

DES LAMPES DE POCHE MOLÉCULAIRES QUI ÉCLAIRENT LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Martin Chalfie

Département des Sciences Biologiques, Université Columbia, New York, NY, États-Unis

Cet article est basé sur un entretien entre le professeur Martin Chalfie et Noa Segev. Le professeur Martin Chalfie a remporté le prix Nobel de Chimie en 2008, avec le professeur Osamu Shimomura et le professeur Roger Tsien, pour la découverte et les applications de la protéine fluorescente verte, GFP.

Les scientifiques cherchent à observer un phénomène qui les intéresse et essaient de le comprendre, en utilisant les outils les plus avancés dont ils disposent. Observer et mesurer ce qu'ils veulent étudier est souvent un défi pour les scientifiques qui veulent pousser leur étude au-delà de ce qu'il a été possible de faire auparavant. Les progrès des techniques d'imagerie modernes ont permis aux scientifiques de relever un tel défi. Dans cet article, je vais te parler de l'une de ces percées dans l'imagerie, basée sur une merveilleuse protéine lumineuse appelée protéine fluorescente verte (GFP). La GFP a non seulement changé ma vie, mais aussi celle de nombreux autres scientifiques et, en fin de compte, de nombreux non-scientifiques. La GFP nous permet, entre autres, de détecter et d'observer l'activité de protéines et de cellules entières chez des animaux vivants, et de détecter l'activité des gènes spécifiant des protéines particulières. À la fin de cet article, j'espère que tu en sauras beaucoup plus sur la GFP et sur la façon dont elle éclaire la recherche scientifique.

DES MÉDUSES LUMINEUSES ET UNE ERREUR MIRACULEUSE

BIOLUMINESCENCE.

Production de lumière par un organisme vivant.

As-tu déjà eu la chance de voir une luciole qui brille dans la nuit sombre ? Les lucioles font partie d'un groupe fascinant d'organismes capables de produire de la lumière, un phénomène appelé **bioluminescence**. Les vers luisants, certains types de bactéries et certains types de poissons sont des organismes bioluminescents. Notre histoire commence avec une méduse bioluminescente appelée *Aequorea victoria*, ou *A. victoria* en abrégé (Figure 1).



Figure 1

Figure 1. Osamu Shimomura et la méduse *Aequorea victoria*. Après une journée frustrante au laboratoire, le professeur Shimomura éteint les lumières et s'apprête à rentrer chez lui pour le dîner. Il voit soudain que l'évier, qui contenait des échantillons de cellules d'*A. victoria* et de l'eau de mer, brille en bleu. Cela l'a conduit à la découverte de la protéine fluorescente appelée *æquorine*. Illustration : Iris Gat.

Dans les années 1960, Osamu Shimomura, un scientifique japonais, a voulu comprendre comment les organismes bioluminescents produisent de la lumière. Il a décidé de travailler sur *A. victoria*, qui produit de la lumière verte. Osamu a travaillé pendant tout un été, essayant de faire briller les cellules d'*A. victoria* (comme cela se produit naturellement dans la mer), mais aucune de ses expériences n'a réussi. Une nuit, alors qu'il faisait déjà nuit dehors et qu'Osamu voulait rentrer chez lui pour le dîner, il a jeté ses échantillons de protéines d'*A. victoria* provenant d'une expérience ratée – une de plus ! - dans l'évier du laboratoire et a éteint la lumière pour fermer le laboratoire. Mais alors qu'il était sur le point de partir, il a remarqué que l'évier brillait d'un bleu éclatant. Étant donné que l'évier contenait également de l'eau de mer, Osamu a pensé que quelque chose dans l'eau de mer avait dû déclencher la production de lumière. Il s'est vite rendu compte que le calcium contenu dans l'eau de mer faisait briller les protéines des méduses. Il a nommé la protéine bleutée **æquorine**, d'après le nom de la méduse [1, 2].

ÆQUORINE.

Protéine brillant en bleu qui a été découverte dans la méduse *Aequorea victoria* par le professeur Osamu Shimomura.

Après cette grande percée, Osamu a dû répondre à une autre question brûlante : pourquoi l'*æquorine* a-t-elle produit de la lumière bleue, alors que les méduses dont elle provient brillent en vert ?

