assimilation du gaz carbonique, car ces Bactéries sont autotrophes et ont besoin de lumière. Certaines, comme *Chromatium* et *Thiopedia* ont besoin de faibles teneurs en oxygène. D'autres sont facultativement ou strictement anaérobies.

Toutes ont besoin, en plus de la lumière, d'hydrogène sulfuré. Elles supportent des concentrations particulièrement élevées d'H²S, jusqu'à 1 mg./litre et plus ; elles caractérisent donc les zones de fermentations les plus intenses où les matières organiques d'origine résiduaire se décomposent le plus activement avec d'abondants dégagements d'H²S, bref les zones les plus polluées que l'on puisse imaginer. Lorsqu'on trouve des Bactéries sulfuraires pourpres en abondance, il est inutile de faire un dosage chimique : on se trouve dans la zone de pollution organique et de fermentation maximum.

Elles sont à ce point de vue extrêmement utiles dans le diagnostic biologique des pollutions, d'autant plus qu'elles sont faciles à reconnaître, même macroscopiquement : elles forment des nuages rouges dans l'eau ou sur la vase. Leur teinte habituelle, plutôt rouge-vineux, permet, en principe, de ne pas les confondre avec autre chose ; quelquefois elles forment des pellicules rose-pêche, pouvant aller jusqu'au rouge-violacé sur la vase. Mais il faut prendre garde cependant de ne les confondre ni avec les *Hæmatococcus* (Algue verte Volvocale) vivant dans les flaques d'eau de pluie, les gouttières de toit, colorés en rouge par un pigment caroténoïde, ni avec certaines Euglènes (*Euglena sanguinea*) pouvant former des fleurs d'eau rouges sur les étangs, ni avec de simples dépôts d'hydroxyde de fer ou des Ferrobactéries, qui sont bruns ou brun-rouges. Le maniement « macroscopique » de la palette de couleurs des êtres microscopiques vivant dans les eaux polluées demande évidemment un peu d'habitude.

Lorsqu'on rencontre des Rhodothiobactéries à l'état isolé, c'est le plus souvent une question de microclimat et de putréfaction locale. Seule, leur présence massive indique les très fortes pollutions. Notons encore le problème particulier des sources sulfuraires qui renferment de l'hydrogène sulfuré, des Bactéries sulfuraires et qui peuvent cependant être considérées comme pures puisque certaines sont potables. Mais ceci nous entraînerait vers les vertus thérapeutiques de l'hydrogène sulfuré à faibles doses (toxique à forte dose) dont il ne peut être question ici.

Il existe des formes unicellulaires flagellées qui nagent activement, comme les *Chromatium*, très répandus (fig. 22), rencontrés souvent en aval de fortes pollutions organiques avec putréfactions (laiteries) en compagnie de *Beggiatoa*, d'Infusoires (*Colpidium colpoda*), d'Algues vertes (*Euglena viridis*), association qui me paraît assez stable et complète celle déjà décrite par FAURE-FREMIET (1951) à *Beggiatoa* et *Colpidium colpoda* ; des espèces unicellulaires fusiformes : *Rhabdochromatium*, spirales : *Thiospirillum* ; des formes coloniales, colonies tabulaires de *Thiopedia rosea*, colonies plus ou moins compactes, sphériques de *Thiocapsa roseo-persicina*, *Thiocystis violacea* (on voit que les noms d'espèces évoquent bien les couleurs), colonies cubiques de *Thiosarcina*, colonies irrégulièrement réticulées de *Lamprocystis roseo-persicina* et de nombreuses autres. Il est inutile de les décrire plus longuement. Les dessins des figures 23 à 30 permettront de reconnaître les plus importantes.

Nous passerons sous silence, parce que trop compliquées et moins

importantes dans les eaux polluées, les Bactéries sulfuraires qui n'accumulent pas de soufre intracellulaire, les Sulfuraires incolores du groupe des Chlorothiobactéries, ainsi que les Sulforéductrices qui réduisent les sulfates en H^2S .

Nous passerons sous silence complet l'énorme règne des Bactéries des eaux polluées (bacilles, coques, sarcines, bactéries protéolytiques, certaines pathogènes comme *Escherichia coli*, certaines anaérobies) qui, tout en ayant une importance très grande dans les eaux polluées où elles peuvent atteindre des chiffres de l'ordre de quelques millions par centimètre cube, ne peuvent pas être envisagées dans le cadre de cet article. Elles s'intégreraient dans un cours complet de Bactériologie.

Évoquons encore en dernier lieu une Bactérie qui est reconnaissable à l'œil nu, formant des enduits mucilagineux dans les eaux très polluées; il s'agit de *Zooglæa ramigera*, sorte d'arbuscules ramifiés qui apparaissent au microscope comme formés d'une masse mucilagineuse hyaline dans laquelle de très nombreuses Bactéries en bâtonnets de $1\ \mu$ de diamètre sont enrobées (fig. 31). Le concept de « zooglée » ne correspond d'ailleurs pas à un genre bien déterminé, mais comprend probablement un grand nombre de Bactéries pouvant prendre cette forme. *Zooglæa ramigera* se trouve dans les eaux très sales, là où les *Sphærotilus* ne se développent pas encore, eaux polluées par du purin, lits bactériens, les bassins de décantation, dans les eaux en pleine fermentation. Le « test zoogléen » de KOLKWITZ consiste à prendre des eaux résiduaires à la sortie de bassins de décantation et à les laisser reposer. Si, en peu de temps, il se forme une pellicule de *Zooglæa* à la surface, c'est que l'épuration est insuffisante.

Classification simplifiée des Bactéries aquatiques.

Donnons néanmoins, pour résumer la question, un tableau de la classification simplifiée des Bactéries les plus importantes dans les eaux. Il est évident que, suivant le point de vue auquel on se place et suivant les auteurs, cette classification, provisoire et toujours remaniée, peut varier.

I. EUBACTÉRIALES. — Bactéries en forme de bâtonnets ou de coques, quelquefois mobiles à l'aide de flagelles, non filamenteuses.

