

Il est urgent de former nos sociétés à la microbiologie

Kenneth Timmis^{1*}, Ricardo Cavicchioli², José Luis Garcia³, Balbina Nogales⁴, Max Chavarría⁵, Lisa Stein⁶, Terry J. McGenity⁷, Nicole Webster⁸, Brajesh Singh⁹, Jo Handelsman¹⁰, Victor de Lorenzo¹¹, Carla Pruzzo¹², James Timmis¹³, Juan Luis Ramos Martín¹⁴, Willy Verstraete¹⁵, Mike Jetten¹⁶, Antoine Danchin¹⁷, Wei Huang¹⁸, Jack Gilbert¹⁹, Rup Lal²⁰, Helena Santos²¹, Sang Yup Lee²², Angela Sessitsch²³, Paola Bonfante²⁴, Lone Gram²⁵, Raymond T. P. Lin²⁶, Eliora Ron²⁷, Ceren Karahan²⁸, Jan Roelof van der Meer²⁹, Seza Artunkal³⁰, Dieter Jahn¹, Lucy Harper³¹

*Correspondance : kntimmis@gmail.com,

¹ Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Allemagne,

² School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, Australie,

³ Department of Environmental Biology, Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) (CSIC), Madrid, Espagne,

⁴ Area Microbiologia, Dept. Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Espagne,

⁵ Escuela de Química & Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica,

⁶ Dept. of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada,

⁷ School of Biological Sciences, University of Essex, Colchester, GB,

⁸ Australian Institute of Marine Science, Townsville and Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australie,

⁹ Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Australie,

¹⁰ Wisconsin Institute for Discovery, University of Wisconsin-Madison, USA,

¹¹ Systems Biology Program, Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, Madrid, Espagne,

¹² Dipartimento di Scienze della Terra, dell' Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova, Italie,

¹³ Athena Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, Pays-Bas,

¹⁴ Estación Experimental del Zaidín-CSIC, Granada, Espagne

¹⁵ Center for Microbial Ecology and Technology (CMET), Ghent University, Belgique,

¹⁶ Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen, Pays-Bas,

¹⁷ Institut Cochin INSERM U1016 – CNRS UMR8104 – Université Paris Descartes, Paris, France,

¹⁸ Department of Engineering Science, University of Oxford, GB,

¹⁹ Department of Pediatrics, University of California at San Diego, USA,

²⁰ Department of Zoology, Molecular Biology Laboratory, University of Delhi, Inde,

²¹ Instituto de Tecnologia Química e Biológica. Universidade Nova de Lisboa, Oeiras, Portugal,

- ²² Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, République de Corée,
- ²³ Bioresources Unit, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln, Autriche,
- ²⁴ Department of Life Science and Systems Biology, University of Torino. Italie,
- ²⁵ Department of Systems Biology, Technical University of Denmark, Lyngby, Danemark,
- ²⁶ Department of Microbiology and Immunology, National University of Singapore,
- ²⁷ School of Molecular Cell Biology & Biotechnology, Tel Aviv University, Israel,
- ²⁸ Department of Medical Microbiology, Ankara University, Turquie,
- ²⁹ Institut de Microbiologie Fondamentale, University of Lausanne, Suisse,
- ³⁰ Department of Clinical Microbiology, Haydarpasıa Numune Training Hospital, Istanbul, Turquie,
- ³¹ Society for Applied Microbiology, London, GB.

Traduction : Antoine Danchin¹, revue par Agnieszka Sekowska²

¹ Institut Cochin INSERM U1016, CNRS UMR8104, Université Paris Descartes, Paris, France.

² Institut de Cardiométabolisme et Nutrition, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France.

Résumé

Les retombées de l'activité et de l'existence-même des microbes se font sentir partout. Généralement positives du fait de leur action sur le fonctionnement, et donc la santé et le bien-être, que ce soit des êtres humains, de l'ensemble du monde biologique, ou de toute la surface et de l'atmosphère de la planète, elles sont considérables. Pris dans leur ensemble, et pour une grande part via leur interaction avec le soleil, les microbes forment le cœur du système qui assure la survie de la biosphère. Il est donc crucial de les prendre en compte dans nos choix, pour la vie quotidienne de chacun d'entre nous et de nos familles. Cette prise de conscience concerne aussi, à tous les niveaux et à toutes les stades, les personnes et les organismes en charge de la santé des collectivités, des nations et du monde, mais encore de la formulation et de la planification des actions politiques. Pourtant, alors que la plupart des thèmes dont l'impact sur l'humanité est universel, que ce soit la finance, la santé ou les transports sont généralement bien compris, la prise en compte des microbes et des activités microbiennes pertinentes —en bref, *la connaissance de la microbiologie*— avec son impact sur nos vies et son exploitation au profit de l'humanité, est absente de la population en général, spécialement chez les décideurs. Les choix qui conduiraient à utiliser l'activité des microbes sont souvent opaques et les informations disponibles sont généralement incomplètes et parfois biaisées. Il s'ensuit qu'ils sont employés de façon éphémère, quand ils

le sont. Il n'est pas rare que même les « meilleures » décisions, fondées sur des démonstrations indiscutables, conduisent à des résultats inattendus, accidentels et parfois même indésirables. Nous appelons donc la société, avec toute la force possible, à mettre en place un plan d'action conduisant à *l'initiation de tous à la microbiologie*. C'est indispensable pour que soient élaborés les choix stratégiques des gouvernements et des entreprises adaptés aux situations nouvelles auxquelles le monde a à faire face. Cette connaissance minimale permettra à toutes les parties prenantes de contribuer de façon avertie à l'élaboration des politiques générales, tout en permettant à chacun de décider de façon éclairée. Comprendre l'activité cruciale des microbes est tout aussi essentiel pour permettre à chacun de passer de l'enfance à l'âge adulte que connaître certaines matières actuellement enseignées à l'école. Il faut donc que ce savoir minimal soit un acquis de l'enseignement général. *L'initiation à la microbiologie doit faire partie du socle minimum du savoir des citoyens du monde*. Pour faciliter l'apprentissage de la microbiologie, comme partie intégrante des programmes d'enseignement, nous proposons ici un concept et un format pédagogique de base, adaptables à tous les âges, de la maternelle au secondaire, en proposant l'étude d'activités microbiennes clés. Elles sont choisies pour leur impact sur notre vie quotidienne, sur les grands défis auxquels l'humanité et la planète Terre sont confrontés, et sont conformes aux objectifs d'un développement durable. Nous exhortons les microbiologistes, les sociétés savantes en microbiologie et les professionnels du domaine à participer et à contribuer à cette initiative en aidant à faire évoluer le concept de base, en développant et en recherchant des financements pour développer des outils et matériels d'enseignement attractifs et adaptés aux enfants et, plus important encore, pour convaincre les éducateurs, les décideurs, les chefs d'entreprise et les agences gouvernementales et non gouvernementales concernés à soutenir et promouvoir cette initiative. *L'initiation généralisée de nos sociétés à la microbiologie* doit devenir une réalité.

Le contexte

Biomes et microbiomes

Les communautés de *microorganismes* créent une « peau » secondaire sur presque toutes les surfaces du corps en contact avec l'environnement, et cela chez tous les *macroorganismes* de la biosphère, animaux comme plantes. Ces peaux microbiennes constituent des barrières écophysiologiques dynamiques. Elles améliorent les fonctions de barrière physique et chimique des surfaces épithéliales (par exemple, en réponse à l'attaque d'un agent pathogène). Mais, outre leur activité de barrière, ces communautés microbiennes créent des interactions multiples avec leurs hôtes, remplissent des fonctions essentielles et ont une influence déterminante sur le bien-être et les caractéristiques biologiques des partenaires hôtes. C'est ainsi que les microbes associés aux plantes facilitent l'acquisition

des minéraux essentiels à leur croissance (l'azote en particulier). Sans fixation de l'azote par voie microbienne, la production de biomasse par les plantes n'aurait pas suffi à permettre la prolifération et l'évolution des consommateurs de végétaux que sont les animaux. Les microbes protègent aussi les plantes contre les infections et produisent des composés de type hormonal qui favorisent leur croissance. Certains microbes associés aux plantes sont toxiques pour les animaux et jouent donc un rôle de défense des plantes contre leurs prédateurs. Les microorganismes protègent les animaux contre les maladies, fermentent la nourriture des ruminants comme les vaches et digèrent les aliments pour les insectes. Tous les *macroorganismes* sont essentiellement recouverts de communautés microbiennes, mais certains abritent aussi des *microorganismes*, dits endosymbiotiques, qui vivent au sein-même des cellules hôtes. Les endosymbiontes jouent un rôle important dans le cycle de vie de bien des organismes, comme les insectes (où ils peuvent même déterminer le sexe de l'hôte), les éponges et les plantes, ainsi que d'autres *microorganismes*, comme les protozoaires. Les organites intracellulaires responsables de la collecte de l'énergie solaire (plastides) dans les organismes photosynthétiques et de la production d'énergie (mitochondries) dans la plupart des organismes sont issus de bactéries endosymbiotiques. La composante microbienne d'un organisme, appelée ici *microbiome* [microbiome: « communauté microbienne caractéristique occupant un habitat convenablement défini, et qui possède des propriétés physicochimiques originales. Le terme ne désigne donc pas seulement les micro-organismes impliqués, mais englobe aussi le théâtre de leur activité » (Whipps et al., 1988)], est une caractéristique essentielle de l'identité et de l'écophysiologie de l'organisme : les animaux et les plantes sans germes (axéniques) sont des monstres de laboratoire. Leur programme de développement est défectueux, ce qui les rend inadaptés et incapables de survivre dans leur habitat naturel. L'ensemble intégré, constitué d'un microbiome et d'un hôte, est appelé *biome*. La perturbation du *microbiome*, entraînant une *dysbiose*, selon l'expression consacrée, peut altérer sa relation avec l'hôte et abolir les fonctions qui contribuent à son équilibre, comme en témoigne la perturbation de la communauté microbienne de l'intestin des abeilles provoquée par un herbicide comme le glyphosate, ce qui les rend plus sensibles aux agents pathogènes (Motta et al., 2018).

