



**HAL**  
open science

## **Rapport d'ouverture thématique: L'énergie solaire dans le monde vivant**

Florian Labourel,, Claudia Gutierrez-Silva,, Deniz Yalcin,

### ► **To cite this version:**

Florian Labourel,, Claudia Gutierrez-Silva,, Deniz Yalcin,. Rapport d'ouverture thématique: L'énergie solaire dans le monde vivant. [Interne] INSA de Lyon. 2015. <hal-01144250>

**HAL Id: hal-01144250**

**<https://hal.science/hal-01144250v1>**

Submitted on 21 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

# Rapport d'ouverture thématique

## L'énergie solaire dans le monde vivant *Une source d'inspiration pour le développement durable*

Florian LABOUREL  
Claudia GUTIERREZ-SILVA  
Deniz YALCIN  
*Encadrés par Yvan RAHBE*

13 avril 2015

## Résumé

L'énergie est une ressource indispensable au monde vivant. L'Homme l'a également rendue indispensable à ses activités quotidiennes. Tant que l'énergie est puisée dans des ressources chimiques fossiles, elle est soumise à la rareté : l'Homme se retrouve donc confronté à sa disparition progressive, comme le Vivant l'a été par le passé. Le Vivant fonctionne depuis grâce à l'énergie solaire dont les réserves ne se tariront pas avant longtemps. Il est dans l'intérêt de l'Homme de suivre la même voie, et, dans la mesure où le Vivant est un grand laboratoire d'expérimentations respectueux de l'environnement, s'en inspirer permettrait de facto un développement durable. Il serait dommage de ne pas s'intéresser consciemment à ce qui fonctionne dans la Nature, alors même qu'inconsciemment, nous l'avons toujours fait. Dans ce compte-rendu, nous explorons les dispositifs utilisés par le Vivant pour tirer profit de l'énergie solaire et tentons de valoriser la bio-inspiration en dévoilant certaines pistes actuelles, grâce notamment au site Asknature.

## Abstract

Energy is an essential ingredient for Life. Besides, Mankind also needs energy to feed his everyday activities. As long as energy consumption relies on fossil fuels such as oil, it will face scarcity and, as time goes by, their complete vanishment. However, Life has already experienced this rising lack of chemical resources. And Life found an answer rather convincing : Solar energy which will remain a safe supply for long. If mankind wants to flourish in a sustainable way that leaves intact environment, it desperately needs to follow the same way and to seek Nature, the greatest chemical laboratory ever. By the way, humanity have always seek and mimic Nature in order to develop its technologies. Provided this fact, we explore devices used by Life to exploit Solar energy and try to show that bio-inspiration may be the safest way out to deal with energy and environmental issues. AskNature will provide most of the examples which we refer to, as it is known to be quite exhaustive.

## Remerciements

Nous remercions Yvan Rahbé pour ses précieux conseils, son investissement permanent et son enthousiasme communicatif, ainsi que Christophe Ménézo pour son éclairage sur le côté opérationnel de la biomimétique appliquée au bâtiment. Nous remercions également Mathieu Bouyer qui a rendu ce projet possible et dont la passion pour le développement durable nous a permis d'en découvrir de nombreuses facettes.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>L'énergie dans le monde Vivant</b>	<b>6</b>
1.1	D'où provient-elle? . . . . .	6
1.1.1	Une Histoire du Soleil . . . . .	6
1.1.2	L'énergie produite par le Soleil . . . . .	8
1.2	A quoi sert l'énergie lumineuse dans le Vivant? . . . . .	10
1.2.1	L'énergie comme source d'activité . . . . .	10
1.2.2	L'énergie comme source d'information . . . . .	12
1.2.3	L'énergie comme source de communication . . . . .	14
1.2.4	L'énergie comme source de camouflage . . . . .	15
1.3	Comment est-elle utilisée? . . . . .	17
1.3.1	La conversion de l'énergie . . . . .	18
1.3.2	Le stockage de l'énergie . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Les mécanismes d'utilisation de l'énergie solaire dans le Vivant</b>	<b>19</b>
2.1	La captation primaire : du rôle prééminent de la photosynthèse dans la biodiversité . . . . .	20
2.1.1	La captation à visée métabolique . . . . .	20
2.1.2	La captation à visée informationnelle . . . . .	23
2.2	Absorption, communication lumineuse et camouflage ou comment utiliser les propriétés physiques de la lumière . . . . .	23
2.2.1	L'utilisation de la réflexion de la lumière : la couleur pigmentaire . . . . .	24
2.2.2	Les couleurs structurales . . . . .	25
<b>3</b>	<b>L'Homme et l'énergie solaire</b>	<b>27</b>
3.1	Applications actuelles de la technologie solaire . . . . .	27
3.1.1	Architecture et énergie passive . . . . .	27
3.1.2	Chauffage de l'eau et des locaux . . . . .	27
3.1.3	Production d'électricité . . . . .	29
3.2	Les grands enjeux de l'énergie solaire pour l'Homme . . . . .	32
<b>4</b>	<b>La bioinspiration pour l'optimisation de l'utilisation de l'énergie solaire : un laboratoire d'idées durables à prospecter</b>	<b>33</b>
4.1	Au siècle de la bio-inspiration : les pistes actuelles . . . . .	33
4.1.1	Photosynthèse artificielle . . . . .	33
4.1.2	L'enveloppe du bâtiment . . . . .	35
4.2	Au siècle de la bio-inspiration : une vision futuriste . . . . .	39
4.2.1	L'éclairage biologique . . . . .	39
4.2.2	L'invisibilité ne sera plus réservé aux super-héros . . . . .	40
4.2.3	La détection sous-marine par photosensibilité sélective . . . . .	41
4.2.4	Des yeux artificiels à facette : vers une vision vivifiée? . . . . .	42

## Introduction : De la rareté des ressources énergétiques dans le règne vivant

La vie est apparue sur Terre il y a plusieurs milliards d'années dans des conditions et selon des modalités qui demeurent à élucider. Les premières formes de vie dont on a retracé l'existence sont des organismes proches des cyanobactéries actuelles. Leur trace a été retrouvée dans des stromatolithes, des roches calcaires bio-construites par cet embranchement de communautés bactériennes. Si l'émergence de la vie reste un phénomène mal appréhendé à ce jour, les caractéristiques définissant un être vivant<sup>1</sup> sont en revanche plus consensuels dans la communauté scientifique. Selon P.David et S.Samadi<sup>2</sup>, un être vivant est composé de matière organique, c'est-à-dire de molécules très complexes contenant une chaîne d'atomes de carbone liés entre eux (en raison de sa structure électronique<sup>3</sup>, il est "prompt" à former quatre liaisons) ainsi qu'à des atomes d'hydrogène et, dans une moindre mesure, à d'autres atomes tels que l'oxygène<sup>4</sup>. Ces molécules donnent lieu à une activité intense et coordonnée, le métabolisme, qui lui permet de se maintenir en vie et de se reproduire. Pour fonctionner, ce métabolisme<sup>5</sup> requiert de l'énergie.

Le mécanisme universel<sup>6</sup> dans lequel le Vivant puise son énergie est la conversion par hydrolyse d'ATP<sup>7</sup> en ADP<sup>8</sup> et phosphate inorganique. Une hydrolyse est une décomposition d'une substance chimique par l'eau : au passage, on remarque donc également le rôle crucial que joue l'eau dans le Vivant dès son avènement, avant même d'être utilisée pour ses qualités de solvant<sup>9</sup>. On suppose que dans le milieu naturel primitif<sup>10</sup>, les molécules d'ATP étaient abondantes<sup>11</sup>. Néanmoins, ces ressources étaient limitées dans la mesure où elles ne se renouvelaient pas, ou très lentement. Afin de se perpétuer, le monde Vivant a donc dû s'appuyer sur d'autres mécanismes susceptibles de lui fournir l'énergie dont il avait besoin. Dès lors, la réaction mettant en jeu l'ATP et l'ADP ne sera plus utilisée que pour convertir et transporter l'énergie issue de ces autres mécanismes : l'ATP devient la "monnaie énergétique" du Vivant. Cette réaction conserve donc un rôle de première importance mais elle n'est plus qu'un maillon de la chaîne.

Pour faire face à cette crise énergétique, certains être vivants acquièrent alors la capacité de recycler l'ADP en ATP. Ainsi, pour continuer son odyssée, le Vivant "invente"<sup>12</sup> la fermentation toujours utilisée par certaines bactéries dites anaérobies<sup>13</sup>, ainsi que par les muscles de certains organismes

---

1. Bien que cette définition soit issue de l'observation de la vie sur Terre, ce sont aussi les caractéristiques qu'on s'attend à retrouver dans des formes de vie extraterrestres : l'avenir seul pourra infirmer ou confirmer cette hypothèse, à condition de trouver d'autres formes de vie.

2. P.David et S.Samadi, 2011, La théorie de l'évolution, Une logique pour la biologie, Editions Flammarion Champs sciences, Version revue et augmentée.

3. configuration  $s^2p^2$  avec quatre électrons sur la couche externe

4. Il a été émis l'hypothèse que le silicium pourrait remplacer le carbone par exemple, en raison de ses caractéristiques proches (même colonne de la classification périodique, et donc, même capacité à créer des liaisons ; outre que ce soit un métalloïde alors que le carbone est un non-métal, il est intéressant de noter que les atomes composant le Vivant terrestre dont le carbone comptent parmi les plus nombreux dans le cosmos, en raison de leur contenance modérée en fermions (électrons, quarks des protons et neutrons) ; le Vivant est donc composé des éléments les plus courants et simples du Cosmos.

5. Selon Wikipédia, le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent au sein d'un être vivant pour lui permettre notamment de se maintenir en vie, de se reproduire, de se développer et de répondre aux stimulus de son environnement.

6. Par universel, on entendra dans l'état actuel des connaissances.

7. Adénosine triphosphate, contenant trois groupements phosphate.

8. Adénosine diphosphate, contenant deux groupements phosphate.

9. Cette importance est encore renforcée par l'utilisation de l'eau comme transporteur (exemple du sang) grâce à sa phase liquide, ainsi que par d'autres phénomènes, y compris énergétique.

10. C'est-à-dire les conditions régnant sur Terre pendant les premières centaines de millions d'années précédant l'apparition de la Vie.