1^o Eubactéries. Les vraies Bactéries *sensu stricto*, comprenant entre autres :

— Bactéries autotrophes du cycle de l'azote (Nitrobactéries), de même que les fixateurs d'azote (*Azomonas* dans l'eau) et les *Rhizobium*;

— Groupe des *Pseudomonas*, vivant dans le sol et dans l'eau, certains pathogènes d'Animaux ou de Plantes. Faute de pouvoir les mettre ailleurs, les *Zooglæa* sont inclus dans ce groupe. *Vibrio*, très répandus dans les eaux, quelquefois pathogènes (choléra), y compris *Desulfovibrio* (sulforéducteur). Bactéries cellulolysantes, telles *Cellvibrio* et *Cellfalcicula*, *Spirillum*, etc.;

— Groupe des *Micrococcus*, *Streptococcus*, *Sarcines*, etc. qui forment un chapitre entier de la bactériologie médicale, car beaucoup sont des pathogènes dangereux ; d'autres sont saprophytes dans l'eau ou décomposent toutes sortes de substances ;

— Groupe des Entérobactéries dans lequel on trouve les *Escherichia coli* (pathogène, recherché le plus souvent pour déterminer la non-potabilité d'une eau, très répandu dans les eaux polluées, le *Proteus*, les *Salmonella* (B. typhique qui rend certaines eaux polluées dangereuses), et d'innombrables autres Bactéries pathogènes ;

— Groupe des *Bacterium* proprement dits, extrêmement complexes, vivant partout, décomposant tout (eau, lait,) des *Bacillus*, dont le *B. subtil*, *B. megatherium* (sol, eau) des *Clostridium* anaérobies, etc.

2° Caulobactéries, attachées au substrat, souvent par une sorte de tige. Ferrobactéries : *Gallionella*, *Siderocapsa*.

3° Rhodobactéries, possédant un pigment photosynthétique voisin de la chlorophylle. Ce sont les Bactéries sulfuraires *sensu stricto*, comprenant :

a) Rhodothiobactéries ou B. sulfuraires pourpres, colorées en rouge ;

b) Athiorhodobactéries, rouges, mais ne renfermant pas de soufre intracellulaire ;

c) Chlorothiobactéries, sulfuraires vertes, ne renfermant généralement pas de soufre intracellulaire.

II. ACTINOMYCÉTALES. — Bactéries allongées, souvent ramifiées, formant une sorte de mycelium. Très importantes dans le sol surtout, mais probablement aussi dans la vase et l'eau : *Actinomyces*, *Streptomyces*, quelques-unes pathogènes. L'agent de la tuberculose (*Mycobacterium*) se trouve aussi dans ce groupe.

III. CHLAMYDOBACTÉRIALES. — Bactéries filamenteuses possédant des gaines, pouvant déposer de l'hydroxyde de fer. Ce sont les *Sphaerotilus* d'eaux polluées, et les Ferrobactéries telles les *Leptothrix* et les *Crenothrix* dont les affinités confuses ont été précisées.

— Appendice. Les Leucothiobactéries, Bactéries sulfuraires incolores, peuvent être rangées dans ce groupe. Elles comprennent les formes filamenteuses (*Beggiatoa*, *Thiothrix*, qui font la liaison avec les Cyanophycées ou Algues bleues) et des formes unicellulaires comme *Achromatium*.

IV. MYXOBACTÉRIALES (Bactéries en colonies formant un pseudoplasmode doué de mouvements amiboïdes) et Spirochaetales (mobiles, en spirales, vivant librement dans l'eau, saprophytes ou parasites, certaines pathogènes).

III. — LES ALGUES VIVANT DANS LES EAUX POLLUÉES

Il peut paraître paradoxal que des Algues, Végétaux inférieurs verts, chlorophylliens, donc autotrophes au sens strict du terme, puissent vivre dans les eaux polluées. En réalité, le monde des Algues est si grand

et leur gamme de répartition écologique tellement vaste que l'on peut en rencontrer dans les eaux très sales. Certaines Cyanophycées, Eugléniens et Diatomées sont même particulièrement caractéristiques des zones polluées.

Cyanophycées. — Parmi les Algues bleues vivant dans les eaux fortement polluées citons certaines Oscillaires (*Oscillatoria putrida*, *O. chlorina*, *O. lauterbornii*, *O. formosa*, *O. tenuis*, *O. princeps*, *O. chalybea*, *O. splendida*), les *Phormidium* (*Ph. uncinatum*, *autumnale* et *foveolarum*), et *Spirulina jenneri*. Il n'est pas possible de décrire en détail ces formes dans le cadre de cet article ; les dessins des figures 32 à 43 permettront de les reconnaître.

Ces Algues bleues filamenteuses, dont les filaments s'appellent des trichomes, vivent soit isolées sur la vase putride, soit en croûtes d'un bleu-vert métallique ou noir ; elles se détachent souvent de leur substratum, flottant dans l'eau en entraînant de grosses plaques de vase. Les croûtes sont souvent noires à cause du sulfure de fer, provenant des fermentations qui se dépose entre les trichomes. Lorsque l'on voit flotter dans les rivières d'abondantes croûtes bleu-vert ou noires d'Oscillaires, entraînant des plaques de vase putride, on peut conclure avec certitude à la pollution organique. La quantité totale d'Oscillaires flottant dans un cours d'eau pollué est mesurable et permet, comme pour les flocons de *Sphærotilus*, de donner une idée de l'importance de la pollution. Certaines Oscillaires peuvent supporter des concentrations assez élevées en hydrogène sulfuré.

Les *Phormidium* forment des croûtes d'épaisseur variable, quelquefois parcheminées, vert-noirâtre, brun noirâtre, vert-olive et même violettes sur le bord des cours d'eau pollués ; ils peuvent être subaériens et former une mince frange au-dessus de la surface de l'eau. Ils peuvent vivre sur la vase putride, et aussi sur la terre humide. On les trouve aussi, comme beaucoup d'autres Cyanophycées, dans certaines eaux thermales et les sources sulfuraires.

