

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

Academic Notes of the French Academy of agriculture

Authors

Jade A. Ezzedine , Stéphane Jacquet

Title of the work

Compléments à la Note : Bactéries prédatrices : zoom sur les Bdellovibrio et organismes apparentés (BALOs)

Year 2019, Volume 7, Number 3, pp. 1-7

Published online:

30 March 2019,

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/n3af-synthese-bacteries-predatrices-zoom-sur-les-bdellovibrio-et>

[Compléments à la Note : Bactéries prédatrices : zoom sur les Bdellovibrio et organismes apparentés \(BALOs\)](#) © 2019 by Jade A. Ezzedine , Stéphane Jacquet is licensed under [Attribution 4.0](#)

[International](#) 

Compléments à la note

Ezzedine JA, Jacquet S. 2019. *Diversité et rôles des bactéries prédatrices de bactéries : zoom sur les Bdellovibrio et organismes apparentés (BALOs)*, Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture, 2019, 2, 1-25.

Jade A. Ezzedine¹, Stéphan Jacquet¹

¹ Université Savoie Mont-Blanc, Inra, UMR CARRETEL, 75 bis avenue de Corzent, 74200 Thonon-les-Bains, France

Correspondance :

stephan.jacquet@inra.fr

1 - Prédateur ou parasite ?

Un prédateur est caractérisé par la consommation de plusieurs proies au cours de sa vie. Il est aussi généralement plus grand que sa proie. Le prédateur a également tendance à provoquer la mort de sa proie et, ainsi, évincer sa valeur sélective ou fitness. En revanche, pour un microprédateur, les deux dernières règles ne sont pas toujours applicables. Un microprédateur n'est pas forcément plus grand que sa proie et n'induit pas systématiquement la mort de celle-ci, car il peut prélever en petite quantité des repas non létaux.

Un parasite attaque une seule victime par cycle de vie, sans nécessairement éliminer la fitness de son hôte. L'hôte est inévitablement plus grand que le parasite. Le parasite au cours d'un stade donné de son cycle de vie ne va normalement pas chercher à sortir de son hôte pour aller en infecter un autre.

A l'instar du parasite, le parasitoïde va infecter un seul hôte par cycle de vie, mais il provoque inévitablement la mort de son hôte.

En général, c'est le développement de la progéniture qui met fin à l'hôte. Concernant les BALOs (*Bdellovibrio* et organismes apparentés), la frontière est mince entre ces différentes catégories. Toutefois les BALOs sont considérés comme des prédateurs, car l'hôte est immédiatement tué, et cela même avant le développement de la progéniture. De plus, le prédateur cherche systématiquement une nouvelle proie à la fin de son cycle. Enfin l'hôte qui a succombé au prédateur ne fait office que d'un réservoir de ressource énergétique, ainsi que d'un environnement inerte, stable osmotiquement et protecteur contre les attaques de prédateurs et les fluctuations des conditions environnementales.

D'après Lafferty M, Kuris M. 2002. Trophic strategies, animal diversity and body size, *Tree*, 17 (11), 507–513.

Document complémentaire

2. Inventaire des prédateurs bactériens : mode de vie, morphologie et stratégie de prédation

Une bactérie est considérée comme un prédateur dès lors qu'elle tue d'autres microbes et les consomme en tant que ressource nutritionnelle (Velicer *et al.*, 2009). Une dizaine d'espèces bactériennes prédatrices correspondant à divers taxa [*Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria*, *Deltaproteobacteria* (<https://en.wikipedia.org/wiki/Proteobacteria>), *Chloroflexi* ([https://en.wikipedia.org/wiki/Chloroflexi_\(phylum\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Chloroflexi_(phylum))), etc. a été identifiée à ce jour. On les trouve dans les environnements terrestres, aquatiques et extrêmes (sources chaudes, milieux hypersalés, etc.).

Le point commun à tous les prédateurs bactériens est la capacité à dégrader les polymères de leurs proies. Cependant il existe une grande diversité au sein des prédateurs bactériens. Ainsi certaines bactéries sont des prédateurs facultatifs ou obligatoires. De plus, la stratégie de prédation peut se faire individuellement ou en groupes nommés essaims ou meutes, de l'anglais wolfpacks. Enfin certaines cellules ont besoin d'établir un contact cellule-cellule pour initier la prédation. En effet, deux types de contacts peuvent être distingués : le contact endobiotique qui résulte de l'envahissement de la proie par le prédateur (Figure 1, E de la Note), et le contact épibiotique (Figure 1, F de la Note), qui n'implique pas une intrusion au sein de la proie.