11. R.Pin et al., Dossiers Science et Connaissance, Vol.5, Les théories de l'évolution, p.51

12. Les guillemets sont nécessaires car il convient de ne pas tomber dans une vision finaliste de l'évolution : ce n'est pas une invention consciente avec le but précis de survivre, guidée par un dessein, mais une invention contingente et téléonomique, sans laquelle le Vivant ne se serait pas perpétué et aurait simplement disparu.

13. C'est-à-dire ne recourant pas à l'oxygène pour se fournir en énergie.

pluricellulaires lorsque les apports en dioxygène deviennent insuffisants : c'est le fameux effet "mur" ressenti lors d'un effort intense et prolongé, comme le 400m en athlétisme.

Néanmoins, les ressources en glucose étaient elles aussi limitées. C'est dans ces conditions de raréfaction du glucose que la fonction de photosynthèse est apparue. La photosynthèse consiste à convertir l'énergie solaire en énergie chimique pour faire fonctionner son métabolisme. Elle constitue un tournant fondamental dans le développement de la vie sur Terre, car elle s'appuie sur une énergie dont les proportions sont considérables et renouvelées continûment tant que les réactions de fusion nucléaire se produisent au coeur du Soleil, mais aussi en raison des externalités qu'elle induit et sur lesquelles le monde Vivant pourra s'appuyer pour se diversifier<sup>14</sup>. De nos jours, la stabilité de la biosphère repose complètement sur cet approvisionnement énergétique par le rayonnement solaire. Ce n'est pas pour autant sa seule utilité dans le Vivant, qui a également mis à profit les propriétés particulières de l'énergie lumineuse pour réaliser d'autres fonctions destinées à améliorer la survie des individus.

A l'heure des prédictions alarmistes sur l'avenir de notre planète, stabilité de la biosphère et approvisionnement énergétique sont des enjeux brûlants. Effectivement, comme le monde Vivant par le passé, dont il représente aujourd'hui une espèce à la présence ostentatoire, l'Homme se retrouve aujourd'hui confronté à une crise énergétique due à l'épuisement des ressources, ainsi qu'à une crise environnementale issue de son impact sur les écosystèmes<sup>15</sup>. En effet, les technologies qu'il a développées pour catalyser son développement<sup>16</sup> et accroître ses capacités<sup>17</sup> consomment de grandes quantités d'énergie.

Historiquement, les grandes révolutions industrielles vont d'ailleurs souvent de pair avec le développement de l'exploitation d'une nouvelle source d'énergie<sup>18</sup>. Jusqu'à aujourd'hui, l'Homme s'est contenté d'exploiter des énergies chimiques ou physiques dites fossiles car disponibles dans son environnement dans des quantités restreintes et non renouvelables à court-terme (charbon, pétrole, uranium) en raison des processus dont ils procèdent. De surcroît, si les sociétés humaines persistent dans cette voie, il n'est pas exclu que les ressources fossiles ne soient plus reconstituées puisque les espèces-ressources<sup>19</sup> sont susceptibles de s'éteindre. La disparition emblématique de la Rhytine de Steller augure de ce qui pourrait survenir si l'Homme s'obstine à suivre le même mode de développement. Principalement chassée pour sa graisse utilisée comme combustible dans les lampes à huile, la Rhytine était un sirénien<sup>20</sup> peu farouche au rythme de reproduction lent<sup>21</sup> : quelques décennies auront suffi à l'exterminer et ainsi, à se priver de son potentiel énergétique.

L'Homme se retrouve donc lui aussi à un carrefour dans le développement de ses sociétés. Pour affronter le grand défi de l'énergie qui l'attend<sup>22</sup>, le Vivant est une source d'inspiration car son modèle

---

14. La réaction de photosynthèse capte du dioxyde de carbone et libère du dioxygène que le Vivant mettra à profit par la respiration cellulaire, qui, si elle existait jusque là, demeurerait marginale en raison de la rareté du dioxygène.

15. Les manifestations les plus notoires de cette crise sont la disparition massive d'espèces, l'influence plus ou moins forte sur le climat, la pollution des sols pour de longues périodes ; s'appliquant à l'ensemble de la biosphère, cette rupture est si marquée et ses effets si durables qu'elle pourrait être retracée dans un avenir lointain en se retrouvant figée dans les couches géologiques : les géologues se proposent donc de nommer Anthropocène l'ère géologique de l'Homme depuis qu'il s'est sédentarisé grâce à l'agriculture.

16. D'un point de vue démographique.

17. Par accroître ses capacités, on entendra, percevoir au-delà de ses sens, appréhender le monde autour de lui et créer des biens augmentant son bien-être ; le bien-fondé de l'idée assimilant le bien-être au matérialisme et plus encore au consumérisme est très discutable, mais il s'agit d'un champ de la réflexion sur le développement durable dont nous ne traiterons pas ici.

18. Ainsi qu'aux déploiements d'un nouveau type de réseau de communication ou de déplacement, dont les effets cumulatifs reposent sur leur intrication : exemple du train et du bateau avec la machine à vapeur, de la voiture et de l'avion avec les hydrocarbures.

19. Le pétrole résulte en effet de la décomposition lente de matière organique piégé au coeur de couches géologiques déformées par les contraintes tectoniques.

20. Les Siréniens sont un ordre comportant entre autres les lamantins. Apparentés aux proboscidiens, dont sont membres les éléphants, ils sont un des trois ordres de mammifères "retournés" à une vie marine indépendamment ; les deux autres sont d'une part les cétacés comprenant baleines, dauphins et apparentés, et d'autre part les pinnipèdes comprenant phoques, otaries et apparentés.

21. S. Leroy et al., *Les animaux disparus*, ça m'intéresse, One plus one éditions, p. 101

22. et, incidemment, celui du respect de l'environnement.

---

## La Rhytine de Steller a disparu

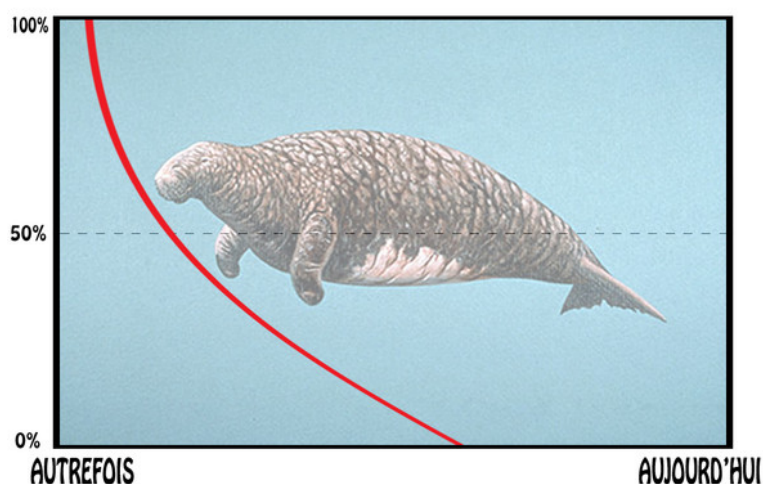


FIGURE 1 – La rhytine de Steller, victime de sa placidité et de ses réserves de graisse (Source : <http://edward.centerblog.net>)

---

basée sur la circularité des flux est durable grâce au processus de l'évolution qui l'a fait naître. Ainsi, dans le Vivant, l'équilibre des écosystèmes est conservé pendant de longues périodes, bien que cette position d'équilibre varie en permanence par le processus de coévolution que nous aborderons au fil de notre étude<sup>23</sup> : le Vivant est donc respectueux de l'environnement. Au-delà de cette considération purement écologique, il constitue un exemple d'autant plus pertinent qu'il a surmonté le défi énergétique avec succès grâce à l'emploi de l'énergie solaire, tout en s'accommodant des inconvénients que celle-ci comporte, notamment son intermittence.

L'objet du présent rapport est d'effectuer un état de l'art de l'utilisation de l'énergie solaire dans le monde vivant, en vue de dégager certaines caractéristiques desquelles pourraient s'inspirer la technique humaine pour surmonter la crise énergétique et environnementale à laquelle l'Homme est confronté. Cet état de l'art ne se veut pas exhaustif, car la tâche serait encyclopédique, mais plutôt un choix ciblé sur les grands principes du cycle énergétique dans le Vivant et les principaux mécanismes utilisés pour tirer parti du Soleil.

Pour mener à bien cette mission, nous allons d'abord chercher à caractériser l'énergie dans le Vivant en partant de sa provenance solaire. Dans un second temps, nous présenterons les mécanismes principaux par lesquels le monde vivant exploite cette énergie à des fins diverses et ouvrirons sur le potentiel biomimétique que le Vivant recèle. Nous intéresserons ensuite aux enjeux cristallisés autour du rapport qu'entretient l'Homme avec l'énergie, nous chercherons pour finir à montrer en quoi les "retours d'expérience" du monde vivant pourraient constituer une source d'inspiration pour nos sociétés. Pour ce faire, certaines applications plus ou moins futuristes seront présentées.

---

23. Il semble que seuls de profonds changements indépendants du Vivant, comme des modifications climatiques subites ou des changements géographiques, puissent entraîner des crises globales du Vivant plus ou moins profondes selon leur nature : la réunion des Deux Amériques a entraîné une petite crise localisée en bouleversant les écosystèmes locaux et entraîné la disparition d'espèces, mais celle-ci ne peut en rien être comparée aux grandes extinctions du Permien-Trias ou du Crétacé-Tertiaire au cours desquelles on estime que plus de la moitié des espèces auraient disparu ; par ailleurs, en-dehors de ces phénomènes exceptionnelles, les relations entre espèces sont plutôt de nature à améliorer les espèces dans une course aux armements sans vainqueur.

# 1 L'énergie dans le monde Vivant

Il n'existe pas de définition universelle de la vie d'autant que la vie sur Terre n'est peut-être qu'une manifestation de la vie parmi d'autres. Il paraît néanmoins acquis que la vie se caractérise par la perpétuation d'un composé (de matière organique sur Terre) capable de se reproduire en transmettant avec une très bonne fidélité l'information sur laquelle reposent son agencement et les fonctions qui lui permettent d'accomplir développement, nutrition et reproduction par une réponse spécifique à certains stimulus de l'environnement.

Pour effectuer ce cycle de perpétuation puis reproduction, un composé vivant est "le siège d'une activité intense et coordonnée" : le métabolisme<sup>24</sup>. Pour que cette activité puisse avoir lieu, le Vivant doit puiser de l'énergie dans son environnement.