Eugléniens. — *Euglena viridis*, Algue unicellulaire, mobile à l'aide d'un flagelle, colorée en vert ; chlorophyllienne, pouvant devenir hétérotrophe, c'est un des représentants les plus classiques des eaux polluées (fig. 46). Les flagellés n'ont que 50 μ environ de longueur, mais ils peuvent prendre des développements tellement importants qu'ils deviennent facilement visibles à l'œil nu, formant des pellicules, des « fleurs d'eau », c'est-à-dire des poussières microscopiques de millions de cellules en suspension dans l'eau. Nous avons déjà vu qu'*Euglena viridis* pouvait vivre en association avec les Bactéries sulfuraires : *Beggiatoa*, *Chromatium*, les Infusoires *Colpidium colpoda* et supportait de fortes concentrations en hydrogène sulfuré. Elle peut vivre également dans les mares de village souillées de purin, dans les rigoles à purin même et supporte de très fortes teneurs en sels ammoniacaux. Elle forme des enduits verts gluants sur les parois des bassins de décantation, à la surface des filtres à lits bactériens, dans les canalisations d'égouts à ciel ouvert, dans les étangs d'épuration d'eaux usées ou surchargées en matières

Planche VII. — ALGUES D'EAUX POLLUÉES

Cyanophycées (Algues bleues) : Oscillaires et Phormidium. Fig. 32. *Oscillatoria chlorina*. — Fig. 33. *O. pultrida*. — Fig. 34. *O. lauterbornii*. — Fig. 35. *O. formosa*. — Fig. 36. *O. tenuis*. — Fig. 37. *O. princeps*. — Fig. 38. *O. chalybea*. — Fig. 39. *O. splendida*. — Fig. 40. *Spirulina jenneri*. — Fig. 41. *Phormidium foveolarum*. — Fig. 42. *Ph. autumnale*. — Fig. 43. *Ph. uncinatum*. — Toutes au même grossissement (env. 1.000 $\times$) pour montrer que la détermination repose sur la forme et l'épaisseur des trichomes, les extrémités, les constrictions des cellules. Seuls, les *Phormidium* ont des gaines nettement visibles.

Diatomées. Fig. 44. *Nitzschia palea*. — Fig. 45. *Hantzschia amphioxys*. — Gross. env. 1.000 $\times$.

Euglénien. Fig. 46. *Euglena viridis*. — Gross. env. 1.000 $\times$.

Algues vertes filamenteuses. Fig. 47. *Stigeoclonium tenue*. — Gross. env. 150 $\times$.

organiques, bref dans les conditions les plus variées d'eaux souillées. Les autres Euglènes, fort nombreuses, ne vivent pas dans des eaux aussi polluées; tout au plus certaines espèces caractérisent-elles les eaux en voie d'auto-épuration ou les étangs envasés.

Diatomées. — Deux Diatomées s'avancent le plus loin dans les eaux polluées; ce sont deux petites espèces, ne dépassant pas 50 μ , *Nitzschia palea* et *Hantzschia amphioxys* (fig. 44 et 45), mais qui peuvent se développer en grande quantité en aval d'effluents de brasseries, féculeries, abattoirs, égouts, etc., recouvrant les cailloux, pieux et objets immergés d'enduits bruns-gluants. Elles sont tout à fait caractéristiques des zones fortement polluées, sont à peu près insensibles aux variations de la teneur en oxygène dissous et du pH et supportent des concentrations d'hydrogène sulfuré jusqu'à 4 mg. par litre. Elles se rencontrent également sur la vase putride d'étangs, de flaques d'eau temporaires; à l'état d'individus isolés elles n'ont pas de valeur indicative; en populations massives elles sont indicatrices de pollutions organiques, comme les Cyanophycées.

D'autres Diatomées peuvent vivre dans les eaux polluées, tout en étant moins caractéristiques.

Synedra ulna, en particulier, qui est ubiquiste, est susceptible de vivre en épiphyte sur les filaments de *Leptomitus* qu'elle colore en brun et caractérise par sa présence des zones moyennement polluées ou en voie d'auto-épuration.

Les autres Diatomées extrêmement nombreuses, dont quelques-unes caractérisent les rivières envasées ou les eaux simplement eutrophes, ne seront pas citées parce qu'à mon avis elles ne font plus partie de la flore spéciale des eaux polluées.

Chlorophycées. — Le problème des Algues vertes, qu'il serait encore utile de passer en revue, est trop complexe pour pouvoir être traité en quelques lignes. Il y en a un certain nombre qui peuvent vivre dans les eaux relativement polluées, comme des *Chlamydomonas* ou des *Carteria* (Volvocales unicellulaires flagellées), *Pandorina*, *Gonium* (Volvocales coloniales), des *Stichococcus* (Ulothricales unicellulaires), certaines Chlorelles ou *Scenedesmus* (Chlorococcales), mais comme on peut également les rencontrer dans les eaux plus pures et qu'elles ne sont pas nettement caractéristiques, elles ne sont pas représentées sur nos dessins.

Il reste cependant à signaler deux Algues vertes filamenteuses, l'une ramifiée : *Stigeoclonium tenue* (fig. 47) qui s'avance assez loin dans les zones moyennement polluées, mais peut vivre aussi dans les rivières plus pures (très abondante, fixée sur les Plantes submergées : Renoncules, Myriophylles, etc.), l'autre non ramifiée : *Ulothrix zonata*, formant de longues crinières vertes en eau courante, fixée aux objets immergés et aux cailloux; il y a une forme nettement d'eaux pures, une autre forme nettement d'eaux polluées (FJERDINGSTAD), qui ne se distinguent nullement au point de vue morphologique. Il y a là probablement un problème de race écologique qui n'est pas encore élucidé.