MOLÉCULE FLUORESCENTE.

Molécule qui convertit une couleur de lumière (bleue, par exemple) en une autre couleur (verte, par exemple).

**PROTÉINE
FLUORESCENTE VERTE
(GFP).** Protéine qui a été identifiée pour la première fois chez la méduse *A. victoria*. La GFP absorbe la lumière bleue et la convertit en lumière verte.

CELLULES NERVEUSES.

Cellules du système nerveux qui reçoivent des informations de leur environnement, les traitent en signaux électriques et chimiques déclenchant une action, telle qu'un mouvement.

**MARQUEUR
BIOLOGIQUE.** Molécule biologique utilisée par les chercheurs comme l'indicateur d'un processus ou d'un état biologique.

Tout en purifiant la protéine *æquorine*, Osamu a cherché quelque chose d'autre qui pourrait créer la lumière verte émise par *A. victoria*. Finalement, il a trouvé une autre protéine qui était une **molécule fluorescente** : elle captait la lumière bleue, que cette lumière soit produite à partir d'*æquorine* ou d'une lampe de poche, et la convertissait en lumière verte. Il s'agissait d'une autre découverte étonnante, car personne à l'époque n'avait la moindre idée que les protéines pouvaient être fluorescentes. Bien qu'Osamu l'ait appelée à l'origine la protéine verte, nous l'appelons maintenant la **protéine fluorescente verte**, ou **GFP** (*Green Fluorescent Protein*) [3]. Cette histoire est aussi un parfait exemple du fait que de nombreuses découvertes scientifiques sont plutôt accidentelles. Le rôle du scientifique, comme dans le cas d'Osamu, est de remarquer, de s'émerveiller et d'enquêter sur ces découvertes accidentelles.

COMMENT LA GFP A CHANGÉ MA VIE

Le mardi 25 avril 1989, j'ai assisté à une conférence à l'heure du déjeuner à mon université sur le travail d'Osamu Shimomura sur la GFP. Dès que j'ai entendu parler de GFP, j'ai été fasciné. Mon laboratoire travaillait sur un minuscule ver transparent (environ 1 mm de long) appelé *Caenorhabditis elegans*, ou *C. elegans*. Nous étudions un groupe de **cellules nerveuses** du ver qui répondent à des stimuli physiques, tels que le toucher et le son, et les convertissent en signaux électriques et chimiques. Je me suis demandé si nous pouvions trouver un moyen de faire en sorte que ces cellules nerveuses de *C. elegans* produisent de la GFP, pour que nous puissions les voir et les étudier d'une manière complètement nouvelle. La GFP pourrait alors être utilisée comme **marqueur biologique**, c'est-à-dire une molécule biologique que les scientifiques peuvent observer pour savoir ce qui se passe à l'intérieur des cellules ou des organismes. À l'époque, la méthode que nous utilisions pour voir des types cellulaires spécifiques chez *C. elegans* était lourde et ne nous permettait pas de travailler avec des tissus vivants. Il s'agissait là de sérieuses limitations. Nous devions « fixer » le ver avec des produits chimiques pour préserver les structures cellulaires, mais ce processus tuait l'animal. Cela signifiait que nos méthodes ne nous donnaient qu'une image figée de ce qui se passait à l'intérieur du ver, une seule « image » à la fois. J'ai pensé que la GFP pourrait nous permettre de voir les cellules nerveuses de *C. elegans* pendant qu'il était vivant et qu'il interagissait avec son environnement.

J'étais tellement excité que je n'ai même pas pu écouter le reste de la conférence. Tout ce à quoi je pouvais penser pendant les jours suivants, c'était la GFP et son potentiel pour mes recherches. J'ai contacté un chercheur du nom de Douglas Prasher, qui travaillait sur le gène (l'ADN) de la protéine GFP. Nous étions tous les deux enthousiasmés par la possibilité d'utiliser la GFP chez *C. elegans* et d'autres organismes, nous avons donc décidé de collaborer. Après avoir perdu le contact pendant

quelques années en raison d'un malheureux malentendu, nous avons repris contact en septembre 1992, lorsqu'une étudiante nommée Ghia Euskirchen est venue dans mon laboratoire et s'est intéressée au projet. Elle avait une bonne expérience du travail avec la fluorescence, et cela m'a rappelé mon idée d'utiliser la GFP pour marquer les cellules vivantes. En étudiant des articles scientifiques publiés sur GFP, nous avons découvert que Douglas avait récemment publié un article [4] et l'avons recontacté. Peu de temps après, il nous a fourni la séquence du gène de la GFP et Ghia a commencé à l'utiliser.