Toutefois d'autres prédateurs ne nécessitent pas de contact et se contentent d'enclencher la prédation à distance par sécrétion d'enzymes lytiques, provoquant ainsi l'éclatement des cellules sensibles à l'action de ces enzymes. Ces différents mécanismes, stratégies et mode de prédation distinguent les BALOs des autres prédateurs bactériens, bien que certaines espèces prédatrices puissent présenter plusieurs stratégies de prédation au cours de leur vie, à savoir le

mode épibiotique et le mode endobiotique.

Les prédateurs *Bdellovibrio* spp., *Bacteriovorax* spp. et *Peredibacter* spp. appartenant à la classe des *Oligoflexia* (récemment retirée de la classe des *Deltaproteobacteria*) (Hahn *et al.*, 2017. *Silvanigrella aquatica* gen. nov., sp. nov., isolated from a freshwater lake, description of *Silvanigrellaceae* fam. nov. and *Silvanigrellales* ord. nov., reclassification of the order *Bdellovibrionales* in the class *Oligoflexia*, reclassification of the families *Bacteriovoracaceae* and *Halobacteriovoraceae* in the new order *Bacteriovorales* ord. nov., and reclassification of the family *Pseudobacteriovoracaceae* in the order *Oligoflexales*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 67 (8), 2555–2568), ainsi que *Micavibrio* spp. de la classe des *Alphaproteobacteria* ont été réunis au sein du même groupe des *Bdellovibrio* and like organisms (BALOs), puisqu'ils présentent des caractéristiques similaires du point de vue de la morphologie (forme vibroïde) (Figure 1 de la Note), de la motilité (présence de flagelle), de l'arsenal enzymatique, du mode de prédation individuel (obligatoire pour la nourriture et la multiplication), et du mécanisme d'attachement à la proie (épibiotique et endobiotique périplasmique ou cytoplasmique).

De plus, les travaux de phylogénie fondés sur la séquence du gène 16S de la petite sous-unité ribosomique renforcent la classification des trois espèces modèles de la classe des *Oligoflexia* dans le groupe des BALOs (Figure 2 de la Note). Par ailleurs, *Micavibrio* ne ressemble à aucun autre prédateur de la classe des *Alphaproteobacteria*. Il s'intègre néanmoins dans le groupe des BALOs par la similitude de son mode d'action, de prédation et sa morphologie.

Ci-dessous sont listés des exemples de prédateurs bactériens n'appartenant pas au groupe des BALOs :

Document complémentaire

Alphaproteobacteria : *Ensifer adhaerens* : Bactérie du sol, Gram-négatif, en forme de bâtonnet, rencontrée à l'état individuel ou par paire. Elle forme des nodules fixateurs d'azote sur les racines et les tiges de légumineuses. Toutefois elle présente un comportement de prédation lorsque les conditions nutritives deviennent limitantes. *In vitro*, la prédation s'opère par un groupe d'*E. adhaerens* qui s'attache à une proie les uns à côté des autres, à l'image d'une palissade.

Betaproteobacteria : *Cupriavidus necator* : Bactérie du sol en forme de bâtonnet, ayant un comportement de prédation facultative. Sa croissance nécessite la présence de concentrations élevées en cuivre.

Gammaproteobacteria : *Lysobacter* : Bactérie à mobilité « glissante » qui prolifère en formant de longues cellules et filaments. La prédation s'effectue suivant la stratégie de meute (*wolfpack*). Un contact est établi entre le prédateur et la proie, mais, contrairement aux BALOs, aucune structure d'attachement à la proie n'est observée ou définie.

Deltaproteobacteria : *Myxobacteria* : Bactérie en bâtonnet relativement volumineuse et qui se déplace par glissement dans les sols. La caractéristique la plus marquante de ce groupe est également la formation d'essaims (*wolfpack*), ainsi que son mode de vie multicellulaire. La prédation s'opère par un déplacement de l'essaim jusqu'à rencontrer fortuitement une proie. La prédation se déroule en deux temps, d'abord par les cellules mères qui attaquent, piègent et affaiblissent la proie, puis les nouvelles recrues générées principalement par division cellulaire forcent la proie dans un espace contraint afin de la dévorer.

D'après Jurkevitch E, Davidov Y 2007. *Phylogenetic diversity and evolution of predatory prokaryotes*. In Jurkevitch E (ed.). *Predatory Prokaryotes - Biology, ecology, and evolution*. Springer-Verlag, Heidelberg et Velicer GJ, Mendes-Soares H. 2009. Bacterial predators, *Current Biology*, 19 (2), 55–56.