IV. — PLACE DE CES ORGANISMES DANS LE SYSTÈME DES SAPROBIES

Il serait évidemment tout à fait commode de pouvoir placer tous ces organismes dans le système des saprobies ; ce système mis au point par KOLKWITZ, revu par LIEBMANN, tient compte des diverses zones de pollution organique d'un cours d'eau, en fonction des fermentations, des décompositions, et par conséquent de l'auto-épuration. Rappelons que l'on a eu coutume de distinguer jusqu'à présent les zones suivantes :

1^o Zone des polysaprobies, fortement polluée, intenses décompositions de toute sorte, pratiquement dépourvue d'oxygène, où le nombre des Bactéries protéolytiques et autres peut atteindre, et même dépasser, un à plusieurs millions par centimètre cube. C'est évidemment dans cette zone que se font les plus intenses dégagements de gaz provenant des fermentations, en particulier de l'hydrogène sulfuré.

2^o Zone des mésosaprobies α , assez fortement polluée, mais où les décompositions encore intenses sont en voie d'achèvement, transformant les matières organiques complexes en corps plus simples tels les acides aminés, sucres, acides organiques et leurs sels ; il peut y avoir une certaine quantité d'oxygène dissous dans l'eau, dans la mesure où il n'y a pas incompatibilité avec les phénomènes de réduction qui ont lieu dans cette zone. Exceptionnellement, un certain nombre de Poissons « résistants » peuvent vivre temporairement dans cette zone ; mais en général, en raison de la destruction de la faune et de la flore utiles, ils ne s'y maintiennent pas. Ils ne sont pas tués, mais émigrent dans un milieu plus favorable et ne se reproduisent plus, entraînant par leur départ, la perte de productivité de ces zones polluées. Le nombre de Bactéries présentes dans cette zone est de l'ordre de une à plusieurs centaines de milliers par centimètre cube.

3^o Zone des mésosaprobies β , où les décompositions sont à peu près complètement achevées, les substances organiques minéralisées, et les traces de la pollution sur le point de s'effacer. La flore et la faune utiles, détruites par les effets de la pollution, se reconstituent lentement : on se trouve dans la zone d'auto-épuration. L'oxygène est présent ; un certain nombre de Poissons (sauf les Truites et les Poissons à exigence respiratoires élevées telles la Perche, le Vairon, la Vandoise) peuvent vivre dans cette zone et, à condition que le fond ne soit pas colmaté par des enduits glaireux des derniers *Sphærotilus* qui se maintiennent, ils peuvent même s'y reproduire. Le nombre de Bactéries tombe en-dessous de 100.000 par centimètre cube. Le phénomène le plus aisément remarquable dans cette zone est l'envasement ; en général la pollution se manifeste par un abaissement de la capacité biogénique du cours d'eau, car la flore et la faune utile ne sont pas encore reconstituées telles qu'elles étaient en amont des déversements nocifs.

4^o Zone des oligosaprobies qui correspond aux eaux pures, non polluées, dépourvues de matières organiques en fermentation (ne dépassant pas une teneur en matières organiques de plus de 5 à 10 mg./litre,

exprimée en oxydabilité du permanganate), ne renfermant que des sels minéraux, oxygénées, favorables à la vie de la plupart des poissons, comprenant les eaux pures de rivières de plaine. Au-dessus de cette zone, si l'on peut dire, on a l'habitude d'en considérer encore une autre, dite *catharobe*, correspondant aux ruisseaux et torrents de montagne, sources et fontaines, eaux particulièrement pures, froides et fortement oxygénées.

On conçoit facilement que cette classification des pollutions organiques en zones de saprobies est assez arbitraire et qu'il est assez délicat de compartimenter ainsi une rivière. Elle est cependant commode car elle permet d'avoir une idée du degré de pollution, de l'intensité des phénomènes de décomposition, et par conséquent du stade d'auto-épuration et de minéralisation où se trouvent dans le cours d'eau pollué les substances organiques déversées. Considérés au point de vue de leur physiologie et de leur adaptation écologique, les organismes caractéristiques de telle ou telle zone sont des indicateurs précieux. Il ne faut toutefois pas exagérer l'importance de ces indicateurs qui n'ont qu'une valeur relative. L'exemple des Gammare, typiquement d'eau pure, donc oligosaprobies, mais que l'on peut trouver temporairement et paradoxalement parmi des touffes de *Sphærotilus* (si les conditions s'y prêtent : eau froide, oxygène, pas trop de fermentations) nous a déjà montré la labilité de certains indicateurs. Les Aselles (Isopodes) et les *Sphærium corneum* (Mollusques bivalves), considérés comme des indicateurs typiques de la zone des mésosaprobies α , peuvent se rencontrer en l'absence de toute pollution, et traduire simplement un certain envasement. Les larves d'*Hydropsyche*, communes dans les eaux courantes et pures, ont un « spectre écologique » étendu, supportent d'assez fortes pollutions et peuvent pénétrer jusque dans les zones de mésosaprobies α . La Diatomée *Melosira varians*, vivant dans les fontaines et ruisseaux de montagne, peut également pénétrer assez loin dans les zones polluées ; elle est considérée comme ubiquiste et ne peut pas, à mon avis, caractériser telle ou telle zone de saprobies. Placer les organismes dans le système des saprobies est donc une affaire assez délicate, et il ne suffit pas d'aligner cinq ou six organismes pour caractériser une zone. Des relevés écologiques complets sont nécessaires.

