Les microorganismes : des outils biologiques pour les conversions d'énergie et de matière

Autor(en): **Aragno, Michel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **77 (1984-1985)**

Heft 368

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-278517

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles
N° 368 1985 Vol. 77, Fasc. 4 et dernier

Les microorganismes: des outils biologiques pour les conversions d'énergie et de matière

PAR

MICHEL ARAGNO[1]

Texte d'une conférence donnée à la Société Vaudoise des Sciences Naturelles le 11 décembre 1984.

Summary. – Microorganisms: biological tools for energy and matter conversions.
Because of their high metabolic activity and growth rate, as well as the variety of their metabolic capabilities, microorganisms are ideal tools for energy and matter bioconversions. The external energy source for microbial growth is either light, in phototrophic organisms, or a chemical substrate, in chemotrophic organisms. Methane production from waste matter is discussed as an example of a chemotrophic, anaerobic conversion of organic matter to an energy source (biogas). The hydrogen-oxidizing bacteria are an example of aerobic organisms utilizing an external energy source (e.g. electricity or knallgas mixture) to synthesize biomass or organic chemicals. Biotechnological utilization of aerobic organisms for production of biomass or chemicals is evoked.

Au sens large, la notion de microorganisme englobe des êtres vivants si petits que seule l'aide d'un microscope permet d'en apprécier les dimensions et les formes. De tels organismes peuvent appartenir à des groupes très différents, sans aucune parenté. Ce sont principalement:
- les bactéries, y compris les actinomycètes et les «algues» bleues
- les champignons microscopiques, y compris les levures
- les algues microscopiques
- les protozoaires, ou animaux unicellulaires

Les très faibles dimensions des microorganismes (une cellule bactérienne se mesure à l'échelle du micron) sont la cause, directe ou indirecte, de nombreux phénomènes propres au monde microbien. Les échanges d'un

[1] Laboratoire de Microbiologie de l'Université, Chantemerle 22, 2000 Neuchâtel 7.

organisme avec le milieu extérieur (nutrition, respiration, excrétion) se font au travers de surfaces. Le rapport entre ces surfaces et le volume de l'organisme (S/V) varie considérablement en fonction de sa dimension. Chez l'homme, il est dans l'ordre de grandeur de 100 m^{-1} environ; il atteint 10 000 000 m^{-1} chez une bactérie moyenne. Chez cette dernière, l'intensité des échanges est par conséquent beaucoup plus élevée. Cela se traduit dans son potentiel de croissance. Une cellule d'*Escherichia coli* pèse environ 10^{-12} g. En culture dans un milieu approprié, elle subit une division toutes les vingt minutes; chaque fois, la masse des cellules double à peu près, aussi longtemps que le milieu permet leur développement. Si l'on pouvait maintenir longtemps des conditions favorables à la croissance, on obtiendrait, à partir d'une seule cellule, une masse de bactéries égale à celle de notre planète en un peu plus de 44 heures! En réalité, du fait de l'épuisement du milieu et de l'accumulation de facteurs inhibiteurs, on ne dépasse pas 10^{10} à 10^{11} cellules par ml en cultures liquides, soit près de 20 g de matière sèche cellulaire par litre. A titre de comparaison, il faut une année environ pour doubler la masse d'un troupeau de bovidés.

Les bactéries, ou procaryotes, sont toujours de très petits organismes dont la diversité morphologique est faible. Des sphères, ou coques, associées parfois selon un, deux ou les troix axes de l'espace, des bâtonnets plus ou moins allongés, des cellules spiralées, des formes irrégulières ou filamenteuses en composent à peu près tout l'éventail morphologique. Pourtant, elles témoignent d'une évolution qui a duré entre 3 et 4 milliards d'années. Cette longue progression s'est surtout manifestée sur le plan fonctionnel: le métabolisme énergétique, en particulier, présente des modalités d'une diversité considérable. Tous les types connus de voies cataboliques et de conversion biologique d'énergie se rencontrent chez les bactéries, et un bon nombre d'entre eux n'existent que chez des bactéries.

Par l'intensité de leur métabolisme, la vitesse de leur croissance et la variété de leurs capacités métaboliques, les microorganismes, particulièrement les bactéries, semblent être les instruments idéaux de nombre de conversions biologiques d'énergie et de matière.

