

La bioluminescence, une lumineuse invention de la nature

KAMIL FADEL

Chef du département de physique
au Palais de la découverte

« Combien la surprise fut grande quand on put retirer du filet un grand nombre de Gorgones ayant le port d'un arbuste, et que ceux-ci jetèrent des éclats de lumière qui firent pâlir les vingt fanaux qui devaient éclairer les recherches ; ils cessèrent pour ainsi dire de luire aussitôt que les polypiers se trouvèrent en leur présence. Cet effet inattendu produisit d'abord une stupéfaction générale, puis on porta quelques spécimens dans le laboratoire, où les lumières furent éteintes. Ce fut un instant de magie ; de tous les points des tiges principales et des branches du polypier s'élançaient, par jets, des faisceaux de feu dont les éclats s'atténuaient, puis se ravivaient pour passer du violet au pourpre, du rouge à l'orangé, du bleuâtre à différents tons du vert, parfois au blanc du fer surchauffé. Cependant, la couleur dominante était sensiblement la verte. Tout ceci était bien autrement beau que la plus belle pièce d'artifice. »

Voilà comment le marquis Léopold de Folin (1817-1896), naturaliste français et l'un des précurseurs de l'océanographie, promoteur du musée de la Mer (inauguré en 1935) ainsi que du Centre d'études et de recherches scientifiques de Biarritz, décrivait en 1880 une scène de pêche dans le golfe de Gascogne à bord de l'avis « Travailleur ».

Visuel non disponible sur la version internet,
mais disponible sur l'édition papier

FIGURE 1

*Ver luisant femelle
posé sur une herbe.
En fait, il ne s'agit pas
d'un ver mais d'un
insecte. Ce sont les
derniers segments
abdominaux qui luisent
le soir des chaudes
journées d'été.
Il s'agit d'un signal
destiné à attirer les
mâles en période
de reproduction.
© BIOS/C. Vechot.*

La production de lumière par un être vivant n'est pas l'apanage exclusif de ce qui est appelé communément « vers luisants » et lucioles (fig. 1). Elle est connue chez des milliers d'espèces, allant de certaines bactéries à des requins en passant par des algues, des champignons, des insectes... La plupart des espèces abyssales sont luminescentes. Bien qu'observée dès l'Antiquité, la bioluminescence ne fait l'objet de recherches scientifiques sérieuses que depuis une centaine d'années seulement. De nombreux détails restent encore à élucider, mais les mécanismes cellulaires et moléculaires qui contrôlent cette émission de lumière ainsi que ses multiples fonctions sont aujourd'hui assez bien connus chez certains animaux. Tandis que certaines espèces utilisent la lumière qu'elles produisent pour communiquer, d'autres s'en servent pour se camoufler, chasser, fuir, se défendre...

Après la présentation d'éléments historiques relatifs à l'étude et aux observations de la bioluminescence, nous nous intéresserons à quelques généralités portant essentiellement sur la production et le contrôle de la lumière. Enfin, nous verrons à travers quelques

exemples le rôle de la bioluminescence dans la vie des animaux qui la produisent.

Quelques repères historiques

Plusieurs auteurs de l'Antiquité gréco-romaine tels Homère, Anaximène, Aristote, Tite-Live, Pline l'Ancien... font explicitement référence dans leurs écrits à la lumière émise par certains animaux, notamment des méduses et des insectes. Au XVII^e siècle, Francis Bacon (1561-1626), René Descartes (1596-1650), Robert Hooke (1635-1703), puis Isaac Newton (1642-1727) font remarquer que le feu n'est pas l'unique source de lumière, car l'eau de mer, disent-ils, luit parfois lorsqu'elle est agitée par le passage d'un navire. Cependant, aucun ne soupçonne l'origine biologique de ces lueurs. De son côté, le Néerlandais Erasmus Bartholin (1625-1698) publie en 1647 le premier livre consacré à la lumière animale, *De Luce Animalium*. A la même époque, Robert Boyle (1627-1691) montre que la luminescence animale cesse en absence d'air. En 1692, le médecin italien Domenico Bottoni attache les ailes d'une

luciole de sorte que l'insecte ne puisse plus les agiter. Observant alors l'arrêt de l'émission lumineuse, il conclut qu'à l'instar de la mer qui luit lorsqu'elle est agitée, le mouvement des ailes est nécessaire à la production de lumière... Un des premiers à s'orienter vers la bonne solution concernant les lueurs marines est l'Américain Benjamin Franklin (1706-1790), connu pour ses travaux en électricité mais aussi pour sa carrière politique. Voici ce qu'il écrit en 1753 :