FAIRE BRILLER LES ORGANISMES AVEC LA GFP

Ghia a commencé ses expériences sur la GFP, en cherchant à déterminer si des bactéries contenant l'ADN codant pour la GFP deviennent fluorescentes. Nous ne savions pas à l'époque si la production de la protéine GFP à partir de l'ADN correspondant était suffisante pour rendre une cellule fluorescente (pour en savoir plus sur la façon dont les protéines sont fabriquées à partir de l'ADN, voir). Il était tout à fait possible qu'il manque quelque chose à la bactérie pour que la GFP qu'elle fabrique soit fluorescente, soit parce que ce quelque chose est synthétisé par les cellules d'*A. victoria*, soit parce qu'il se trouve dans l'environnement de ces cellules.

La première décision que nous avons dû prendre concernait ce qu'il fallait faire avec l'ADN que Douglas nous avait envoyé. Il contenait des séquences supplémentaires de part et d'autre de celle qui détermine la séquence de la protéine GFP (Figure 2A). Fallait-il l'utiliser tel quel (avec les séquences supplémentaires) ou se limiter à la partie correspondant à la GFP ? Nous devions par ailleurs disposer de beaucoup de copies de l'ADN GFP pour nos expériences. Mais la méthode PCR (*Polymerase Chain Reaction*) disponible à l'époque pour obtenir de grandes quantités d'ADN introduisait souvent des erreurs dans les copies d'ADN. Grâce aux tests de détection du virus de la COVID-19, tu connais peut-être cette méthode de réplication en chaîne d'un morceau d'ADN grâce à une enzyme appelée polymérase [5]. Malgré cette limitation, j'ai décidé que nous utiliserions la PCR, car nous allions examiner des millions de bactéries et certaines d'entre elles auraient de l'ADN GFP sans aucune erreur.

Il s'est avéré que nous avons choisi la bonne stratégie. Ghia a utilisé la PCR pour copier l'ADN correspondant juste à la séquence codant pour la GFP. Elle a ensuite intégré cet ADN GFP dans une molécule d'ADN appelée plasmide, que les bactéries « avalent » et traitent comme leur propre ADN. Après avoir éclairé avec de la lumière bleue les bactéries *E. coli* contenant de l'ADN GFP, elles sont devenues fluorescentes [6]. (En revanche, les autres groupes qui ont utilisé l'ADN GFP d'origine avec l'ADN supplémentaire n'ont pas vu de fluorescence. Quelque chose dans l'ADN supplémentaire devait interférer avec la production

PCR (POLYMERASE CHAIN REACTION).

Méthode de laboratoire utilisée pour fabriquer de nombreuses copies d'un segment spécifique d'ADN à l'aide d'une enzyme de réplication de l'ADN appelée ADN polymérase.

de GFP. Si nous n'avions pas utilisé la PCR, notre expérience n'aurait pas fonctionné. Comme notre méthode fonctionnait chez les bactéries, nous l'avons ensuite utilisée pour incorporer de l'ADN GFP dans *C. elegans*, comme je rêvais de le faire à l'origine, et nous avons également fait briller ces vers (Figure 2B). Cela a ouvert la voie à l'incorporation de GFP dans toutes sortes d'organismes et à son utilisation pour diverses applications.