Energie et microorganismes

Le rôle premier du métabolisme énergétique est de procurer à l'organisme de l'énergie pour la synthèse de ses propres structures et pour le maintien de ses fonctions essentielles. Il s'agit alors de convertir une source externe d'énergie en une forme utilisable par la cellule: liaisons chimiques dont l'hydrolyse libère une quantité considérable d'énergie, et gradients électroniques et protoniques entre compartiments délimités par des membranes.

La source externe d'énergie est:

– soit l'énergie *lumineuse*, chez les organismes *phototrophes* (littéralement «qui se nourrissent de lumière»). Il s'agit des bactéries photosynthétiques vertes et pourpres, des cyanobactéries, des algues et de presque tous les végétaux, bien sûr. Les agriculteurs sont encore (et seront peut-être toujours) les principaux et les plus efficaces biotechnologues.

– soit de l'énergie *chimique* potentielle, sous forme de molécules inorganiques ou organiques dont la transformation fournit à la cellule l'énergie dont elle a besoin. On parle alors d'organismes *chimiotrophes.* C'est plus particulièrement de ces derniers qu'il sera question ici.

On peut envisager deux cas bien différents, suivant que les organismes se développent en absence d'oxygène (en *anaérobiose*), ou en présence d'oxygène (en *aérobiose*).

En anaérobiose:

La conversion anaérobie de substances organiques fournit peu d'énergie aux cellules par rapport à la quantité de matière utilisée. Souvent, à l'oxydation d'une partie de la matière consommée correspond la réduction d'une autre partie. On a alors une *dismutation* du substrat organique; la fermentation alcoolique en est un bon exemple:

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$$

Les gaz produits, le CO_2 par exemple, sont en grande partie éliminés dans la phase gazeuse du système, tandis que les autres substances (ici l'alcool) s'accumulent dans le milieu.

Par rapport à la matière consommée, la biomasse formée est relativement petite (peu d'énergie à la disposition des cellules) tandis que la production de métabolites réduits est importante (fig. 1A). Ces métabolites peuvent être utilisées comme carburants ou comme produits de base de l'industrie chimique ou alimentaire.

En aérobiose:

En présence d'oxygène, la situation est toute différente (fig. 1B). En règle générale, les molécules organiques sont complètement oxydées en CO_2 et H_2O, et la quantité d'énergie mise à disposition de la cellule est beaucoup plus élevée qu'en conditions anaérobies. Une partie de cette énergie se dissipe d'ailleurs sous forme de chaleur, tandis que la formation de biomasse est beaucoup plus importante.

Certaines bactéries aérobies sont à même d'utiliser l'énergie provenant de l'oxydation de substances inorganiques réduites (hydrogène, sels d'ammonium et nitrites, dérivés réduits du soufre et fer bivalent); elles accomplis-