Ceci étant dit, il me paraît utile cependant de créer, au sein des polysaprobies, une zone particulière correspondant aux plus intenses fermentations, avec d'importants dégagements d'hydrogène sulfuré, que j'appelle zone des « THIOSAPROBIES » (le radical *thio* voulant dire soufre). Une certaine pratique de la biologie des eaux polluées m'a convaincu de la réalité de l'existence de cette zone. Aucun milieu n'est aussi clairement défini que celui où se trouvent d'abondantes quantités d'hydrogène sulfuré : des organismes absolument caractéristiques tels que les Bactéries sulfuraires pourpres ou incolores, les Beggiatoa, toutes les Bactéries qui métabolisent l'hydrogène sulfuré, un certain nombre d'Infusoires, et quelques très rares Algues s'y rencontrent. Il n'y a pratiquement pas d'oxygène dans cette zone, gaz incompatible avec les fermentations intenses et les teneurs élevées en hydrogène sulfuré,

pas d'Animaux supérieurs (à part quelques larves de Chironomes capables de vivre en anaérobiose, et des larves d'Eristalis), et bien entendu pas de Poissons. La teneur en hydrogène sulfuré doit être supérieure à la teneur assez vague indiquée généralement sous le nom de « traces », supérieure encore à la teneur décelable à l'odorat. Je fixe cette teneur limite inférieure, au-dessus de laquelle la zone des thiosaprobies peut s'installer entre 0,1 et 0,2 mg. d'hydrogène sulfuré par litre.

On pourrait m'objecter que la zone des polysaprobies est très bien comme elle est, et que j'ai tort de donner une importance particulière à l'hydrogène sulfuré. Pourquoi ne pas faire une zone « ammoniacale » et sachant que les fermentations et décompositions se mélangent, pourquoi ne pas faire une zone spéciale pour chaque fermentation ? C'est que, parmi toutes les fermentations connues qui ont lieu dans les eaux polluées, aucune n'est aussi facile à déceler que la fermentation sulfhydrique, et aucune ne présente des organismes aussi caractéristiques que les Bactéries sulfuraires pourpres ou les Beggiatoa, aisément reconnaissables à l'œil nu, ou même les Oscillaires enrobées d'une croûte de sulfure de fer provenant des fermentations. Je sais bien que les fermentations sont extrêmement complexes, mais la fermentation sulfhydrique, avec ses organismes caractéristiques, a justement la propriété de pouvoir en quelque sorte être isolée, et facilement reconnaissable, même par des non spécialistes.

Je définis donc la *zone des thiosaprobies* comme la zone où la pollution organique est la plus forte, où les décompositions et fermentations sont les plus intenses, où domine la fermentation sulfhydrique avec d'importantes formations d'hydrogène sulfuré, en teneurs supérieures à 0,1 ou 0,2 mg. par litre. Il s'y développe des Bactéries qui utilisent l'hydrogène sulfuré pour leur métabolisme, quelques Algues et quelques rares Animaux capables de supporter des concentrations élevées de ce gaz considéré à juste titre comme toxique pour les Animaux dits supérieurs.

Pour clore ce chapitre, je place les organismes cités en un tableau, dans les colonnes respectives correspondant aux zones de saprobies. Ce tableau se lit de gauche à droite en partant des zones les plus polluées (colonne de gauche : thiosaprobies), pour arriver aux zones moins polluées (colonne de droite, β mésosaprobies) en voie d'auto-épuration. Les zones oligosaprobies et catharobies sont laissées de côté dans cet article. L'ensemble des organismes caractéristiques des zones de saprobies et d'eaux pures fera l'objet d'un autre article où il sera donné par tableaux et colonnes un résumé des principaux indicateurs valables des zones qui intéressent l'hydrobiologiste.

Dans le présent tableau, les symboles suivants ont été choisis : un gros trait hachuré indique que les organismes sont tout à fait caractéristiques et dominants dans une zone donnée ; un trait ordinaire veut dire que les organismes en question se trouvent habituellement dans cette zone, sans être tout à fait caractéristiques. Un trait pointillé signifie qu'ils ne se rencontrent qu'occasionnellement dans la zone considérée, sans jouer le rôle d'indicateurs valables. Enfin, un trait interrompu

au milieu d'une colonne veut dire que les avis sont partagés ou que mon opinion n'est pas encore faite : les organismes cités entrent exceptionnellement dans la zone en question mais ne s'y maintiennent pas régulièrement.

TABLEAU DES CHAMPIGNONS,
BACTÉRIES ET ALGUES D'EAUX POLLUÉES
(Système des Saprobies)

Organismes	Zone thio- saprobe	Zone poly- saprobe	Zone α méso- saprobe	Zone β méso- saprobe
CHAMPIGNONS				
<i>Leptomitius lacteus</i>			■■■■■■■■■■	
<i>Saprolegnia</i> divers.		_____	_____	
<i>Mucors</i> divers.		_____	_____	
<i>Fusarium aquaeductum</i>			■■■■■■■■■■	
Moisissures (<i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i>)		-----	-----	
Levures (<i>Torula</i>)		-----	-----	
BACTÉRIES				
CHLAMYDOBACTÉRIES :				
<i>Sphaerotilus natans</i> (forme d'abondance)	-----	■■■■■■■■■■	_____	
<i>Sph. natans</i> (forme de famine : (<i>Cladothrix</i>))		■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■	-----
LEUCOTHIOBACTÉRIES :				
<i>Beggiatoa alba</i> et autres.	■■■■■■■■■■	■■■■■■■■■■		
<i>Thiothrix nivea</i>	_____	■■■■■■■■■■		
<i>Achromatium oxaliferum</i>				
BACTÉRIES SULFURAIRES POURPRES :				
<i>Chromatium okenii</i>	■■■■■■■■■■	_____		
<i>Rhabdochromatium roseum</i> ..	■■■■■■■■■■	_____		
<i>Thiospirillum sanguineum</i> ..	_____	_____		
<i>Thiopedia rosea</i>	■■■■■■■■■■	_____	-----	
<i>Thiocapsa roseo-persicina</i> ..	■■■■■■■■■■	_____		
<i>Thiocystis violacea</i>	■■■■■■■■■■	_____		
<i>Lamprocystis roseo-persi- cina</i>	■■■■■■■■■■	_____		
AUTRES BACTÉRIES :				
<i>Zoogloea ramigera</i>	-----	■■■■■■■■■■		