3. Classification des bactéries

La classification vise à décrire et à regrouper des espèces bactériennes sur la base de caractères similaires. Cette classification apparaît dans deux publications officielles qui sont *The International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* (<https://ijs.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem>) et le *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (https://en.wikipedia.org/wiki/Bergey%27s_Manual_of_Systematic_Bacteriology).

De plus, *The International Committee on Systematics of Prokaryotes* (<https://www.the-icsp.org>) supervise la nomenclature des procaryotes et détermine les règles de désignation.

Historiquement les bactéries ont été classées selon la coloration de Gram (qui permet de mettre en évidence les propriétés de la paroi bactérienne ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Coloration_de_Gram), la morphologie, la mobilité, la température de croissance, la sporulation, les besoins nutritionnels, etc. De nos jours et depuis la découverte des techniques moléculaires, la taxonomie se fonde sur la constitution chimique (caractéristiques électrophorétiques des protéines) et sur la structure de l'ADN. Cette dernière se fonde sur l'étude du génome, lui-même par l'intermédiaire de techniques telles que le pourcentage en GC (densité et température de dénaturation des paires de bases guanine G et cytosine C), l'électrophorèse de l'ADN en champ pulsé, l'hybridation ADN-ADN, l'hybridation ADN-ARN et le séquençage de l'ARN ribosomique (16S ou/et 23S). Enfin en bactériologie médicale, il existe aussi une autre classification qui se fonde sur les marqueurs épidémiologiques pour caractériser les bactéries à intérêt clinique.

La base de données en ligne *List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature* (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3965054/>) répertorie et

Document complémentaire

maintient des informations relatives au nom et à la taxonomie des procaryotes. A ce jour, cette base contient 34 phyla bactériens (*Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Aquificae*, *Armatimonadetes*, *Bacteroidetes*, *Balneolaeota*, *Caldiserica*, *Calditrichaeota*, *Chlamydiae*, *Chlorobi*, *Chloroflexi*, *Chrysiogenetes*, *Cyanobacteria*, *Deferribacteres*, *Deinococcus-Thermus*, *Dictyoglomi*, *Elusimicrobia*, *Fibrobacteres*, *Firmicutes*, *Fusobacteria*, *Gemmatimonadetes*, *Kiritimatiellaeota*, *Lentisphaerae*, *Nitrospira*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria*, *Rhodothermaeota*, *Spirochaetes*, *Synergistetes*, *Tenericutes*, *Thermodesulfobacteria*, *Thermotogae*, *Verrucomicrobia*, et une liste de non assignées).

4. Historique et étymologie

En 2000, Baer et ses co-auteurs (Baer ML, Ravel J, Chun J, Hill RT, Williams HN. 2000. A proposal for the reclassification of *Bdellovibrio stolpii* and *Bdellovibrio starrii* into a new genus, *Bacteriovorax* gen. nov. as *Bacteriovorax stolpii* comb. nov. and *Bacteriovorax starrii* comb. nov., respectively, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 50 (1), 219–224) ont proposé de transférer les deux espèces *Bdellovibrio stolpii* Uki2 et *Bdellovibrio starrii* A3.12 vers un nouveau genre nommé *Bacteriovorax*.

Ce terme est composé de *baktron*, mot grec signifiant petit bâtonnet, et du mot latin *vorax*, exprimant l'action de dévorer. Ainsi *Bacteriovorax stolpii* et *Bacteriovorax starrii* ont vu le jour. Par ailleurs, le terme *stolpii* provient de Stolp, nom du microbiologiste allemand Heinz Stolp (https://de.wikipedia.org/wiki/Heinz_Stolp), découvreur du premier BALO.

En 2004, Davidov et Jurkevitch (Davidov Y, Jurkevitch E. 2004. Diversity and evolution of *Bdellovibrio*-and-like organisms (BALOs), reclassification of *Bacteriovorax starrii* as *Peredibacter starrii* gen. nov., comb. nov., and

description of the *Bacteriovorax-Peredibacter* clade as *Bacteriovoracaceae* fam. Nov, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54 (5), 1439–1452) reclassent l'espèce *B. starrii* dans un nouveau genre *Peredibacter*. Ainsi l'espèce *B. starrii* devient *Peredibacter starrii*. *Peredibacter* dérive du latin *peredere* qui signifie « dévorer » et du néo-latin *bacter* qui dépeint la forme en bâtonnet. Ainsi le terme *Peredibacter* signifie « dévoreur de bactéries ». Le mot *starrii* provient quant à lui de Starr, nom du microbiologiste américain Mortimer P. Starr (https://www.researchgate.net/scientific-contributions/77379731_Mortimer_P_Starr).