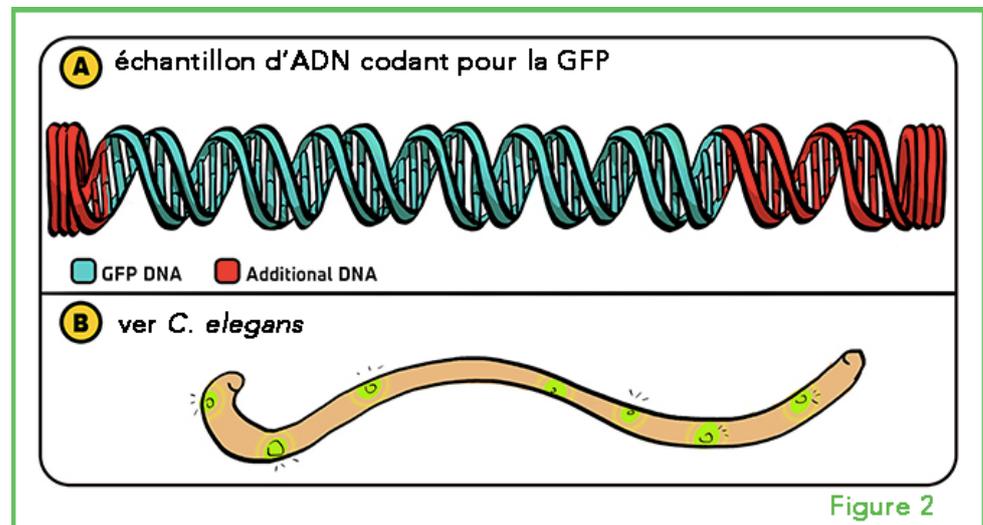


Figure 2. Premières expériences avec la GFP. (A) L'échantillon d'ADN GFP (original que nous avons obtenu de Douglas Prasher contenait l'ADN spécifiant la GFP (bleu-vert) ainsi que des séquences d'ADN supplémentaires de chaque côté (rouge). (B) Après avoir fait des copies de l'ADN de la GFP à l'aide de la PCR, nous avons pu utiliser cet ADN chez *C. elegans* et observer que certaines cellules du ver étaient fluorescentes en lumière verte. Illustration : Iris Gat.

COMMENT LA GFP A CHANGÉ LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Tout nouveau développement scientifique peut nous donner une meilleure compréhension des principes biologiques ou physiques de base, et peut également aider à la création de nouvelles technologies. Souvent, la découverte originale se développe au fil du temps dans des directions surprenantes et inattendues. La découverte du laser en est un bon exemple. Charles Townes, dont les travaux ont conduit au laser, n'aurait jamais imaginé que ce serait utile dans les épiceries pour scanner les prix des produits, ou dans l'industrie du disque pour fabriquer des disques compacts, ou dans l'industrie du cinéma pour faire des DVD, ou en médecine pour effectuer des opérations chirurgicales. Il en va de même pour la découverte de la GFP : son utilisation a évolué et continuera d'évoluer dans de nombreuses directions différentes qui feront progresser à la fois les connaissances scientifiques fondamentales et diverses applications technologiques.

Dans la recherche scientifique, la GFP peut être utilisée comme marqueur biologique pour nous renseigner sur l'activité des gènes et de leurs produits. Les gènes peuvent être considérés comme ayant deux parties : la partie codante, qui indique quel produit doit être fabriqué

GÈNE. Segment d'ADN qui porte les instructions pour fabriquer une protéine spécifique.

(un ARN ou une protéine) et la partie régulatrice qui dit où, quand, et en quelle quantité le produit doit être fabriqué. Si la séquence d'ADN GFP est ajoutée à la partie régulatrice d'un gène, la GFP sera fabriquée et deviendra fluorescente chaque fois que le gène sera « activé ». Alternativement, si la séquence d'ADN GFP est ajoutée à la partie codante d'un gène, la protéine correspondante sera attachée à la protéine GFP, et cette protéine hybride brillera quand nous l'éclairerons avec de la lumière bleue [7]. Nous pouvons ainsi voir où les protéines résident dans les cellules (par exemple, dans le noyau, au niveau de la membrane cellulaire) et les observer lorsqu'elles se déplacent dans les cellules vivantes, un processus qui n'était pas possible avec les méthodes précédentes. Il est important de noter qu'une fois que l'ADN de la GFP est inséré dans l'ADN d'un organisme, il peut être transmis à ses descendants, ce qui rend l'utilisation expérimentale de la GFP très pratique.

