

DANS LES OCÉANS, LES LACS ET LES ÉTANGS, LES ÊTRES VIVANTS PEUVENT DEVENIR CE QU'ILS MANGENT

Zachary J. F. Fedder * et David R. Smith

Département de Biologie, Université de l'Ontario de l'ouest, London, ON, Canada

La majeure partie de la biodiversité de notre planète est invisible à l'œil nu. Mais ce n'est pas parce qu'elle concerne des êtres minuscules qu'elle est ennuyeuse ou sans importance ! Ces organismes connus sous le nom de microbes, souvent constitués d'une seule cellule, ont de nombreuses capacités impressionnantes et des qualités étonnantes. Une grande partie de la diversité microbienne que nous observons aujourd'hui a été possible grâce au partage de l'ADN entre espèces différentes par un processus appelé endosymbiose, dans lequel un organisme (l'endosymbiote) est capturé à l'intérieur d'un autre (appelé hôte). Ainsi, un ancien événement d'endosymbiose a donné naissance aux chloroplastes grâce auxquels les plantes et les algues vertes convertissent l'énergie de la lumière du soleil en énergie chimique. Les chloroplastes ont ensuite été transmis, comme des cartes Pokémon, à d'autres organismes par le biais d'événements endosymbiotiques plus récents, provoquant une explosion d'organismes capables de photosynthèse à travers le monde vivant.

LES MICROBES DIRIGENT LE MONDE

Il y a des millions d'espèces sur Terre, et la plupart sont des microbes, des organismes invisibles à l'œil nu. Toute cette diversité se répartit en deux branches principales : les procaryotes et les eucaryotes (Figure 1). Les animaux, les plantes et les champignons, par exemple, sont des eucaryotes ; leurs cellules contiennent des structures appelées organites. Les organites sont entourés d'au moins une membrane (barrière qui ne laisse entrer et sortir que certaines choses) et ils effectuent des tâches spécifiques indispensables au fonctionnement des cellules. Les organites distinguent les eucaryotes des cellules « plus simples » appelées procaryotes. Alors que les eucaryotes peuvent être constitués d'une ou de plusieurs cellules, les procaryotes sont le plus souvent des organismes constitués d'une seule cellule (unicellulaires). Les bactéries sont des exemples classiques de procaryotes. Une autre différence clé entre les eucaryotes et les procaryotes

est que les eucaryotes ont un « organite » appelé le noyau, qui renferme leur ADN (information génétique transmise aux descendants), alors que les procaryotes n'ont pas de noyau : leur ADN est plutôt « flottant » à l'intérieur de la cellule. Au microscope, les cellules eucaryotes sont généralement beaucoup plus grandes et plus complexes que les cellules procaryotes (Figure 1).