La même année, Baer *et al.* (2004) proposent à leur tour de reclasser les BALOs marins *Bdellovibrio* sp. en *Bacteriovorax marinus* et *Bacteriovorax litoralis*, *marinus* pour environnement marin et *litoralis* pour la côte. Ensuite ces deux espèces ont été transférées dans un nouveau genre *Halobacteriovorax*. Ce terme est composé du mot grec *hals* ou *haloes*, autrement dit sel, du mot latin *bacterium*, pour la forme en petit bâtonnet, et, enfin, du suffixe latin *vorax*, pour dévoreur. L'ensemble définit les *Halobacteriorax* comme « des dévoreurs de bactéries en milieu halophile ».

Dans un article récent de Hahn *et al.* (2017. *Silvanigrella aquatica* gen. nov., sp. nov., isolated from a freshwater lake, description of *Silvanigrellaceae* fam. nov. and *Silvanigrellales* ord. nov., reclassification of the order *Bdellovibrionales* in the class *Oligoflexia*, reclassification of the families *Bacteriovoracaceae* and *Halobacteriovoracaceae* in the new order *Bacteriovoracales* ord. nov., and reclassification of the family *Pseudobacteriovoracaceae* in the order *Oligoflexales*, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67 (8), 2555–2568), la classification des BALOs a encore une fois subi des changements. L'ordre des *Bdellovibrionales* a été transféré de la classe des

Document complémentaire

Deltaproteobacteria à la classe des *Oligoflexia*. Cet ordre contenait à l'origine deux familles : les *Bdello-vibrionaceae* et les *Pseudobacterio-voracaceae*. Depuis, les *Pseudo-bacteriovoracaceae* ont quitté cet ordre pour rejoindre l'ordre des *Oligoflexiales*. De même, l'ordre des *Bacteriovorales*, contenant les familles *Peredibacteraceae*, *Bacterio-voracaceae* et *Halobacteriovoraceae* a aussi été incorporé à la classe des *Oligoflexia* (Table 1 de la Note).

5. Quelques exemples d'applications des BALOs en tant que bio-agents anti bactériens

Exemple I : La mucoviscidose est une maladie génétique létale. L'évolution naturelle de la mucoviscidose est un déclin progressif de la fonction respiratoire des poumons occasionné par un cercle vicieux d'inflammation et de destruction des tissus, enclenché et maintenu par une colonisation bactérienne chronique des voies respiratoires inférieures. *B. bacteriovorus* a été détecté naturellement dans le microbiote des poumons de sujets sains et parvient à survivre dans ces conditions anoxiques. Il a donc été proposé d'inoculer des souches du prédateur au début du stade de colonisation des poumons chez des sujets atteints de mucoviscidose pour contribuer à contrôler la colonisation chronique des deux bactéries dominantes du microbiote, *Pseudomonas aeruginosa* (Gram négatif) et *Staphylococcus aureus* (Gram positif). Effectivement, une fois que les bactéries pathogènes sont installées, rien ne peut les déloger, pas même les antibiotiques (Iebba *et al.*, 2014. *Bdellovibrio bacteriovorus* directly attacks *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* cystic fibrosis isolates. *Frontiers in Microbiology* 5, 1–9).

L'action des BALOs semble se traduire par une réduction significative des biofilms de *S.*

aureus et de *P. aeruginosa* (Iebba *et al.*, 2014 ; Pantanella *et al.*, 2018. *Behaviour of Bdellovibrio bacteriovorus in the presence of Gram-positive Staphylococcus aureus*. *New Microbiologica* 41 (2), 145–152).