« Il est possible qu'un très petit animalcule, trop petit pour être visible même à l'aide des meilleurs verres, soit capable de produire de la lumière. »

A partir de cette date, de nombreux scientifiques observent qu'effectivement de nombreux petits animaux, dont certains microscopiques, sont capables de luire.

Charles Darwin (1809-1882) raconte qu'au cours d'un de ses voyages, alors que son navire traversait un banc de méduses pris dans la tempête, la mer fut rendue lumineuse par les débris de ces animaux déchiquetés par l'agitation violente de l'eau. S'intéressant à la luminescence animale dans le cadre de sa théorie de l'évolution, au chapitre six de l'Origine des espèces, consacré aux difficultés de la théorie de la sélection naturelle, Darwin écrit :

« Les organes lumineux qui se rencontrent chez quelques insectes appartenant à des familles très différentes et qui sont situés dans diverses parties du corps, offrent, dans notre état d'ignorance actuelle, une difficulté absolument égale à celle des organes électriques. »

En 1885, le médecin et pharmacien français Raphaël Dubois (1848-1929) étudie la luminescence d'une espèce de luciole *Pyrophorus* de Jamaïque. Ses travaux révèlent que l'émission de lumière résulte d'une réaction chimique (réalisée en présence d'oxygène) entre deux substances : l'une thermolabile, une enzyme qu'il baptise *luciférase*, l'autre son substrat thermostable qu'il nomme *luciférine*. Après la Seconde Guerre mondiale, l'Américain William Mc Elroy (1917-1999) affine le principe réactionnel mis en évidence par Dubois. Il montre notamment que certaines réactions de bioluminescence, notamment celles qui ont lieu chez les lucioles, exigent – hormis l'oxygène – la présence d'autres corps, dont les ions magnésium Mg^{2+} .

Aujourd'hui, on sait que luciférine et luciférase ne constituent pas un couple unique de molécules. On dénombre en effet une trentaine de luciférines appartenant à des groupes chimiques très différents, les luciférases étant également très variées. Aussi, afin de ne pas créer de confusion, il vaudrait mieux parler *des* luciférines et *des* luciférases, et lorsqu'il s'agit d'un couple particulier, préciser à quelle(s) espèce(s) ce dernier se rapporte.

En fait, depuis une trentaine d'années environ, on sait qu'il existe un deuxième mécanisme de bioluminescence. Il se déroule en deux étapes. La première met en jeu une réaction produisant une lumière bleue qui ne quitte pas l'organisme car elle est aussitôt absorbée par une molécule appelée GFP (*Green Fluorescent Protein*). Consécutivement à l'absorption d'un photon bleu, la GFP se trouve dans un état excité et émet alors un photon de moindre énergie (vert) que celui absorbé (bleu). C'est cette lumière verte, dite de fluorescence, qui est émise par l'organisme dans son environnement et qui constitue à proprement parlé le signal de bioluminescence.

FIGURE 2

Méduse Polyorchis penicillatus.

Il s'agit d'une méduse dont la cloche fait environ 5 cm de diamètre.

Elle est dotée d'une centaine de tentacules rouges à leur base : ce sont des cellules sensibles à la lumière

© Ardea London Ltd/ K. Lucas.

Visuel non disponible
sur la version internet,
mais disponible sur
l'édition papier

Quelques généralités

La bioluminescence, cela se comprend, n'a de raison d'être que lorsque l'obscurité règne. Aussi, peut-on l'observer la nuit, dans certaines grottes, ainsi que dans les abysses. Les réactions chimiques mises en jeu dans ce mode de production de la lumière, dite froide, sont assez variées, avec souvent d'excellents rendements dépassant les 90 %⁽¹⁾. Comme cela s'observe souvent dans le monde vivant, la variété est la règle. La bioluminescence ne

fait pas exception. Autrement dit, il n'existe pas une seule et unique manière biochimique de produire de la lumière, mais une multitude (une trentaine comme indiqué précédemment). De même, il n'existe ni une seule et unique manière de luire, ni une seule et unique manière de contrôler la lumière...