Je voudrais mentionner brièvement deux découvertes, faites grâce à la GFP et que j'admire personnellement. La première a été réalisée par Clifford Brangwynne et Anthony Hyman en 2009 [8]. Ils examinaient des protéines localisées dans le cytoplasme, le liquide qui remplit l'espace à l'intérieur des cellules. Jusque-là, on pensait que le cytoplasme était assez uniforme, mais lorsque ces scientifiques ont examiné une protéine cytoplasmique particulière marquée avec la GFP, elle semblait être contenue dans des particules séparées du reste du cytoplasme. Ces particules agissaient comme de minuscules gouttes d'huile dans l'eau – parfois elles se rassemblaient et fusionnaient, et d'autres fois, elles se divisaient en deux. Ces structures ne se mélangeaient pas avec le reste du cytoplasme, elles constituaient une phase distincte (elles sont souvent appelées particules à phase séparée) (Figure 3A). Cette découverte s'est avérée exceptionnellement importante pour notre compréhension de la structure et de la fonction des cellules, et elle a ouvert un domaine de recherche très actif.

Une autre utilisation de la GFP que j'aime particulièrement a été faite par Geoff Waldo [9]. Geoff a trouvé un moyen astucieux d'utiliser la GFP pour surveiller le repliement des protéines. Il l'a qualifiée de « reporter de repliement ». Une fois qu'une protéine est produite sous la forme d'une longue chaîne d'éléments constitutifs appelés acides aminés, elle doit se replier en une structure tridimensionnelle spécifique pour remplir sa fonction. Si une protéine se replie mal, elle ne fonctionnera pas correctement. Lorsque nous étudions les protéines en les fabriquant dans des bactéries, par exemple, nous voulons nous assurer qu'elles sont correctement repliées. Geoff a construit un ADN correspondant à une fusion de la protéine qui l'intéressait avec la GFP. Il a fait l'hypothèse que si la protéine d'intérêt ne se replie pas correctement, la GFP ne se repliera pas correctement non plus et ne brillera pas. Ainsi, s'il voyait des cellules fluorescentes, il pouvait conclure que la protéine

d'intérêt se repliait correctement, et s'il n'y avait pas de cellules fluorescentes, c'est que la protéine ne se repliait pas correctement. C'est une très bonne façon pour les scientifiques de s'assurer qu'ils travaillent avec des protéines correctement repliées (Figure 3B).

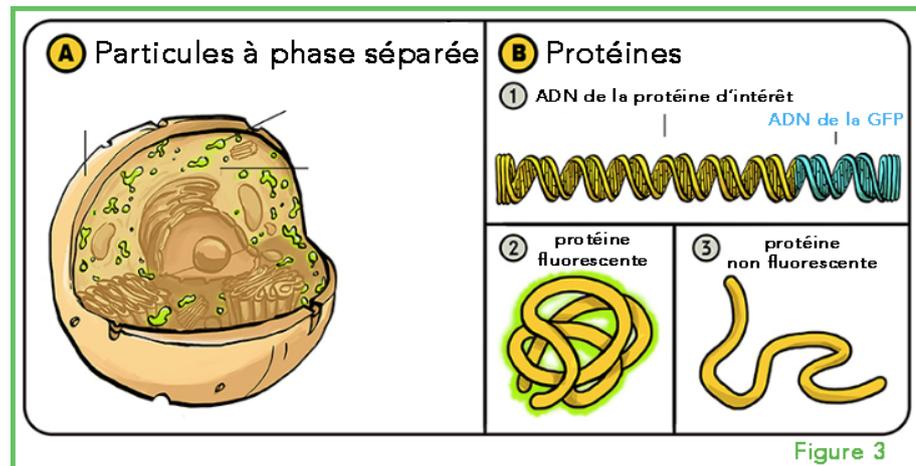


Figure 3. Utilisations de la GFP. (A) En utilisant la GFP, Clifford Brangwynne et Anthony Hyman ont découvert que le cytoplasme de la cellule contient deux phases distinctes : la phase liquide bien connue et une autre phase qui se comporte comme des particules d'huile dans l'eau. (B) Geoff Waldo a utilisé la GFP pour surveiller le repliement des protéines. (1) Il a ajouté de l'ADN GFP à l'extrémité de l'ADN codant pour une protéine qui l'intéressait. (2) Si la protéine (y compris la partie GFP) se replie correctement, elle deviendra fluorescente en vert. (3) Si la protéine se replie de manière incorrecte, elle ne devient pas fluorescente. Illustration : Iris Gat.