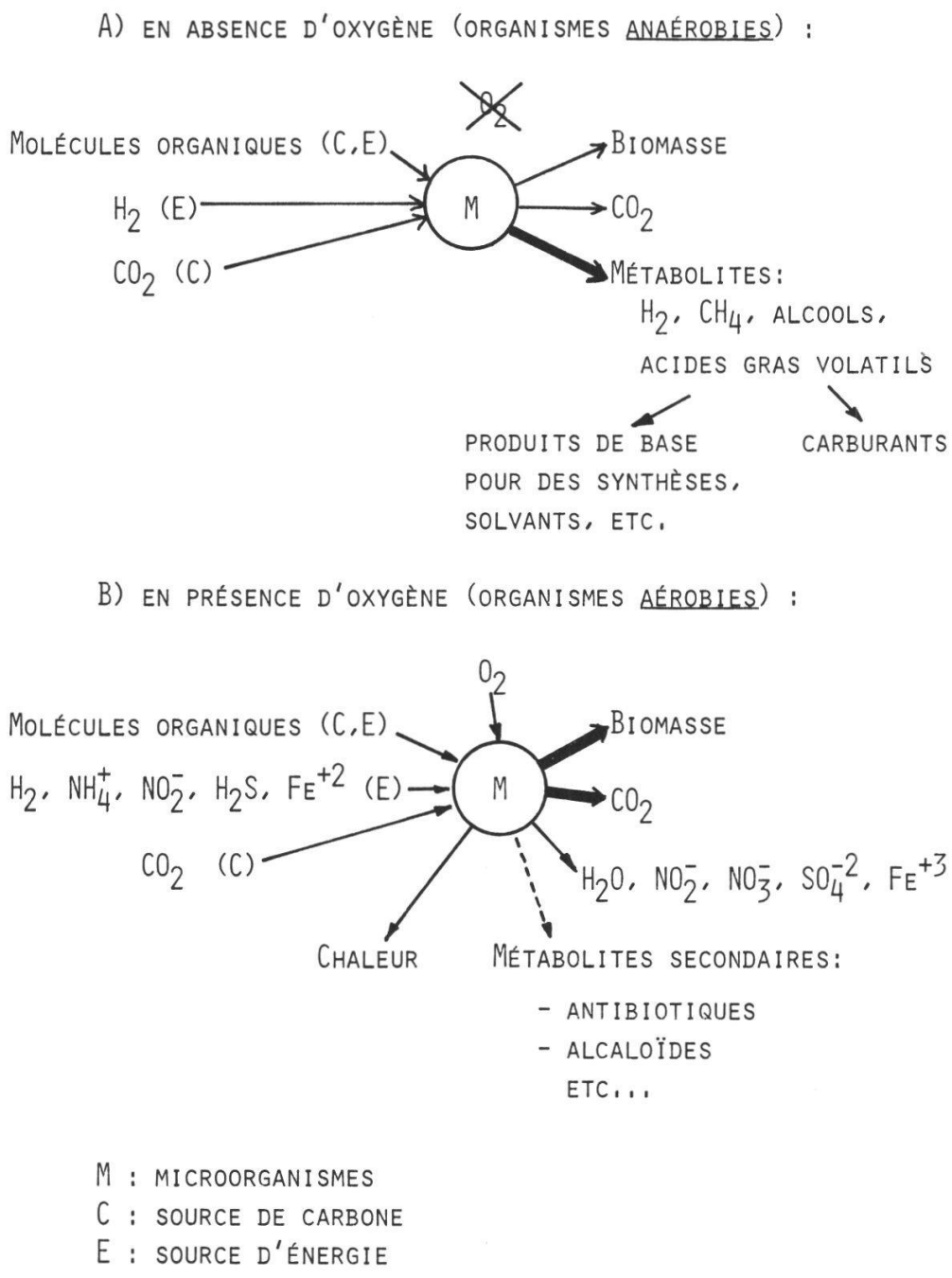


Figure 1. – Transformations d'énergie et de matière réalisées par des microorganismes.

sent simultanément la transformation du gaz carbonique en matière organique, selon un cycle de réactions semblable à celui utilisé par les plantes: le cycle du ribulose biphosphate, ou cycle de Calvin; chez ces dernières toutefois, l'énergie provient de la lumière (photosynthèse). Les produits de l'activité de ces organismes sont, outre leur biomasse (ce sont des producteurs primaires), les dérivés oxydés des substances réduites leur servant de source d'énergie: eau, nitrite, nitrate, sulfate, ou fer trivalent.

J'illustrerai ici l'utilisation des microorganismes aux fins de transformations énergie–matière par deux exemples choisis parmi les recherches

poursuivies au Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel:

– la *digestion méthanique*, qui fait intervenir une association complexe de microorganismes travaillant de manière coordonnée, en conditions anaérobies, et qui effectue une conversion de matière (déchets) en une source d'énergie (gaz combustible);

– les *hydrogénobactéries*, qui réalisent en culture pure, en conditions aérobies, une conversion d'énergie (électricité, gaz tonnant) en matière (biomasse, métabolites primaires ou secondaires).

La digestion méthanique

Lorsque de la matière organique d'origine végétale ou animale se trouve confinée dans un milieu dépourvu d'oxygène, elle subit une série de transformations qui entraînent globalement une dismutation du squelette carboné, engendrant à la fois le dérivé carboné le plus oxydé (le gaz carbonique) et le plus réduit (le méthane). Une telle transformation s'opère dans la nature, au niveau de sédiments, de sols hydromorphes, de bois ou de cadavres en décomposition, et même dans le tube digestif des animaux, tout particulièrement des ruminants. Les sols des rizières et les renvois des ruminants sont d'ailleurs les deux principales sources du méthane atmosphérique.

L'idée d'exploiter ce processus pour le traitement de divers types de déchets n'est pas nouvelle et des digesteurs, principalement dans des exploitations agricoles, ont déjà fonctionné avant la Seconde Guerre mondiale, en France, aux Indes et en Chine surtout.

