

Pourquoi les coraux n'attrapent-ils pas de coups de soleil ?

Auteur : J. Malcolm SHICK

Professeur émérite de zoologie et d'océanographie,
Faculté des sciences marines, Université du Maine, Orono, Maine, États-Unis

Quiconque voit un récif corallien tropical pour la première fois est émerveillé devant la diversité et l'abondance des organismes qui y vivent, et notamment devant les formes et les couleurs des coraux. Bien qu'ils ressemblent à des rochers ou à des arbres fossilisés, ce sont en fait des animaux formant des colonies composant le récif. C'est bien vite que les touristes se rendent compte, à leurs dépens, de l'intensité du soleil tropical et de la clarté de l'eau, ainsi que de la nécessité de se protéger pour éviter les coups de soleil. Pourtant, le physiologiste Paul Portier (qui a souvent accompagné le Prince Albert I^{er} de Monaco lors de ses expéditions océanographiques) s'est aperçu lors d'un séjour à la Grande Barrière de corail que les coraux prospèrent et « fleurissent » malgré le rayonnement solaire des tropiques. En effet, les récifs coralliens ont besoin de soleil et d'eau de mer transparente pour un développement sain.



Photo 1 : Les coraux vivant dans les eaux peu profondes de la Grande Barrière de corail reçoivent des doses d'UV parmi les plus nocives au monde. Photo : J.M. Shick.

Si l'eau est claire, c'est parce qu'elle présente une faible teneur en nutriments, et donc en phytoplancton. À la place, des millions d'algues unicellulaires, généralement appelées « zooxanthelles », vivent dans les cellules gastrodermiques tapissant la cavité digestive des coraux. Cette quintessence donne lieu à une symbiose alimentée par le soleil. Les algues captent la lumière du soleil grâce à la photosynthèse, et fournissent à l'animal-hôte la majeure partie de la matière organique qu'elles produisent. En échange,



l'hôte recycle ses déchets, tels que le dioxyde de carbone (de la respiration) et l'ammoniaque (issu du métabolisme des protéines), sous forme d' « engrais » pour les algues. Cette relation symbiotique est typique des récifs coralliens tropicaux modernes. Toutefois, pour que les algues puissent réaliser la photosynthèse, l'animal-hôte doit s'exposer à l'intense soleil tropical, et notamment au rayonnement ultraviolet de celui-ci. Les coraux constructeurs de récifs vivant dans des eaux peu profondes peuvent recevoir *chaque jour* jusqu'à 30 fois la dose minimum de rayonnement UV solaire provoquant un érythème chez les humains. Dans une eau claire, pauvre en composés organiques dissous qui auraient pu absorber le rayonnement UV solaire, ces longueurs d'onde pénètrent sous la surface. Alors pourquoi les coraux n'attrapent-ils pas de coups de soleil ?

Ce qui vaut pour les êtres humains vaut pour les coraux : ces derniers ont recours à un filtre solaire qui absorbe les UV du soleil, avant qu'ils ne puissent endommager leurs tissus. Le rayonnement UV solaire atteint la Terre sous forme d'UVA (320-400 nm) et d'UVB (290-320 nm). Leurs longueurs d'onde ne représentent qu'un faible pourcentage de la totalité du spectre solaire. Le restant du spectre se compose :

- de rayonnements avec des longueurs d'onde moyennes, ou rayonnement visible, utilisé dans la photosynthèse chez les algues et les plantes (rayonnement photosynthétiquement actif, RPA, ou PAR de l'anglais *Photosynthetically Active Radiation*), ainsi que dans la vision chez les animaux ;
- du rayonnement infrarouge (IR) à grande longueur d'onde, qui se manifeste sous forme de chaleur.