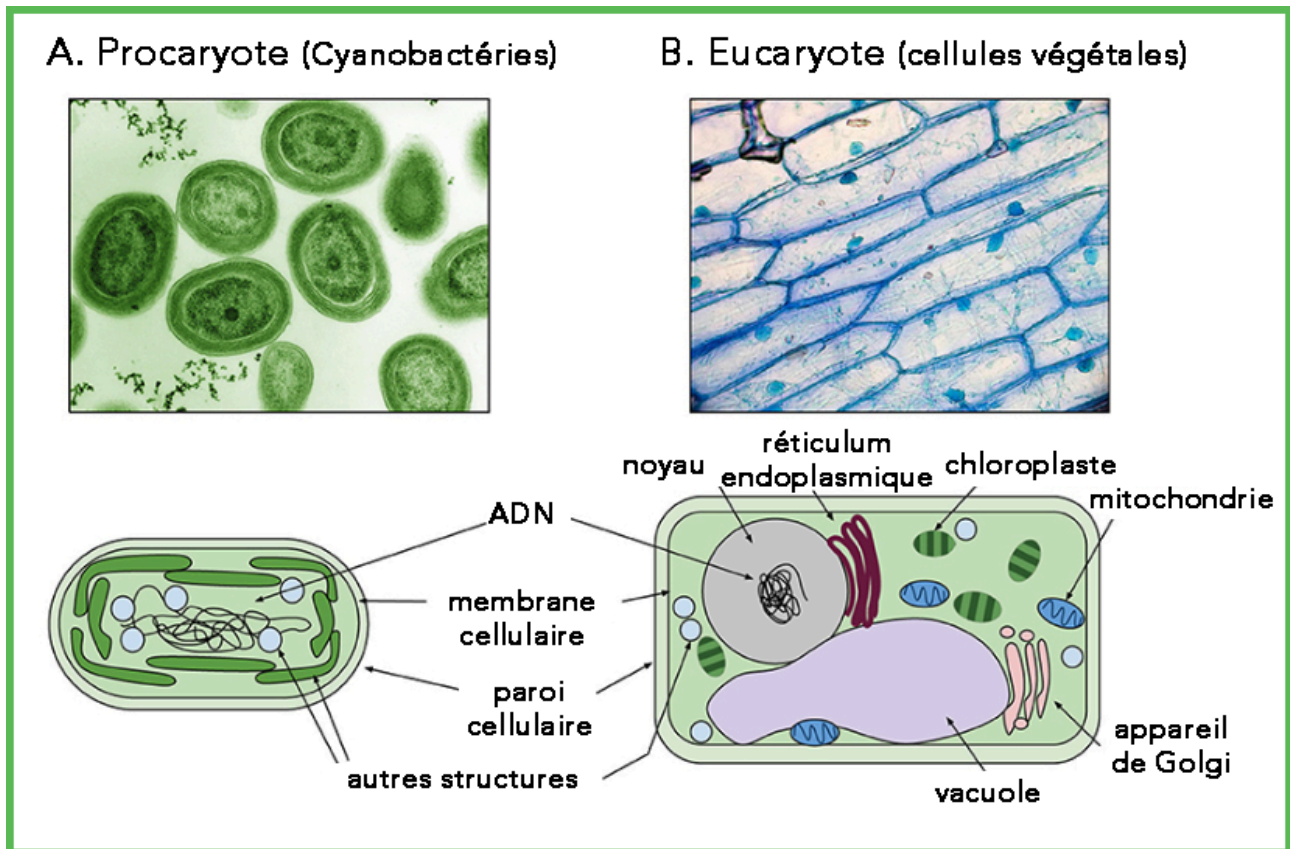


Figure 1. (A) Les procaryotes, comme les cyanobactéries, sont généralement plus petits et moins complexes que les cellules eucaryotes. Ils n'ont pas de noyau renfermant leur ADN. (B) Les eucaryotes, comme ces cellules végétales (colorées en bleu), ont diverses structures entourées de membranes appelées organites qui remplissent des fonctions importantes à l'intérieur de la cellule. Les cellules eucaryotes contiennent un noyau où se trouve leur ADN. Elles sont généralement environ 100 fois plus grandes que les cellules procaryotes – à peu près la différence qu'il y a entre un grain de riz et un ballon de plage (Crédits photo : Wikipedia Commons).

Il y a plus d'un million d'espèces eucaryotes sur Terre [1], et la plupart d'entre elles ne sont ni des animaux ni des plantes, ce sont des microbes. Une grande partie de cette biodiversité microscopique existe parce que les microbes eucaryotes adorent « se manger » les uns les autres. Et dans le cas des microbes, qui tu es peut être déterminé par ce que tu manges !

Dans cet article, nous nous concentrons sur les plastes, un type d'organites présents dans certaines cellules eucaryotes. Les plastes produisent et stockent des produits chimiques nécessaires à la survie de la cellule hôte. Les chloroplastes présents dans les plantes et les algues sont une variété de plastes qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique, un processus connu sous le nom de photosynthèse. Les plastes sont responsables d'une grande partie de la biodiversité observée sur Terre aujourd'hui, en particulier celle des microbes eucaryotes.

AVANT LES PLANTES ET LES ANIMAUX

Il y a bien longtemps, avant l'apparition des animaux et des plantes, les microbes dominaient les océans, les lacs et les étangs de la Terre (Figure 2A). Ce fut le cas pendant la majeure partie de l'histoire de la Terre. Tout comme les animaux d'aujourd'hui, les

microbes eucaryotes avaient besoin de manger pour se procurer l'énergie nécessaire à leur survie. Aucun eucaryote ne pouvait utiliser la lumière du soleil pour produire sa propre énergie – seuls certains microbes procaryotes, en particulier un type de bactéries appelé cyanobactéries (Figure 1A), pouvaient effectuer la photosynthèse.