## 1.1 D'où provient-elle ?

Sur Terre, l'énergie provient de différentes sources et existe sous différentes formes. Tout d'abord, il existe l'énergie lumineuse, dont une partie est émise par le Soleil et une autre est émise par la Terre elle-même, qui restitue par rayonnement ce qu'elle reçoit du Soleil et ce que fournit son noyau en fusion. Nous avons explicité dans l'introduction que l'énergie pouvait également se trouver sous forme chimique, stockée dans les liaisons moléculaires, comme c'est le cas de l'ATP, des sucres et des graisses. Elle existe également sous forme physique, contenue dans la masse des atomes<sup>25</sup>. Cette énergie de masse peut être libérée suivant des processus naturels par la désintégration radioactive d'isotopes instables, ou bien par le déclenchement de réactions nucléaires, de fission ou de fusion. Néanmoins, l'énergie stockée sous forme de masse est extrêmement compliquée à maîtriser de manière directe en raison de sa puissance colossale<sup>26</sup>, tandis que l'énergie chimique n'est que la conversion d'une énergie reçue. L'énergie exploitable sur Terre provient donc presque exclusivement du Soleil<sup>27</sup>, que ce soit de manière directe (rayonnement) ou indirecte (chimique) ; l'Homme est certes parvenu à domestiquer en partie l'énergie de masse par le processus de fission nucléaire utilisé au sein des centrales nucléaires, mais il est encore loin d'en maîtriser toutes les externalités et ne pourra pas compter sur le Vivant pour lui servir de source d'inspiration car celui-ci ne sait pas l'exploiter directement<sup>28</sup>. Pour comprendre ce qu'est l'énergie solaire, il faut revenir sur l'Histoire de cet astre dont on a longtemps cru qu'il était extraordinaire avant de comprendre qu'il est, au contraire, tout ce qu'il y a de plus ordinaire.

### 1.1.1 Une Histoire du Soleil

Le Soleil est une étoile de taille moyenne distante d'environ huit minutes-lumière de la Terre. C'est à la suite de la naissance de cette étoile qu'est née la Terre, comme l'ensemble des autres planètes du

---

24. P.David et S.Samadi, 2011, La théorie de l'évolution, Une logique pour la biologie, Editions Flammarion Champs sciences, Version revue et augmentée, p. 11 et 12

25. Selon la célèbre formule  $E=mc^2$ , toute masse au repos est équivalente à de l'énergie : dans l'état actuel des connaissances, on pense que cette forme de stockage s'est constitué peu après l'inflation cosmique : la cristallisation du Champ de Higgs aurait tout d'abord conféré à certaines particules cette caractéristique particulière qu'est la masse, avant que le refroidissement dû à l'expansion ne la fixe sous forme d'atomes (Les atomes ne peuvent se constituer qu'au-dessous d'une certaine température, par changement de phase entre l'état de plasma primordial où les nucléons puis les noyaux atomiques baignent dans une "mer d'électrons" et l'état gazeux.).

26. Selon un bon mot de Richard Feynman, il s'agit de la différence entre une explosion de dynamite qui réarrange les nuages électroniques et une explosion nucléaire, qui réarrange les noyaux des atomes : cela illustre bien la différence de force entre l'interaction électromagnétique, responsable des liaisons électroniques par échanges de photons et l'interaction forte responsable de la cohésion des quarks au sein du noyau, par échanges de gluons.

27. Énergie physique exploitée indirectement et sur laquelle nous allons revenir.

28. On peut d'ailleurs s'interroger sur la possibilité même d'utiliser l'interaction forte de manière directe, car elle requiert une grande chaleur initiale et produit des éléments radioactifs, donc instables, en grande quantité : or, le Vivant a besoin d'une relative stabilité de l'environnement auquel il appartient et n'est pas en mesure d'apporter de chaleur initiale : de plus, à des températures très élevées, l'eau ne peut en aucun cas agir comme un solvant, il faudrait donc qu'une autre molécule tienne ce rôle.

système solaire ainsi que d'autres astres occupant des volumes plus restreints, tels que les planètes naines<sup>29</sup> de la ceinture de Kuiper.

La naissance d'une étoile résulte de l'effondrement d'un nuage de poussières cosmiques sur lui-même. Cet effondrement gravitationnel échauffe le nuage et enclenche ainsi une succession de dilata-tions thermiques et contractions gravitationnelles. L'augmentation de la chaleur finit par déclencher les réactions de fusions nucléaires entre atomes d'hydrogènes<sup>30</sup>(on trouve un schéma les illustrant ci-dessous). Ces réactions sont à l'origine du rayonnement qui caractérisera l'étoile pendant l'essen-tiel de sa vie : son carburant principal est donc l'hydrogène. Lorsque le coeur de l'étoile aura épuisé l'hydrogène disponible, il s'effondrera de nouveau sur lui-même en s'échauffant derechef.

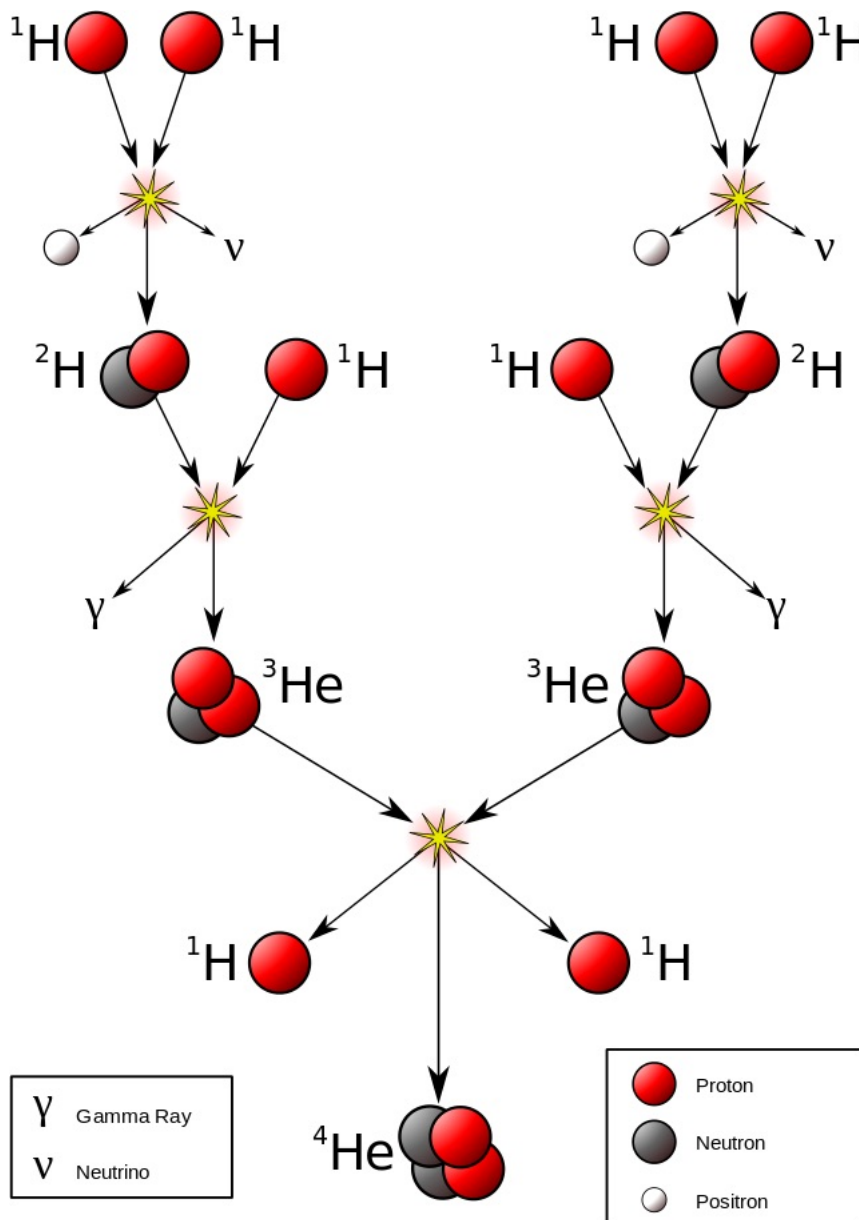


FIGURE 2 – Les réactions de fusion de l'hydrogène, un "moteur physique"<sup>31</sup> durable pour le Soleil (source : Wikipédia)

29. Pluton est la planète naine la plus célèbre en raison de son Histoire tumultueuse : sa rétrogradation du rang de planète à celui de planète naine a suscité une certaine animation lorsqu'elle s'est produite

30. Ces réactions aboutissent à un atome d'hélium 4.

31. L'expression peut paraître osée, car un moteur convertit une énergie microscopique de nature physico-chimique

Le Soleil se situe au-delà d'une masse critique suffisante pour déclencher les réactions de fusion de l'hélium, qui s'amorceront tandis que les couches internes de son enveloppe deviendront assez chaudes pour démarrer la fusion de l'hydrogène : il s'agit de la phase de géante rouge<sup>32</sup> au cours de laquelle le Soleil grossira jusqu'à englober Mercure et Vénus ; la Terre ne sera alors plus qu'un amas désertique, si elle n'est pas simplement vaporisée dans l'espace elle aussi, avant que le Soleil ne s'effondre de nouveau en une naine blanche, vestiges très chauds d'une étoile dont la température diminuera graduellement puisque la température n'aura pas été suffisamment élevée pour déclencher de nouvelles réactions thermonucléaires entre atomes de masses plus élevées que l'hélium et l'hydrogène. Calqué sur des modèles issus de l'observation d'autres astres, ce déroulement qu'il reste à peaufiner est largement accepté.

Quelles que soient les évolutions dans notre appréhension de l'Histoire du Soleil, ces processus se déroulent sur de très longues périodes. Globalement, plus une étoile contient de carburant, plus elle le consomme rapidement. Doté d'une masse moyenne, le Soleil devrait vivre encore plusieurs milliards d'années, et constitue donc un approvisionnement en énergie quasiment infini du point de vue de l'Homme, car la vie des espèces se comptent généralement en millions d'années. D'ici là, il aura en tout cas le temps de réfléchir à d'autres solutions si d'aventure il parvenait à subsister. Il pourrait alors devenir la meilleure arme pour perpétuer le Vivant tel que connu sur Terre, car il en est le seul représentant actuel capable de prévoir l'avenir, dans une certaine mesure, ce dont le processus d'évolution est tout autant incapable que les autres espèces<sup>33</sup>.