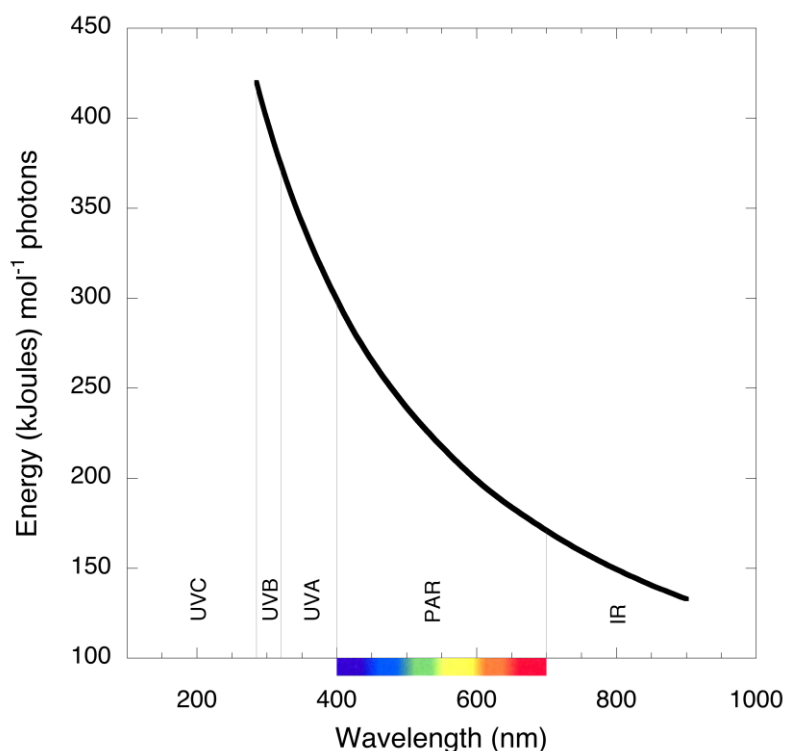


Figure 1 : Le contenu énergétique de chaque photon du rayonnement solaire est inversement proportionnel à sa longueur d'onde. Modifiée à partir de Shick, 2007 [7].

Les longueurs d'onde UVB, les plus courtes, sont les moins abondantes car elles sont pour la plupart neutralisées par la couche d'ozone protectrice de la Terre. Signalons que le rayonnement UVC à longueurs d'onde encore plus courtes, très énergétique, n'atteint pas la Terre car il interagit avec les composants atmosphériques, par exemple avec l'O₂, pour former la couche d'ozone (O₃) qui va, à son tour, empêcher la majeure partie du rayonnement solaire UVB de nous atteindre.

Le rayonnement UVB contient beaucoup d'énergie par photon, ce qui fait que, à faible dose, il peut gravement endommager les tissus en excitant et en altérant les biomolécules lorsqu'il les frappe. Le support de l'information génétique dans les cellules, l'ADN, y est particulièrement vulnérable, tout comme les enzymes et autres protéines. Les plus courtes longueurs d'onde UVA sont elles aussi très énergétiques, et peuvent indirectement endommager les tissus en interagissant avec l'oxygène moléculaire (O₂), ce qui se traduit par la formation de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO), tels les peroxydes toxiques et les radicaux libres qui endommagent les membranes et autres composants cellulaires.

Au début du XX^e siècle, les scientifiques soupçonnaient le rayonnement UV d'endommager les coraux, mais les premières expériences sur le terrain ne virent le jour que dans les années 1980. Des coraux prélevés entre 10 et 25 m de profondeur et transférés dans les eaux de surface, ou dans un aquarium sur le rivage, et exposés en plein soleil, mouraient, sauf s'ils étaient protégés par des vitres ou par du plastique acrylique, opaques aux UV, qui permettent le passage des longueurs d'onde RPA. Chez les coraux, le rayonnement UV provoque des effets sublétaux, notamment une diminution de la croissance squelettique, car il ralentit leur calcification, et inhibe la photosynthèse chez leurs zooxanthelles. De manière générale, les coraux vivant dans les eaux superficielles sont moins sensibles au rayonnement UV que les coraux des mêmes espèces vivant en eaux plus profondes et transférés en surface.

Dans les années 1960, des scientifiques japonais ont découvert, chez les algues rouges, des composés absorbant fortement les UV. Kazuo Shibata a constaté que des extraits de coraux symbiotiques absorbaient eux aussi fortement aux alentours de 320 nm (dans le spectre UVB/UVA), car ils contenaient une série de composés ayant chacun une structure chimique légèrement différente, et absorbaient donc chacun une longueur d'onde différente, avec une efficacité maximale. Ces composés, appelés « S-320 » (car absorbant à cette longueur d'onde), étaient plus concentrés chez les coraux vivant en eaux superficielles que dans ceux vivant dans les eaux plus profondes ou dans des endroits ombragés. Au début des années 1980, Paul Jokiel et Richard York ont démontré, sous lumière naturelle, que la concentration en S-320 fluctuait au gré de l'exposition aux UV. Ces résultats, associés à la différence de sensibilité aux UV chez les coraux vivant en eaux superficielles ou profondes, laissaient penser que les composés S-320 jouaient un rôle de protecteur contre les UV dans les eaux superficielles.