Exemple II : *B. bacteriovorus* est injecté dans le rhombencéphale (cerveau postérieur) en tant que traitement antibactérien *in vivo* chez des larves de *Danio rerio* (poisson-zèbre) infectées par une souche pathogène humaine résistante à l'antibiotique, *Shigella flexneri*. La survie des animaux infectés est alors significativement améliorée, ainsi que le taux de survie des larves du poisson-zèbre qui augmente de 35 %. Le système immunitaire du poisson-zèbre est hautement homologue à celui de l'homme, avec des réponses associées aux neutrophiles et macrophages. Après injection du prédateur dans les larves, le temps de persistance de ce dernier est de 24 heures. En effet, *B. bacteriovorus* est englouti par les neutrophiles et les macrophages du poisson qui se chargent de l'éliminer efficacement après 24 heures, même quand une dose importante du prédateur est apportée. Par contre, malgré ce temps de persistance relativement court, *B. bacteriovorus* est capable de réduire efficacement la charge pathogène *in vivo* avant d'être éliminé par l'action du système immunitaire de l'hôte. De plus, l'action prédatrice ne perturbe pas le système immunitaire, c'est-à-dire que la bactérie ne stimule pas une réponse immunitaire supplémentaire quand une infection est déjà présente ; au contraire on parle d'une réaction synergétique, puisque les leucocytes et *B. bacteriovorus* participent ensemble à l'élimination de *Shigella* (Willis *et al.*, 2016. *Injections of predatory bacteria work alongside host immune cells to treat Shigella infection in zebrafish larvae*. *Current Biology*, 26 (24), 3343–3351).

Exemple III : La parodontite est une maladie infectieuse polymicrobienne (Van Essche *et al.*, 2011. *Killing of anaerobic pathogens by*

Document complémentaire

predatory bacteria. *Molecular Oral Microbiology*, 26 (1), 52–61) qui provoque l'inflammation des tissus de soutien de la dent (parodonte). L'infection est due à de nombreux pathogènes Gram négatifs tels que *Porphyromonas gingivalis*, *Aggre-gatibacter actinomycetemcomitans*, *Prevo-tella intermedia*, *Tannerella forsythia*, *Fusobacterium nucleatum*, *Capnocytophaga sputigena*, *Eikenella corrodens* et *Actinomyces naeslundii* (Harini *et al.*, 2013. *Bdellovibrio bacteriovorus: a future antimicrobial agent?* *Journal of Indian Society of Periodontology*, 17 (6), 823.; Van Essche *et al.*, 2011. *Killing of anaerobic pathogens by predatory bacteria. Molecular Oral Microbiology* 26 (1), 52–61) qui sont enchâssés dans un biofilm complexe constitutif de la plaque dentaire.

Les traitements de la parodontite qui consiste à éradiquer le biofilm par des thérapies classiques comme l'utilisation d'antibiotiques se révèlent de plus en plus compliqués et sont souvent inefficaces, voire déconseillés (Van Essche *et al.*, 2011). En effet, les bactéries développent le plus souvent des résistances aux antibiotiques et les agents antimicrobiens ont du mal à pénétrer le biofilm dentaire.

En effet, les bactéries en biofilm sont 1000 fois plus résistantes aux agents antimicrobiens que ceux sous formes libres ou planctoniques (Van Essche *et al.*, 2011). Néanmoins, l'application locale de BALOs permet de réduire spécifiquement le taux de pathogènes à Gram négatif dans la cavité buccale. Les BALOs sont capables de pénétrer profondément dans le biofilm et ainsi de le détruire. De ce fait, il est suggéré de compléter les bains de bouche classiques par un cocktail de BALOs.

Toutefois il existe quelques inconvénients à leurs utilisations. D'abord, ils n'éliminent pas entièrement les proies même quand la concentration des prédateurs est augmentée, probablement à cause de l'apparition de résistance phénotypique transitoire ou parce que le spectre de prédation de la souche de

BALO employée ne permet pas d'éradiquer l'ensemble des pathogènes.

De plus, leur activité est affectée par l'état physiologique de leurs proies et par la présence d'autres bactéries qui peuvent contrecarrer leurs activités par encombrement stérique (Van Essche *et al.*, 2011). Enfin les BALOs sont des bactéries aérobies strictes si bien que leur action est limitée en cas d'absence d'oxygène.