### 1.1.2 L'énergie produite par le Soleil

Le Soleil peut être apparenté à un corps noir dont le rayonnement est donné par la loi de Planck et ne dépend que de la température. Ce rayonnement est représenté dans le schéma ci-dessous :

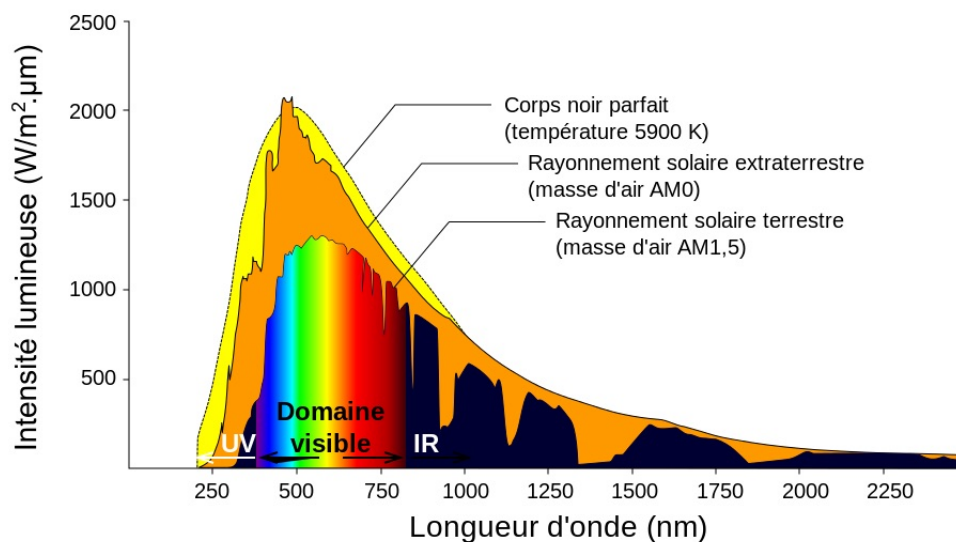


FIGURE 3 – Le Soleil, un rayonnement proche du corps noir idéal à  $T=5800\text{K}$  (source : Wikipédia (article sur les raies de Fraunhöfer))

en énergie macroscopique de nature mécanique ; elle nous paraît cependant appropriée car la fusion effectuée également une conversion d'énergie.

32. Si les couches internes de l'enveloppe sont plus chaudes, la dilatation résultant de l'énergie libérée par la contraction du noyau et la fusion dans l'enveloppe interne accroît massivement le volume de l'astre et donc la surface rayonnante, qui, de ce fait, est plus froide : le spectre se déplace alors vers le rouge, car le corps radiant est plus froid

33. Le processus d'évolution fait avec ce qu'il trouve et ce à quoi il est confronté, mais ne peut en aucun cas faire en fonction de l'avenir

Le rayonnement solaire est composé d'ultra-violet, de lumière visible et d'infra-rouge. Il présente un pic d'émission dans le domaine visible aux longueurs d'onde correspondant au bleu clair et au vert pour notre oeil. Il convient de noter que c'est bien notre oeil qui interprète cette longueur d'onde comme du vert et non la longueur d'onde en question qui serait de couleur verte : les couleurs n'ont pas d'existence fondamentale en physique, elles ne sont qu'un moyen de conversion des longueurs d'onde par l'oeil afin de distinguer ces dernières entre elles<sup>34</sup>, dont nous expliciterons le fonctionnement par après. Ainsi, un mélange de rouge et de vert est perçu comme du jaune alors même qu'aucune couleur jaune n'est émise physiquement ; c'est sur ce principe de synthèse additive trichromatique<sup>35</sup> que sont basés les écrans télévisés et grâce au procédé inverse de synthèse soustractive<sup>36</sup> que la plupart des peintres ont pu obtenir ces palettes de couleur variées qui invitent à la rêverie. En fait, ce n'est pour autant qu'une manipulation de nos sens menée par des apprentis chimistes qui s'ignorent<sup>37</sup>. Le tableau de Paul Signac présenté ci-dessous est emblématique de ce mouvement de peinture atypique.

---



FIGURE 4 – La calanque de Paul Signac, illustration de la synthèse additive en peinture (source : Wikipédia (article sur le pointillisme))

---

Le Soleil est aussi concerné par la synthèse additive lors du processus de détection par l'oeil. La lumière qu'il émet comporte toutes les longueurs d'onde discrètes du spectre visible (en proportions toutefois variables) : l'agrégation de ces couleurs est perçue comme du blanc, une couleur qui n'existe pas au sens strict, c'est-à-dire qu'elle ne correspond pas à une longueur d'onde donnée, mais à la traduction sensorielle de la détection de toutes les longueurs d'onde.

Sur le graphique représentant l'émission solaire en fonction des longueurs d'onde a été reporté le rayonnement solaire terrestre, qui correspond au rayonnement après filtration par l'atmosphère : c'est donc le rayonnement que nous percevons, mais il n'en serait pas de même pour un cosmonaute en orbite autour de la Terre. L'atmosphère présente un rôle capital dans la Vie, en ce qu'elle contient le dioxygène

---

34. Les couleurs ne présentent donc un intérêt qu'en raison du fait que les atomes et molécules n'interagissent pas tous à l'identique avec la lumière, ce qui nous permet de les distinguer les uns des autres.

35. Basée sur trois couleurs primaires.

36. En synthèse soustractive, le procédé consiste à absorber certaines couleurs du spectre blanc émis par une source quelconque : grossièrement, on soustrait donc des couleurs au blanc à partir de trois types de pigments seulement. Plus justement, il s'agit d'atténuer (possiblement jusqu'à la disparition) ou de conserver les longueurs d'onde en fonction du rendu souhaité.

37. Les pointillistes s'étant inspirés de travaux scientifiques pour faire de la synthèse additive et non soustractive peuvent être considérés comme des chimistes accomplis

et le diazote nécessaires à la vie, mais aussi car elle filtre une grande partie du rayonnement ultraviolet très énergétique<sup>38</sup> par l'entremise des réactions entre le rayonnement et les molécules de dioxygène, qui entraînent la formation d'ozone : le trou dans la couche d'ozone fut d'ailleurs une préoccupation majeure il y a quelques années, ayant amené à une limitation drastique des émissions de gaz aérosol de type CFC<sup>39</sup> et HCFC<sup>40</sup> : il est intéressant de noter que les CFC ont été interdits au niveau mondial pour préserver la couche d'ozone, montrant qu'il est possible de rassembler tout le monde autour d'une cause lorsque les intérêts économiques sont moindres. Au surplus, c'est également cette atmosphère qui est responsable du forçage radiatif<sup>41</sup> grâce auquel la température est clémente ; sans elle, la Terre serait considérablement plus froide. C'est aussi par la modification de sa composition que l'Homme influence le climat dans des proportions encore discutées<sup>42</sup>. Ceci se visualise par l'absorption massive de certaines longueurs d'onde, notamment au niveau du rayonnement infra-rouge (ce sont les creux sur le graphique, correspondant à diverses molécules tels que le dioxyde de carbone ou le méthane).

Du point de vue terrestre, une partie de cette énergie (dont 99% provient du Soleil) est captée par la matière couvrant sa surface, qui la réemet par convection, permettant à la température de l'air d'être supérieure à celle du cosmos et par conduction dans les différentes couches qui la composent, mais aussi et surtout par rayonnement<sup>43</sup>. Une partie du rayonnement est absorbée par l'atmosphère, qui la réemet dans toutes les directions, donc en partie vers la Terre : c'est "l'effet de serre". L'énergie est également en partie captée par le monde Vivant qui la met à profit pour prospérer : 1% environ des  $1.6 \times 10^{18}$  kWh reçus chaque année par la Terre sert à la photosynthèse et correspond donc à l'ensemble de l'énergie utilisée par le Vivant.

## 1.2 A quoi sert l'énergie lumineuse dans le Vivant ?

Par définition, le Vivant n'est vivant que s'il transmet une information susceptible d'être transmise à son tour, peu importe qu'elle ressemble ou non à l'original. Cette vallée du Vivant n'est pas pour autant aussi large qu'on pourrait le croire et fortement dépendante de l'environnement dans lequel Il s'inscrit. Si ce n'était pas le cas, la reproduction ne disposerait pas de mécanismes pointus permettant de limiter les erreurs au cours du processus de transmission. Cela tient au fait que la descendance doit être capable d'exploiter de l'énergie<sup>44</sup> qui lui permettra de déclencher à son tour un processus de reproduction<sup>45</sup> et d'entretenir l'odyssée. Comme nous venons de l'expliquer, la source principale d'énergie dans le Vivant est l'énergie lumineuse issue du Soleil. Nous allons maintenant détailler les mécanismes auxquels sert cette énergie.

### 1.2.1 L'énergie comme source d'activité

Intuitivement, on peut se douter que l'énergie est nécessaire pour que la Vie existe, puisqu'il lui est nécessaire de se reproduire. Mais les réactions chimiques pouvant être endergoniques<sup>46</sup> comme exergoniques<sup>47</sup>, elles peuvent libérer de l'énergie comme en requérir pour se produire. Dès lors, on

---

38. Il est responsable des "coups de soleil" par exemple, notamment en bord de mer et à la montagne et plus particulièrement pour les haplogroupes (un haplogroupe est un groupe d'individus partageant un ancêtre commun exclusif) européens dont la peau est claire.

39. Chlorofluorocarbure, gaz anciennement utilisés dans l'industrie climatique notamment.

40. Hydrochlorofluorocarbures

41. Plus connu sous le nom "d'effet de serre", il met néanmoins en jeu un processus différent agissant sur les échanges par rayonnement et non par convection.

42. Le climat est une science jeune dont on cerne encore mal l'ensemble des facteurs et des rétroactions mis en jeu : cela explique, pour partie au moins, les controverses liées au sujet, opposant grosso modo les géologues qui s'intéressent aux temps longs (de l'ordre du million d'années) et les météorologues et glaciologues qui s'intéressent aux temps courts (de l'ordre du millier d'années)

43. la Terre se comporte également approximativement comme un corps noir, mais en raison de sa température plus faible, elle n'émet que dans le domaine de l'infra-rouge.