En comparant avec des extraits de spores de champignons terrestres (mycosporines), Walter Dunlap et Bruce Chalker ont montré que les substances S-320 des coraux sont une série de molécules similaires, appelée collectivement « acides aminés de type mycosporine » (MAA) et possédant une structure chimique individuelle et donc une longueur d'onde d'absorbance maximale, λ_{max} , variable. Bien que les MAA absorbent fortement les rayons UV, ils sont transparents aux RPA et n'interfèrent donc pas avec la photosynthèse. Voilà pourquoi ils sont incolores et non pas « pigmentés » et n'ont rien à voir avec les superbes couleurs des coraux

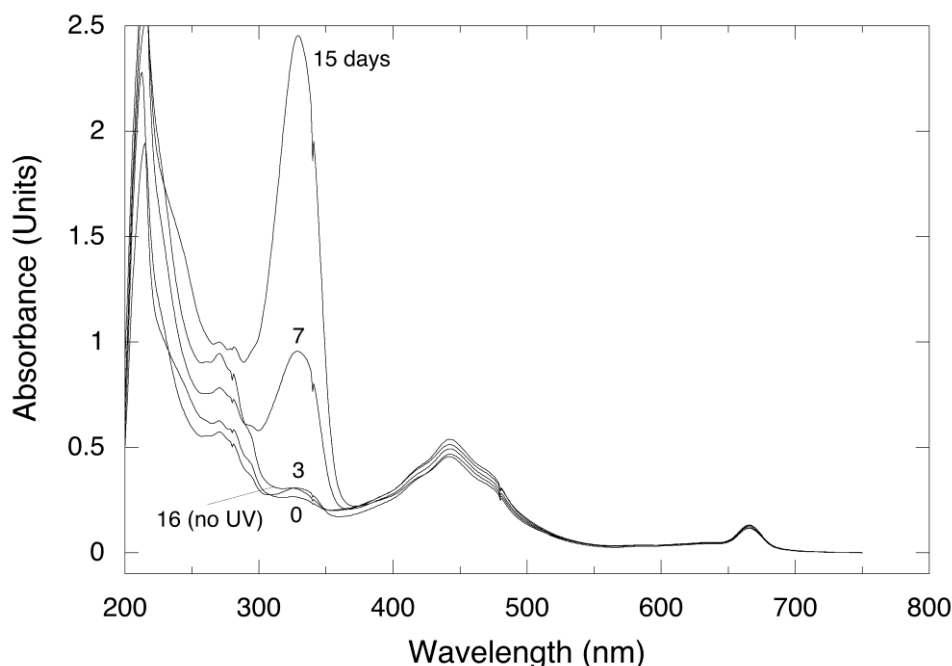
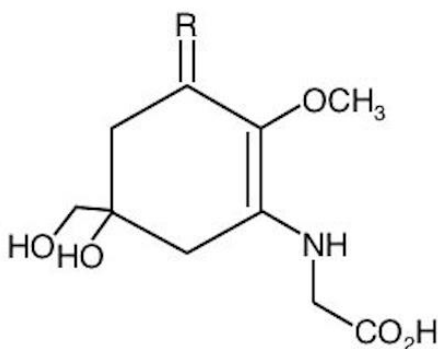


Figure 2 : Des échantillons de *Stylophora pistillata* cultivés durant des années dans les aquariums du Centre Scientifique de Monaco n'avaient jamais été exposés au rayonnement UV.

Des extraits de ces coraux, le jour 0 d'une expérience, ne présentaient que des traces de composés absorbant les UV. Une exposition expérimentale à des UVA + UVB, dans une large bande, en présence de RPA, a provoqué la production de composés absorbant autour de 327 nm chez les coraux pendant 15 jours. Les coraux de contrôle, situés dans le même aquarium mais protégés du rayonnement UV pendant 16 jours, n'ont pas accumulé de composés absorbant les UV. Les pics, situés à 664 nm et de 400 à 500 nm, correspondent à la chlorophylle algale et aux pigments accessoires. Shick *et al.*, 1999 [11].