L'être humain est fait de microbes à 50%

En termes de nombre de cellules, le biome humain est constitué de 50% de microbes (Sender et al., 2016). Les microbes intestinaux humains digèrent une grande partie de ce que nous consommons et libèrent les éléments nutritifs sous forme assimilable (Brown et Hazen, 2015). Ils jouent aussi un rôle dans diverses maladies physiques et mentales (Wang et al., 2017; Du Toit, 2019). Un exemple classique de dysbiose du microbiome humain est la perturbation de la communauté microbienne intestinale induite par les antibiotiques, qui

conduit la bactérie *Clostridium difficile* à devenir envahissante et à provoquer une colite pseudomembraneuse (Bartlett, 1979). Il est essentiel de se rappeler que, de la naissance à la mort, nous vivons une relation intime, dynamique et mutuellement bénéfique avec nos partenaires microbiens, relation intégrée et réciproque qui spécifie dans une large mesure quoi et comment —et donc qui— nous sommes (et, bien sûr, qui ils sont). Pour paraphraser Descartes : *Je pense, donc nous sommes.*

Nous devrions nous interroger sur le peu de connaissance et de confiance que nous avons en nos partenaires microbiens, alors que nous ne savons pour l'essentiel rien de ces amis les plus intimes et les plus influents. Parvenir à optimiser notre équilibre personnel exigera que nous comprenions

- *ce que font nos partenaires microbiens,*
- *quel impact leurs activités ont sur nous,*
- *comment nos partenaires microbiens et leurs activités sont affectés par ce que nous faisons, et*
- *comment nous pouvons améliorer nos interactions, à notre avantage mutuel.*

Les microbes au service de l'humanité

Les microbes ne nous touchent pas seulement personnellement en tant qu'individus, ils ont été exploités au service de l'humanité depuis des temps immémoriaux, tout d'abord pour la production d'aliments et de boissons fermentés (bière, vin, produits laitiers fermentés), de pain levé, et de textiles (rouissage du lin). Ils ont assuré le maintien de la fertilité du sol (utilisation de légumineuses contenant des bactéries fixatrices d'azote, fertilisation par la biomasse microbienne). Ils ont aussi réduit la pollution en dégradant les déchets ménagers et industriels et ils assurent la fourniture d'eau potable. En particulier, la fermentation des aliments pour les conserver et en améliorer les qualités nutritionnelles, et par la suite, l'amélioration de l'hygiène grâce au traitement microbien des eaux usées et la réduction concomitante de leur contenu en agents pathogènes, ont largement contribué à l'essor de la civilisation, et à la qualité et la longévité humaine.

Plus récemment, les microbes ont été au centre d'une bioéconomie en plein essor (voir par exemple, Timmis et al., 2017a). Cela a coïncidé avec un changement majeur de l'économie mondiale, qualifiée de 4^{ème} révolution industrielle (4RI). En parallèle avec l'interconnexion illimitée, l'intelligence artificielle, la surveillance omniprésente, le traitement des données massives, la robotique et de nombreuses autres fonctions nouvelles, la 4RI nous prépare aussi à la production durable de biens au moyen d'une économie circulaire sans déchets, sans émissions nocives et dans laquelle tout est recyclé (voir par exemple, Nielsen, 2017). Les procédés utilisant des microbes sont parfaitement adaptés à la 4RI, car ils n'ont besoin

ni de conditions extrêmes, ni de ressources élevées en énergie, ni d'intrants toxiques. Les nouveaux matériaux et les déchets créés de cette manière, ainsi que les intrants impliqués, sont généralement facilement recyclés. Il s'ensuit que les transformations chimiques dérivant de la biocatalyse microbienne, qui n'étaient jusque là qu'un complément un peu marginal de procédés chimiques et ne concernaient que la production d'un petit nombre de molécules bioactives à haute valeur ajoutée, sont devenues une véritable alternative aux grandes conversions chimiques à grande échelle des matières premières renouvelables en produits intéressants. Les usines cellulaires (principalement microbiennes) et les enzymes obtenues à partir de celles-ci, qu'elles soient naturelles ou reprogrammées, sont au cœur de ces développements.

Voici, au delà de la biocatalyse, une sélection de quelques résultats de la vaste gamme des procédés microbiens utilisés aujourd'hui :

- fabrication d'aliments variés (yaourts, fromages, natto, extraits protéiques de cultures cellulaires, chocolat, saucisses, cornichons, probiotiques), d'arômes alimentaires (vanille, sauce soja, kimchi, paa deak, soumbala) et de compléments alimentaires (vitamines, acides aminés, acide folique, probiotiques),
- fabrication de produits pharmaceutiques (antibiotiques, hormones, produits biologiques), de vaccins, de systèmes de diagnostic, de biocapteurs et de produits de soins personnels,
- protection et usage de facteurs favorisant la croissance des plantes cultivées,
- fermentation pour la production de produits chimiques et de biomatériaux variés (bioplastiques, cellulose microbienne),
- développement d'une ingénierie chimique verte, comme l'électrosynthèse, et utilisation du gaz carbonique —gaz à effet de serre— comme matériau de base pour la synthèse chimique,
- production d'énergie (biogaz, piles à combustible microbiennes),
- récupération des ressources naturelles (par exemple récupération des métaux par biolixiviation, ce qui remplace les procédés thermiques, très polluants),
- traitement des eaux usées et biorestauration des sites pollués,
- bionettoyage – restauration biologique et biopréservation des objets historiques du patrimoine culturel (monuments, statues, fresques, peintures, documents).

En outre, une vaste gamme de nouvelles applications est en cours de développement. Sont développées par exemple des thérapies microbiennes pour traiter les maladies causées par les dysbioses microbiennes [colite pseudomembraneuse, maladies inflammatoires de

l'intestin, obésité, diabète et toutes sortes d'affections psychologiques, voir par exemple (Rossen et al., 2015)]. Des cellules et des organismes intéressants pour la biotechnologie sont reprogrammés en utilisant les concepts et les pratiques de la biologie synthétique afin d'atteindre un niveau élevé de production ou une activité accrue. La bio-ingénierie est développée à l'échelle des écosystèmes, etc. L'étonnante polyvalence métabolique des microbes ouvre de nouvelles perspectives pour la production durable de produits chimiques destinés à la chimie fine ou à celle des réactifs de base (Lee et al., 2019).

Une nouvelle économie fondée sur la connaissance biologique suppose savoir identifier rapidement les retombées des activités microbiennes, évaluer avec précision leurs avantages et leurs risques. C'est ce savoir essentiel qui permet de prendre des décisions fondées sur la réalité des faits et d'engager les actions permettant de faciliter leur exploitation, d'être compétitif et de progresser sérieusement vers des pratiques durables. Il faut absolument pour cela, à tous les niveaux de la chaîne de décision, y compris chez le grand public en tant que partie prenante clé, une connaissance suffisante de la microbiologie sous-jacente.

Les décisions politiques fondées sur la connaissance des processus microbiologiques sous-jacents seront à la base des progrès futurs, du bien-être, de la durabilité et généralement des progrès de la civilisation. La rapidité et la direction de ces progrès dépendent fortement du degré de notre engagement à

- explorer sans a priori les processus microbiologiques et ainsi améliorer continuellement notre capacité à prévoir et à identifier de nouvelles applications commerciales potentielles fondées sur la microbiologie¹*
- exploiter de manière adéquate toute nouvelle application afin d'améliorer la santé humaine et celle de la planète,*
- développer et améliorer les applications existantes, et*
- concevoir des systèmes appropriés de décision et d'allocation des ressources, fondés sur des données factuelles, qui incitent et facilitent les activités de recherche, de développement et de commercialisation pertinentes et tiennent bien compte des préférences des parties prenantes.*

¹ Toute découverte nouvelle est le résultat d'une recherche. Mais la recherche est organisée en disciplines et en groupes de disciplines séparés, ce qui, dans une certaine mesure, constitue un obstacle aux découvertes de nature transdisciplinaire. Il est important de noter que nombre des changements nécessaires pour assurer la protection de l'environnement, la santé humaine et la sécurité alimentaire nécessitent la planification et la mise en œuvre d'une recherche transdisciplinaire. La microbiologie est par essence très variée dans sa nature et dans ses applications. Elle est si omniprésente dans ses impacts sur la vie et la planète, que connaître la microbiologie rendrait les chercheurs intrinsèquement plus interdisciplinaires. Cela accélérerait sans aucun doute l'élaboration de solutions novatrices et d'orientations nouvelles pour résoudre un grand nombre des problèmes environnementaux / sanitaires critiques auxquels nous sommes actuellement confrontés.

Les microbes nous affectent profondément et en toutes choses, personnellement et collectivement

Les microbes influent sur notre vie de bien des manières. Il faut les impliquer dans de nombreuses décisions personnelles, comme choisir d'accoucher par césarienne (de façon aseptique) ou d'accoucher par les voies naturelles [colonisation du nouveau-né par les microbes maternels (Wampach et al. , 2018)], d'allaiter [apport au bébé d'anticorps protecteurs contre les agents pathogènes, d'oligosaccharides du lait maternel favorisant les bactéries censées orchestrer le développement sain du système immunitaire (Gomez de Agüero et al., 2016; Moossavi et al., 2018), de microbes présents dans le lait de la mère, etc. (Milani et al., 2017)], d'utiliser, fréquemment ou non, des désinfectants puissants pour faire le ménage (ce qui réduit l'exposition des nourrissons à la diversité du microbiome et à ses bénéfices pour la santé: Finlay et Arrieta, 2016; Gilbert; et Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma et Gilbert, 2018; ou encore à l'hôpital: voir Caselli, 2017), d'être vaccinés ou traités pour une infection (Lane et al., 2018), d'utiliser des produits de nettoyage domestique contenant du phosphore [cela contribue à l'eutrophisation et à la prolifération d'algues nuisibles dans les eaux locales (Richards et al., 2015)], d'utiliser des savons germicides [ils peuvent provoquer une dysbiose du microbiote cutané (Gilbert et Yee, 2016)], d'adopter un animal de compagnie [cela facilite les échanges de microbiotes (Trinh et al., 2018) et augmente les apports de phosphore dans les eaux usées (Hobbie et al., 2017)], ou encore de choisir une alimentation carnée [manger du bœuf, par exemple, crée une empreinte substantielle en méthane, la consommation de viande bovine et de produits laitiers est liée aux cancers (zur Hausen et al., 2017), mais consommer d'autres viandes et légumes sera associé à d'autres facteurs de risque en fonction de leur provenance, de leur durée de conservation, etc.], de choisir les modes de stockage et de préparation des aliments, de décider de ventiler / humidifier / déshumidifier nos habitations, et de quelle manière, etc.