44. D'où une nécessaire stabilité dans la capacité d'exploitation de l'énergie.

45. D'où une nécessaire stabilité dans la capacité de reproduction.

46. C'est-à-dire nécessitant de l'énergie pour se produire.

47. Au contraire d'une réaction endergonique, il s'agit de réactions qui dégagent de l'énergie en se produisant.

pourrait imaginer une biomolécule dont la constitution céderait de l'énergie pour chaque synthèse : dans ce cas, le processus de la réplication céderait de l'énergie, une énergie qui pourrait être utilisée afin que le complexe permettant la reconstitution<sup>48</sup> effectue sa tâche de lecture du code, récupération puis incorporation de l'acide nucléique. Ceci pose néanmoins une difficulté : pour que des réactions exergoniques aient lieu, il faut que l'énergie existe déjà sous forme physique ou chimique au sein de l'organisme vivant lui-même : or, l'énergie physique intervient dans des processus très hautement énergétiques bien éloignés des conditions permettant l'épanouissement de la vie terrestre<sup>49</sup> (Conversion de l'énergie de masse issue du Big Bang par la fusion et la fission nucléaire.), et l'énergie chimique nécessite un apport extérieur pour se reconstituer : cette réserve d'énergie est donc épuisable.

Comme présenté dans l'introduction, la vie a d'abord capitalisé sur cette énergie chimique grâce aux réserves présentes sur Terre : cependant, les synthèses de molécules ont toujours besoin d'énergie, que ce soit pour répliquer une molécule informative ou pour générer une molécule fonctionnelle.

Pour l'illustrer, nous pouvons nous pencher sur les synthèses de protéines<sup>50</sup> dont dépendent les fonctions cellulaires. En effet, les protéines possèdent une conformation spatiale complexe en trois dimensions dont dépendent les fonctions et permettent de ce fait l'activité<sup>51</sup>. Par exemple, les protéines de myosine et d'actine sont responsables de la contraction musculaire ; mais, pour générer cette contraction, elles nécessitent un apport d'énergie. Selon l'Université Médicale Virtuelle Francophone<sup>52</sup>, la synthèse protéique consomme une quantité importante d'énergie, de l'ordre de 1 kcal/g de protéine synthétisée d'après les expérimentations.

L'activité nécessite donc une source d'énergie dans laquelle puiser. Mais à quoi sert cette activité ? Initialement, elle est destinée à accomplir la division cellulaire, qui lui permet de ne pas disparaître. Il existe trois formes de division cellulaire (qui peuvent elles-mêmes se décliner en différents types desquels nous ne traiterons pas) et dont on trouvera des illustrations en haut de page suivante :

- La scissiparité consiste en la division d'une cellule-mère en deux cellules filles ; elle aboutit à la formation de deux clones. Elle existe presque exclusivement chez les organismes unicellulaires.

- La mitose peut être décrite comme une scissiparité ayant lieu à l'échelon cellulaire au sein d'organismes pluricellulaires. Elle diffère cependant en ce que la reproduction aboutit à la formation de deux cellules contenant chacune un brin parent et un brin fils. C'est par ce processus que se (re)constitue un organisme. Les cellules sont toutes apparentées entre elles et n'entrent généralement pas en compétition car elles sont toutes porteuses du même patrimoine génétique. Si une mutation survient, elle peut toutefois compromettre la survie de l'organisme, parce que la compétition entre lignées cellulaires au patrimoine différent reprend alors son cours.

- La méiose est une division cellulaire à partir de deux cellules issues d'organismes différents (les gamètes). Elle fait suite à la fécondation d'un gamète femelle par un gamète mâle au cours de laquelle le brassage chromosomique<sup>53</sup> permet de créer de la diversité.

Au-delà des réactions destinées à la production d'un nouvel individu ou au développement de celui-ci (embryogenèse, croissance), l'énergie a également été mise à profit pour effectuer de nouvelles fonctions annexes. C'est un fait remarquable dans la mesure où la vie n'a pas besoin de ces fonctions pour exister ; elles sont accessoires, mais certaines formes de vie ne peuvent pas s'en dispenser : les animaux n'étant pas capables de produire par eux-mêmes de l'énergie, la plupart ne peuvent

---

48. Ce complexe repose sur l'ADN polymérase notamment.

49. D'où la nécessaire "symbiose" d'une planète accueillant la vie avec une étoile qui peut fournir cette énergie physique sous forme atténuée et dénuée de particules toxiques pour le Vivant telle que nous le connaissons.

50. Le processus complet se traduit par la transcription de l'ADN en ARN messenger, puis la maturation de cet ARN messenger qui est enfin traduit en protéine.

51. Cette dichotomie entre fonction et reproduction constitue d'ailleurs la pierre d'achoppement dans notre compréhension du processus initiateur de la vie : cela a donné corps à l'hypothèse du monde à ARN où l'ARN, intermédiaire entre l'ADN et les protéines, aurait été la première forme de vie

52. Source : [http://campus.cerimes.fr/nutrition/enseignement/nutrition\\_8/site/html/2.html](http://campus.cerimes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_8/site/html/2.html)

53. Il en existe deux types, réassociant soit des chromosomes entre eux, soit des morceaux de chromosomes entre eux.



FIGURE 5 – Chienne avec sa progéniture  
(Source : sritweets.com)



FIGURE 6 – Croissance d'un végétal  
(Source : francais.istockphoto.com)

survivre sans se déplacer pour se nourrir. Certaines formes animales sont toutefois parvenues à le faire comme le corail<sup>54</sup>, animal fixe possédant des tentacules mobiles, mais leur alimentation repose sur le plancton et ils bénéficient des courants marins qui génèrent un mouvement déplaçant les particules en suspension<sup>55</sup>.

Qui plus est, que certaines formes de vie puisent leur énergie chez les autres a permis un nouveau saut dans la diversité de la vie, puisqu'ils ne se consacrent plus à capter et stocker mais à chercher, absorber puis stocker (l'énergie). Ce n'est pas un hasard si ces nouvelles fonctions ont essaimé plus ou moins en concomitance avec une autre évolution extraordinaire qu'a été l'émergence des êtres pluricellulaires<sup>56</sup> : l'association de plusieurs cellules portant la même information génétique en un organisme autorise en effet une spécialisation des tâches et, de ce fait, la diversification de leur fonction respective. Le mouvement animal a été rendu possible par l'association de protéines dédiées que nous avons évoquées plus haut (actine et myosine) avec le carburant qu'est l'ATP. A l'instar de tous les mammifères herbivores, l'âne broute et doit donc constamment se déplacer pour trouver de nouvelles réserves d'herbe dans lesquelles il puise l'énergie indispensable à ses fonctions vitales.



FIGURE 7 – Un âne en train de paître  
(Source : Wikimini)

### 1.2.2 L'énergie comme source d'information

En-dehors des activités à visée métabolique et reproductive, l'énergie est aussi utilisée pour prendre de l'information auprès de l'extérieur et en transmettre. Plusieurs types d'énergie sont employées à ces fins. L'énergie sonore<sup>57</sup> est par exemple utilisée pour détecter d'éventuels proies ou prédateurs, dont

54. les coraux sont des animaux appartenant à l'embranchement des Cnidaires au même titre que les méduses ; ils ont longtemps été nommés zoophytes pour leur ressemblance avec les animaux et les végétaux.

55. Certains coraux n'en ont pas besoin grâce à leur symbiose avec des algues photosynthétiques.

56. Certaines bactéries sont capables de se déplacer grâce à des cils situés autour de leur membrane, mais il ne s'agit pas d'un mouvement contrôlable, et encore moins d'un mouvement permettant de grands déplacements.

57. Elle se matérialise par la déformation du milieu ambiant et requiert donc qu'il ne soit pas vide.

les mouvements créeraient des bruissements. De manière plus originale, quelques animaux pratiquent l'écholocation, et se servent donc de la réflexion du son sur les objets, dont leurs proies et prédateurs, pour représenter leur environnement immédiat. Cette capacité a été démontrée chez la chauve-souris et certains cétacés, tous deux des mammifères placentaires. Ils disposent d'un système de cartographie fonctionnant avec le son comme le notre fonctionne avec la lumière : on peut donc dire qu'ils voient avec leurs oreilles. Ce système a été exploité par l'Homme pour créer le sonar utilisé pour la détection dans le domaine maritime. Le principe est également exploité dans l'imagerie radar pour détecter les précipitations par exemple. D'autres animaux sont capables de se repérer grâce aux variations spatiales du champ magnétique terrestre : les saumons et les anguilles capables de retrouver le lieu où ils sont nés pour s'y reproduire ; dans le cas des anguilles, elles vont toutes se reproduire en mer des Sargasses<sup>58</sup>, peu importe le lieu où elles vivent à un instant donné. La boussole fonctionne sur le même principe, mais attention, il faut prendre garde aux conditions de son utilisation<sup>59</sup>.

Dans le cadre de notre sujet, nous nous focaliserons sur l'énergie lumineuse, dont l'utilisation au titre de l'information est majoritaire dans le Vivant. Le Vivant ayant eu des centaines de millions d'années pour faire des expériences, de nombreuses tentatives ont été produites, dont les rares fructueuses ont proliféré<sup>60</sup>. Au cours de l'évolution, plusieurs formes de prise d'information se sont instaurées :

- La vision s'est développée car elle apporte de nombreux bénéfices aux animaux. Différents objets physiques (atomes) ou chimiques (molécules) interagissent avec la lumière d'une manière qui leur est propre. La vue est le sens qui permet d'identifier ses différences et donc, d'associer à un objet une représentation due à ces multiples interactions. Ainsi, l'homme peut reconnaître visuellement un fruit dont il sait qu'il est comestible<sup>61</sup> et lui apportera de l'énergie. La vision permet donc d'identifier ces sources de nourriture, mais aussi d'identifier les dangers : voir avant d'être vu est une qualité primordiale pour le chasseur et le chassé. Elle permet aussi d'éviter les collisions ou les rencontres inadéquates. Par exemple, les guêpes disposent généralement d'un aiguillon venimeux dont elles se servent pour se défendre ou paralyser des proies destinées à leur progéniture ; reconnaître une guêpe permet à l'Homme de ne pas s'en approcher trop et bénéficie donc aux deux animaux : la guêpe ne risque pas d'être tuée, par mégarde, par brutalité ou par peur tandis que l'homme ne risque pas d'être piqué. En résumé, la vision est presque indissociable du mouvement qui caractérise une grande partie du monde animal ; elle permet de guider ce mouvement en fonction des contraintes.