Aucun organisme n'est capable à lui seul de réaliser la transformation des biopolymères (polysaccharides, protéines ou lipides) en méthane et en gaz carbonique. C'est une succession, voire (si on l'analyse en détail) un réseau de processus biologiques gouvernés par des microorganismes spécialisés qui intervient. On peut subdiviser ces processus en quatre groupes de fonctions (fig. 2):

1. *Hydrolyse enzymatique*. Les biopolymères ne peuvent pas être directement absorbés par les bactéries. Ils doivent être convertis tout d'abord en mono- ou en dimères. Cette transformation, une hydrolyse, est effectuée par des enzymes localisés à la surface des bactéries ou émis par celles-ci dans le milieu (exoenzymes). Les polysaccharides sont ainsi convertis en mono- ou disaccharides, les protéines en acides aminés, et les lipides en acides gras et en glycérine.

2. *Fermentation.* Les produits de l'hydrolyse enzymatique sont alors soumis à un ensemble de transformations, les fermentations, menant à la formation d'acides carboxyliques, d'alcools et d'autres substances neutres, ainsi que d'une certaine quantité de CO_2 et d'H_2. En présence d'une concentration élevée d'hydrogène moléculaire, la formation de composés réduits (l'éthanol

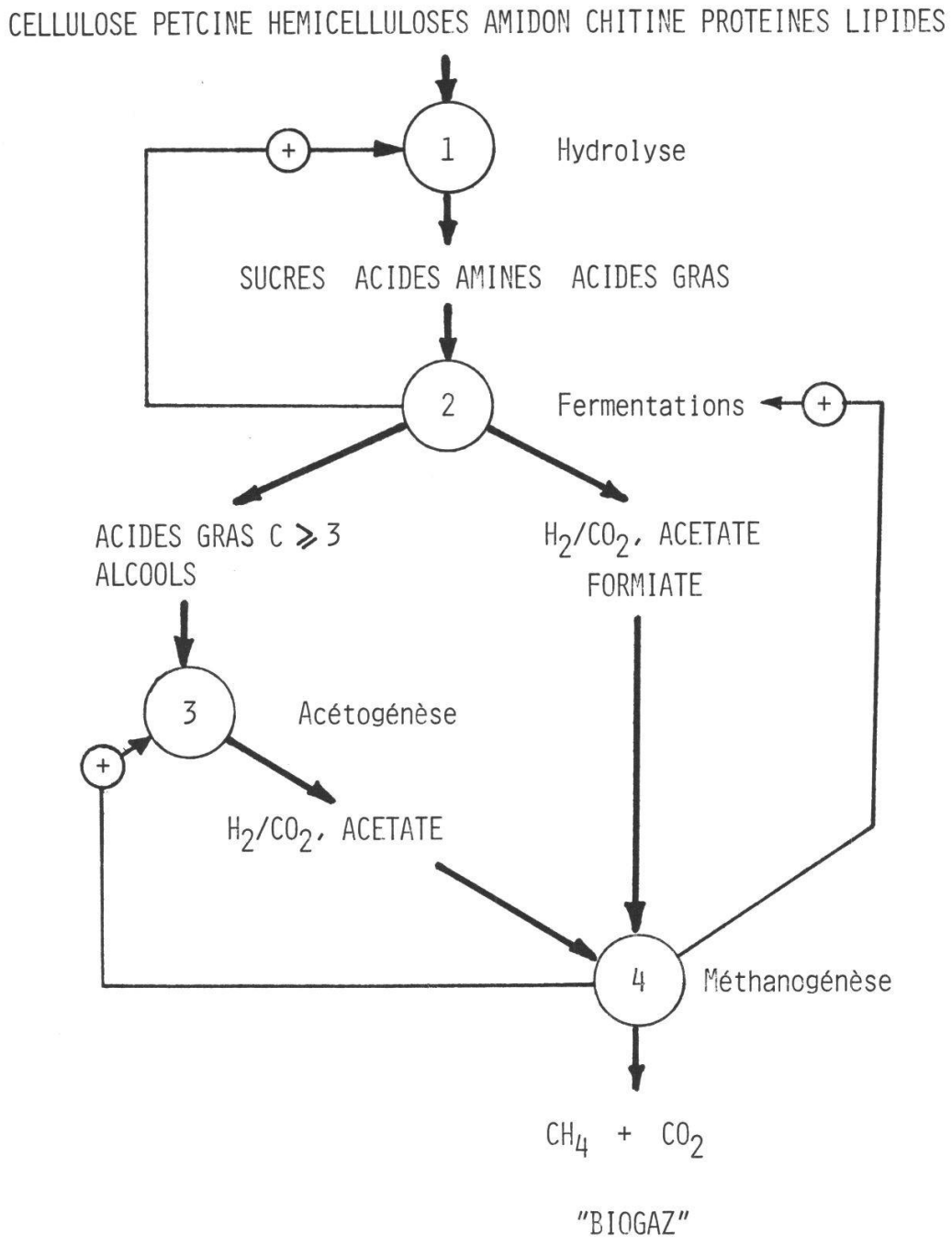


Figure 2. – Schéma global de la syntrophie méthanogène.