Habitats des organismes bioluminescents

Bien que tout le monde connaisse la bioluminescence des lucioles et des « vers » lumineux, il s'agit d'un phénomène relativement rare en milieu aérien. La bioluminescence est répandue surtout chez les animaux marins, plus particulièrement chez ceux qui vivent à de grandes profondeurs. On la trouve égale-

(1) A titre de comparaison, une lampe à incandescence de 100 W possède un rendement avoisinant les 5 %, les 95 % de l'énergie électrique étant « perdue » sous forme de chaleur transmise à l'environnement.

Visuel non disponible sur la version internet,
mais disponible sur l'édition papier

FIGURE 3

*Poisson vipère (Chauliodus sp.).
Les dents impressionnantes sont associées
chez cette espèce à des modifications
de la colonne vertébrale permettant une
augmentation de l'ouverture buccale.
Ces poissons présentent des rangées
parallèles longitudinales de photophores
de chaque côté du ventre. Une des fonctions
de cette luminescence serait d'être un
signal de reconnaissance intraspécifique,
favorisant, entre autres, le rapprochement
des sexes au moment de la reproduction.
© Ifremer/P. Briand.*

ment chez certaines espèces nocturnes des eaux superficielles, ainsi que chez certaines espèces vivant dans les grottes. Dans les mers et les océans, la lumière solaire ne peut pénétrer dans les eaux profondes en raison de l'atténuation qu'elle subit, en commençant par les radiations rouges et ultraviolettes. Grossièrement, on peut considérer que l'intensité de la lumière chute d'un facteur 10 tous les 75 mètres. Vers 850 mètres de profondeur, l'œil humain n'est plus capable de déceler aucune trace de lumière solaire. Ici, 90 % des méduses, des poissons, des crevettes, des calmars... sont bioluminescents (fig. 2). En fait, à partir de 200 mètres déjà, de nombreuses espèces émettent leur propre lumière, généralement bleue, correspondant aux radiations qui se propagent le plus loin dans l'eau de mer. Les grands fonds ne sont donc pas totalement obscurs : il y règne les lueurs de ces lanternes vivantes que sont les espèces bioluminescentes.

Lieux de production de la lumière

Chez les organismes bioluminescents, les cellules productrices de lumières, ou photocytes, sont, selon les espèces, isolées ou regroupées en un organe appelé photophore. Ces derniers sont d'une extraordinaire variété. Ils peuvent être très simples comme très com-

plexes, dotés de dispositifs tels que lentille, filtre coloré, réflecteur, écran pigmentaire... Les animaux eux-mêmes peuvent être lumineux sur tout le corps ou sur certaines parties seulement (fig. 3). Dans certains cas, la lumière n'est pas issue du corps : l'animal projette dans l'eau une substance luminescente. C'est le cas de certains céphalopodes qui déchargent ainsi un nuage lumineux à l'instar d'autres qui font de même avec leur encre. Signalons aussi que la bioluminescence d'un organisme peut résulter de sa propre physiologie, comme elle peut être l'œuvre de micro-organismes qu'il héberge. La bioluminescence se manifeste ainsi sous des formes très diverses. Il en va de même des mécanismes qui la déclenchent, voire contrôlent parfois la lumière émise.

Contrôle des émissions lumineuses

L'émission de lumière peut être intermittente ou continue. L'intermittence peut provenir de celle des réactions biochimiques luminescentes elles-mêmes, mais elle peut être due à un mécanisme qui masque de manière intermittente une lumière produite de façon continue. Chez certains organismes, la température peut modifier les caractéristiques de la lumière : durée, intensité, rythme des flashes... Pour beaucoup, une température éle-

FIGURE 4

Poisson lanterne (Melanocetus sp.) ou baudroie. Chez ces espèces, le dimorphisme sexuel est remarquable. Les femelles adultes acquièrent la forme globuleuse habituelle, tandis que certains mâles restent de petites taille (mâles « nains ») et deviennent parasites des femelles sur lesquelles ils se fixent, dégénéralant en un sac à spermatozoïdes. On peut voir sur cette photographie la lanterne lumineuse que le poisson agit pour attirer des proies vers sa bouche.