- Les rythmes biologiques, qui permettent de calquer le rythme de l'organisme sur un rythme plus ou moins optimal. Chez beaucoup d'organismes pluricellulaires, le rythme est circadien, c'est-à-dire quasiment journalier, en décryptant l'étymologie. Basée sur la photo-détection<sup>62</sup>, il consiste à capter l'énergie lumineuse et à en compter la durée quotidienne. Cette captation peut être effectuée à différents endroits. Chez l'Homme, elle se produit au niveau de la rétine : l'oeil sert donc à la vision et à régler

---

58. La mer des Sargasses est la seule mer sans rivages ; elle se situe au large de l'Amérique du Nord.

59. Le pôle Nord magnétique se situe actuellement au Canada et non au pôle Nord géographique, et dérive peu à peu : la boussole entraîne donc une erreur systématique plus ou moins importante selon le lieu d'utilisation ; en outre les pôles s'inversent à intervalle régulier en raison d'un processus non identifié se produisant dans le noyau en fusion de la Terre ; enfin, le pôle Nord magnétique de la boussole pointe en réalité vers le pôle Sud magnétique terrestre, car les bornes négatives attirent les bornes positives.

60. Là encore, le Vivant ne cherche pas à se développer : il se développe si l'information qu'il porte le lui permet, il s'éteint sinon : les mutations fructueuses prolifèrent car elles permettent une plus grande descendance et donc, une plus grande transmission de l'information qui leur a permis de se reproduire en plus grand nombre ; attention à ne pas se méprendre, ce n'est en rien un raisonnement circulaire, car le phénomène qui l'initie est ponctuel.

61. Le sens du goût est un indicateur sélectionné par l'évolution pour permettre d'indiquer au cerveau ce qui est bon ou mauvais pour son organisme ; c'est ce qui a conduit les enseignes de fast-food à créer des sandwiches très riches en lipides et donc en énergie : en effet, notre goût a été développé pour nous inciter à consommer des lipides, en des temps où ils n'étaient pas produits de façon industrielle. Le chocolat est également apprécié pour cette richesse énergétique.

62. Il existe aussi des moyens de régler son rythme biologique basé sur la température comme chez les cigales américaines *Magicicada septendecim* popularisées par S.J.Gould : pendant dix-sept ans, elles restent toutes terrées puis, lorsque la température atteint un certain seuil, elles se ruent dehors pour se reproduire : grâce à ce mécanisme, elles échappent partiellement à leurs prédateurs, qui n'ont pas pu contre-sélectionner une adaptation à ce rythme car ils vivent généralement moins longtemps.

son rythme biologique. Chez plusieurs insectes, la détection est effectuée par les ocelles, de minuscules "yeux" situés au-dessus de la tête. Chez la plupart des êtres vivants étudiés, cette horloge est en partie régie par une protéine dénommée Clock, qui participe à un système de régulation en boucle<sup>63</sup>. Il existe donc une certaine stabilité des mécanismes déterminant les rythmes biologiques dans le Vivant : dès lors, on peut imaginer que les dispositifs mis en place sont relativement efficaces. Dans certains cas, ils sont également indispensables : chez les végétaux qui effectuent la photosynthèse, le rythme biologique est vital car la plante doit capter l'énergie lorsqu'elle est disponible et donc être synchronisée avec les apparitions du Soleil. Ce mécanisme est donc une adaptation aux contraintes de l'intermittence solaire ; bien que peu d'éléments en attestent pour le moment, le sommeil pourrait également être un mécanisme de conservation d'énergie mis en place en réaction (et que le sommeil a probablement d'autres fonctions tels que la restauration d'un équilibre nerveux et hormonal<sup>64</sup>) à l'intermittence de l'approvisionnement énergétique<sup>65</sup>. Cette omniprésence des rythmes biologiques dans le Vivant suscite de quoi interroger le fonctionnement des sociétés, qui recherchent à être constamment en activité maximale malgré des contraintes extérieures variables : n'est-il finalement pas tautologique que l'activité doit être en partie liée aux conditions extérieures dont elle ne pourra jamais totalement s'affranchir ? C'est en tout cas ce qu'il s'est produit au sein du Vivant.

Optimisant la valeur sélective des formes de vie aux conditions de leur environnement, l'évolution a favorablement sélectionné le fait de pouvoir exploiter les informations disponibles par diverses formes de perception sensorielle. Cette nouvelle capacité a favorisé l'acquisition d'une seconde capacité, dont elle est un pré-requis nécessaire : la communication. En effet, dans la mesure où le Vivant était habilité à capter une information, il devenait pertinent pour chacune des espèces de pouvoir également en émettre.

### 1.2.3 L'énergie comme source de communication

Dans cette partie, nous nous focaliserons sur le règne animal, de loin le plus prolifique en terme de communication. Néanmoins, il faut mentionner que les animaux ne représentent pas une exception, là encore : il a été mis en évidence des formes de communication par des molécules volatiles chez certains végétaux, qui leur permettent ainsi de prévenir leurs congénères de certaines menaces : par exemple, une variété d'acacia modifie la composition chimique de ses feuilles lorsque des antilopes les mangent, puis émet des molécules gazeuses pour que ses voisins en fassent de même (Source : Le Journal Du Dimanche)<sup>66</sup>.

Capitalisant sur ces nouvelles capacités que sont les sens, permettant de distinguer des espèces et individus différents car chacun d'entre eux est composé de matières en proportion et selon des conformations légèrement différentes, les animaux ont ensuite développé divers mécanismes permettant la communication. Ce sont par exemple les phéromones dégagées pour communiquer avec l'extérieur : cela peut avoir pour but d'attirer un partenaire, comme le fameux musth de l'éléphant (image ci-contre) ou agir comme un signe de reconnaissance à l'intérieur d'une colonie ou sur un territoire donné.

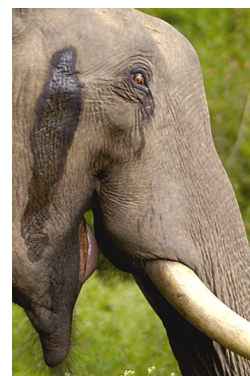


FIGURE 8 – Eléphant en phase de musth avec sécrétions visibles au niveau des temps<sup>67</sup>

63. Source : [www.futura-sciences.com/magazines/sante/infos/actu/d/vie-proteine-clock-rythme-notre-biologie-8857/](http://www.futura-sciences.com/magazines/sante/infos/actu/d/vie-proteine-clock-rythme-notre-biologie-8857/)

64. Source : Michel Jouvét, se reporter à ses ouvrages ou au site [https://sommeil.univ-lyon1.fr/articles/jouvet/encyclo\\_universalis/fonction1.php](https://sommeil.univ-lyon1.fr/articles/jouvet/encyclo_universalis/fonction1.php)

65. En revanche, ceci est clairement démontrée pour l'hibernation à laquelle se livrent certains mammifères comme le loir, la marmotte ou l'écureuil.

66. Source : [www.lejdd.fr/Societe/Sciences/Les-arbres-parviennent-a-communiquer-entre-eux-633904](http://www.lejdd.fr/Societe/Sciences/Les-arbres-parviennent-a-communiquer-entre-eux-633904)

Si l'odorat et même le goût ont trouvé une place conséquente dans la communication à visée reproductive grâce aux sécrétions chimiques, la vision a également profité à cette activité du Vivant. La communication étant essentiellement destinée à trouver un partenaire pour pouvoir se reproduire, la sélection s'est donc portée sur les caractères qui assurent la plus grande descendance possible : c'est la sélection sexuelle, qui va souvent à l'encontre de la sélection naturelle d'un point de vue strictement conceptuel<sup>68</sup>. En effet, les animaux sont dotés de parures et de couleurs de plus en plus extravagantes afin de séduire les femelles : ce mécanisme semble universel au sein du monde animal<sup>69</sup>, et se concentre plutôt sur les mâles, car ils sont en compétition pour avoir le droit de féconder les femelles<sup>70</sup>. On peut admirer ci-dessous le fruit de la sélection sexuelle chez les araignées-paons, et ainsi connaître leur goût en matière d'esthétique :



FIGURE 9 – L'araignée-paon, une espèce récemment découverte aux robes et aux parades nuptiales extraordinaires (Source : Sciences et avenir<sup>71</sup>)

Ce type de sélection esthétique se heurte toutefois à la sélection naturelle dont la prédation constitue l'une des pressions sélective : le fruit de l'évolution est un équilibre à un moment donné issu de l'ensemble de ces pressions sélectives. Dans son grand jeu mêlant hasard et nécessité pour reprendre le titre de l'ouvrage célèbre de Jacques Monod<sup>72</sup>, l'évolution a également sélectionné des modifications permettant de tromper les sens des autres : c'est ainsi que, bien avant les techniques militaires, le Vivant a peaufiné des techniques de camouflage basées sur le mimétisme avec son environnement.

#### 1.2.4 L'énergie comme source de camouflage

Pour se camoufler, le Vivant se sert de l'ensemble des propriétés physiques de la lumière, sur lesquels nous reviendrons lorsque nous aborderons les mécanismes physiques utilisés. Intuitivement,

67. Source : Wikipédia, article sur le musth.

68. En étant plus voyant, les animaux courent plus de risques d'être vus de leurs prédateurs, ce qui constitue un désavantage. Néanmoins, cela peut présenter plusieurs avantages du point de vue des femelles : en premier, un animal très voyant qui aurait réussi à survivre dispose donc d'une très bonne fitness puisqu'il n'a toujours pas été la proie de ses prédateurs (néanmoins, cet argument souffre d'un défaut : en effet, avoir une condition extraordinaire mais être très voyant peut entraîner la même mortalité qu'un animal ordinaire dans ces deux domaines : dans ce cas, il ne se produit aucune sélection); ensuite, si son organisme est capable de produire des couleurs aussi extravagantes, plus coûteuses énergétiquement, cela signifie qu'il est en meilleure forme physique; enfin, il peut s'agir d'un cas de pléiotropie dans lequel un même gène est responsable de plusieurs caractéristiques (des couleurs chamarrées et une très bonne fitness par exemple), comme on le soupçonne pour certains traits des canidés : en effet, des expériences de sélection artificielle sur la docilité des renards a conduit à une race surprenante de renards ressemblant à des chiens

69. Cela ne signifie pas qu'il se manifeste chez toutes les espèces, seulement qu'on le retrouve chez de nombreux embranchements d'animaux; pourquoi uniquement les animaux? Car ils appartiennent au seul embranchement où le partenaire est choisi.