On peut, de façon un peu perverse, illustrer ces choix par ce qui nous attend lorsque nous nous livrons à une activité banale mais qui nous plaît généralement beaucoup —nos vacances et nos loisirs. Cette activité nous expose à toutes sortes d'infections et de maladies d'origine microbienne, parfois mortelles, alors qu'elles sont absentes ou généralement moins répandues dans notre environnement habituel. Cela se manifeste lorsque l'on va :

- *se baigner*, dans de l'eau douce ou de l'eau de mer (par exemple, contamination par *Cryptosporidium* sp., *Vibrio vulnificus*, *Leptospira* sp., etc.), ou dans des piscines ou des bains chauds mal désinfectées (*Mycobacterium* sp., *Pseudomonas* sp., *Legionella* sp., *Candida* sp., *Trichophyton* sp., *Giardia* sp., etc.),
- *manger*, des aliments crus ou contaminés, et en particulier des fruits de mer (par exemple, *Salmonella* sp., *Vibrio* sp., colibacilles pathogènes EHEC, *Campylobacter* sp., *Listeria* sp.,

Norovirus, virus de l'hépatite et divers parasites), et même des aliments bien cuits contenant des toxines thermostables (y compris les neurotoxines des marées rouges et plusieurs mycotoxines),

- *boire*, des liquides contaminés (par exemple de l'eau, des jus de fruits, etc.),
- *avoir une activité sexuelle*, avec de nouveaux partenaires (IST classiques, mais aussi papillome, VIH, etc.),
- *choisir une destination de vacances*, où des agents infectieux comme le virus de la fièvre jaune, le paludisme, le virus Zika, les virus de l'hépatite, le virus de la dengue, la maladie de Lyme ou la tuberculose peuvent être endémiques, et
- *choisir des lieux d'hébergement et de détente*, y compris les navires de croisière (Cyclospora, Norovirus, *Legionella* sp. et mycobactéries, par exemple).

Bien entendu, les voyages d'affaires nous exposent à des risques du même type, et le tourisme médical comporte des risques supplémentaires, liés à la chirurgie et aux hôpitaux.

Les activités microbiennes influencent aussi les entreprises, et en tenir compte est essentiel pour de nombreuses décisions stratégiques / politiques, comme la création d'une nouvelle matière première / la formation d'un nouveau déchet dans une installation de production industrielle, l'introduction d'un nouvel ingrédient dans un produit alimentaire, la mise en place d'une nouvelle chaîne d'approvisionnement alimentaire, l'introduction d'une nouvelle mesure de santé publique, la mise en œuvre de nouvelles pratiques agricoles ou l'introduction de nouvelles mesures visant à protéger nos systèmes marins contre leur dégradation.

Si nous devons —que ce soit au niveau personnel ou politique— prendre des décisions efficaces qui aient une forte chance d'aboutir à des résultats escomptés et prévisibles, nous devons savoir quelles activités microbiennes sont pertinentes et en quoi ces activités pourraient avoir un impact et être affectées par leur mise en œuvre. Les décisions habituelles de notre existence doivent être éclairées par une compréhension minimale. Nous devons savoir

- *quelles conséquences défavorables peuvent résulter de nos actions, et*
- *comment modifier notre comportement pour éviter ou atténuer ces conséquences, pour nous et pour les autres.*

Les microbes affectent profondément et en toutes choses toute la biosphère

Les microbes, premières formes de vie apparues il y a près de quatre milliards d'années, en sont aussi l'avenir : ils continueront d'habiter la planète Terre longtemps après la disparition des êtres humains et d'autres formes de vie. Le monde invisible des microbes représente

une diversité évolutive et métabolique bien plus grande que celle des organismes visibles qui nous sont familiers. En termes de biomasse, 90% de la vie dans les océans est microbien. Les algues photosynthétiques et les cyanobactéries forment une composante majeure du plancton marin et la base des réseaux trophiques océaniques. Les bactéries des genres *Prochlorococcus* et *Synechococcus* éliminent de l'air environ 10 milliards de tonnes de carbone par an, ce qui correspond à environ deux tiers du carbone fixé dans les océans. Les microbes régulent les processus biogéochimiques mondiaux et locaux qui influencent de façon majeure les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cela a des conséquences considérables pour le changement climatique, ainsi que pour la santé des êtres humains, des animaux, des plantes, du sol et pour l'approvisionnement en eau. Ils produisent 50% de l'oxygène que nous respirons. Les premiers microbes ont produit l'oxygène qui a permis à tous les organismes utilisant de l'oxygène d'évoluer, ainsi que la couche d'ozone qui a permis à la vie de se déplacer des profondeurs des océans vers la surface exposée au soleil. Ils sont les principaux recycleurs et régénérateurs de déchets de la planète. Les microbes sont omniprésents et leurs activités soutiennent et influencent la qualité de la vie sur la planète. *Ils sont le système qui entretient la vie de la biosphère.* Bien que nous nous considérions comme les gardiens de la santé de la planète, les microbes sont des acteurs, des régulateurs et des transformateurs d'activités bien plus puissants que nous. *In extremis* : si un groupe de microbes réalisant un processus critique pour le cycle des éléments nutritifs disparaissait de la biosphère sans pouvoir être remplacé par un autre groupe fonctionnellement équivalent, la vie sur Terre telle que nous la connaissons cesserait d'exister². Le microbiome environnemental mondial est, en termes d'activités et par sa taille, le seul allié sur lequel on puisse compter pour inverser l'impact des émissions polluantes résultant des activités industrielles, de l'agriculture intensive et de la surpopulation humaine (de Lorenzo et al., 2016).

Il est essentiel que nous reconnaissons collectivement le rôle central que jouent les microbes dans les processus planétaires et la santé, et que nous sachions ce que les microbes font et peuvent faire, afin de pouvoir développer des alliances et des stratégies efficaces pour la cogestion de la santé de notre planète. Il est urgent pour nous de

² Bien qu'à première vue, cette notion (en particulier combinée avec ce que nous affirmons plus bas, que *tous les microbes se rencontrent partout*) puisse paraître tirée par les cheveux, il convient de s'interroger sur les points suivants : les changements de l'environnement et de l'habitat, résultant du réchauffement planétaire par exemple, peuvent les rendre défavorables à leurs habitants. Il s'ensuit que ces habitants doivent (1) migrer vers des habitats plus favorables, (2) s'adapter / évoluer vers de nouvelles aptitudes qui soient mieux appropriées aux nouvelles conditions ou (3) mourir et, s'ils sont géographiquement isolés, peut-être s'éteindre. L'évolution est plus facile et diversifiée pour les organismes à reproduction rapide. Mais les microbes, dans un certain nombre d'habitats de la biosphère, se reproduisent extrêmement lentement. Si les changements se produisent rapidement, il est concevable qu'ils puissent disparaître. Et si alors certains appartiennent à un groupe assurant une fonction critique de la biosphère, cela pourrait avoir de très graves conséquences. Curtis (2006) s'en est exprimé ainsi : « ...*Si la dernière baleine bleue s'étouffait sur le dernier panda, ce serait une catastrophe, mais pas la fin du monde. Mais si nous empoisonnions accidentellement les deux dernières espèces de bactéries nitrifiantes et anamox, ce serait une autre affaire. Cela pourrait arriver en ce moment et nous ne nous en rendrions même pas compte...* ».

- *comprendre et apprécier le délicat équilibre entre les cycles nutritifs à médiation microbologique, la fonction planétaire et la santé de la biosphère, et*
- *veiller à ne pas nuire (même involontairement) aux groupes / communautés microbiennes qui jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de la biosphère.*

Exploiter les activités microbiennes est crucial pour répondre à certains grands défis et atteindre les objectifs d'un développement durable

L'humanité est aujourd'hui confrontée à plusieurs défis majeurs : déséquilibre entre accès à la nourriture, à l'eau potable, aux soins de santé, à l'éducation, à l'énergie et aux matières premières, pauvreté persistante, perte de terres peuplées en raison du réchauffement de la planète, désertification ; voilà ce que sont quelques-uns des *Grands Défis*. Les besoins de l'humanité et de la planète Terre, ainsi qu'un plan d'action pour les satisfaire de manière durable, sont détaillés dans les Objectifs du Développement Durable des Nations Unies [ODD; Nations Unies (2015) Transformer notre monde : Programme de développement durable à l'horizon 2030 ;

https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=FJ. Un numéro récent de *Microbial Biotechnology* (2017) a exploré la gamme des technologies microbiennes qui font connaître / démontrent comment contribuer à la réalisation des ODD, y compris celles qui peuvent atténuer les problèmes d'approvisionnement alimentaire pour une population mondiale en augmentation constante (Garcia et al., 2017; Trivedi et al., 2017), ceux de la production des gaz à effet de serre, du réchauffement planétaire et de certaines de ses conséquences négatives, de la pollution globale, et visent à maximiser l'exploitation des énergies renouvelables et la durabilité de la consommation mondiale de ressources naturelles, etc. (voir par exemple, de Lorenzo, 2017; Verstraete et de Vrieze, 2017). Ce numéro abordait aussi le potentiel exceptionnel de la biotechnologie microbienne pour un autre ODD, à savoir *la recherche d'une croissance économique durable et créatrice d'emplois*, impliquant de nouvelles entreprises, créant emplois et richesses, en partie grâce à la bioéconomie (Timmis et al., 2017b), mais aussi dans d'autres contextes. Une série d'éditoriaux publiés dans cette même revue sous le titre général *Le microbiome en tant que source de nouvelles entreprises et de création d'emplois*, a exploré en 2017 et 2018 la capacité des technologies du microbiome à faire naître de nouvelles entreprises et de nouvelles occasions d'emploi.

Un grand nombre des actions qui doivent être mises en place sur le long chemin qui mène à répondre aux grands défis et à réaliser les ODD impliquera des processus microbiens. Les principales décisions politiques nécessaires pour entreprendre ces actions / les entretenir / accroître leur contribution supposent connaître les activités microbiennes pertinentes et la manière dont elles peuvent être orientées pour obtenir un effet bénéfique maximal.