Organismes	Zone thio- saprobe	Zone poly- saprobe	Zone α méso- saprobe	Zone β méso- saprobe
ALGUES				
CYANOPHYCÉES :				
<i>Oscillatoria putrida et chlorina</i>	=====	■■■■■■■■■■	-----	
<i>O. lauterbornii</i>	=====	=====		
<i>O. tenuis et formosa</i>		-----	■■■■■■■■■■	
<i>O. princeps et splendida</i> . . .			=====	-----
<i>O. chalybea</i>			=====	-----
<i>Spirulina jenneri</i>		=====	=====	
<i>Phormidium uncinatum et autumnale</i>		-----	■■■■■■■■■■	-----
<i>Ph. foveolarum</i>		-----	=====	-----
EUGLÉNIENS :				
<i>Euglena viridis</i>	=====	■■■■■■■■■■		
DIATOMÉES :				
<i>Nitzschia palea</i>	-----	=====	■■■■■■■■■■	=====
<i>Hantzschia amphioxys</i>	-----	=====	=====	=====
<i>Synedra ulna</i>		-----	=====	=====
CHLOROPHYCÉES :				
<i>Stigeoclonium tenue</i>		-----	-----	■■■■■■■■■■
<i>Ulothrix zonata</i> (forme d'eau polluée ?).....		-----	=====	-----

Ce tableau est le résumé et l'illustration simplifiée de tout ce qui vient d'être dit jusqu'à présent. Tout le monde pourra y lire, dans les quatre colonnes correspondant à des zones plus ou moins gravement polluées, les organismes caractéristiques. Ainsi, à titre d'exemple, nous voyons que *Leptomit* se trouve dans des zones moins polluées que *Sphærotil*. Comme nous l'avons déjà laissé entendre au cours de cet article, *Sphærotil* est caractéristique de la zone des polysaprobies, tandis que *Leptomit* est caractéristique des α mésosaprobies et s'étend jusque dans la zone de β mésosaprobies. Les conditions écologiques du développement de ces deux organismes, que nous avons longuement exposées, expliquent ces particularités. Une autre distinction, un peu subtile, est encore possible, à mon avis : la forme d'abondance de *Sphærotil* est caractéristique de la zone polysaprobe et peut pénétrer dans la zone thiosaprobe, et le cas échéant α mésosaprobe ; la forme de famine de *Sphærotil* (l'ancienne forme *Cladothrix*), tout en étant aussi fortement représentée dans les polysaprobies, est plutôt caractéristique des

α mésosaprobies et s'étend exceptionnellement jusque dans la zone des β mésosaprobies. Un grand nombre de considérations écologiques de ce genre devraient encore être énoncées, si je ne craignais de rendre trop long cet article.

Précisons que dans une pollution organique « classique », les zones se succèdent normalement en commençant par les zones des plus intenses fermentations, à H^2S ou thiosaprobe, suivie par la zone polysaprobe, puis, la pollution diminuant légèrement d'intensité, la zone α mésosaprobe, et enfin lorsque l'auto-épuration est en cours, la zone β mésosaprobe. Mais ce n'est pas toujours le cas ; il peut y avoir une inversion de zones qui s'explique facilement.

En effet, en aval d'un déversement d'eaux résiduaires, il peut exister une zone où il ne se développe rien, parce que les substances organiques ne sont pas assez décomposées. Puis, on trouve plus loin la zone des polysaprobies et la plupart des personnes non averties s'étonnent que cette zone s'installe à quelques centaines de mètres de l'usine, voire à un ou deux kilomètres. Mieux encore, à la faveur du développement abondant de *Sphærolilus* ou autres, les fermentations ont lieu et l'on peut assister à l'établissement d'une zone thiosaprobe de très fortes décompositions au milieu ou même à la fin de la zone polysaprobe.

Un autre aspect de décalage des zones de saprobies est provoqué par l'emploi de substances diverses destinées à empêcher les fermentations dans la rivière immédiatement en aval du déversement résiduaire. Par exemple, la chloration de l'eau résiduaire, si elle empêche le développement de Bactéries encombrantes et accusatrices immédiatement en aval d'une usine, ne détruit pas complètement les matières organiques déversées en trop grande quantité, ne facilite pas leur dégradation, mais déplace seulement le problème en reculant de plusieurs kilomètres l'installation des zones de saprobies et retarde même l'auto-épuration naturelle de l'eau. L'emploi des produits synthétiques modernes (sels d'ammonium quaternaire) dans le même but, donne lieu aussi à cette fausse épuration, déplaçant les pollutions dont les conséquences ne se font alors sentir qu'à 5 ou 10 kilomètres en aval de l'usine ; la responsabilité de celle-ci est dans ce cas bien plus difficile à prouver.

Conclusions.

L'étude systématique et écologique de la flore inférieure des eaux polluées nous a fait entrer dans des détails qui ont pu paraître assez rébarbatifs. Il n'est pas possible de simplifier outre mesure dans ce domaine où la détermination de Champignons, de Bactéries ou d'Algues reste parfois délicate même pour les spécialistes. Je crois que mon exposé pourra apporter aux techniciens de l'eau et des pollutions des indications valables pour la détermination de tous ces organismes, soit avec une bonne loupe, soit à l'œil nu.

Les pollutions organiques chroniques, et même beaucoup d'autres, peuvent et doivent se reconnaître « à l'aide de nos yeux et de notre nez »

(de naturaliste) comme l'a écrit judicieusement WEIMANN. Les procédés de chimie analytique font perdre de vue l'essentiel des phénomènes lorsqu'on ne tient compte que de la toxicité des eaux résiduaires ou qu'on guette en vain le passage du flot destructeur. Souvent, dans les cas de pollutions chroniques où les déversements sont variables, l'analyse chimique ne prouve rien alors que les traces biologiques de la pollution sont inscrites sur 10 ou 15 kilomètres de rivière. Je n'ai jamais sous-estimé l'importance de la chimie dans l'étude des pollutions; au moment où j'ai décrit le premier laboratoire ambulant de lutte anti-pollution que je venais de mettre au point en 1948 (*Bull. de Pisciculture*, n° 151, pp. 5 à 17) j'ai fait la part égale à la chimie et à la biologie sur le terrain. Cependant, l'étude biologique de tous les organismes dont il vient d'être question ici, permet souvent de mieux rendre compte de l'état de pollution d'une rivière que les analyses chimiques, et en tous cas d'expliquer la perte de productivité piscicole par suite de pollution. Il est à souhaiter que les seules preuves biologiques de la pollution prennent la même valeur qu'on accorde aux analyses chimiques seules et qu'une pollution démontrée par les seules constatations biologiques, faites avec soin et précision, soit reconnue juridiquement, en l'absence d'une analyse chimique ou en présence d'une analyse chimique contradictoire.