70. Les goûts visuels des femelles représentent ici la pression sélective.

71. [www.sciencesetavenir.fr/animaux/20150303.OBS3778/decouverte-de-deux-nouvelles-araignees-paons.html](http://www.sciencesetavenir.fr/animaux/20150303.OBS3778/decouverte-de-deux-nouvelles-araignees-paons.html)

72. J.Monod, Le hasard et la Nécessité, 1970

le camouflage se comprend bien et il n'est pas difficile d'en trouver des illustrations. Cependant, la démonstration de la sélection du camouflage dans le Vivant n'était pas si évidente car de nombreux phénomènes déterminent la couleur, et le camouflage présente également l'inconvénient de rendre invisible aux yeux de ses propres congénères : l'équation évolutive doit donc intégrer ces deux forces antagonistes et ne débouche pas nécessairement sur la sélection du camouflage. La présence de nombreux animaux blancs dans les paysages enneigés du Grand Nord fournissait cependant des éléments accréditant cette théorie, qui se sont trouvés encore renforcés par le fait que certains animaux ne portent une fourrure blanche que l'hiver lorsque la neige et la glace sont omniprésentes. Il s'agit d'un phénomène de convergence évolutive<sup>73</sup>, dans lequel des espèces partageant une même niche écologique : c'est en raison de ce phénomène que la faune australienne de mammifères marsupiaux<sup>74</sup> ressemble aux faunes des autres continents où les mammifères placentaires sont majoritaires.



FIGURE 10 – Convergence évolutive dans le camouflage en paysage enneigé : le cas du lièvre (à gauche, source : Nature.ca<sup>75</sup>) et du renard arctiques (à droite, source : espèces menacées.ca)

Par la suite, les avantages du camouflage ont été clairement mis en évidence grâce à un papillon nocturne, la Phalène du Bouleau, dont les variations de couleur ont suivi celles des troncs plus ou moins pollués selon les périodes de la Révolution industrielle en Angleterre : les troncs se sont d'abord largement assombrés avant d'éclaircir de nouveau à la fin du XXème siècle, parallèlement à la mise en place de mesures d'amélioration de la qualité de l'air<sup>76</sup>. Le camouflage est donc dépendant de l'environnement puisque les conditions et les êtres vivants n'y sont pas les mêmes : il varie donc dans le temps et dans l'espace. Ainsi, les phasmes sont des animaux qui se maquillent en brindilles pour passer inaperçus, mais cela n'aurait aucun intérêt s'il vivait dans le désert, comme le fennec n'aurait aucun intérêt à être de la couleur du sable s'il n'avait, justement, élu résidence dans le désert. Le Vivant a donc expérimenté et éprouvé de nombreuses façons de se camoufler en réponse aux biotopes concernés : ceci est très intéressant pour l'ingénierie biomimétique car cela signifie que de nombreuses pistes peuvent être explorées.

73. Nous reviendrons sur ce phénomène plus tard pour l'intérêt qu'il présente du point de vue de la biomimétique.

74. Les mammifères marsupiaux constituent une famille dont les membres sont tous plus proches entre eux qu'ils ne le sont de n'importe quel autre animal : ils forment un groupe dit monophylétique ; contrairement à une croyance populaire, les mammifères marsupiaux ne sont pas cantonnés au sous-continent Australien (Australie, Nouvelle-Guinée, Tasmanie). Ils sont également présents en Amérique et ont, dans un passé plus lointain, sillonné d'autres continents, étant probablement originaires d'Asie. Les mammifères marsupiaux d'Australie constituent également un sous-groupe monophylétique, à condition d'y inclure un petit animal d'Amérique du Sud, le colocolo (Nom. sc. : *Dromiciops gliroides*), qui leur est plus apparenté qu'il ne l'est aux autres mammifères marsupiaux d'Amérique ; la diversification de ces animaux s'est donc faite à partir d'un seul et même ancêtre, soit qu'il se soit retrouvé isolé sur le sous-continent Australien, soit que ses descendants s'y soient retrouvés isolés, sur une masse terrestre où la concurrence des mammifères placentaires était inexistante.

75. Source de la photographie du lièvre : <http://nature.ca/ukaliq/elem/pop/P0285-f.html> ; source de la photographie du renard : <http://www.especesenmenacees.ca/fr/changements-climatiques.php>

76. On remarque au passage que les animaux sont un indicateur particulièrement fiable de l'état des biotopes, à condition de bien maîtriser les caractéristiques des espèces ; les espèces utilisées comme indicateurs sont appelées "espèces sentinelles" et sont d'un usage fort important pour caractériser les eaux : à ce titre, elles sont très utilisées en hydrologie.

Enfin, il convient également de noter que les convergences déclinées ci-dessus ne signifient pas nécessairement que le mécanisme dont elles tirent leur origine est unique : les couleurs peuvent être formées par différents moyens, mais, avant de les expliciter, nous allons développer un point-clé de l'adaptation du monde vivant à l'énergie solaire : les problématiques de conversion et de stockage, auxquels l'Homme se retrouve également confronté.

### 1.3 Comment est-elle utilisée ?

En guise de prémisse, rappelons que l'énergie au sein du Vivant procédant de diverses origines et répondant à diverses utilisations, le processus qui la caractérise n'est pas à sens unique : l'énergie emprunte plusieurs chemins selon sa destination, comme on l'indique sur le schéma en page suivante.

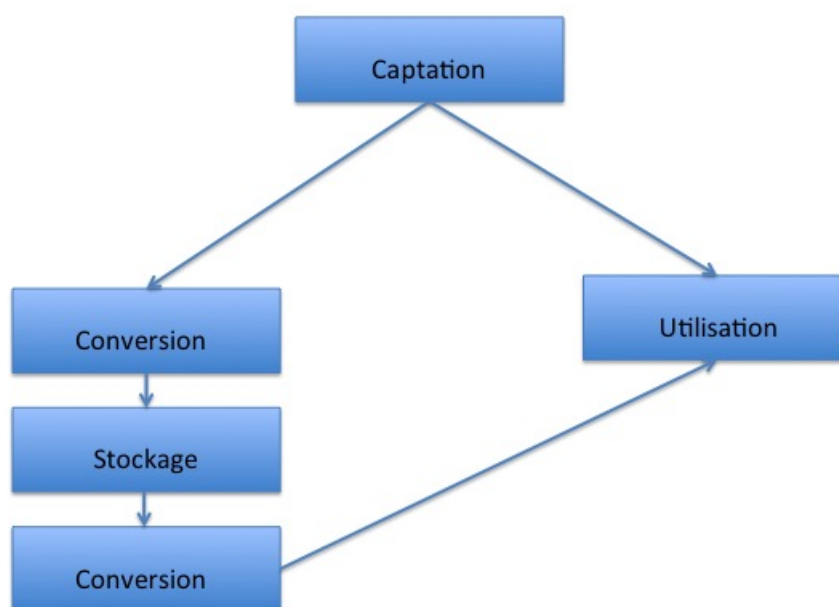


FIGURE 11 – Processus d'utilisation de l'énergie solaire (production personnelle)

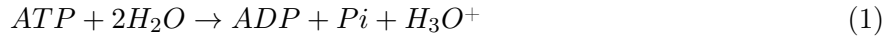
Pour ce qui est de l'information, l'énergie est utilisée directement. En revanche, l'énergie destinée à assurer des fonctions métaboliques doit pouvoir être synthétisée à tout instant, qu'importent les conditions extérieures : ceci nécessite que l'énergie solaire soit convertie en énergie chimique pour pouvoir être stockée et réutilisée par la suite à l'aide d'une nouvelle conversion. De plus, l'ATP étant le seul carburant universel du Vivant<sup>77</sup>, ceci oblige l'organisme à des conversions permanentes entre formes d'énergie, car l'ATP n'est pas stockable en raison de son instabilité dans les conditions d'un organisme<sup>78</sup>.

77. C'est la seule monnaie d'échange d'énergie reconnue et utilisable par les cellules : le métabolisme doit donc préalablement reconstituer l'ATP à partir de l'ADP et d'un apport d'énergie.

78. Cette instabilité est probablement de nature thermochimique.

### 1.3.1 La conversion de l'énergie

La réaction universelle de conversion énergétique dans le Vivant a déjà été abordée. Seule l'énergie apportée par celle-ci peut être directement exploitée : il s'agit de l'hydrolyse de l'ATP suivant la réaction suivante :



Cette réaction consiste à casser une liaison entre groupements phosphates, elle est donc exergonique c'est-à-dire qu'elle fournit de l'énergie. Les êtres vivants disposent de quantités modérées d'ATP dans leur corps, nécessitant un recyclage permanent de l'ADP en ATP : c'est là qu'intervient la nécessité de captation d'énergie. Suite à cette captation, le moteur moléculaire se met en branle pour reformer les molécules d'ATP. Il est amusant de noter que si le Vivant n'a pas inventé la roue à l'échelle macroscopique, il l'a en revanche fait à l'échelle moléculaire pour ses besoins énergétiques. Le processus permettant la reconstitution d'ATP est une sorte de moteur rotatif nommé ATP synthase<sup>79</sup> dont on illustre le fonctionnement ci-dessous, où un gradient de protons  $H^+$  (entretenu par la respiration) entraîne la roue constituée de sous-unités organiques  $c$  (12 représente leur nombre sur le graphique ci-dessous), énergie transmise à l'arbre de protéines  $\gamma$  et  $\epsilon$  et servant in fine à reconstituer les réserves d'ATP par la mise en branle de la roue  $\alpha\beta$  et la captation de cette énergie pour créer la liaison entre ADP et phosphate inorganique :