Des décisions fondées sur la connaissance des processus microbiologiques sous-jacents pourraient éviter des catastrophes majeures, voire parfois mondiales

Les microbes sont des acteurs centraux, parties prenantes de l'évolution planétaire et biologique. Ne pas laisser s'exprimer, connaître, et prendre en compte la contribution microbienne aux processus pertinents, et planifier sans tenir compte du rôle que les microbes peuvent jouer dans chacun des changements envisagés, rend l'élaboration et la mise en œuvre des politiques, à tous les niveaux (international, national, régional et individuel), risquées, sous-optimales ou inefficaces et, dans le pire des cas, contre-productives. Voici quelques exemples de catastrophes potentiellement évitables qui ont eu ou auraient un impact négatif provoqué par des décisions / des politiques (ou a contrario le manque de décisions / de politiques) malvenues :

Émergence de la résistance à tous les antibiotiques connus. Dès les années 1960 et au début des années 1970, des microbiologistes renommés comme Stanley Falkow (Falkow et al., 1961; Falkow, 1970, 1975), Tsutomu Watanabe (Watanabe, 1963; Watanabe, 1966) et Stuart Levy (Levy et al., 1976; Levy, 1982) nous mettaient en garde contre l'émergence croissante et la propagation de la résistance aux antibiotiques, en raison de leur prescription excessive et de leur utilisation hors d'un contexte clinique strict. Alexander Fleming, le découvreur de la pénicilline, avait déjà mis en garde contre ce danger lors de sa conférence Nobel en 1945 : <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf>). Des avertissements du même type ont été émis à plusieurs reprises depuis lors, certains liés à l'utilisation des antibiotiques en aquaculture (voir par exemple, Cabello, 2006), mais sans grand succès. Aujourd'hui, nous considérons que la résistance aux antibiotiques est l'un des défis les plus importants auquel a à faire face la médecine, car elle rend de plus en plus difficile le traitement d'infections mettant en jeu le pronostic vital, infections qui pouvaient jusque là être bien contrôlées (http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf). Le rapport international *Combattre les infections résistantes aux médicaments dans le monde : rapport final et recommandations* (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf) fait état des risques liés à la résistance aux antibiotiques. Cela pourrait dès 2050 coûter 100 milliards de dollars et causer 10 millions de décès évitables par an (on notera avec intérêt que la première de ces quatre recommandations était qu'il faut établir une *Campagne mondiale de sensibilisation du public* ciblant en particulier les enfants et les adolescents. Curieusement, bien que le coût de la campagne ait été de 40 et 100 millions de dollars par an, ce qui était recommandé n'incluait pas la mise en place d'un niveau minimal d'éducation). Malgré cet avertissement, l'utilisation d'antibiotiques à usage non clinique, pour l'élevage et l'aquaculture devrait encore augmenter de 67% au cours de la période 2010-2030

([https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final% 20paper_with% 20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)). Si les autorités sanitaires, les politiques et les chefs d'entreprise (et, surtout, le grand public) avaient été conscients de la capacité des microbes à évoluer rapidement et à répandre de nouvelles fonctions en réponse aux changements de leur environnement, en l'occurrence l'introduction dans l'environnement de composés antimicrobiens puissants —et donc capables d'entendre les avertissements de Falkow et al., nous serions dans une situation très différente aujourd'hui, bien moins préoccupante.

Retour des maladies infantiles pratiquement disparues. La réémergence de la rougeole, de la coqueluche et de la diphtérie, en raison de la diminution de l'acceptation par le grand public de la vaccination et de la couverture vaccinale, était totalement évitable. Dans les pays qui avaient pratiquement éradiqué ces maladies, ce qui arrive reflète une ignorance coupable, résultant de l'incompréhension du risque associé à la vaccination, de la microbiologie sous-jacente et reflète un ensemble de choix personnels fondés sur des croyances —« peur de la vaccination »— au lieu de reposer sur la force des preuves bien établies par les faits, (Lane et al., 2018).

Augmentation des allergies. Il faut bien sûr combattre sérieusement les infections infantiles graves. Mais les infections bénignes, et une exposition raisonnable aux microbes de l'environnement facilitent le développement d'un système immunitaire sain chez les nourrissons (Bach, 2018). La montée de la *microbiophobie* (germaphobie) et les campagnes publicitaires qui donnent à penser que tous les microbes sont mauvais et doivent être éliminés pour créer un environnement domestique sain ont contribué de manière significative à l'explosion actuelle du dysfonctionnement immunitaire dans les sociétés industrielles (par exemple, allergies, asthme, eczéma et même troubles neurologiques). De fait, on a récemment démontré qu'utiliser des savons germicides agressifs réduisait l'effet protecteur des microbes cutanés contre les cancers de la peau (Nakatsuji et al., 2018). Ces effets indésirables auraient été bien moindres si des mesures appropriées avaient été prises pour sensibiliser le public au nécessaire équilibre des pratiques d'hygiène, fondé sur la réduction de la contamination par des agents pathogènes au moyen de stratégies visant à maintenir un microbiote sain. La plupart des microbes nous fournissent des services écophysiologiques essentiels, en particulier en façonnant efficacement notre système immunitaire au travers de l'exposition microbienne aux sols, aux animaux et aux plantes (Finlay et Arrieta, 2016; Gilbert et al., 2017).

Crise des gaz à effet de serre. Les microbes produisent et consomment des gaz à effet de serre (Cavicchioli et al., soumis). Réduire les émissions microbiennes de ces gaz, d'une part, et augmenter leur consommation par les microbes, d'autre part, sont donc des objectifs cruciaux. Mais lorsqu'on prend en compte la participation des microbes à tel ou tel

processus, il faut en comprendre les aspects quantitatifs et le fait qu'ils peuvent ne pas être linéaires. La fixation du gaz à effet de serre CO_2 par les microbes et les plantes est lente par rapport à sa libération durant la combustion des combustibles fossiles par les activités humaines —le cycle normal des choses est déséquilibré. C'est pourquoi le niveau de CO_2 augmente rapidement : nos amis microbiens et végétaux ne peuvent pas rivaliser avec les activités humaines. Les émissions de gaz à effet de serre entraînent un réchauffement de la planète, qui à son tour provoque le dégel des sols gelés (permafrost), ce qui conduit à une nouvelle production microbienne de méthane et de CO_2 , amplifiant et exacerbant ainsi les conséquences de la consommation de combustibles fossiles.

On le sait depuis longtemps, la production de viande animale, en particulier celle des ruminants, s'accompagne d'importantes émissions de méthane, gaz à effet de serre. Mais cela va plus loin. La production de viande repose sur la production de fourrage, elle-même liée à l'utilisation d'engrais azotés. L'urée, qui est décomposée par les microbes du sol en ammoniac et en CO_2 , gaz à effet de serre, a une longue histoire d'utilisation comme engrais azoté dans l'agriculture (cette utilisation est en diminution, cependant). D'autres engrais azotés conduisent à la production microbienne du très puissant gaz à effet de serre N_2O (et, bien sûr, à l'eutrophisation : proliférations d'algues nuisibles induites par le ruissellement des nutriments dans les cours d'eau, causant la mort des poissons par hypoxie et imposant des restrictions à l'utilisation des masses d'eau affectées). Il est clair que des décisions personnelles et politiques importantes auraient dû être prises / doivent encore être prises concernant les quantités de viande à produire et à consommer pour ne pas dépasser les besoins alimentaires essentiels.

Le ruissellement des nutriments dans les fleuves entraîne une consommation rapide de l'oxygène par le microbiote résidant, ce qui contribue à l'expansion rapide de zones dépourvues d'oxygène. Neuf limites essentielles à ne pas dépasser pour permettre un avenir planétaire durable ont été identifiées. En sus du changement climatique, de la perte de biodiversité et de l'appauvrissement de la couche d'ozone, c'est le cycle de l'azote qui a été identifié comme la frontière la plus sérieusement transgressée, du fait que l'usage des engrais fabriqués par l'homme dépasse désormais tous les processus naturels produisant ce nutriment essentiel à la biosphère (Rockström et al., 2009). Le débat existe aujourd'hui dans de nombreux pays sur la limitation de l'utilisation de ces engrais, mais le besoin de nourrir une population mondiale toujours croissante et de produire des aliments à un prix abordable pour les plus pauvres, en dehors du secteur de l'agriculture et de ses chaînes d'approvisionnement, rendent l'équation difficile à résoudre. Il semble logique d'encourager les agriculteurs à prendre les décisions et à formuler des politiques judicieuses, car ils comprennent mieux que quiconque la relation entre l'amendement en azote du sol et la

productivité des cultures. Cependant, l'implication microbienne dans la question des émissions de gaz à effet de serre liées aux engrais azotés est rarement un élément majeur du processus de débat / décision personnel ou politique, alors qu'il faudrait rendre ces débats significatifs et efficaces. Plus généralement, les décisions politiques récentes limitant les émissions de gaz à effet de serre traitent principalement des émissions anthropiques et ignorent essentiellement le fait que les microbes jouent un rôle crucial dans la production et la consommation de quantités importantes de gaz à effet de serre, notamment le N₂O et le CH₄, en plus du CO₂. Quoi qu'il en soit, nous sommes tous touchés de différentes manières par le réchauffement de la planète et nous sommes donc parties prenantes clés. Par exemple, le réchauffement modifie la répartition mondiale des agents pathogènes et de leurs vecteurs, entraînant ainsi l'apparition de maladies au sein de nouvelles populations d'êtres humains et d'animaux immunologiquement naïfs ou des plantes sans défense, avec la possibilité d'une propagation épidémique.

Dégradation des sols. Le sol est une peau caractéristique de la Terre. Il permet la croissance des plantes et abrite une incroyable diversité d'animaux et de microbes, à l'origine d'un nombre étonnant de processus biogéochimiques qui en caractérisent les fonctions et en déterminent la santé. Le sol purifie les eaux de surface qui s'infiltrent dans les aquifères et fournissent de l'eau potable à des milliards de personnes. Le sol contient des nutriments précieux et trois fois plus de carbone que l'atmosphère terrestre. Mais le sol de la Terre s'érode rapidement et aboutit souvent dans les lacs, les rivières et les océans, libérant ses éléments nutritifs en cours de route. De fait, la plupart des pays perdent beaucoup plus rapidement leur terre arable que celle qui est produite par les processus générateurs de sol (altération des roches). Des phénomènes météorologiques de plus en plus extrêmes augmentent le taux d'érosion. Or, les microorganismes du sol produisent des polysaccharides qui agissent comme une colle donnant sa structure et sa stabilité au sol et ainsi augmentent sa résistance à l'érosion. La perte désastreuse du sol d'une grande partie des terres agricoles de la planète devrait survenir avant la fin du 21^{ème} siècle. Cela aura pour conséquence l'impossibilité de produire les aliments nécessaires pour nourrir la population mondiale, alors que de grandes quantités d'éléments nutritifs seront libérés et pollueront nos cours d'eau. En parallèle du carbone sera libéré et cela va accroître le réchauffement climatique. Si l'on veut éviter cette crise, il faut absolument que les décideurs mettent en place des stratégies fondées sur la connaissance scientifique pour mieux exploiter les activités microbiennes qui améliorent la stabilité des sols. Pour que cela arrive, il est aussi nécessaire que les citoyens du monde, en tant que parties prenantes clés, comprennent la gravité du problème et les options microbiennes accessibles. Mais, pour y parvenir, *l'acquisition de connaissances minimales en microbiologie* est essentielle.