Mycosporine-glycine: R = O; λ_{\max} = 310 nm

Palythine: R = NH; λ_{\max} = 320 nm

Diverse MAAs: R = N of amino acid or other amine;
 λ_{\max} = 330–360 nm

Figure 3 : Structure fondamentale des MAA. Le « R » représente les substitutions chimiques, qui modifient la composition de la molécule, et donc son λ_{\max} . À ce jour, une vingtaine de MAA différents ont été identifiées. Un corail contenant plusieurs MAA possède un « filtre à bande large », qui intercepte une vaste gamme de longueurs d'onde UVA et UVB avant qu'elles n'endommagent ses composants cellulaires. Shick, 2007 [7].

Il semblerait que les MAA soient synthétisés par le biais de la voie métabolique du shikimate, qui est présente chez les champignons et les algues, mais n'existe pas chez les animaux (tel le corail-hôte). Voilà pourquoi les scientifiques ont longtemps supposé que les algues symbiotiques étaient également la source des MAA chez les coraux. Des expériences plus récentes, mettant en scène des inhibiteurs de la voie du shikimate, ont confirmé son rôle dans la biosynthèse des MAA coralliens.

Ainsi, le corail-hôte ne se contente pas d'obtenir des nutriments organiques grâce aux algues, celles-ci lui apportent aussi une protection face aux UV en jouant le rôle de filtres UV naturels. Toutefois, lorsque les concentrations de MAA étaient mesurées dans la totalité du corail et dans les zooxanthelles isolées du corail, elles étaient largement supérieures chez l'animal, et plus particulièrement dans ses tissus ectodermiques (ou paroi externe). Du point de vue du filtrage UV, cette localisation est logique étant donné que la lumière du soleil va toucher en premier la surface de l'ectoderme. En y concentrant les MAA, l'hôte et les algues, situées plus à l'intérieur de ses tissus, sont protégés contre le rayonnement UV, car ces longueurs d'onde sont interceptées avant de pouvoir atteindre les cibles cellulaires critiques.

Les MAA sont des filtres UV tout désignés à l'intérieur des cellules du corail, car ils absorbent le rayonnement UV solaire énergétique et dissipent l'énergie de manière inoffensive sous forme de chaleur, au lieu de former des intermédiaires réactionnels pouvant être toxiques pour les cellules. Certains MAA font également office d'antioxydants en protégeant contre les DRO, ce qui contribue également à éviter les effets néfastes du soleil.

Il n'en reste pas moins que la diversité moléculaire des MAA est également plus grande chez la colonie corallienne que chez les algues isolées, et que les zooxanthelles élevées en culture produisent peu, voire pas de MAA, ce qui semble contredire l'idée que les MAA sont des produits des symbiotes algaux. L'avènement des technologies génomiques et protéomiques a permis à Walter Dunlap, Paul Long et leurs collègues [5, 13] de découvrir que, bien que les enzymes de la voie du shikimate impliquées dans la fabrication des précurseurs utilisés dans la biosynthèse des MAA se situent effectivement dans les algues, le processus doit être mené à bien dans les cellules animales par d'autres enzymes, spécifiques de l'hôte et ne se trouvant pas chez les algues. Ainsi, lors de la symbiose corallienne, qui a évolué durant des millions d'années pour prospérer au soleil, la biosynthèse des filtres UV rendant possible l'exposition au soleil est une « adaptation métabolique partagée » par les deux partenaires : l'algue et l'animal. Nos expériences réalisées au Centre Scientifique de Monaco montrent que l'éventail de MAA différents chez les coraux (jusqu'à 10 chez *Stylophora pistillata*) est dû au fait que la machinerie métabolique de l'hôte transforme des MAA primaires simples en MAA secondaires plus complexes, plus stables, moins acides et absorbant un plus large spectre d'UV [6, 11, 12].



Encadré 1 : Les MAA concentrés dans les tissus de l'hôte corallien protègent à la fois le corail lui-même et ses symbiotes zooxanthelles.