et les acides organiques à plus de deux atomes de carbone par exemple) est favorisée; en revanche, si la pression partielle de l'hydrogène est très faible, la formation d'acide acétique et d'H_2 est stimulée.

3. *Acétogenèse.* La conversion des acides organiques à plus de deux atomes de carbone en acide acétique et en hydrogène est peut-être un des pas les plus critiques de la digestion méthanique. Cette transformation est réalisée par des bactéries réductrices de protons, capables de libérer leur excès de pouvoir réducteur sous forme d'hydrogène moléculaire. Globalement, une telle réaction n'est possible que lorsque la pression partielle d'hydrogène est

très faible. Par exemple, la transformation d'acide propionique en acide acétique, bicarbonate et CO_2 requiert une pression partielle d'hydrogène inférieure à 10^{-5} atm. Les organismes qui effectuent ces transformations sont soit des réducteurs obligatoires de protons (on ne peut alors les cultiver qu'en association avec des organismes consommateurs d'hydrogène), soit des sulfatoréducteurs facultatifs, qui peuvent réduire les protons en absence de sulfate. On peut aussi mentionner ici des organismes tels que *Clostridium aceticum*, qui réalisent la transformation du gaz carbonique et de l'hydrogène moléculaire en acide acétique:

$$4\,H_2 + 2\,CO_2 \longrightarrow CH_3\,COOH + H_2O$$

4. *Méthanogenèse.* Le dernier pas est la production de méthane par les bactéries méthanogènes. Il y a en fait plusieurs types de méthanogenèse. Les deux principaux sont:

– la méthanogenèse autotrophe, qui est la réduction du gaz carbonique par l'hydrogène:

$$4\,H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2\,H_2O$$

– la méthanogenèse acétoclaste, qui scinde la molécule d'acide acétique en gaz carbonique et en méthane:

$$CH_3\,COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

Les deux réactions fournissent de l'énergie au métabolisme de la bactérie.

Dans la digestion méthanique d'un substrat organique complexe, 25 à 30% du flux de carbone passe par la méthanogenèse autotrophe, le reste en grande partie par la méthanogenèse acétoclaste.

Ce modèle simplifié permet d'entrevoir les interactions étroites qui coordonnent l'activité des différents groupes d'organismes: d'une part une chaîne trophique descendante, et d'autre part une régulation ascendante par les transferts d'hydrogène. En fait, cette coordination explique que, malgré sa complexité, une telle association s'établisse spontanément et que son maintien n'implique qu'un minimum de contrôles (absence d'oxygène, température, agitation pour maintenir l'homogénéité du milieu).

Toutes les molécules organiques ne peuvent être dégradées lors de la digestion méthanique. La lignine en particulier est presque totalement résistante, ainsi que les complexes lignicellulosiques dont les végétaux sont riches. Aussi, seule une partie de la matière organique sera décomposée, la proportion étant variable suivant le substrat. En revanche, la lignine est le plus important précurseur des matières humiques des sols. Sa conservation par le processus de digestion assure donc au résidu une bonne valeur comme amendement agronomique.

Du fait de sa simplicité de contrôle, la méthanogenèse s'applique fort bien à la transformation de déchets complexes. Au contraire de la plupart

des processus biotechnologiques, il n'est pas nécessaire ici de stériliser le milieu, tandis que les régulations et les interventions en cours d'opération sont réduites à un strict minimum. En plus du biogaz traditionnel que l'on obtient à partir des déchets agricoles, on peut appliquer la digestion méthanique à quantité d'autres déchets. Elle est déjà souvent utilisée pour le traitement des boues d'épuration. Notre laboratoire est associé actuellement à une recherche sur le traitement des déchets urbains, qui fournit, outre le gaz, un résidu donnant après stabilisation un amendement d'excellente qualité pour les sols. Des déchets industriels (bagasses de cacao, vinasses de distillation, mélasses des sucreries, par exemple) pourraient être traités de la sorte. On a même pensé à utiliser la biomasse des algues marines qui s'échouent en quantité croissante sur les plages océaniques.