Accumulation de polluants dans l'environnement et les réseaux alimentaires. Il ne suffit pas de savoir que les microbes participent à un processus écologique, il faut aussi savoir ce qu'ils font bien et ce qu'ils font moins bien. Historiquement, il a été commode de supposer que la polyvalence métabolique bien connue des microbes prend en charge tous les matériaux polluants rejetés par l'industrie, les ménages, les hôpitaux, et ainsi de suite, sans tenir compte de fait qu'il puisse exister une limite à cette capacité. Mais, bien que les microbes puissent dégrader une étonnante gamme de produits organiques, le métabolisme de certains d'entre eux est lent, parfois très lent. Aussi, lorsque la production et le rejet des polluants dans l'environnement sont plus rapides que la capacité des microbes à les dégrader, ces matières s'accumulent et polluent, comme en témoigne la découverte de produits chimiques toxiques à longue durée de vie, comme les PCB et les dioxines dans le réseau trophique actuel, des décennies après l'interdiction de leur fabrication. On le constate aussi avec le désastre en cours de la pollution par les matières plastiques dérivées de la pétrochimie.

L'éventail de problèmes graves auxquels nous sommes actuellement confrontés, notamment la propagation insidieuse d'agents pathogènes résistants aux médicaments de dernier recours, l'érosion des sols, les matières plastiques dans les océans et son impact sur la santé de la faune, ainsi que la formation et l'accumulation de microplastiques dans la chaîne alimentaire, étaient prévisible et dans une mesure significative évitables si

- *les responsables politiques avaient été en mesure de comprendre les résultats probables de leurs décisions en matière de processus microbiologiques et leurs implications à long terme, et*
- *un éventail plus large de parties prenantes de la société avait pu évaluer beaucoup plus tôt les risques des politiques et des comportements contemporains*

L'exposome et le problème particulier de l'exposition chronique à long terme à de faibles concentrations de substances biologiquement actives

La pollution biologique et chimique de la biosphère est l'un des grands défis particulièrement pertinents pour comprendre la nécessité de *l'initiation à la microbiologie*, car les décisions humaines sont à la fois le problème —elles conduisent à des politiques qui créent la pollution— et la clé de sa solution —elles peuvent produire des politiques qui atténuent la pollution (pour la *réduire, assainir, recycler*). La pollution biologique, en particulier la pollution fécale associée aux grandes agglomérations, bien que largement contrôlée dans les pays à revenu élevé, révèle parfois des problèmes dus à des défaillances techniques ou à des phénomènes météorologiques extrêmes, et reste problématique dans les pays à faible revenu. Par ailleurs, l'élevage industriel destiné à la production de viande crée une dimension supplémentaire en produisant à grande échelle des déchets animaux comprenant

d'énormes volumes de matières fécales enrichies en microbes, y compris pathogènes, résistants aux antibiotiques. Certains de ces déchets sont rendus inoffensifs dans les digesteurs anaérobies, mais d'autres restent dans l'environnement où ils constituent une menace sérieuse.

Bien que la toxicité et les cycles de vie des nouveaux produits chimiques et pharmaceutiques soient généralement évalués avant leur circulation, les méthodes utilisées donnent surtout des informations sur la toxicité aiguë détectable sur de courtes périodes, avec des modèles standard peu adaptés à l'analyse des dangers associés à ces produits chimiques. L'évaluation de la toxicité aiguë pour les organismes les plus directement affectés ou de la toxicité chronique à faible niveau qui se manifeste à long terme est extrêmement difficile. De nombreux produits chimiques biologiquement actifs, comme les produits pharmaceutiques, se retrouvent dans les déchets de fabrication et les eaux usées des hôpitaux et des ménages. Or ils sont actifs à de très faibles concentrations et certains d'entre eux restent inchangés dans l'environnement après passage au travers des systèmes de traitement des déchets. À cela s'ajoute le fait que certains produits chimiques sont souvent partiellement dégradés par les microbes de l'environnement en de nouveaux métabolites qui n'ont pas été pris en compte dans les évaluations d'impact, et peuvent être toxiques d'une manière différente de celle des produits chimiques d'origine ou même être plus toxiques que les produits chimiques qui ont atteint initialement l'environnement. Une faible exposition chronique à ces produits chimiques et à ces métabolites peut avoir des conséquences insidieuses dans la population. Les composés les plus répandus dans l'environnement comprennent les xénoestrogènes —perturbateurs endocriniens (Monneret, 2017)— aujourd'hui considérés comme responsables au moins en partie de la baisse de la fertilité chez l'homme et d'autres animaux, et les insecticides, responsables de la diminution du nombre de pollinisateurs, comme les abeilles (Godfray et al., 2015; Christen et al., 2018). Un autre problème, encore plus difficile à résoudre, réside dans le fait que les produits chimiques polluants se mélangent dans l'environnement. L'impact des mélanges de produits chimiques sur la santé humaine et l'environnement, en particulier après exposition chronique à de faibles concentrations, est essentiellement inconnu, mais indubitable. Les microbes ont, ou peuvent faire apparaître, la capacité de dégrader beaucoup de ces composés. Ils seront souvent les principaux agents de leur élimination de l'environnement. Cependant, ils ne sont pas en mesure de les dégrader tous, du moins à des vitesses significatives, en particulier lorsque ces composés sont présents à des concentrations très faibles et, plus encore, lorsqu'ils sont présents au sein de mélanges complexes.

En résumé, en dépit de la complexité de la pollution biologique et chimique et de la capacité tout aussi complexe des microbes permettant de rendre inoffensifs les polluants, le seul

moyen de réduire la pollution existante sera d'améliorer notre compréhension des processus microbiens pertinents et de les exploiter. Lors de la production de nouveaux produits chimiques, y compris ceux qu'on obtient à l'aide de la microbiologie synthétique, leur conception responsable devra inclure une limite claire pour leur cycle de vie. Mais, répétons-le : quelles que soient les limitations du monde microbien, les microbes restent les seuls agents sur lequel nous pouvons compter pour contrer le fardeau de la pollution exceptionnelle qui pèse sur la planète (de Lorenzo et al., 2016).

Il est essentiel que les capacités et les limites de l'aptitude des microbes à dégrader les polluants environnementaux soient reconnues et comprises comme caractères essentiels du développement de la politique de contrôle et de réduction de leurs effets négatifs afin, à terme, de limiter notre niveau d'exposition. Des politiques concertées, cohérentes et durables (globales) sont nécessaires pour

- rationaliser l'identification, l'évaluation et la surveillance des types et des niveaux de substances bioactives et de leurs mélanges dans notre environnement, au niveau local, régional et mondial,*
- améliorer notre compréhension de l'impact de ces substances sur la santé de la planète, des collectivités et des individus,*
- coordonner les efforts pour les soustraire à l'environnement, atténuer leurs effets toxiques et réduire leur entrée dans le réseau trophique et leur migration, et*
- élaborer des mesures pour réduire notre niveau d'exposition à ces polluants.*

Connexité mondiale et réactions microbiennes au changement

Un dernier point, mais non le moindre. Il convient de souligner deux caractéristiques clés de notre planète. La première est la connexité : toutes les surfaces et l'atmosphère de la planète sont connectées entre elles par l'eau, le vent et les chaînes d'approvisionnement mécanisées, qui déplacent une grande partie de ce qui se trouve à la surface et dans l'atmosphère par le biais des transports terrestres, maritimes et aériens, parfois sur des milliers de kilomètres. Une conséquence bien comprise de cette *connexité physique* est le déplacement des déchets plastiques vers toutes les régions des océans, très loin des sites où ils ont été rejetés, ou la découverte de biphényles polychlorés toxiques —PCB— chez des animaux polaires, très éloignés de leurs sites de production et d'utilisation. Ainsi, bien que nous puissions croire que les dangers potentiels d'un produit chimique sur son site de production soient traités de manière sûre, les mécanismes de connexité et de redistribution posent des problèmes à grande distance. Mais les agents biologiques contribuent aussi à la connexité et aux mouvements dans la biosphère, par des mouvements actifs et passifs, que ce soit par les airs, dans le cas des insectes volants, des oiseaux et des personnes qui

prennent l'avion, en nageant ou en flottant, dans le cas des organismes aquatiques, ou encore les graines, le pollen et le plancton en suspension dans l'air et dans l'eau, etc. La pandémie du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) en 2003, l'épidémie annuelle de grippe originaire d'Asie, un foyer d'*E. coli* entérohémorragique en Allemagne, transmis par des germes de graines de fenugrec « bio » importés d'Égypte, la progression de maladies importées par une immigration grandissante, comme la tuberculose qui croît dans des pays africains comme le Maroc ou les virus africains transmis par les tiques en Espagne sont autant d'exemples des conséquences de la connexité biologique du monde. Le commerce international joue aussi un rôle important dans la propagation des agents pathogènes et est responsable de la propagation actuelle des maladies des plantes causées par *Xylella fastidiosa*, l'un des agents phytopathogènes les plus dangereux au monde, dont l'impact économique est énorme sur l'agriculture, les espaces publics et l'environnement. À la différence des nombreux pathogènes transmis par des vecteurs spécifiques de l'hôte et qui ont une gamme d'hôtes restreinte, *X. fastidiosa* est transmise par une gamme variée d'insectes qui sucent la sève et infectent ainsi un large éventail d'hôtes végétaux. Les eaux du ballast des navires, collectées et rejetées un peu partout sur le globe créent de nouvelles populations d'organismes non indigènes et parfois dangereux, comme des espèces d'algues toxiques qui posent des problèmes de biosécurité. Et les poussières du désert, riches en phosphore, en fer et en microbes, sont transportées par les courants aériens vers des lieux lointains : des poussières du Sahara tombent régulièrement sur l'Europe et fertilisent les eaux du golfe du Mexique et de la mer des Sargasses, permettant la prolifération des algues.