C'est à ce titre que la connaissance des organismes inférieurs, indicateurs précieux des pollutions, est indispensable à nos biologistes qui ont pour mission de veiller sur les rivières.

BIBLIOGRAPHIE

(Sont cités les travaux importants ou récents relatifs au sujet traité dans cet article)

- BAHR (H.). — 1953. Zur Biologie von *Sphaerotilus natans* Kütz. *Schweiz. Zeitschr. Hydrol.* **15**, 285-301.
- BAVENDAMM (W.). — 1924. Die Farblosen und roten Schwefelbakterien des Süß- und Salzwassers. *Pflanzenforschung*, **2**, 159 p., Iena.
- BENEDEN (VAN G.). — 1951. Contribution nouvelle à l'étude des Ferrobactéries. I. *Hydrobiologia*, **3**, 1-64.
- BERGEY'S. — Manual of Determinative Bacteriology. 1948. 6^e édition, Baillière, Tindall & Cox, London.
- CHOLODNY (N.). — 1926. Die Eisenbakterien. Beiträge zu einer Monographie. *Pflanzenforschung*, **4**, 171 p., Iena.
- DEMOLL (R.) et LIEBMANN (H.). — 1952. Über die Verteilung von *Sphaerotilus natans* im Fluss, *Schweiz. Zeitschr. Hydrol.*, **14**, 289.
- DORFF (P.). — 1934. Die Eisenbakterien. *Pflanzenforschung.*, **16**, Iena.
- ELLIS (D.). — 1912. An Investigation of *Cladothrix* into the life-history of *Cladothrix dichotoma* Cohn, *Proc. Royal Soc.*, London.
- ELLIS (D.). — 1919. Iron Bacteria, Methuen & Co, London.
- FAURE-FREMIET (E.). — 1951. Associations Infusoriennes à *Beggiatoa*, *Hydrobiologia*, **3**, 65-71.
- FJERDINGSTAD (E.). — 1950. The microflora of the river Mølleaa, with special reference to the relation of the benthal Algae to pollution. *Folia Limnol. Scandin.* **5**, 1-123.
- GANTER (I. R.) et SCHWARTZ (W.). — 1956. Beiträge zur Biologie der Eisenmikroben *Leptothrix crassa* Chol. *Schweiz. Zeitschr. Hydrol.* **18**, 171, 192.
- GEITLER (L.). — 1932. Cyanophyceae dans Rabenhorst's Kryptogamen-Flora, 14. Akadem. Verlagsges. Leipzig.
- GENNERICH (J.). — 1952. Beiträge zur Ernährungsphysiologie und Systematik der Abwasserpilze *Leptomit* *lacteus* und *Sphaerotilus natans*. *Gedenkschr. Bundesanst. Gewässerkde, Bielefeld*.
- GENNERICH (J.) et SIKORA (E.). — 1952. Die Verunreinigung von Main und Rhein, ausgedrückt in quantitativer Bestimmung der treibenden Abwasserpilze, *Wasserwirtschaft*, **42**, 5, 190.
- HÖHNEL (G.). — 1955. Ernährung-und stoffwechselphysiologische Untersuchungen an *Sphaerotilus natans*. *Arch. Mikrobiol.*, **23**, 207-250.
- HÖHNEL (G.). — 1955. Ein Beitrag zur Physiologie der Eisenbakterien. *Vom Wasser*, **22**, 176-193.
- HUBER-PESTALOZZI (G.). — 1938. Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematik und Biologie, 16, 1, Blaualgen. Bakterien. Pilze., dans Binnengewässer Thienemann's Schweizerbart, Stuttgart.
- KOLKOWITZ (R.). — 1903. Über Bau und Leben des Abwasserpilzes *Leptomit* *lacteus*. *Mitt. Kgl. Prof. Wasser und Abwasser*, **2**, 34-98.
- KOLKOWITZ (R.). — 1904-1906. Abwasserpilze, in : F. LAFAR, Handbuch der technischen Mykologie, 3, Iena.