© Ifremer/P. Briand.

Visuel non disponible sur la version internet, mais disponible sur l'édition papier

vée, supérieure à 37 °C, agit comme un stimulus de luminescence. De même, la composition ionique de l'eau, notamment celles des ions potassium, sodium, calcium et magnésium, affecte la luminescence chez certaines espèces. Chez la plupart des animaux bioluminescents, l'émission de lumière n'est pas modifiée par une exposition préalable à la lumière. D'autres font exception : la lumière inhibe leur luminescence, alors que l'obscurité la stimule. Enfin, chez certaines espèces, l'éclairage d'une petite zone de leur corps entraîne l'inhibition de leur luminescence uniquement dans cette zone. L'influence de l'éclairage du jour sur la bioluminescence peut permettre d'expliquer les rythmes nyctéméraux qu'adoptent certains organismes, débutant leurs émissions de lumière à la tombée du jour. Les mécanismes mis en jeu dans l'altération de la luminescence par l'éclairage sont mal connus, mais ils peuvent être classés en deux catégories : une action photochimique directe sur les photocytes ou une action via le réseau nerveux après perception de la lumière. Cela, sachant que ces deux composants peuvent intervenir dans un même organisme, leur importance relative variant avec les espèces. La synchronisation parfaite des flashes émis par des milliers d'individus est un phénomène tout à fait spectaculaire, particulièrement bien

étudié chez certaines lucioles, mais qui existe également chez certains crustacés du genre *Vargula*.

Rôles de la bioluminescence

La bioluminescence apparaît dans des embranchements si nombreux et si éloignés les uns des autres que les biologistes admettent qu'elle est apparue de manière indépendante et multiple au cours des centaines de millions d'années d'évolution. Aussi, n'est-il pas étonnant que le rôle de la bioluminescence dans la vie des diverses espèces soit extrêmement varié et revête quelquefois plus d'une fonction chez une même espèce. Bien qu'il soit toujours difficile voire parfois peu sensé de procéder à une classification qui relève d'une vision anthropomorphique des choses, nous allons adopter par commodité un classement en quatre catégories des fonctions que la bioluminescence peut remplir : l'éclairage, le camouflage, la répulsion ou l'attraction d'autres organismes.

La bioluminescence comme torche

Bien qu'à nos yeux l'éclairage soit l'une des fonctions évidentes de la lumière, il n'existe que peu d'exemples non équivoques d'un tel usage de la bioluminescence chez les ani-

maux. On peut toutefois citer l'exemple de certaines lucioles *Photuris* qui utilisent leur lumière comme « phare d'atterrissage » pour illuminer la feuille ou la brindille sur laquelle elles comptent atterrir. On connaît aussi le *Photoblepharon*, un poisson nocturne qui vit en eau superficielle et qui illumine le plancton dont il se nourrit à l'aide d'un faisceau de lumière bleue produit grâce à d'énormes organes lumineux sous-orbitaires. Maintenus en aquarium dans l'obscurité, ces poissons perdent quelquefois irréversiblement leur bioluminescence, si bien qu'ils deviennent incapables de se sustenter... Terminons avec un dernier exemple, pris en eau très profonde. La lumière rouge étant fortement absorbée par l'eau, les animaux marins ne sont généralement pas sensibles aux radiations rouges ou infrarouges, et tout particulièrement ceux qui vivent en eau profonde à plus de 500 mètres où il ne subsiste aucune trace de radiation solaire. Ces animaux voient surtout dans le vert et le bleu. Dans ce contexte, un prédateur qui aurait développé exceptionnellement une capacité à voir le rouge serait avantage... En effet, à la recherche de proies, il pourrait alors éclairer son environnement proche avec une lumière rouge sans prendre le risque d'être repéré ! Cette faculté est d'autant plus intéressante qu'il existe en mer profonde de nombreuses proies, rouges justement (souvent des crustacés), invisibles en lumière bleue, mais bien visible en lumière rouge. Comme exemple de prédateur capable d'éclairer sa proie de cette manière, on peut citer le « poisson dragon » *Malacosteus*, un poisson vivant dans les océans tempérés et subtropicaux.