De même, la connexité air-eau intervient dans la répartition dans la biosphère et l'atmosphère de produits chimiques à longue durée de vie, y compris de matières radioactives ; elle assure aussi la répartition de microbes minuscules, presque en apesanteur. Mais, contrairement aux produits chimiques, les microbes peuvent se reproduire, coloniser leur environnement de manière opportuniste et avoir un impact sur tout site qu'ils trouvent propice. La répartition mondiale des microbes est inhérente au système : *tous les microbes sont partout*. Un corollaire, peut-être plus significatif, pourrait être le mantra : *dès que les microbes sont capables de tirer profit de leur influence sur un processus quelconque, on les rencontrera et ils exerceront cette faculté*.

Une deuxième caractéristique importante de la planète est le fait que les changements, causés par les événements naturels ou les actions accidentelles ou délibérées de l'homme, provoquent souvent une réaction, parfois une réponse inattendue, qui entraîne des conséquences différentes de celles que l'on prévoyait. Cela peut être dû à des réactions physico-chimiques ou, bien souvent, biologiques, en particulier microbiologiques. Il s'ensuit

qu'à chaque fois que nous décidons d'entreprendre une action quelconque, en plus des considérations habituelles de faisabilité, de coût, de logistique, etc., il nous faut prendre en compte le fait que les microbes ne sont pas des agents passifs sensibles aux changements anthropiques importants l'environnement —volus ou non : ils réagissent activement et, de ce fait, altèrent les conséquences de nos actions, de manière positive ou négative. Nous devons toujours nous poser la question suivante : l'activité des microbes est-elle directement ou indirectement impliquée ou affectée par le processus en discussion et, dans l'affirmative, quelles sont leurs réponses possibles / probables à l'action proposée ? Malheureusement, nous n'avons pas encore appris à discuter avec les microbes, nous ne pouvons donc pas leur demander ce qu'ils vont faire quand nous changeons les choses. Il est donc essentiel de faire des prévisions à partir des preuves qui ont été fondées sur l'observation et la modélisation de la manière dont les microbes réagissent aux changements environnementaux, et d'adopter une attitude prudente. Pour reprendre la formule familière — *penser mondialement, agir localement*— nous devons exhorter chacun à agir localement, mais seulement après avoir bien pris en compte la possibilité que des réactions locales, régionales ou mondiales aient des retombées collatérales (y compris des retombées contre-intuitives qui seraient totalement différentes de ce qu'on attend).

La nature interconnectée de notre planète nécessite que, avant d'agir, nous puissions

- *évaluer judicieusement les retombées possibles, le degré d'impact et les chemins adaptés de l'action locale sur les activités microbiologiques sur un voisinage plus ou moins éloigné, ainsi qu'au niveau mondial,*
- *établir correctement des scénarios et des modèles d'impact, y compris la durée de vie des effets attendus et la possibilité de contre-mesures, en utilisant des méthodes adéquates,*
- *examiner attentivement les solutions possibles lorsque, en nous fondant sur des hypothèses prudentes, nous ne sommes pas sûrs de nos prévisions, et*
- *surveiller, réviser et améliorer les politiques et donner aux autorités locales le pouvoir d'empêcher les actions non coordonnées ou non fiables qui pourraient, involontairement ou non, avoir des effets néfastes.*

Le problème

Le problème est que les microbes et leurs activités ne sont actuellement bien connus que d'un très petit groupe de spécialistes, les microbiologistes. Bien entendu, la société a toujours eu recours à des spécialistes pour conseiller les décideurs, par exemple à des économistes pour conseiller les gouvernements sur les coûts de mise en œuvre de leurs nouvelles politiques. La question ici est que les activités microbiennes sont si omniprésentes et affectent si directement et intimement les choix quotidiens de tous les membres de la société, que consulter à temps des microbiologistes ou rechercher très vite ce qu'on sait en

microbiologie reste presque toujours, malgré l'accès par Internet à des informations pertinentes, difficile ou même impossible. Ainsi, nous avons d'un côté les microbiologistes, qui ont peu d'influence sur les décisions politiques à tous les niveaux, et les politiques ou les décideurs, qui ne disposent pas des connaissances essentielles indispensables pour prendre des décisions en connaissance de cause. *Comment allons-nous gérer efficacement les crises auxquelles nous sommes confrontés si ni les causes sous-jacentes des crises, ni les solutions potentielles* (par exemple, Brüssow, 2017) *ne peuvent être comprises et évaluées par les décideurs et les parties prenantes ?*

Si nous voulons éviter de répéter les erreurs du passé qui ont eu les conséquences catastrophiques du type décrit ci-dessus, les informations essentielles qui sous-tendent une perception correcte des problèmes, des choix appropriés et des décisions politiques optimales, fondées sur de véritables preuves, doivent faire partie intégrante de notre base de connaissances individuelle et collective. Afin de ne pas déclencher à l'avenir des événements désastreux évitables

- *il faut non seulement qu'une connaissance élémentaire des processus et des activités microbiologiques, ainsi que de leurs interactions et leurs interdépendances, fasse partie de la sensibilisation du public, mais aussi*
- *qu'une connaissance plus élaborée de ces processus fasse partie des compétences des décideurs impliqués, et*
- *que les systèmes décisionnels exigent de façon plus appropriée l'usage de critères fondés sur de véritables preuves et non des croyances, en examinant les problèmes avec les experts compétents.*

Le chemin vers une solution : réussir à former la société à la microbiologie

Les notions clés de la microbiologie doivent faire partie de l'éducation de base

Certains membres de la société, comme les enseignants, les politiques, les chefs d'entreprise, les dirigeants d'agences nationales et internationales, etc., ont le plus grand besoin de connaître la microbiologie, car leurs décisions ont un impact social plus important que celui des autres. Il n'en reste pas moins que chacun d'entre nous prend des décisions qui mettent en jeu les microbes et développe quotidiennement des pratiques pertinentes sur le plan microbien. Par ailleurs, nous sommes tous parties prenantes des grandes décisions politiques affectant notre santé et notre bien-être, tout comme ceux de notre planète. Pour pouvoir exercer nos droits de citoyens et assumer nos responsabilités d'informer de manière compétente les décideurs, qu'il s'agisse d'électeurs ou de membres de groupes d'intérêts, nous devons maîtriser la microbiologie. Il existe donc un besoin crucial en matière d'*initiation*

à la microbiologie à tous les niveaux de la société : l'initiation à la microbiologie doit faire partie intégrante de la description des postes de travail proposés aux adultes.

Un socle commun de connaissances et l'esprit critique acquis au cours des études, depuis l'enfance, sont généralement considérés comme essentiels pour le passage à l'âge adulte. Jusqu'à présent, connaître sa langue maternelle, une langue étrangère, l'histoire, la géographie, l'actualité, les mathématiques, la physique, la chimie, la biologie, etc., était considéré comme constituant les matières essentielles d'une éducation équilibrée. Plus précisément : la connaissance de ces sujets est vue ici comme un attribut essentiel de la maturité, indispensable pour prendre les responsabilités associées à la famille et à l'emploi, user de l'obligation que nous avons d'aborder les informations nouvelles qui nous parviennent, dans nos vies personnelles et professionnelles, et répondre à la nécessité de prendre des décisions efficaces au quotidien pour naviguer au travers des méandres de la vie. Tout comme Bergey en 1916, nous affirmons que connaître et comprendre les microbes et leurs activités est aussi essentiel à la formation générale que les matières traditionnelles.

La microbiologie doit devenir un élément central des programmes scolaires afin que les décideurs soient correctement informés et que toutes les autres parties prenantes possèdent une compréhension de base de la manière dont la société et ses actions sont intimement liées à notre monde microbien. Cela permettra aux acteurs de la société de

- prendre des décisions éclairées à la fois pour eux-mêmes et pour les autres, par exemple leurs enfants,*
- évaluer de manière critique les arguments pour et contre les alternatives avant de prendre une décision et donner ainsi une préférence informés à ceux qui prennent les décisions en leur nom, et*
- pouvoir demander des comptes à ceux qui ne prennent pas leurs décisions sur la base de preuves scientifiques mais en raison de leurs croyances.*

Un concept et un format d'enseignement centrés sur l'expérience personnelle pour tous les groupes d'âge, mettant l'accent sur les grands défis et les objectifs d'un développement durable

Les microbes affectent nos vies dès le premier jour (en fait, ils nous affectent beaucoup plus tôt). C'est pourquoi la formation à la microbiologie devrait commencer dès le début de l'enseignement primaire et constituer un fil conducteur à tous les niveaux de l'éducation afin de donner aux décideurs, à tous les échelons, le pouvoir de prendre des décisions éclairées sur les bonnes pratiques et de fournir aux jeunes et aux moins jeunes les connaissances nécessaires pour comprendre le principe de ces décisions. Les gens doivent comprendre la différence entre ce qui est presque certain, ce qui est probable et ce qu'on ne sait pas. Les individus doivent être capables de prendre des risques en fonction des preuves accessibles :

mesurer les avantages et les inconvénients leur permettrait de prendre des décisions pour des actions fondamentalement bénéfiques mais comportant un certain degré de risque ou d'interagir de manière constructive avec les agences qui prennent ces décisions en leur nom. Et, ils devront savoir quelles sont les connaissances nouvelles qu'il faudra acquérir pour élaborer les meilleures politiques à venir, fondées sur des preuves tangibles et non des spéculations hasardeuses.