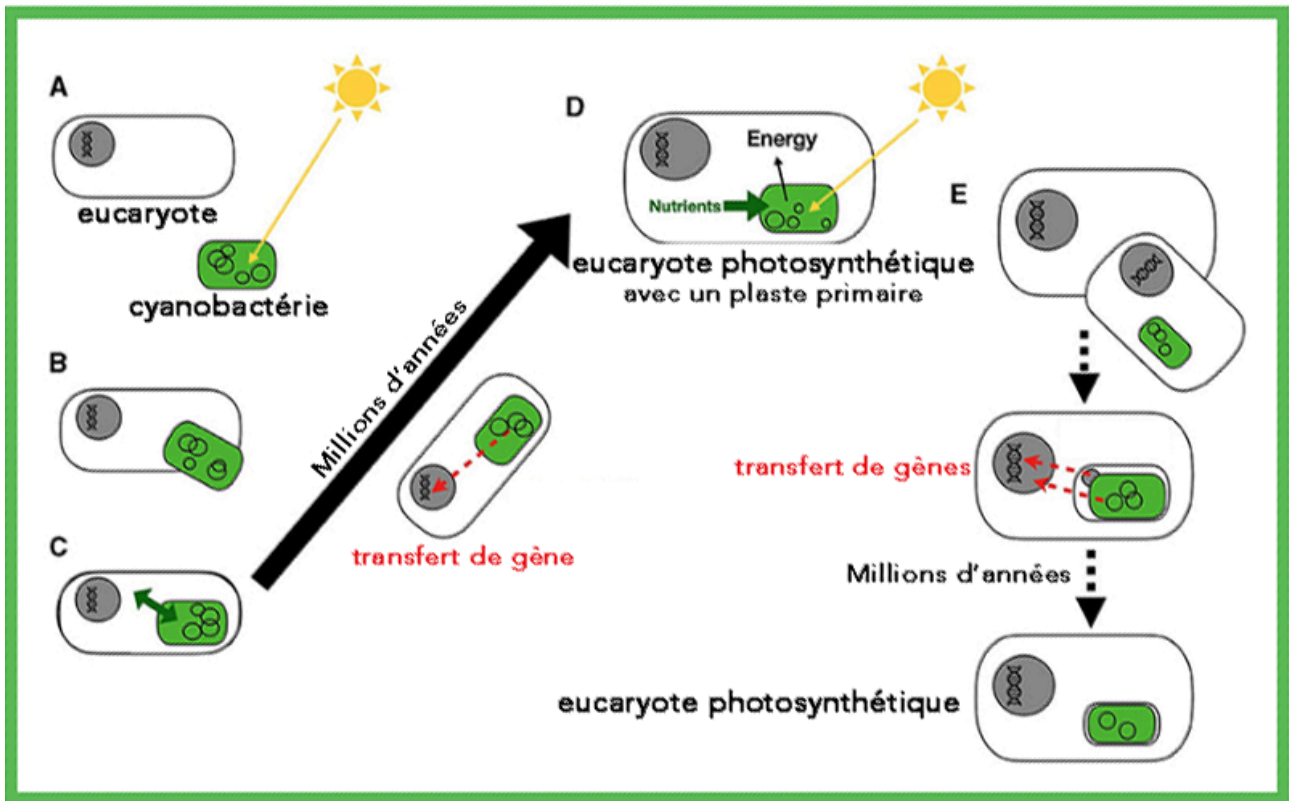


Figure 2. (A) Un eucaryote et une cyanobactérie vivant indépendamment il y a des milliards d'années. Les cyanobactéries convertissent l'énergie lumineuse du soleil en énergie chimique en utilisant la photosynthèse. (B) Un eucaryote englutit une cyanobactérie. (C) Endosymbiose primaire, dans laquelle la bactérie reçoit une protection et des nutriments en échange de l'énergie qu'elle fournit par la photosynthèse. Pendant des millions d'années, des gènes de la cyanobactérie ont été progressivement transférés vers le noyau de l'hôte tandis que d'autres gènes ont été perdus. (D) L'endosymbiote est finalement devenu un organite – un plaste primaire. (E) L'endosymbiose de plaste d'ordre supérieur implique un eucaryote sans plaste englobant un autre eucaryote avec un plaste primaire, dans cet exemple un chloroplaste effectuant la photosynthèse.