Le rôle des MAA dans la photoprotection aux UV chez les coraux peut être testé de manière expérimentale. Comme pour les coraux acroporidés étudiés précédemment par Walter Dunlap, Bruce Chalker et James Oliver, des colonies d'*Acropora microphthalmma* ont des niveaux de MAA plus élevés quand elles grandissent à faible profondeur, alors que ces concentrations diminuent fortement en eau profonde (Figure A). Les colonies transférées depuis les eaux profondes vers les eaux superficielles seront exposées à des niveaux de rayonnement UV solaire bien plus intenses, ce qui devrait nuire aux coraux des eaux profondes qui présentent des concentrations en filtre UV plus faibles.

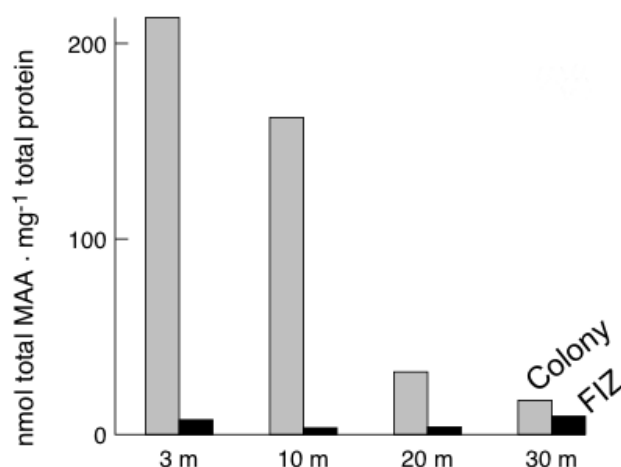


Figure A : Teneurs en filtres UV naturels – acides aminés de type mycosporine, MAA – (en nanomoles par milligramme de protéine) chez *Acropora microphthalmma* vivant à différentes profondeurs. La figure montre les concentrations en MAA chez l'ensemble de la colonie corallienne (hôte + zooxanthelles, bandes grises) et chez les zooxanthelles venant d'être isolées (FIZ, bandes noires) des mêmes colonies. Données issues de Shick *et al.*, 1995 [9].

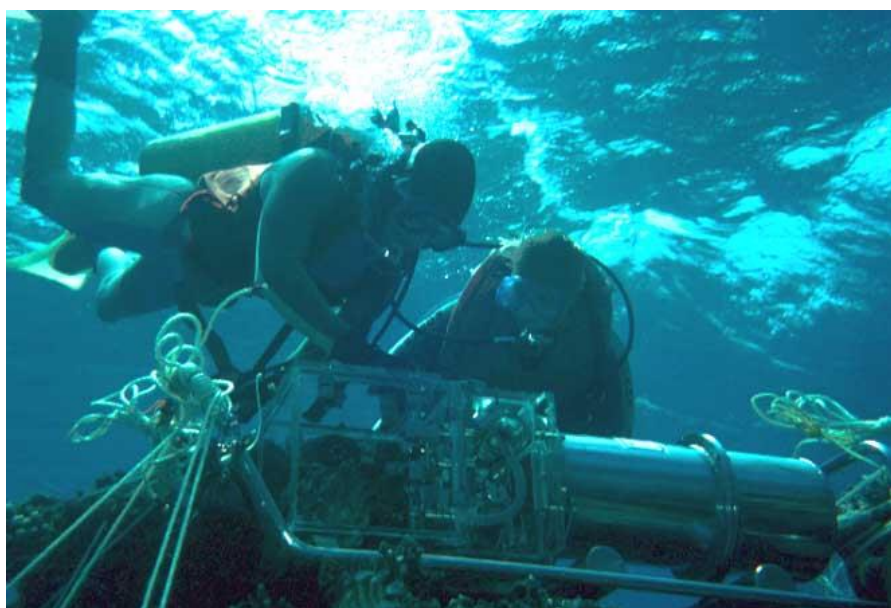


Photo a : Des plongeurs de l'Australian Institute of Marine Science disposent un appareil pour mesurer la photosynthèse chez une colonie corallienne placée dans la chambre en plastique (à gauche). Des appareils identiques dotés de chambres faites en Plexiglas opaque aux UV (UVO) ou transparent aux UV (UVT) ont été déployés à 1 mètre de profondeur, exposés en plein soleil. Les coraux collectés à différentes profondeurs et placés dans la chambre UVT étaient exposés à la totalité du spectre solaire, tandis que ceux placés dans la chambre UVO étaient protégés du rayonnement UV. La figure B présente les résultats de ces expériences. Photo : J.M. Shick.