Nous voyons ainsi l'élaboration de programmes de microbiologie pour la maternelle, les écoles primaires, les collèges et les lycées, ainsi que des programmes d'enseignement de la microbiologie pour la formation des enseignants de l'enseignement supérieur [voir aussi (Bergey, 1916; Savage et Bude, 2014; Scalas et al, 2017) ;

<https://enviroliteracy.org/environment-society/environmental-health/microorganisms/> ;

<http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html> ;

<https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2013/04/whose-planet-is-it-anyway-1.html>, et en français, par exemple <https://www.encyclopedie-environnement.org> ;

<http://naturealsacebossue.over-blog.com/2018/08/plantes-et-microbes-passionant.html>]. Ils devraient aussi être disponibles en tant que service public de formation continue, mettant à jour la connaissance des personnes compétentes en microbiologie et permettant à ceux qui n'ont pas reçu de formation scolaire d'apprendre les principes et de se tenir au courant des nouveaux progrès de la microbiologie. Bien que le développement de ces programmes incombe aux organismes d'enseignement concernés, nous proposons une série de thèmes pour faciliter leur mise en œuvre : —un cadre d'*initiation à la microbiologie (L'enseignement de la microbiologie à l'école et à la maternelle : un cadre centré sur l'expérience de l'enfant, Timmis, KN et al., en préparation)*— et un format d'enseignement comprenant une question initiale simple relative à l'expérience quotidienne, suivie de la présentation de la microbiologie sous-jacente dans un langage simple, de sa pertinence pour les *Grands Défis* et les ODD, de sa relation avec les processus de la biogéosphère, de la santé planétaire et surtout, de ses conséquences pour faire des choix, par exemple :

- Papa, j'aimerais vraiment un hamburger au foot cet après-midi, mais Juliette m'a dit hier que nourrir les vaches réchauffaient la planète : c'est vrai ? (*Gaz à effet de serre : sources et pièges, digestion par le rumen, émissions de méthane, réchauffement de la planète, élévation du niveau de la mer et conditions météorologiques extrêmes, incidence sur nous, ODD-13 : lutter contre le changement climatique*) ;
- Maman, on nous a dit en classe que Jeanne avait la rougeole : pourquoi n'était-elle pas vaccinée comme moi ? (*Efficacité du vaccin, risques, corrélations et liens de*

causalité, équilibre risques/bénéfices, immunité collective, avantages indirects de la vaccination, ODD-3 : garantir une vie saine) ;

- Maman, tu me dis toujours de me laver les mains après être allée aux toilettes, parce que le caca est mauvais. Mais qu'est-ce qui lui arrive quand on tire la chasse ?
(Traitement des eaux usées, agents pathogènes fécaux, indicateurs fécaux en tant qu'indicateurs de la charge en agents pathogènes fécaux et de la qualité de l'eau, ODD-6 : assainissement pour tous) ;
- Madame, pourquoi les plantes ne poussent pas dans le noir ? *(Les plantes et les microbes photosynthétiques capturent l'énergie solaire et fabriquent de la biomasse : la base du réseau alimentaire ; la photosynthèse, les chloroplastes, les mitochondries proviennent de microbes anciens ; les plantes et les microbes photosynthétiques fournissent la nourriture du monde entier, de l'énergie, des matières premières renouvelables, des produits chimiques, etc. polluant, développement durable, ODD-2 : Éliminer la faim, ODD-7 : Garantir l'accès à une énergie durable, ODD-12 : assurer des modes de production durables)*

Cette approche a le mérite de montrer que la pertinence / l'importance de la microbiologie pour la société et sera évidente pour les élèves dès le début de la leçon.

Les objectifs de la collection de sujets sélectionnés sont les suivants :

- *contribuer à l'élaboration de programmes d'enseignement adaptés aux différents âges, dans divers contextes sociétaux et culturels,*
- *mettre au jour les principaux processus et problèmes planétaires, biologiques et humains impactés ou sous-tendus par les activités écophysiologiques microbiennes,*
- *expliquer comment ces activités affectent notre bien-être et celui des autres membres de la biosphère,*
- *révéler en quoi les activités microbiennes sont influencées par nos actions et les conséquences qui en découlent,*
- *indiquer comment nous pouvons orienter ou exploiter les activités microbiennes à des fins personnelles, humaines, planétaires et contribuer à la réalisation des objectifs de développement durable,*
- *donner une perspective de notre place dans le monde au sens large et de la manière dont nous sommes connectés par les microbes dans le « village planétaire » et avec le reste de la biosphère.*

Le cadre des connaissances pour l'initiation à la microbiologie consistera initialement en une centaine de sujets centrés sur l'expérience, regroupés dans les catégories Bien-être humain, Planète Terre, Eau, Végétaux, Animaux, Nutrition-Boissons et Biotechnologie,

qui seront bientôt disponibles, gratuits, en ligne. Ces sujets seront certainement améliorés et affinés au fil du temps.

Il faut souligner que, malgré l'invisibilité des sujets en question —les microbes— l'enseignement des thèmes de la microbiologie peut être particulièrement fascinant pour les enfants, car la microbiologie est un sujet expérimental pratique qui permet de mener des expériences étonnantes à différents niveaux scolaires. Des suggestions d'expériences simples concernant chaque catégorie de sujet seront aussi disponibles en ligne. Par ailleurs, de nombreux processus microbiens intéressants sont développés par des entreprises commerciales (brasserie, fabrication du fromage, fabrication du pain, fermentations, etc.) et des organismes publics (usines de traitement des déchets, laboratoires de diagnostic, etc.) qui peuvent, en fonction de leur situation géographique, être accessibles localement, conduisant à faire l'expérience de première main au moyen d'excursions scolaires. Encore une fois, une liste illustrant des excursions possibles, avec des suggestions d'organisation pour les enseignants sur la manière d'orchestrer l'expérience pour communiquer un maximum de connaissances, d'intérêt et de plaisir pour les élèves, sera disponible en ligne.

Les sujets proposés dans ce contexte ne sont ni exhaustifs, ni structurés de manière à être traités dans leur intégralité pour un groupe d'âge particulier. À l'exception de certains sujets introductifs, la plupart d'entre eux seront compréhensibles en tant qu'entités autonomes et constitueront donc un système modulaire d'options qu'on pourra choisir et mettre en correspondance, en fonction des préférences de l'enseignant et des styles et objectifs d'apprentissage des élèves. Il n'en reste pas moins que l'objectif primordial est que les enfants se familiarisent avec tous les sujets au cours de leur parcours scolaire.

Il faut aussi souligner qu'il ne s'agit pas de créer une *initiation à la microbiologie* qui consisterait à enseigner la discipline de la microbiologie et à créer des professionnels de la microbiologie. L'intention est plutôt de fournir un socle de connaissances adéquat décrivant les activités microbiennes qui sont précisément essentielles à la société pour améliorer la vie quotidienne, élaborer des politiques fondées sur des preuves tangibles et gérer la planète.

Et, il est essentiel que la société en vienne rapidement à comprendre que le préjugé répandu que les microbes sont nos ennemis est non seulement faux, mais qu'il engendre des pratiques comportementales dangereuses. Les microbes sont comme les êtres humains : la plupart n'ont que peu ou pas d'influence directe sur nos vies, beaucoup sont très bénéfiques et seuls quelques-uns sont dangereux pour nous. Et comme les êtres humains, ce sont les mauvais —ceux qui causent les maladies ou abîment les choses—

qui attirent le plus l'attention et que nous connaissons le mieux. Néanmoins, il est crucial que les microbes dans leur ensemble soient décrits comme des amis, car ils nous aident non seulement discrètement dans notre vie, mais peuvent aussi être appelés à résoudre des problèmes majeurs, comme l'accroissement des rendements alimentaires, alors que la fraction microbienne qui forme 50% de nos propres cellules sont notre famille la plus proche.

Il est essentiel que la connaissance des microbes dans la société soit développée afin de dissiper la croyance et la pratique néfastes de la microbiophobie. C'est l'un des messages centraux de l'aide à l'initiation à la microbiologie qui sera au premier plan de son utilisation dans les programmes scolaires.

Allons y !

Les *macroorganismes* —animaux et plantes— ne sont pas seulement des acteurs majeurs de la biosphère mais ils sont aussi partie intégrante de la société humaine, de l'évolution, de la civilisation et de la psyché humaine elle-même. Quand ce sont des espèces domestiquées, ils fournissent nourriture, textiles, confort, plaisir et bien-être et, quand ce sont des espèces sauvages, ils sont sources d'émerveillement, de loisirs et de variété.

La conservation des *macroorganismes* est notre responsabilité primordiale. Pour cette raison, la biologie —essentiellement la biologie animale et végétale— a souvent été un sujet central de l'éducation, à la fois en tant que telle et en tant que fondement de l'enseignement de la biologie humaine et de la reproduction. L'intérêt populaire pour les *macroorganismes* et l'appréciation de leur importance ont considérablement augmenté ces dernières années au Royaume-Uni grâce aux documentaires télévisés présentés par David Attenborough (<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life-series-ranked/480678/>). En revanche, en raison de leur taille, les microbes sont généralement invisibles du grand public —*loin des yeux, loin du cœur*— et ne sont donc généralement pas affichés sur les écrans radar, sauf lorsqu'ils causent un chaos qui attire les médias de masse, comme pour le SIDA, Ebola ou les marées rouges. Cette composante invisible de la biosphère est largement négligée dans l'enseignement général. Pourtant, ces dernières années, des découvertes étonnantes sur les microbiomes et leurs influences variées sur la biologie et le comportement humains ont considérablement sensibilisé la population aux microbes (<https://oceans.taraexpeditions.org/m/qui-est-tara/les-expeditions/tara-oceans/> ; <http://www.cnrs.fr/cnrs-images/tara-oceans/>).

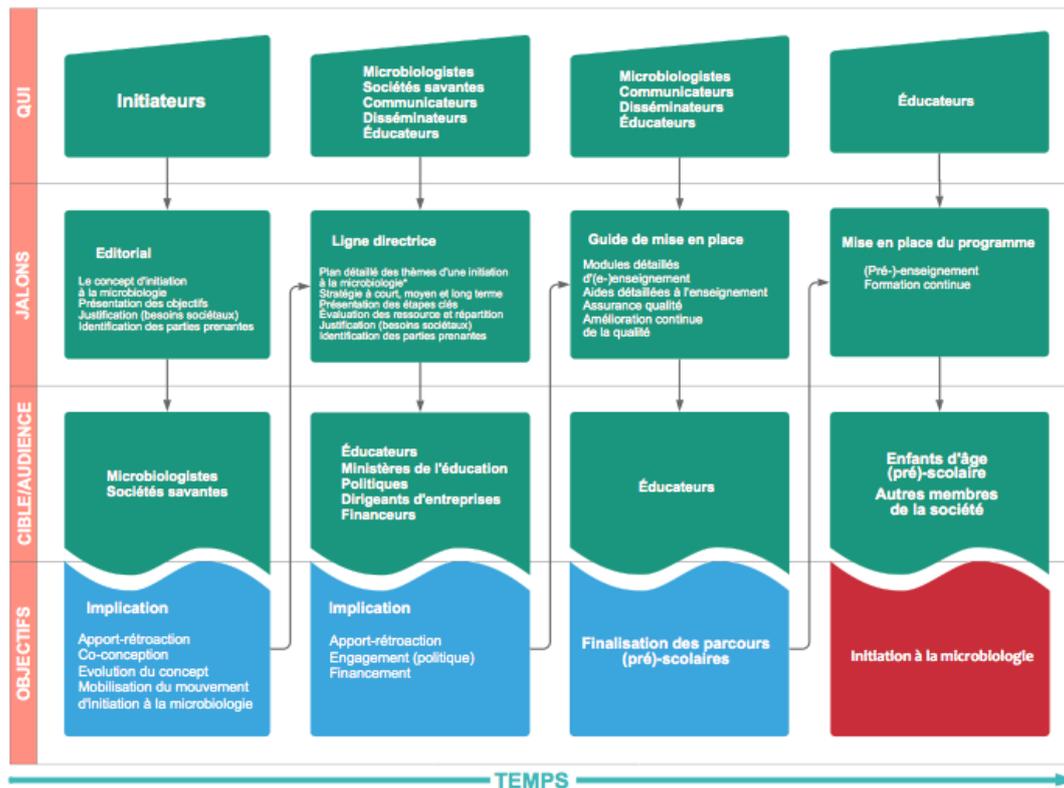


Figure 1. L'initiative « Initiation à la Microbiologie »