Il y a plus d'un milliard d'années, un eucaryote a englouti une cyanobactérie photosynthétique (Figure 2B) [2]. Habituellement, ça n'a que peu de conséquences – de nombreux eucaryotes chassent et engloutissent leurs proies, les digèrent, en extraient les nutriments et continuent leur journée. Mais pas cette fois ! Pour diverses raisons, cette cyanobactérie particulière n'a pas été digérée. En fait, au fil du temps, elle a continué à vivre à l'intérieur de l'eucaryote. Ce type de relation est appelé endosymbiose parce qu'un organisme (appelé **endosymbiote**) vit à l'intérieur d'un autre (appelé hôte) et que chacun bénéficie de l'autre. Dans ce cas, l'eucaryote protégeait et nourrissait la cyanobactérie et, en retour, la cyanobactérie fournissait à l'eucaryote l'énergie produite par photosynthèse (Figure 2C). Au fur et à mesure que l'hôte se reproduisait (se divisant en nouvelles cellules), l'endosymbiote restait à l'intérieur de l'hôte et se divisait aussi. Toutes les cellules qui descendaient de l'hôte contenaient un endosymbiote qui lui fournissait de l'énergie. Finalement, pendant des millions d'années, les descendants de cette cyanobactérie ont lentement perdu toute indépendance et sont progressivement passés d'un endosymbiote (un organisme séparé) à une partie de la cellule eucaryote – un organite que nous appelons maintenant un plaste (Figure 2D).

Cet événement est connu sous le nom d'**endosymbiose primaire** car il impliquait un procaryote (la cyanobactérie) et a donné naissance à un **plaste primaire**. Les scientifiques pensent que les mitochondries ont évolué par un processus similaire : un ancêtre des eucaryotes a englouti une bactérie, qui est finalement devenue l'organite que nous appelons une mitochondrie. Cette endosymbiose primaire mitochondriale s'est produite il y a beaucoup plus longtemps que l'endosymbiose primaire des plastides. Trois principaux groupes sont nés de cet événement endosymbiotique primaire des plastides : les algues rouges, les algues vertes et les plantes terrestres, et un groupe d'algues d'eau douce appelées glaucophytes (**Figure 3, A à F**) [2, 3]. Les organismes de ces trois groupes contiennent tous un plaste primaire. En d'autres termes, sans endosymbiose primaire, les plantes et les algues n'existeraient pas !

AUCUN EUCARYOTE N'EST EN SÉCURITÉ

L'endosymbiose de plaste peut également se produire entre eucaryotes. Par exemple, les algues rouges et vertes qui contiennent des plastides, sont souvent englouties comme nourriture par d'autres types d'eucaryotes. Donc, tu l'as deviné, certaines algues rouges et vertes ont évolué (via l'endosymbiose) en passant de simple aliment à un véritable chloroplaste logé à l'intérieur de divers autres organismes.

Ce processus est connu sous le nom d'**endosymbiose d'ordre supérieur** (**Figure 2E**). Lorsque les eucaryotes deviennent finalement des organites dans un autre eucaryote, ils sont connus sous le nom de plastides complexes dont la principale caractéristique est d'être entouré de plus de deux membranes (contrairement aux plastides primaires qui en ont deux). Mais le point le plus important à retenir est que l'endosymbiose d'ordre supérieur a permis à la photosynthèse de se propager dans le monde eucaryote chez des organismes vraiment intéressants, ceux dont tu ne penserais pas nécessairement qu'ils possèdent des plastides [3] (**Figure 3**).

TU ES TRANSFORMÉ PAR CE QUE TU ENGLOUTIS

Parmi les nombreux avantages de l'endosymbiose, il peut y avoir l'échange réciproque d'énergie et de nutriments entre l'hôte et l'endosymbiote. Mais cette relation étroite peut aussi finir par mélanger l'ADN des deux organismes, dans un processus connu sous le nom de **transfert endosymbiotique de gènes** [4]. En termes simples, cela implique le passage d'ADN de l'endosymbiote vers le génome de l'hôte, un peu comme le transfert d'informations d'un lecteur externe vers un ordinateur de bureau.



Figure 3. (A-C) Exemples d'algues rouges multicellulaires et unicellulaires (Crédits photo : Encyclopædia Britannica ; Wikipedia Commons ; Instruments Direct Services Limited). (D, E) Exemples d'algues vertes multicellulaires et unicellulaires (Crédit photo : Encyclopædia Britannica ; Département de biologie de Stevens Point, Université du Wisconsin). (F) Un glaucophyte, algue d'eau douce avec des plastes primaires (Crédit photo : Wikipedia Commons). (G) Dinoflagellés vus au microscope électronique (Crédit photo Flickr). (H, I) Diatomées vues au microscope électronique (Crédits photo : @@Randolph Femmer, USGS Library of Images From Life ; Wikipédia Commons).