Des colonies d'*Acropora microphthalma*, vivant à des profondeurs de 20 à 30 m, étaient exposées à un faible rayonnement UV, puis confrontées à des niveaux plus élevés après transfert dans une chambre transparente aux UV, à une profondeur de 1 m (Photo A). Par rapport à des colonies également issues d'eaux profondes, puis placées dans une chambre opaque aux UV, et donc à l'abri du rayonnement UV à 1 m, les colonies dans la chambre **UVT** présentaient une forte inhibition, induite par les UV, des pics de photosynthèse (mesurés par la production d'O₂ par milligramme de chlorophylle). Les coraux vivant dans les eaux superficielles (2 à 10 m) étaient régulièrement confrontés à des niveaux de rayonnement UV supérieurs, qui ne nuisaient pas à leur photosynthèse. Ces résultats sont en phase avec l'observation de concentrations supérieures de MAA chez les coraux entre 2 m et 10 m (Figure B).

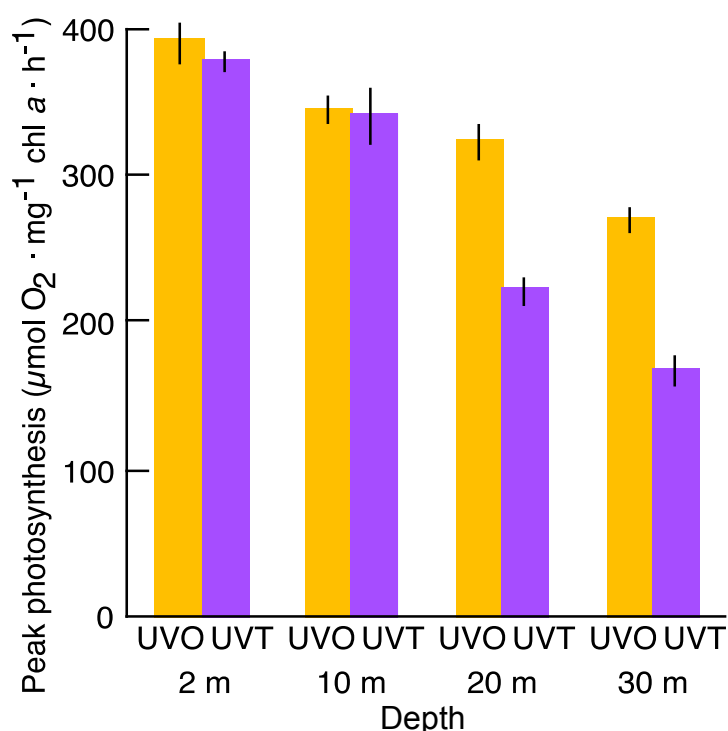


Figure B : Niveaux maximaux de photosynthèse chez des colonies d'*Acropora microphthalma* se développant à des profondeurs différentes, transplantées à 1 m et placées dans des chambres opaques aux UV (**UVO**, bandes jaunes) ou transparentes aux UV (**UVT**, bandes violettes), en plein soleil. La forte inhibition de la photosynthèse par le rayonnement UV (dans les chambres **UVT**) ne se produisait que dans les coraux qui vivaient à 20 et 30 m de profondeur. Données de *Shick et al.*, 1995 [9].

Il va de soi que la découverte d'une catégorie de filtres UV *naturels* chez les organismes marins a attiré l'attention des secteurs de la cosmétique et de la « cosméceutique ». Les MAA n'ont pour l'heure jamais été synthétisés en laboratoire, mais certaines entreprises ont intégré des MAA extraits d'algues récoltées de manière durable, dans des produits de soin pour la peau.

Pour en savoir plus

(* = revues de synthèse : les références à la littérature antérieure peuvent y être trouvées, y compris les études classiques mentionnés dans cette fiche).