- KOLKWITZ (R.). — 1914 et 1922. Pflanzenphysiologie. Iena.
- KOLKWITZ (R.). — 1926. Über die Verwandtschaft zwischen *Sphaerotilus natans* und *Cladotrix dichotoma*. *Kl. Mitgl. Ver. WaBoLu-Hyg.* **2**, 11-12.
- KOLKWITZ (R.). — 1950. Oekologie der Saprobien. Über die Beziehungen der Wasserorganismen zur Umwelt. *Schrift. Ver. WaBoLu-Hyg.* **4**, 64 p.
- LACKEY (J. B.) et WATTIE (E.). — 1940. Studies of Sewage Purification, XIII. The Biology of *Sphaerotilus natans* in relation to bulking of activated sludge. *Publ. Health. Rep.* **55**, 975.
- LAUTERBORN (R.). — 1906. Zur Kenntniss der sapropelischen Flora. *Allg. Bot. Zeitschr.*
- LAUTERBORN (R.). — 1913. Zur Kenntniss einiger sapropelischen Schizomyceten. *Ibid.* **19**.
- LAUTERBORN (R.). — 1915. Die Verunreinigung der Gewässer und die biologische Methode ihrer Untersuchung. Ludwigshafen.
- LAUTERBORN (R.). — 1914-1917. Die Sapropelische Lebewelt. Ein Beitrag zur Biologie des Faulschlammes natürlicher Gewässer. *Verh. Naturhist. Med. Ver. Heidelberg*, **13**.
- LIEBMANN (H.). — 1951 Handbuch der Frischwasser-und Abwasserbiologie, 1, München, 539 p.
- LIEBMANN (H.). — 1953. Die Lebensgemeinschaft der *Sphaerotilus floccus* und die physikalisch-chemischen Voraussetzungen ihrer Bildung. *Vom Wasser*, **20**, 24-33.
- LINDE (P.). — 1913. Zur Kenntniss von *Cladotrix dichotoma*, *Zbl. Bakter. II. Abt.* **39**, 369.
- MOLISCH (H.). — 1892. Die Pflanzen in ihren Beziehungen zum Eisen. Iena.
- MOLISCH (H.). — 1910. Die Eisenbakterien, G. Fischer, Iena.
- NAUMANN (E.). — 1932. Über den Normaltypus von *Sphaerotilus natans* Kütz. und einige Modifikationen davon. *Ber. deutsch. Bot. Ges.*, **50**.
- NAUMANN (E.). — 1933. Wuchsformenbilder des Aufwuchses des Abwasserpilzes *Leptomitus lacteus*. *Ibid.*, **51**, 99-102.
- NAUMANN (E.). — 1933. Ist *Cladotrix dichotoma* Cohn mit *Sphaerotilus natans* Kütz. identisch? *Zbl. Bakt. II. Abt.* **88**, 214.
- NAUMANN (E.). — 1933. Über die Begutachtung des Aufwuchses von *Sphaerotilus natans*. *Arch. Hydrobiol.* **25**, 407.
- NAUMANN (E.). — 1934. Über *Sphaerotilus*-aufwuchs als Selbstreiniger und Selbstverunreiniger der Flussläufe. *Ibid.* **26**, 3.
- PRINGSHEIM (E. G.). — 1949. The filamentous Bacteria *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Cladotrix* and their relation to iron and manganese. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Biol. Sc.* **233**, 453-482.
- PRINGSHEIM (E. G.). — 1949. Iron Bacteria. *Biological Reviews*, **24**, 200-244.
- SCHADE (A. L.). — 1940. The nutrition of *Leptomitus*, *Amer. J. Bot.* **27**, 376-384.
- SCHADE (A. L.) et THIMANN (K. V.). — 1940. The metabolism of the water-mold *Leptomitus lacteus*, *Ibid.* **27**, 659-670.
- SCHEURING (L.). — 1955. Ein Beitrag zur Biologie und dem Stoffwechsel von *Sphaerotilus natans*. *Arch. Hydrobiol. Suppl. Band* **22**, 498-503.
- SCHEURING (L.) et HÖHNEL (G.). — 1956. *Sphaerotilus natans*, Seine Ökologie und Physiologie. *Schrift. Ver. Zellstoff und Papier-Chemiker und Ingenieure*, **26**, 150 p. Darmstadt.
- SRAMEK-HUSEK (R.). — 1956. Zur biologischen Charakteristik der Höheren Saprobitätsstufen. *Arch. Hydrobiol.* **51**, 376-390.
- TIEGS (E.). — 1919. Beiträge zur Ökologie der Wasserpilze, *Ber. deutsch. Bot. Ges.* **37**, 497.

- TIEGS (E.). — 1921. Die Bedeutung des Pilzwachstums in Vorflutern für Abwasser, *Wasser und Gas*, **11**, n° 26.
- TIEGS (E.) et DORRIES (W.). — 1926. Kann *Leptomit*us lacteus aus anorganischen Stickstoffverbindungen seinen Stickstoffbedarf decken? *Kl. Mitt. Ver. Wasservers. u. Abwasserbeseitigung*, **2**, 105-108.
- TROMSDORFF (R.). — 1918. Über die Wachstumsbedingungen der Abwasserpilze *Leptomit*us und *Sphaerotilus*. *Zbl. Bakt.* II. Abt., **48**, 62-76.
- VOLKONSKY (M.). — 1932. Culture de *Saprolegnia* sp. en milieu synthétique. *C. R. Soc. Biol. Paris*, **109**, 528-530.
- VOLKONSKY (M.). — 1934. Culture de *Saprolegnia* sp. en milieu synthétique. *Ann. Inst. Pasteur*, **52**, 76-101.
- WAKSMAN (S. A.) et LOMANITZ (S.). — 1925. Contribution to the chemistry of decomposition of proteins and amino acids by various groups of microorganisms. *J. Agric. Research*, **30**, 263-281.
- WEIMANN (R.). — 1949. Zur Überwachung unserer Bäche und Flüsse. *Sc'weiz. Zeitschr. Hydrol.*, **11**, 463.
- WEIMANN (R.). — 1952. Abwassertypen in Nordrhein-Westfalen. *Ibid.* **14**, 371-433.
- WOLF (F. A.) et WOLF F. T.). — 1949. *The Fungi*. 2 vol. New-York, Wiley & Sons Inc. et Chapman & Hall, London.
- WUHRMAN (K.). — 1949. Über den Aminosäuregehalt gereinigten und ungereinigten Abwassers. *Verh. Int. Ver. theor. angew. Limnol.* **10**, 580-586.
- WURTZ (A.). — 1946. Quelques problèmes d'Hydrobactériologie. *Revue Scientif.* **84**, 9, 553-563.
- WURTZ (A.). — 1946. Rôle et importance des Bactéries dans l'eau. *Bull. fr. Piscicult.* **143**, 80-88 et **144**, 144-148.
- WURTZ (A.) 1947. — La lutte contre la pollution par les usines industrielles, en particulier les usines de pâte à papier. *Ibid.* **147**, 71-78.
- WURTZ (A.). — 1949. Le problème des pollutions industrielles des cours d'eau. Création d'un laboratoire ambulant pour l'étude chimique et biologique des pollutions. *Ibid.* **154**, 5-17.
- ZIKES (H.). — 1915. Vergleichende Untersuchungen über *Sphaerotilus natans* Kütz. und *Cladothrix dichotoma* auf Grund von Reinkulturen. *Zbl. Bakt.* II. Abt. **43**, 19.
-