* L'enseignement de la microbiologie à l'école et à la maternelle : format pour un enseignement centré sur l'enfant, Timmis, K. N. et al., en préparation

Malgré cela, les microbes restent des entités essentiellement abstraites, moins compréhensibles qu'Internet et situés au même niveau que comprendre le fonctionnement de la mémoire. Mais leur signification est infiniment plus grande qu'Internet — nous avons survécu sans Internet jusqu'à son arrivée, et nous ne pourrions pas survivre, nous n'aurions jamais pu survivre sans la contribution vitale de nos microbes. Il est donc essentiel que le monde microbien, dans toute son étonnante beauté, inhérente à la beauté microscopique, passe de l'abstraction à la perception visuelle et prenne sa place légitime dans la psyché humaine. Les aides visuelles occuperont donc une place centrale dans les cours d'initiation et la tendance à la mode de l'« art microbien » (voir par exemple, <https://www.bbc.com/news/GB-england-oxfordshire-45099420>) stimulera l'imagination. Cela doit devenir si banal que, lorsque nous discutons des microbes, nos enfants puissent se les représenter, les avoir immédiatement à l'esprit et imaginer ce qu'ils font. À mesure que les microbes émergent de l'abstraction et prennent forme, ils deviennent réels ; les enfants auront leurs favoris ! Les ours en peluche et les doudous laineux seront rejoints par Methano, Wolbo ou Diatoma, qui auront tous leur individualité (anthropocentrique) inventée

par des fabricants de jouets créatifs. Ils pourraient même devenir les favoris des dessins animés à la télévision dans un avenir pas trop éloigné.

Cet éditorial a trois objectifs fondamentaux, mis en contexte dans la Figure 1, feuille de route décrivant comment introduire l'initiation à la microbiologie dans les programmes scolaires.

Le premier souligne le manque criant des compétences et des connaissances critiques nécessaires pour permettre à la société de prendre les décisions appropriées, fondées sur la preuve scientifique et non les croyances, à propos de nombreux problèmes sociétaux ou liés à la personne, et présente les arguments en faveur d'une société éduquée en microbiologie, ce qu'il faudra réaliser par la création d'un cadre d'initiation aux thèmes clés de la microbiologie au sein de l'éducation de base.

Le second cherche à encourager les microbiologistes, les sociétés savantes de microbiologie et les professionnels compétents à participer à cette initiative et à y contribuer, en développant mieux le cadre de base, en apportant des idées et du matériel pour des sujets, des vidéos et des expériences en classe, et développer et rechercher des fonds pour la création des outils et matériels pédagogiques nécessaires.

Et le troisième, le plus important de cet éditorial, est d'inciter les microbiologistes, les sociétés savantes de microbiologie et les professionnels compétents en contact avec eux, à influencer les éducateurs, les politiciens, les chefs d'entreprise, les organismes gouvernementaux et non gouvernementaux concernés, etc. ainsi que les puissances internationales afin de provoquer un effort international pour convaincre ces facilitateurs de la nécessité cruciale d'initier la société à la microbiologie (*nous sommes tous acteurs de la santé planétaire et humaine : pouvons-nous vraiment nous permettre d'ignorer la base fondamentale de notre capacité à résoudre les crises actuelles ?*) et de les convaincre de défendre son progrès vers la prochaine étape, la mise en œuvre. Pour faciliter la chose, nous avons dans cet éditorial, dans la mesure du possible, évité les termes spécialisés afin de pouvoir l'utiliser à destination de publics variés.

Remerciements

Cette initiative s'appuie sur les efforts antérieurs de microbiologistes inspirés qui ont reconnu le besoin fondamental d'améliorer les connaissances en microbiologie de nos sociétés. En sensibilisant le public à la question et en créant d'excellents textes centrés sur l'enfant et divers matériels pédagogiques qui peuvent être intégrés aux programmes d'initiation à la microbiologie et en facilitant leur évolution, ils ont jeté une base superbe pour le développement d'une véritable politique de l'initiation à la microbiologie.

Références (les articles pertinents sont tous en anglais)

- Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. *Nat Rev Immunol* 18: 105–120.
- Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. *Rev Infect Dis* 1: 530–539.
- Bergey, D.H. (1916) The pedagogics of bacteriology. *J Bacteriol* 1: 5–14.
- Brown, J.M., and Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. *Annu Rev Med* 66: 343–359.
- Brüssow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance – and possible solutions. *Micro Biotech* 10: 1041–1046.
- Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environ Microbiol* 8: 1137–1144.
- Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. *Micro Biotech* 10: 1979–1983.
- Christen, V., Kunz, P.Y., and Fent, K. (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: can we better protect our pollinators? *Environ Pollut* 243: 1588–1601.
- Curtis, T. (2006) Microbial ecologists: it's time to 'go large'. *Nat Rev Microbiol* 4: 488.
- de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. *Micro Biotech* 10: 995–998.
- de Lorenzo, V., Marliere, P., and Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. *Micro Biotech* 9: 618–625.
- Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. *Nat Rev Microbiol* 17: 196. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z>.
- Falkow, S. (1970) Antibiotics in animal feeds. *N Engl J Med* 282: 693–694.
- Falkow, S. (1975) *Infectious Multiple Drug Resistance*. London: Pion Ltd.
- Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F., et al. (1961) Episomic transfer between *Salmonella typhosa* and *Serratia marcescens*. *Genetics* 46: 703–706.
- Finlay, B.B., and Arrieta, M.-C. (2016) *Let them Eat Dirt*. Vancouver, B.C., Canada: Greystone Books.
- Garcia, J.L., de Vicente, M., and Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Micro Biotech* 10: 1017–1024.
- Gilbert, J.A., Knight, R., and Blakeslee, S. (2017) *Dirt is Good*. New York, USA: St Martin's Press.
- Gilbert, J.A., and Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? *Science* 353: 348–334.
- Godfray, H.C., Blacquière, T., Field, L.M., et al. (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proc Biol Sci* 282: 20151821.
- Gomez de Agüero, M., Ganai-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., et al. (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. *Science* 351: 1296–1302.
- Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D., Nidzgorski, D.A., Millet, D.B., and Baker, L.A. (2017) Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. *Proc Natl Acad Sci U S A* 114: 4177–4182.
- Lane, S., Noni, E., MacDonald, N.E., Marti, M., and Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: analysis of three years of WHO/UNICEF joint reporting form data-2015–2017. *Vaccine* 36: 3861–3867.
- Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U., Cho, J.S., Kim, J.W., Shin, J.H., et al. (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. *Nat Catal* 2: 18–33.
- Levy, S.B. (1982) Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. *Lancet* 2: 83–88.
- Levy, S.B., FitzGerald, G.B., and Maccone, A.B. (1976) Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. *Nature* 260: 40–42.
- Microbial Biotechnology. (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 979–1274.
- Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S., et al. (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. *Microbiol Mol Biol Rev* 81: e00036–e00017.
- Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? *Comptes Rend Biol* 340: 403–405.
- Moossavi, S., Miliku, K., Sepehri, S., Khafipour, E., and Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. *Front Pediatr* 6: 197. <https://doi.org/10.3389/fped.2018.00197>.
- Motta, E.V.S., Raymann, K., and Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc Natl Acad Sci U S A* 115: 10305–10310.
- Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M., Trzoss, L.L., Nam, S.J., Shirakawa, K.T., et al. (2018) A

- commensal strain of *Staphylococcus epidermidis* protects against skin neoplasia. *Sci Adv* 4: eaao4502.
- Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Micro Biotech* 10: 1102–1105.
- Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A., and Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. *J Environ Manage* 150: 427–434.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472–475.
- Rossen, N.G., MacDonald, J.K., de Vries, E.M., D'Haens, G. R., de Vos, W.M., Zoetendal, E.G., and Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. *World J Gastroenterol* 21: 5359–5371.
- Savage, A.F., and Jude, B.A. (2014) Starting small: using microbiology to foster scientific literacy. *Trends Microbiol* 22: 365–367.
- Scalas, D., Roana, J., Mandras, N., et al. (2017) The Microbiological@mind project: a public engagement initiative of Turin University bringing microbiology and health education into primary schools. *Int J Antimicrob Agents* 50: 588–592.
- Sender, R., Fuchs, S., and Milo, R. (2016) Are we really vastly outnumbered? Revisiting the ratio of bacterial to host cells in humans. *Cell* 164: 337–340.
- Sharma, A., and Gilbert, J.A. (2018) Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol* 44: 79–87.
- Timmis, K.N., de Lorenzo, V., Verstraete, W., et al. (2017a) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Micro Biotech* 10: 1137–1144.
- Timmis, K.N., de Vos, W.M., Ramos, J.L., et al. (2017b) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 984–987.
- Trinh, P., Zaneveld, J.R., Safranek, S., and Rabinowitz, P.M. (2018) One health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. *Front Public Health* 30: 235. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00235>.
- Trivedi, P., Schenk, P.M., Wallenstein, M.D., and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Micro Biotech* 10: 999–1003.
- Verstraete, W., and de Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Micro Biotech* 10: 988–994.
- Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., et al. (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. *Nat Commun* 9: 5091.
- Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z., and Li, L. (2017) The human microbiota in health and disease. *Engineering* 3: 71–82.
- Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. *Bacteriol Rev* 27: 87–115.
- Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. *N Engl J Med* 275: 888–894.
- Whipps, J.M., Lewis, K., and Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitism and plant disease control 161–187. In *Fungi in Biological Control Systems*, Burge, N.M.(ed). Manchester, UK.: Manchester University Press, p. 176.
- zur Hausen, H., Bund, T., and de Villiers, E.M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. *Curr Top Microbiol Immunol* 407: 83–116.