Quant à la faisabilité économique du procédé, celui-ci ne s'applique de façon rentable qu'au traitement de déchets qui de toute façon doivent être éliminés. Ainsi, pour les ordures ménagères, le traitement anaérobie permet d'éviter en totalité ou en partie le recours à l'incinération, ce qui résout simultanément le problème de la pollution de l'air par les fumées. En combinant des boues d'épuration aux déchets solides (c'est souvent une nécessité pour le maintien d'une activité biologique optimale, car la teneur en azote des déchets est trop basse), on évite leur traitement séparé souvent coûteux. En outre, le compost boues-ordures est de meilleure qualité que le compost des boues seules (moins de phosphates, moins de métaux lourds); en plus, on récupère une source d'énergie accumulable et plus maniable que la chaleur développée par l'incinération. En tenant compte de l'ensemble de ces considérations, la digestion méthanique est rentable. Il est par contre utopique et vain de chercher à produire de la biomasse dans le seul but de la digérer ensuite.

Les hydrogénobactéries

Parmi les vecteurs d'énergie, l'hydrogène moléculaire occupe une place à part. On peut en produire par électrolyse de l'eau. On peut également l'obtenir biologiquement, soit par l'intermédiaire d'organismes photosynthétiques, soit comme sous-produit de certaines fermentations. Au contraire des hydrocarbures, son oxydation n'engendre pas de gaz carbonique, mais seulement de l'eau. Son utilisation n'entraîne donc pas une augmentation de la concentration du CO_2 atmosphérique.

Les Hydrogénobactéries, organismes chimio-autotrophes, sont à même de mettre à profit l'énergie libérée par l'oxydation de l'hydrogène (mélange $H_2 + O_2$, gaz tonnant). Cette énergie leur permet d'utiliser le gaz carbonique comme seule source de leur carbone cellulaire (fig. 3). Elles se cultivent facilement et donnent des rendements de croissance élevés. Certaines d'entre elles fournissent près de 20 g de matière sèche cellulaire par litre de

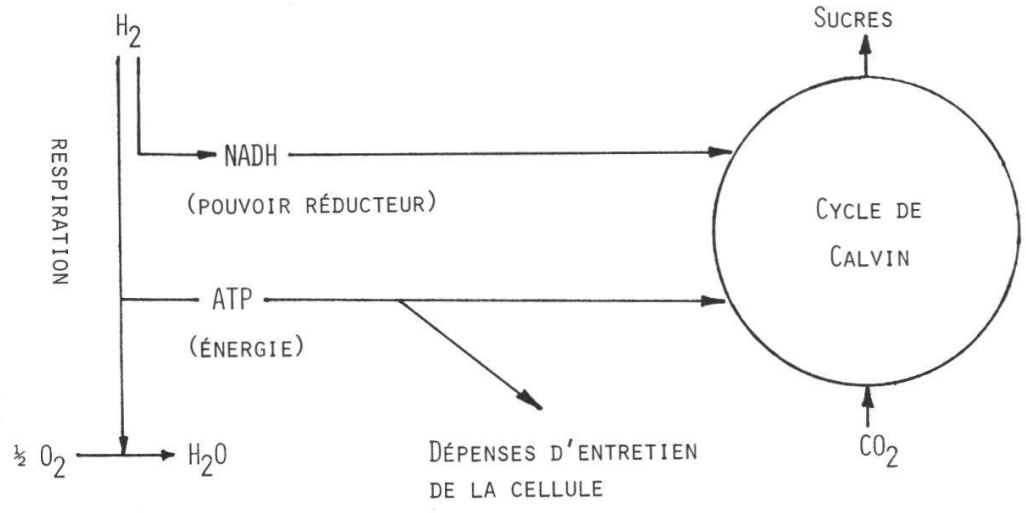


Figure 3. – Schéma de principe (très simplifié) du métabolisme chimiolithoautotrophe des hydrogénobactéries.

culture. Pour cela, il suffit de les repiquer dans une solution de sels minéraux, dans laquelle on fait barboter un mélange d'hydrogène, d'oxygène et de gaz carbonique. Les deux premiers gaz peuvent également être produits dans la culture même, par électrolyse de l'eau (fig. 4). On a alors réalisé un couplage presque direct entre la dépense d'énergie électrique et la production de biomasse. Le rendement énergétique est beaucoup plus élevé que celui qu'on obtient, par exemple, en éclairant des cultures végétales au moyen de rampes fluorescentes.