Il existe de nombreuses autres utilisations de la GFP, je vais donc en aborder quelques-unes de plus. Certaines personnes utilisent la GFP pour étudier comment les virus infectent les cellules. Une étude remarquable a utilisé la GFP pour colorer le VIH, le virus qui cause le SIDA, afin d'étudier comment le virus se propage d'une cellule à l'autre [10]. Dans cette étude, il a été constaté que les virus du VIH peuvent se déplacer entre les cellules sans les détruire (contrairement à ce que font de nombreux autres virus). Cette découverte a des implications quant à la façon dont le transfert du virus d'une cellule à une autre pourrait être contrôlé. D'autres groupes étudient comment utiliser la GFP pour détecter les mines terrestres ou des résidus d'explosifs [11]. Au Japon, les gens utilisent même la GFP pour produire de la soie qui brille en vert [12]. Il existe de nombreuses autres utilisations intéressantes de la GFP et d'autres protéines fluorescentes avec d'autres couleurs que les scientifiques ont trouvées ou créées. Ces exemples te donnent un premier aperçu de l'utilité des protéines fluorescentes.

RECOMMANDATION POUR LES JEUNES ESPRITS

Je ne pense pas qu'il y ait une « recette » pour faire de la recherche scientifique de premier plan, *mais* il y a des choses que je crois importantes. L'une des qualités les plus importantes pour la réussite d'un scientifique est sa capacité à poser des questions. Beaucoup de bonnes questions se trouvent juste sous notre nez, attendant d'être

posées, mais si nous n'avons pas l'habitude de poser des questions, nous risquons de les manquer. Poser des questions est un excellent moyen de comprendre les choses. Lorsque tu apprends quelque chose de nouveau, demande-toi comment la nouvelle chose que tu as apprise pourrait s'appliquer à d'autres sujets qui t'intéressent. C'est une approche importante que j'utilise tout le temps dans mon travail. Un autre aspect important est de remettre en question tes hypothèses (Figure 4) : pourquoi crois-tu ce que tu crois ? Très souvent, lorsque nous étudions nos hypothèses de cette manière, nous y trouvons des erreurs. Corriger ces erreurs en mettant à jour nos hypothèses peut nous aider à faire progresser nos connaissances et notre compréhension.

Je recommande souvent aux élèves de travailler sur deux choses en même temps. De cette façon, si un projet ne fonctionne pas, ils ont toujours l'autre pour se motiver et réussir. La science est un voyage dans l'inconnu. Ce n'est pas toujours facile, cela peut être frustrant, et nous faisons beaucoup d'erreurs en cours de route. Nos idées ne fonctionnent pas toujours, mais progresser contre l'inconnu est une partie passionnante du métier de scientifique. De temps en temps, ce voyage stimulant apporte de grandes récompenses, comme découvrir quelque chose que personne d'autre n'a découvert auparavant, puis partager cette découverte avec d'autres.

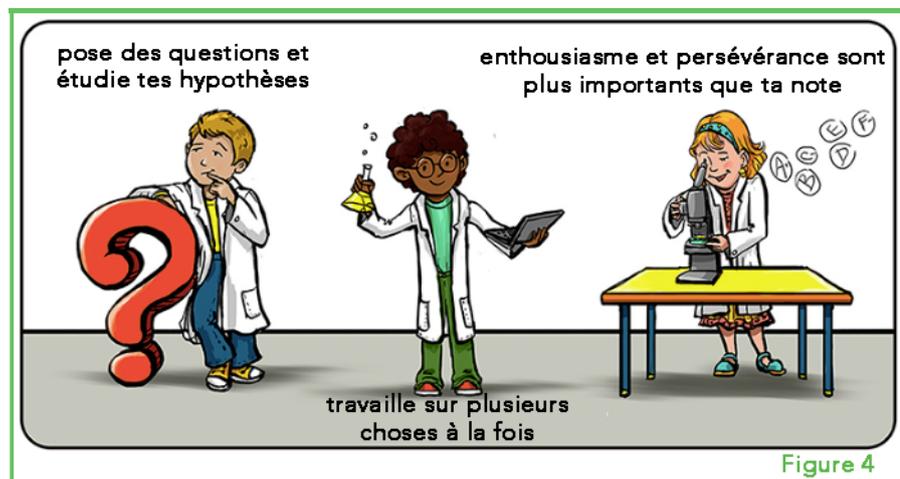


Figure 4. Trois recommandations pour les jeunes esprits. Pose des questions et étudie tes hypothèses. Travaille sur deux choses simultanément. L'enthousiasme et la persévérance sont plus importants que tes notes. Illustration : Iris Gat.