- [1] *Carreto J.I. & Carignan M.O., 2011. Mycosporine-like amino acids: Relevant secondary metabolites. Chemical and ecological aspects. *Marine Drugs*, 9 : 387-446; doi:10.3390/md9030387



- [2] *De Mora S., Demers S. & Vernet M. (eds.) 2000. *The Effects of UV Radiation in the Marine Environment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, x + 324 p.
- [3] *Dunlap W.C. & Shick J.M., 1998. Ultraviolet radiation-absorbing mycosporine-like amino acids in coral reef organisms: a biochemical and environmental perspective. *Journal of Phycology*, 34 : 418-430
- [4] *Karentz D., 2001. Chemical defenses of marine organisms against solar radiation exposure: UV-absorbing mycosporine-like amino acids and scytonemin. In: *Marine Chemical Ecology*, J.B. McClintock & B.J. Baker (eds.), p. 481-520. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [5] Pope M.A., Spence E., Seralvo V., Gacesa R., Heidelberger S., Weston A.J., Dunlap W.C., Shick J.M. & Long P.F., 2015. O-methyltransferase is shared between the pentose phosphate and shikimate pathways and is essential for mycosporine-like amino acid biosynthesis in *Anabaena variabilis* ATCC 29413. *ChemBioChem*, 16 : 320-327; doi:10.1002/cbc.201402516
- [6] Shick J.M., 2004. The continuity and intensity of ultraviolet radiation affect the kinetics of biosynthesis, accumulation, and conversion of mycosporine-like amino acids (MAAs) in the coral *Stylophora pistillata*. *Limnology and Oceanography*, 49 : 442-458.
- [7] *Shick J.M. 2007. Ultraviolet stress. In : *Encyclopedia of Tidepools and Rocky Shores*, M.W. Denny & S.D. Gaines (eds.), p. 604-609. University of California Press, Berkeley
- [8] *Shick J.M. & W.C. Dunlap W.C., 2002. Mycosporine-like amino acids and related gadusols: Biosynthesis, accumulation, and UV-protective functions in aquatic organisms. *Annual Review of Physiology*, 64 : 233-262.
- [9] Shick J.M., Lesser M.P., Dunlap W.C., Stochaj W.R., Chalker B.E. and Wu Won J., 1995. Depth-dependent responses to solar ultraviolet radiation and oxidative stress in the zooxanthellate coral *Acropora microphthalma*. *Marine Biology*, 122 : 41-51
- [10] *Shick J.M., Lesser M.P. & Jokiel P.L., 1996. Effects of ultraviolet radiation on corals and other coral reef organisms. *Global Change Biology*, 2 : 527-545
- [11] Shick J.M., Romaine-Lioud S., Ferrier-Pagès C. & Gattuso J.-P., 1999. Ultraviolet-B radiation stimulates shikimate pathway-dependent accumulation of mycosporine-like amino acids in the coral *Stylophora pistillata* despite decreases in its population of symbiotic dinoflagellates. *Limnology and Oceanography*, 44 : 1667-1681
- [12] Shick J.M., Ferrier-Pagès C. & Grover R. & Allemand D., 2005. Effects of starvation, ammonium concentration, and photosynthesis on the UV-dependent accumulation of mycosporine-like amino acids (MAAs) in the coral *Stylophora pistillata*. *Marine Ecology Progress Series*, 295 : 135-156
- [13] Starcevic A., Dunlap W.C., Cullum J., Shick J.M., Hranueli D. & Long P.F., 2010. Gene expression in the scleractinian *Acropora microphthalma* exposed to high solar irradiance reveals elements of photoprotection and coral bleaching. *PLoS ONE*, 5 (11) : e13975

Liens vers des sites internet :

- [14] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/UVB/>
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet>
- [16] <http://www.skincancer.org/prevention/uva-and-uvb>
- [17] <http://www.epa.gov/athens/publications/reports/Zepp600R03095UVExposureCoral.pdf>
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Mycosporine-like_amino_acid

Fiches de l'Institut océanographique:

<http://www.institut-ocean.org> > L'Institut et la science > Fiches scientifiques:

- [19] Christine Ferrier-Pagès, décembre 2014 : *Les coraux scléactiniaires de Méditerranée*
<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1419933840.pdf>
- [20] Jean Jaubert, avril 2013 : *Les récifs coralliens*
<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1366629432.pdf>