Le transfert endosymbiotique est peut-être l'élément clé dans la transformation de l'endosymbiote en organite, car il permet à l'hôte d'acquérir de plus en plus de contrôle sur son résident cellulaire. Un autre fait important est la perte de gènes par l'endosymbiote, ce qui le rend de plus en plus dépendant de l'hôte. Transfert et perte de gènes peuvent parfois conduire à des caractéristiques génétiques très inhabituelles. Certaines algues diatomées, par exemple, ont des plastes spéciaux qui leur permettent de produire des produits chimiques qui les aident à survivre même dans les conditions les plus difficiles, comme dans l'océan Antarctique où l'eau est très pauvre en fer (un ingrédient essentiel pour la plupart) [5].

ENCORE PLUS DE DIVERSITÉ !

Tous les événements endosymbiotiques de plastes ne réussissent pas, et il faut parfois plusieurs essais pour bien faire les choses [3, 6]. L'ADN de certaines algues porte en effet les marques d'endosymbioses de plastes d'ordre supérieur plus anciennes. Elles ont été interrompues avant leur achèvement, ou bien elles ont abouti mais le plaste a finalement été perdu. Penses-y comme à un panneau solaire sur une maison dont l'installation a été arrêtée avant la fin ou a été emporté pendant une tempête alors qu'il était bien installé. Quelle qu'en soit la raison, la maison aura souvent des « cicatrices » de l'installation initiale sous forme de marques sur le toit, etc. C'est comparable à ce qu'on trouve dans

les génomes de certains eucaryotes qui peuvent contenir des morceaux d'ADN provenant d'anciens événements endosymbiotiques [6].

Les génomes de certaines algues, les diatomées (Figure 3), en sont un excellent exemple : elles contiennent un mélange aléatoire de dizaines de morceaux d'ADN provenant de nombreux organismes. Imagine essayer de faire des sushis avec une recette qui contient des instructions pour faire une sauce pour des pâtes et des tacos ! Mais pour les diatomées, ce gloubiboulga fonctionne comme un charme. En fait, les diatomées sont parmi les groupes d'algues les plus abondantes et les plus diversifiées sur Terre [6]. Certains pensent que des centaines, voire des milliers de nouveaux gènes et combinaisons de gènes ont évolué à partir du mélange de génomes résultant d'endosymbioses, ouvrant la voie à de nouvelles capacités et à de nouvelles espèces adaptées à la vie même dans les environnements les plus difficiles.

Nous pourrions continuer pendant une centaine de pages à décrire les nombreuses caractéristiques et résultats étonnants de l'endosymbiose de plastides. Il existe plus d'un million d'espèces de microbes eucaryotes, chacune avec des caractéristiques uniques et des histoires évolutives compliquées. En résumé, non seulement l'endosymbiose est un processus biologique fascinant, mais sans elle, une grande partie de la biodiversité massive que nous voyons aujourd'hui n'existerait pas.

GLOSSAIRE

BIODIVERSITÉ. Variété des êtres vivants dans le monde ou dans une certaine région.

ENDOSYMBIOTE. Organisme qui vit à l'intérieur d'un autre organisme, impliquant souvent un échange de ressources.

ENDOSYMBIOSE D'ORDRE SUPÉRIEUR. Endosymbiose impliquant des eucaryotes, où un eucaryote devient le plaste d'un autre eucaryote.

ENDOSYMBIOSE PRIMAIRE. Événement initial qui s'est produit il y a plus d'un milliard d'années lorsqu'un procaryote (comme une cyanobactérie) a été englouti par un eucaryote et est finalement devenu un organite connu sous le nom de plaste.

EUCARYOTES. Organismes avec des cellules complexes qui contiennent des organites entourés de membranes, un noyau contenant l'ADN, et possèdent d'autres caractéristiques complexes.

PLASTE. Type d'organite qui a évolué à partir d'un endosymbiote. Les plastides produisent des produits chimiques essentiels (tels que les sucres) utilisés par la cellule comme source d'énergie.

PLASTE PRIMAIRE. Plaste qui a évolué à partir d'une endosymbiose primaire.

TRANSFERT ENDOSYMBIOTIQUE DE GÈNES. Transfert de gènes d'un endosymbiote dans le génome de l'hôte.