Il est à noter que les militaires emploient une technique tout à fait similaire en éclairant les cibles en infrarouge et en les observant avec des caméras sensibles dans cette gamme... Signalons aussi que pendant la Seconde Guerre mondiale, les officiers japonais capturaient une certaine espèce de crustacé cypridine bioluminescent très abondante sur les côtes japonaises, et dont la luminescence

résiste à la dessiccation. Une pincée de cypridines secs, écrasée dans la paume de la main et humidifiée, émettait une lueur suffisante pour lire une carte.

L'art de se cacher en luisant

La bioluminescence permet à certains animaux de se dissimuler. En effet, si l'on observe par le dessus un animal situé à 700 mètres de profondeur, on le verra comme une silhouette plutôt claire se détachant sur un fond sombre. A l'inverse, si on l'observe par le dessous, on le verra comme une silhouette sombre sur un arrière-plan plus clair, car éclairé par la lumière solaire. Afin de ne pas être vu, l'animal a donc intérêt à être sombre sur sa face dorsale et clair sur sa face ventrale. Aussi, n'est-il pas étonnant que de nombreux animaux vivant entre 300 et 1 000 mètres de profondeur possèdent sur leur face ventrale des parties bioluminescentes. La proportion de ces zones est d'ailleurs plus faible chez ceux qui évoluent à des profondeurs plus importantes, à mesure que la lumière du jour disparaît. Certains animaux, en particulier les calmars *Argyrolepecus* ou le Cyclothone pâle (*Cyclothone pallida*) sont même en mesure d'ajuster très étroitement l'intensité de la lumière qu'ils émettent pour se fondre au mieux dans la lumière du jour en arrière-plan, en fonction de l'heure et de la profondeur à laquelle ils évoluent. Signalons que cette technique de camouflage par contre-éclairage a été mise au point, testée, puis abandonnée par l'aviation militaire américaine pendant la Seconde Guerre mondiale.

Une arme de dissuasion

Pour beaucoup d'organismes marins, la bioluminescence joue un rôle protecteur qui éloigne les prédateurs. Ainsi, certaines crevettes du genre *Acanthephyra* qui vivent en eau profonde crachent un liquide luminescent vers les yeux des poissons qui tentent de les capturer. La lumière est suffisante pour éblouir et distraire le prédateur, permettant à

FIGURE 5
Lampyre femelle
 (ver luisant).
 Contrairement
 à la grande majorité des
 insectes,
 les lampyres femelles ne
 sont pas ailées. C'est
 sans doute la raison
 pour laquelle dans le
 langage courant
 on les confond
 avec des vers.
 © G. Simonin.



la crevette de fuir. Le *Photoblepharon*, dont il a été question précédemment, possède un organe lumineux qui fonctionne en permanence, mais l'animal peut le masquer à volonté à l'aide d'une sorte de paupière noire. Lorsqu'il se sent menacé, il fait clignoter rythmiquement son organe lumineux : cela perturbe ses prédateurs et permet à l'animal de fuir. Certaines méduses du genre *Atolla* utilisent leur bioluminescence pour « crier » véritablement au secours : lorsque la méduse est attaquée, elle émet des signaux lumineux qui attirent l'attention de prédateurs du prédateur par lequel la méduse est menacée... Pour finir, signalons que certaines algues unicellulaires, des dinoflagellés, sont responsables de la luminescence qui apparaît dans le sillage des bateaux, et constituent la nourriture de nombreux crustacés. La nuit, en réponse à toute stimulation mécanique, ces dinoflagellés émettent un court flash d'un dixième de seconde environ. Or, expérimentalement, on a montré que les flashes réduisent la consommation des crustacés qui les mangent, si bien qu'il est raisonnable de penser que la bioluminescence de ces dinoflagellés augmente leur chance de survie.

A titre anecdotique, ces algues ont joué un rôle particulier pendant la guerre, à commen-

cer par la Première Guerre mondiale : le sous-marin U-34, le dernier submersible allemand coulé par les alliés, avait été repéré par son sillage luminescent... De même, ce sont ces mêmes sillages qui, durant la Seconde Guerre mondiale, permettaient parfois aux pilotes de retrouver leur porte-avions la nuit. Enfin, lors de la première guerre du Golfe, les Américains ont dû modifier le trajet suivi par les navires afin d'éviter les bancs de dinoflagellés qui risquaient de trahir leur présence. On comprend alors l'intérêt que l'US Navy manifeste pour le repérage des algues luminescentes et les recherches qu'elle finance à ce sujet...