Enfin, ne t'inquiète pas trop de tes notes. Les notes n'ont absolument rien à voir avec la réussite en Sciences. Je pense que l'enthousiasme et la persévérance sont beaucoup plus importants que les notes. J'ai obtenu des notes très moyennes en chimie quand j'étais à l'université puis, finalement, j'ai reçu un prix Nobel de chimie quelque 30 ans plus tard (j'aime l'ironie de la chose). Si tu t'intéresses à la Science, l'une des meilleures façons de devenir bon dans ce domaine est de la pratiquer. Essaie de faire des expériences et vois à quoi cela ressemble, c'est le meilleur moyen de savoir si tu as fait le bon choix.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Noa Segev pour l'interview qui a servi de base à cet article et pour avoir co-écrit l'article, Iris Gat pour les figures (<https://www.irisgat-art.com/>), et Susan Debad pour la révision du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- [1] Shimomura, O., Johnson, F. H., and Saiga, Y. 1962. Extraction, purification and properties of aequorin, a bioluminescent protein from the luminous hydromedusan, *Aequorea*. *J. Cell. Compar. Physiol.* 59:223–39. doi: 10.1002/jcp.1030590302
- [2] Shimomura, O. 2009. Discovery of green fluorescent protein (GFP) (Nobel Lecture). *Angew. Chem. Int. Ed.* 48:5590–602. doi: 10.1002/anie.200902240
- [3] Morin, J. G., and Hastings, J. W. (1971). Energy transfer in a bioluminescent system. *J. Cell. Physiol.* 77:313–8. doi: 10.1002/jcp.1040770305
- [4] Prasher, D. C., Eckenrode, V. K., Ward, W. W., Prendergast, F. G., and Cormier, M. J. 1992. Primary structure of the *Aequorea victoria* green-fluorescent protein. *Gene* 111:229–33. doi: 10.1016/0378-1119(92)90691-H
- [5] Mullis, K., Faloona, F., Scharf, S., Saiki, R., Horn, G., and Erlich, H. 1992. Specific enzymatic amplification of DNA *in vitro*: the polymerase chain reaction. *Biotechnol. Ser.* LI:17.
- [6] Chalfie, M., Tu, Y., Euskirchen, G., Ward, W. W., and Prasher, D. C. 1994. Green fluorescent protein as a marker for gene expression. *Science* 263:802–5. doi: 10.1126/science.8303295
- [7] Wang, S., and Hazelrigg, T. 1994. Implications for bcd mRNA localization from spatial distribution of exu protein in *Drosophila* oogenesis. *Nature* 369:400–3. doi: 10.1038/369400a0
- [8] Brangwynne, C. P., Eckmann, C. R., Courson, D. S., Rybarska, A., Hoege, C., Gharakhani, J., et al. 2009. Germline P granules are liquid droplets that localize by controlled dissolution/condensation. *Science* 324:1729–32. doi: 10.1126/science.1172046
- [9] Waldo, G. S., Standish, B. M., Berendzen, J., and Terwilliger, T. C. (1999). Rapid protein-folding assay using green fluorescent protein. *Nat. Biotechnol.* 17:691–5. doi: 10.1038/10904
- [10] Hübner, W., McNerney, G. P., Chen, P., Dale, B. M., Gordon, R. E., Chuang, F. Y., et al. 2009. Quantitative 3D video microscopy of HIV transfer across T cell virological synapses. *Science* 323:1743–7. doi: 10.1126/science.1167525

[11] Shemer, B., Palevsky, N., Yagur-Kroll, S., and Belkin, S. 2015. Genetically engineered microorganisms for the detection of explosives' residues. *Front. Microbiol.* 6:1175. doi: 10.3389/fmicb.2015.01175

[12] Shimizu, K. 2018. Genetic engineered color silk: fabrication of a photonics material through a bioassisted technology. *Bioinspir. Biomimet.* 13:041003. doi: 10.1088/1748-3190/aabbe9

MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

1. Les cinq mythes sur les scientifiques selon le lauréat du prix Nobel Martin Chalfie :

<https://www.youtube.com/watch?v=OTBbK6cuuvs&t=14s>

2. Martin Chalfie, lauréat du prix Nobel, à propos de l'échec et de

l'inutile : <https://www.youtube.com/watch?v=BhMJgZg5hiM&t=1277s>

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2023.1104539; Chalfie M (2023) Molecular Flashlights That Light up Science. *Front. Young Minds.* 11:1104539).