Comme de nombreuses autres bactéries aérobies, les Hydrogénobactéries peuvent être utilisées à des fins biotechnologiques. Nous évoquerons ici un certain nombre des applications possibles, non seulement des Hydrogénobactéries, mais aussi des bactéries aérobies en général.

On peut tout d'abord faire appel à leur biomasse, c'est-à-dire à la totalité de la masse des cellules. On peut exploiter cette biomasse de différentes manières:

Pour la production de nutriments. La synthèse de protéines alimentaires à partir de biomasse microbienne (*single cell proteins,* SCP) n'a rencontré jusqu'ici que des applications limitées. Il y a plusieurs obstacles importants à l'utilisation de microorganismes pour l'alimentation animale ou humaine:

– obstacles psychologiques: on répugne à «manger du microbe».

– obstacles toxicologiques: prise dans sa totalité, la biomasse bactérienne est peu comestible. Elle est en particulier trop riche en acides nucléiques, qui peuvent provoquer des troubles de la fonction rénale. D'autres substances sont inutilisables. Certains toxiques inattendus peuvent se trouver dans les cellules bactériennes. Des essais d'alimentation effectués sur des volontaires ont montré une fréquence élevée d'allergies ou d'intolérances. Certains de ces inconvénients sont évités si on utilise des protéines extraites plutôt que la biomasse totale.