RÉFÉRENCES

1. Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G. B., and Worm, B. 2011. How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biol.* 9:e1001127. doi: 10.1371/journal.pbio.1001127
2. Burki, F., Roger, A. J., Brown, M. W., and Simpson, A. G. B. 2019. The new tree of eukaryotes. *Trends Ecol. Evol.* 35:43–55. doi: 10.1016/j.tree.2019.08.008
3. Sibbald, S. J., and Archibald, J. M. 2020. Genomic insights into plastid evolution. *Genome Biol. Evol.* 12:978–90. doi: 10.1093/gbe/evaa096
4. Timmis, J. N., Ayliffe, M. A., Huang, C. Y., and Martin, W. 2004. Endosymbiotic gene

transfer: organelle genomes forge eukaryotic chromosomes. *Nat. Rev. Genet.* 5:123–35. doi: 10.1038/nrg1271

5. Bowler, C., Vardi, A., and Allen, A. E. 2010. Oceanic and biogeochemical insights from diatom genomes. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2:333–65. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081051

6. Dorrell, R. G., and Bowler, C. 2017. "Secondary plastids of stramenopiles," in *Secondary Endosymbioses. Advances in Botanical Research*, Vol 84, ed Y. Hirakawa (London: Academic Press), 57–93.

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec des modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2023.1010245 ; Fedder ZJF and Smith DR (2023) In Oceans, Lakes And Ponds, Living Things Can Become What They Eat. *Front. Young Minds* 11:1010245).

TRADUCTEUR : Jean-Marie Clément, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITEUR : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTORS SCIENTIFIQUES : Charlotte André (IRIM), et Océane Paris (IRMB), Montpellier, France

JEUNES EXAMINATEURS

ANTOINE, 15 ANS.

Je m'appelle Antoine. Je fais beaucoup de sport, notamment du tennis, du tambourin et du foot. Je vis dans une maison agréable avec ma famille, mon chat et mon chien

LUDIVINE, 13 ANS.

Je m'appelle Ludivine, j'ai 13 ans et je suis en 4^{ème}. Je fais de la boxe et j'aime les animaux. Cet article m'a plu car il parlait des microbes, les premiers êtres vivants sur la Terre.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOUMIS le 15 novembre 2022 et ACCEPTÉ le 03 août 2023

PUBLIÉ EN LIGNE le 05 septembre 2023.

ÉDITEUR : Hervé Claustre, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

MENTORS SCIENTIFIQUES : Francesco Catania et Pamela T. Wong

CITATION : Fedder ZJF and Smith DR (2023) In Oceans, Lakes And Ponds, Living Things Can Become What They Eat. *Front. Young Minds* 11:1010245. doi: 10.3389/frym.2023.1010245

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 Fedder and Smith.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux

pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

GIACOMO, 13 ANS

Je m'appelle Giacomo et j'ai 13 ans. J'étudie pour entrer dans une école de musique et jouer de la guitare, je traîne avec des amis, je lis beaucoup, je regarde des séries télévisées et j'aime beaucoup dormir.

GIUSEPPE, 11 ANS

Je m'appelle Giuseppe et j'ai 11 ans. Je suis un champion de jeux vidéo, j'aime lire des bandes dessinées, j'aime dessiner, je joue au football et je suis aussi très bon dans d'autres sports. Je suis aussi un fan de Marvel et de Star Wars, et j'aimerais sauter entre les bâtiments et sauver la ville des criminels.

TAPPAN MIDDLE, 12–13 ANS

Cet article a été révisé par Charlotte, Evelyn, Louis et Will, un petit groupe d'élèves de septième année, joyeux et brillants de la classe de sciences de Mme Frantom à Tappan Middle School à Ann Arbor, Michigan, États-Unis. Les élèves de Tappan de la sixième à la huitième année réussissent à des niveaux élevés grâce à des éducateurs compétents, efficaces et cultivés. Nous avons réalisé cette évaluation avec l'aide de notre mentor à l'UoM, la Dr Pamela Wong.

AUTEURS

ZACHARY J. F. FEDDER

Zachary Fedder a obtenu son diplôme de premier cycle au Département de biologie de l'Université Western. Il a étudié la génétique et la biochimie. *zac.fedder@gmail.com

DAVID R. SMITH

David Smith est professeur au Département de biologie de l'Université Western. Il étudie l'évolution du génome des algues vertes.