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

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOUMIS le 21 novembre 2022 ; **ACCEPTÉ** le 11 avril 2023

PUBLIÉ EN LIGNE le 19 septembre 2023.

ÉDITEUR : Idan Segev

MENTORS SCIENTIFIQUES : Naveed Aslam, Klavdja Fignole

CITATION : Chalfie M (2023) Molecular Flashlights That Light up Science. *Front. Young Minds.* 11:1104539. doi: 10.3389/frym.2023.1104539

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT. 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 Chalfie. 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

ALI, 13 ANS

Je m'appelle Ali, j'ai 13 ans et j'aime les jeux vidéo et le sport, même si j'aime les sciences mais je n'aime pas l'école. Je suis en 7^e année, et je me débrouille bien dans mes notes parce que c'est la seule façon pour moi de garder mes privilèges de jeu vidéo.

BILAL, 15 ANS

Je m'appelle Bilal ; je suis un lycéen de 15 ans. Je m'intéresse à l'ingénierie et à la médecine et me prépare à aller à l'université dans les prochaines années. J'adore la course de fonds.

LAURENT, 10 ANS

Je m'appelle Laurent. J'adore passer du temps avec des amis de mon quartier et avec des camarades de classe. J'adore lire et écrire, et j'ai déjà gagné des prix pour mes poèmes ! Je suis français et je parle aussi anglais. Je joue au basket-ball et j'ai joué au judo et au football. J'aime lire des histoires de fiction, des mangas, des enquêtes policières, des histoires d'horreur, des mythes etc, et j'aime regarder des documentaires scientifiques. Ma saison préférée est le printemps, lorsque vous pouvez jouer à l'extérieur et faire du vélo.

YA'EL, 11 ANS

J'aime Minetest, la programmation informatique, les mathématiques, les sciences, courir, jouer à la poupée, dessiner, cuisiner, lire, jouer avec des lego, regarder des vidéos, faire de l'artisanat et réfléchir.

AUTEUR

MARTIN CHALFIE

Martin Chalfie est un généticien américain, professeur à l'Université Columbia (NY, États-Unis). Il a étudié la biochimie à l'Université Harvard (MA, États-Unis). Après une expérience décevante en recherche scientifique, il a décidé d'abandonner les sciences après l'obtention de son diplôme. Il a ensuite occupé plusieurs emplois temporaires, notamment en vendant des robes pour l'entreprise de ses parents à Chicago, et il a enseigné la chimie dans un lycée du Connecticut. En 1971, il était à la recherche d'un emploi temporaire pendant les vacances d'été. Un de ses amis l'a mis en contact avec un professeur de l'Université de Yale, et il a mené avec succès un projet de recherche dans ce laboratoire, ce qui a ravivé son intérêt pour la Science. Il a obtenu son doctorat en physiologie à l'Université Harvard en 1977. En 1982, il devient professeur de sciences biologiques à l'Université Columbia où il étudie le système nerveux de *C. elegans*. En 1989, il commence à travailler sur la GFP avec son collaborateur, Douglas Prasher. En 1994, le professeur Chalfie, sa doctorante Ghia Euskirchen,

Douglas Prasher et collaborateurs publient un article décrivant comment ils ont ajouté l'ADN de la GFP à l'ADN de la bactérie *E. coli* et du nématode *C. elegans* et ils ont montré que chacun de ces organismes pouvait alors produire la protéine fluorescente. Le professeur Chalfie vit avec sa femme, Tulle Hazelrigg, professeur de biologie à l'Université Columbia. Ils ont une fille prénommée Sarah.
[*mc21@columbia.edu](mailto:mc21@columbia.edu)