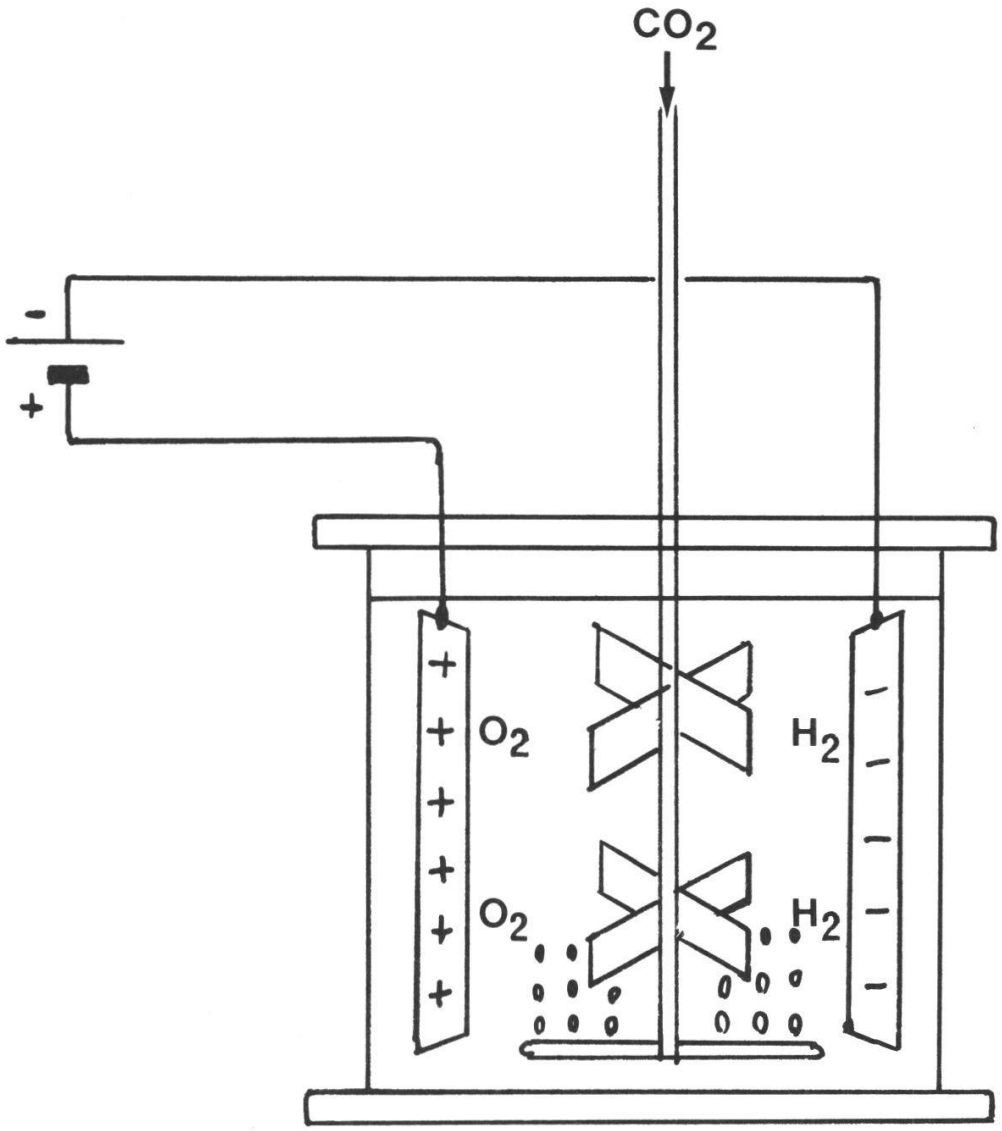


Figure 4. – Schéma d'un fermenteur équipé pour la culture autotrophe d'hydrogénobactéries, l'énergie étant fournie par une source de courant électrique à faible tension. Le milieu de culture est une solution de sels minéraux tamponnée.

– obstacles nutritionnels: la biomasse a-t-elle une bonne valeur nutritive, apporte-t-elle tous les nutriments indispensables, et dans des proportions adéquates?

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est difficile d'estimer l'importance que pourra prendre, à l'avenir, la production de protéines alimentaires microbiennes.

De la biomasse, on peut aussi extraire des enzymes pour le génie biochimique, de même que des substances variées. On peut également se servir des cellules entières comme catalyseurs de certaines réactions biochimiques. Dans ce cas, on aura souvent avantage à les immobiliser sur un support inerte.

Les cellules des bactéries aérobies peuvent être utilisées pour synthétiser certaines substances dans le milieu. Parmi les productions «normales»,

mentionnons les exopolysaccharides, que les cellules de nombreuses espèces sécrètent sous forme de mucilages. Certaines de ces substances macromoléculaires pourraient trouver des applications, dans l'industrie alimentaire par exemple.

En revanche, la production de métabolites primaires (comme l'acide citrique) et secondaires (antibiotiques, alcaloïdes) est normalement faible. Seules des bactéries hétérotrophes aérobies spécialisées, les bactéries acétiques, engendrent des quantités élevées de métabolites, en particulier des acides organiques. Elles réalisent des oxydations incomplètes de nombreuses molécules carbonées. Les bactéries responsables de la transformation du vin en vinaigre en sont un bon exemple.

Chez les autres, parmi lesquelles les Hydrogénobactéries, il est possible d'augmenter, voire de provoquer, l'excrétion de métabolites dans le milieu. Il y a plusieurs moyens d'y parvenir:

– Par des méthodes culturales. En modifiant les conditions de culture, et bien souvent en les rendant quelque peu défavorables (par exemple en limitant l'aération ou en abaissant le pH), on peut obliger les cellules à sécréter certaines substances.

– Par des mutations. En détruisant certains systèmes de régulation des activités normales de la cellule ou en «endommageant» certaines voies métaboliques, on engendre des «monstres» qui produiront une certaine substance en quantités bien supérieures à la normale.

– Par des manipulations génétiques. Il s'agit alors de faire exécuter par des «microbes» faciles à cultiver des fonctions normalement réalisées par des organismes qu'il serait difficile, voire impossible, d'exploiter technologiquement. On en prélève alors des gènes, fragments d'ADN porteurs de l'information nécessaire à l'accomplissement de telle ou telle fonction; on les introduit dans le génome d'un microorganisme, en veillant à ce qu'ils ne soient pas seulement intégrés, mais aussi actifs, *exprimés* dans leur nouvel «hôte».

* * *

Le présent exposé ne fait qu'effleurer un sujet vaste, dont chaque chapitre pourrait faire l'objet d'une revue détaillée. Au travers de quelques exemples, nous avons tenté d'évoquer la domestication de la vie microbienne par l'homme du XX^{e} siècle. Cette conquête devrait lui permettre de franchir une nouvelle étape importante de son évolution, à la condition bien sûr qu'il sache mettre à profit pour son bien, plutôt que pour son autodestruction, les immenses potentialités des microorganismes. Nos ancêtres néolithiques avaient réussi à domestiquer la vie végétale et animale. Ils ont eu la sagesse de cultiver des céréales plutôt que de la belladone, d'élever des ruminants plutôt que des vipères. Puissions-nous les imiter!

Manuscrit reçu le 11 décembre 1984.