Exemple IV : L'aquaculture en eau douce de crevettes à pattes blanches (*Penaeus vannamei*) en Chine produit annuellement 300 000 tonnes d'animaux à destination alimentaire. Les pathogènes *Vibrio harparahaemolyticus* et *V. cholerae* provoquent des épidémies généralisées et sont responsables d'une perte atteignant les 90%. L'infection de *Vibrio* n'est pas toujours contrôlable par des antibiotiques, et les antibiotiques ont un coût prohibitif et sont néfastes pour l'environnement ainsi que pour la santé humaine. Or il a été démontré que *B. bacteriovorus* H16 parvient à éradiquer 10 souches différentes de *Vibrio*. En effet, des expériences ont montré une diminution de 99,9 % de l'abondance de *V. cholerae* par rapport aux conditions contrôles. Le prédateur a indéniablement un effet protecteur pour la crevette contre les infections à *Vibrio* et le pourcentage de survie *in vivo* des crevettes augmente de 47,7 % à 63,3 % (Cao *et al.*, 2015. *Vibrio cholerae pathogen from the fresh water cultured whiteleg shrimp Penaeus vannamei and control with Bdellovibrio bacteriovorus. Journal of Invertebrate Pathology* 130, 13–20). Il a été aussi indéniablement établi par Ottaviani *et al.* (2018. *Halobacteriovorax isolated from marine water of the Adriatic sea, Italy, as an effective predator of Vibrio parahaemolyticus, non-O1/O139 V. cholerae, V. vulnificus. Journal of Applied Microbiology* 125, 1199- 1207) et Richards *et al.* (2012. *Predatory bacteria as natural modulators of Vibrio parahaemolyticus and Vibrio vulnificus in seawater and oysters.*

Document complémentaire

Applied and Environmental Microbiology 78 (20), 7455–7466) que les BALOs marins tel que *Halobacteriovorax* HBXCO1 sont des modulateurs écologiques des populations de *Vibrio* sp. notamment *V. parahaemolyticus*, *V. cholerae*, et *V. vulnificus* chez les bivalves. En effet, certaines souches de *Vibrio* s'accumulent naturellement dans les huitres (*Mytilus galloprovincialis* et *Crassostrea virginica*), moules et autres palourdes provoquant des maladies chez l'homme quand la cuisson des fruits de mer est insuffisante.

Les éleveurs n'arrivant pas toujours à décontaminer les bivalves d'une façon efficace, les BALOs ont été considérés comme une bonne solution de contrôle biologique de par une activité de prédation spécifique et rapide (< 24 h) même quand une faible concentration de prédateurs est apportée (< 10⁸ CFU). Aujourd'hui, pour que les BALOs marins puissent être utilisés dans ce but, il reste à les isoler et trouver le moyen de les commercialiser.

Exemple V: *B. bacteriovorus* SSB et SKB peuvent être employés comme amplificateurs naturels en agriculture. Les deux souches n'agissent pas sur *Rhizobium leguminosarum* qui vit en symbiose avec les racines des plants de légumineuses et favorise la croissance des plants par fixation d'azote atmosphérique, mais leur action est utile pour éliminer les compétiteurs de *R. leguminosarum* (Oyedara *et al.*, 2016. *Isolation of Bdellovibrio sp. from soil samples in Mexico and their potential applications in control of pathogens*. Microbiology Open 5 (6), 992–1002).

Exemple VI : Les boues activées biologiques sont principalement constituées de microorganismes et de fibres organiques associées à des particules inorganiques (sel et sable). Le procédé le plus largement utilisé

pour le traitement biologique des boues activées génère de grandes quantités de boues résiduelles avec une humidité de plus de 95 %.

L'incinération, le compostage, l'épandage et l'enfouissement sont les approches les plus couramment utilisées pour la gestion de ces boues. En tenant compte de l'espace de stockage, de l'apport d'énergie, des coûts pour le transport et la manipulation des boues, un processus efficace de déshydratation et de réduction de volume de boues est nécessaire pour les stations d'épuration municipales. Globalement, pour améliorer la déshydratation des boues, les technologies de prétraitement comme l'ultrasonication, l'irradiation aux micro-ondes et l'électrolyse sont généralement appliquées.

Des réactifs chimiques de conditionnement sont généralement ajoutés pour perturber la structure des floccs et pour lyser les cellules afin de libérer l'eau interne. Cependant, ces réactifs diminueraient les performances de décantation des boues et provoqueraient des pollutions secondaires.

Une alternative à ces procédés est l'utilisation des BALOs. En effet, en raison de la grande densité de microorganismes dans les boues et de l'abondance des matières organiques, les BALOs y sont naturellement présents. Ainsi un apport supplémentaire de BALOs permet de perturber la composition des biofilms et par extension la structure des boues, favorisant considérablement leur déshydratation.

Le processus de biolyse stimulé par les BALOs présente des avantages opérationnels, économiques, écologiques et hygiéniques (Yu *et al.*, 2017. *Isolation and application of predatory Bdellovibrio-and like organisms for municipal waste sludge biolysis and dewaterability enhancement*. Frontiers of Environmental Science and Engineering 11 (1), 1–11).