Attraction lumineuse

De nombreux animaux emploient la bioluminescence pour attirer vers eux des congénères pour l'accouplement, des proies, ou bien les deux. Dans sa forme la plus simple, la fonction d'attraction entre congénères peut se manifester par un dimorphisme sexuel : chez certains poissons, la position des zones lumineuses sur le corps n'est pas la même selon qu'il s'agit du mâle ou de la femelle. A l'inverse, pour attirer des proies, certaines espèces de poissons telles que les baudroies agitent devant leur gueule une petite « lanterne » lumineuse qui attire de petits pois-

sons curieux qu'elles mangent aussitôt (fig. 4).

Les parades nuptiales constituent une manière plus élaborée pour attirer des congénères. Les parades les plus spectaculaires sont certainement celles des lucioles et des lamproyres, tous deux des coléoptères. Selon les espèces, un seul sexe ou les deux peuvent émettre de la lumière. Chez le lamproyre d'Europe, la femelle est dépourvue d'ailes : il s'agit de ce que l'on appelle communément le « ver luisant » (fig. 5). Tout en luisant sur un arbre, elle attend qu'un mâle la repère et vole jusqu'à elle. Chez de nombreuses espèces de luciole, les femelles sont ailées et les deux sexes émettent de la lumière. D'étonnantes méthodes d'émission de signaux lumineux ont été mises au point afin d'éviter la confusion lorsque plusieurs espèces communiquent simultanément. De manière générale, les lucioles adultes se nourrissent peu, mais les femelles *Photuris*, plutôt grandes, font exception. Ce qui est particulièrement remarquable chez *Photuris* est la manière dont la femelle convertit ses signaux pour attirer un congénère mâle ou une proie. Avant l'accouplement, les femelles répondent normalement aux messages des mâles de leur propre espèce. Après l'accouplement, elles répondent avec le code approprié aux appels des mâles d'autres espèces. Lorsque ces mâles s'approchent d'elles, les femelles *Photuris* les dévorent.

Pour finir, signalons que certaines parades lumineuses sont particulièrement spectaculaires dans la mesure où d'énormes populations de mâles émettent leurs flashes de manière synchrone. Bien que moins connue, ce genre de parade existe également chez certains organismes marins, notamment les petits crustacés *Vargula*.

Laboratoires bioluminescents

C'est essentiellement l'étude des insectes luminescents et des dinoflagellés qui a permis de mettre en évidence les mécanismes molé-

culaires de la production de lumière dans le monde vivant. Pourtant, la très grande majorité des organismes bioluminescents peuplent les abysses et sont donc difficiles à étudier. C'est en ce sens que la bioluminescence demeure un domaine peu connu, notamment pour ce qui relève de l'usage qu'en font ces espèces abyssales : les fonctions assignées aux signaux lumineux restent très souvent hypothétiques. Cette lumineuse invention de la nature conservera sans doute bien longtemps encore ses mystères abyssaux.

Toutefois, des applications de la bioluminescence ont été développées pour la biochimie, la biologie moléculaire et les biotechnologies : dosage de divers métabolites, gènes rapporteurs, sondes marquées, détection de contaminations bactériennes... par la luminescence produite. Il s'agit d'outils puissants, de plus en plus employés dans les laboratoires de recherches et dans l'industrie notamment afin d'éviter le recours aux marqueurs radioactifs.

De plus, certaines de ces applications peuvent être adaptées pour une utilisation pédagogique. Ainsi, l'utilisation de la luminescence du mélange luciférine-luciférase de la luciole permet non seulement la détection et le dosage de certaines molécules (ATP par exemple), car la réaction ne se produirait pas sans elles... mais aussi le suivi de diverses réactions enzymatiques.

K. F.



<http://bioluminescence.free.fr/dosatp.htm>
<http://www.inrp.fr/Access/biotic/neuro/techniques/imagerie/html/technique1.htm>