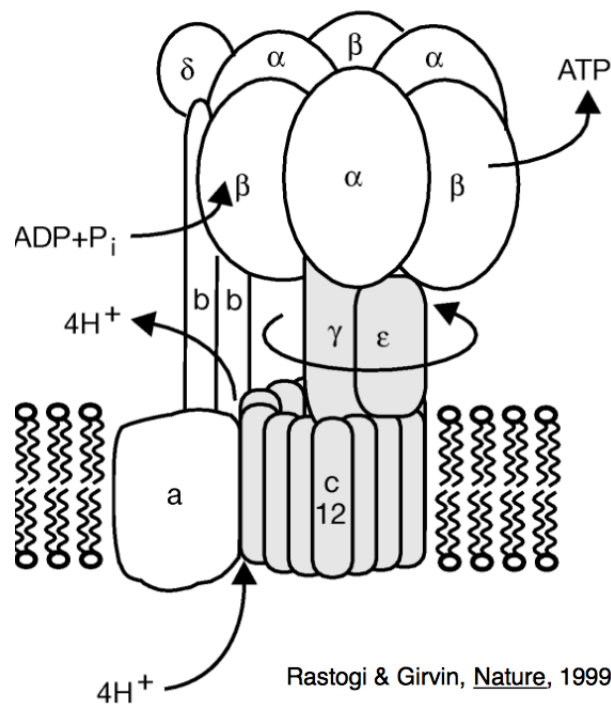


FIGURE 12 – Le moteur rotatif moléculaire (Source : cultures-sciences, ENS)<sup>80</sup>

L'ATP possède une durée de vie très limitée dans l'organisme. Si elle n'est pas utilisée rapidement, elle subit des réactions chimiques spontanées libérant de la chaleur : elle ne peut donc pas être utilisée comme un moyen de stockage ; les réserves d'ATP présentes dans le corps humain permettent généralement d'effectuer un effort intense de quelques secondes avant que les capacités ne déclinent (de l'ordre de la dizaine de secondes). Chez les organismes eucaryotes, cette conversion est réalisée

79. Un complexe protéique enzymatique

80. <http://culturesciences.chimie.ens.fr/nodeimages/images/NanomachinesJPSauvage.pdf>

par les mitochondries, des organites dont on sait désormais qu'ils sont issus d'une endosymbiose passée<sup>81</sup>. Certaines bactéries fonctionnent d'ailleurs exactement sur le même principe d'un point de vue énergétique<sup>82</sup>.

### 1.3.2 Le stockage de l'énergie

Afin de faire face à l'intermittence de l'énergie, que ce soit une intermittence de fait (énergie issue du Soleil), ou pratique (un animal ne peut se nourrir en continu), l'évolution a donc dû sélectionner des moyens qui permettent aux espèces vivantes de stocker des réserves d'énergie. Il existe deux principales ressources-stocks d'énergie dans le Vivant :

- Les glucides (notamment sous forme de glycogène, un polymère du glucose, chez les animaux) permettent de disposer d'une énergie rapide, immédiatement convertible en ATP ; néanmoins, les glucides ne peuvent pas être stockés tels quels par le Vivant : c'est le rôle des matières grasses (huiles pour les végétaux, graisses pour les animaux). -Les lipides (principalement sous forme de triglycérides) permettent de stocker l'énergie dont le métabolisme n'a pas besoin immédiatement. Pour être utilisés sous forme d'ATP, elles nécessitent cependant d'être converties en glucides. Les sucres, s'ils sont trop abondants peuvent aussi être converties en matières grasses pour que l'énergie qu'ils contiennent soit stockée. Les graisses ont un pouvoir énergétique trois fois plus fort que les glucides, ce qui les rend très avantageuses pour le stockage.

Chez la plupart des végétaux<sup>83</sup> le stockage des sucres est effectué sous forme d'amidon, qu'on retrouve par exemple dans les tubercules que sont les pommes de terre ou la patate douce : cette forme de stockage permet, entre autres choses, d'économiser de l'eau. Chez les animaux, le stockage a lieu dans les cellules adipeuses.

Il est tout sauf anodin de constater que le Vivant a dissocié les processus chimiques de stockage et de captation de l'énergie solaire. En effet, l'énergie solaire n'est présente qu'en journée, il convient donc de pouvoir la stocker, et, dans la mesure du possible, il convient de la stocker efficacement, en minimisant la place occupée par ces "entrepôts du Vivant". Il s'agit de l'un des enjeux essentiels pour l'Homme s'il veut pouvoir en faire la source principale de son approvisionnement, car il se heurte aux mêmes contraintes ; il y a donc là encore de quoi prospecter pour les futurs biomiméticiens.

Qui dit biomimétique, dit inspiration. Or, pour s'inspirer, il faut avant tout comprendre pour songer ensuite à reproduire. Le monde Vivant recourt à des mécanismes très diversifiés qui sont l'aboutissement de nombreux essais et échecs. S'ils ne sont pas nécessairement optimaux en raison du processus qui les a faits émerger<sup>84</sup>, ils présentent l'avantage de s'inscrire durablement<sup>85</sup> dans leurs écosystèmes, auxquels ils participent et sont parfois indispensables.

## 2 Les mécanismes d'utilisation de l'énergie solaire dans le Vivant

Comme nous venons de le voir, il ne peut y avoir de vie sans moyen d'utiliser une forme d'énergie, qu'elle soit d'origine chimique ou physique. Depuis que le Vivant s'est tourné vers l'énergie solaire, celle-ci est devenue très largement prépondérante dans l'approvisionnement. En-dehors de quelques niches aux conditions très particulières comme les sources hydrothermales, capables de chimiotrophie à partir du dioxyde de carbone ou du méthane par exemple, toutes les autres formes de vie reposent

---

81. Les mitochondries possèdent leur propre information génétique

82. Le processus exhaustif est le cycle de Krebs.

83. Les Astéracées, comme la laitue, le pissenlit ou le topinambour, se servent d'une autre molécule, l'inuline.

84. Plusieurs raisons empêchent en effet l'optimisation d'un procédé en particulier : tout d'abord, un organisme comporte un ensemble de fonctions dont la captation d'énergie et la reproduction sont les plus vitales : l'évolution optimise donc les dépenses d'énergie par rapport aux gains de fécondité que cela apporte, et n'amène donc pas nécessairement aux dispositifs les plus prolifiques en terme d'exploitation d'énergie ; ensuite, l'évolution procède par essais et erreurs, mais si plusieurs variations sont nécessaires pour atteindre un dispositif, le Vivant risque de passer à côté, sauf à trouver une fonction passagère à certaines de ces variations

85. par le biais des espèces porteuses

sur la captation d'une partie de l'énergie solaire qui parvient jusqu'à la surface terrestre après filtration par l'atmosphère<sup>86</sup>.

Cependant, toutes les formes de vie ne sont pas capables d'absorber l'énergie solaire pour la convertir en énergie chimique utilisable dans les processus cellulaires : c'est notamment le cas des animaux, qui tirent alors leur énergie d'autres formes de vie par la nutrition, de manière plus ou moins directe vis-à-vis de l'énergie solaire. Ainsi, les animaux peuvent se nourrir à partir de végétaux, qui agissent pour eux comme des hôtes intermédiaires, ou bien à partir d'autres animaux qui allongent encore la chaîne de nouveaux maillons intermédiaires : ces maillons constituent des réserves de graisses et de glucides, des entrepôts vivants. C'est par l'implémentation évolutive de ces chaînes alimentaires que se noue l'interdépendance à l'intérieur des écosystèmes.

De nombreux mécanismes se sont donc mis en place pour exploiter l'énergie solaire plus ou moins directement, et ne pas souffrir du fait qu'il s'agit d'une ressource pulsée<sup>87</sup> : le stockage évoqué plus haut en est l'une des facettes les plus notoires, au même titre que la nutrition. Il nous reste désormais à voir par quels mécanismes directs l'énergie solaire est utilisée.

## 2.1 La captation primaire : du rôle prééminent de la photosynthèse dans la biodiversité

La captation primaire peut être décomposée en différents processus qui n'ont pas la même vocation. Il existe les processus destinés à capter l'énergie à des fins métaboliques, et d'autres à des fins informationnelles.

### 2.1.1 La captation à visée métabolique

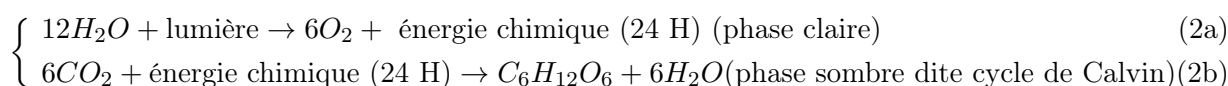
Cette captation est principalement réalisée à l'aide de la photosynthèse. Nous verrons tout de même qu'il existe à la marge de'autres mécanismes.

## La photosynthèse

Selon Wikipédia, la photosynthèse est "le processus bioénergétique qui permet aux plantes, aux algues et à certaines bactéries, dites photoautotrophes, de synthétiser de la matière organique en utilisant la lumière du soleil"<sup>88</sup>.

A ce stade, il convient de préciser qu'il n'existe pas une photosynthèse, mais de multiples variantes issues du même modèle, s'appuyant notamment sur des pigments aux spectres d'absorption différents. Chez les bactéries photosynthétiques, l'absorption se déroule au niveau de la membrane, tandis que chez les algues et les végétaux, celle-ci se déroule dans les chloroplastes<sup>89</sup>, des organites présents au sein de certaines cellules<sup>90</sup>. Ces chloroplastes sont issus de l'endosymbiose<sup>91</sup> de bactéries capables de photosynthèse.

La photosynthèse met en jeu deux réactions successives. La première, dite photochimique, consiste en la captation de l'énergie lumineuse pour obtenir de l'énergie chimique, et se déroule en deux temps, une phase dite claire ayant lieu pendant le jour et une phase dite obscure, qui n'a pas besoin de lumière solaire.



86. Soulignons encore que cette filtration est essentielle à la plupart des formes de vie, car les molécules d'ozone dont elle est composée absorbent une grande partie du rayonnement ultra-violet très énergétique duquel la plupart des formes de vie s'accommode mal ; pour visualiser cette absorption des UV, se reporter à la figure 3.

87. C'est-à-dire une ressource abondante mais présente par intermittence.

88. source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photosynthèse>

89. source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photosynthèse>

90. Dans leur cytoplasme, c'est-à-dire enter la membrane et le noyau.

91. Telle que définie par wikipédia, l'endosymbiose est la coopération mutuellement bénéfique entre deux organismes vivants, donc une forme de symbiose, où l'un est contenu par l'autre.

L'énergie chimique dont il est question dans ces équations sont les conversions impliquant l'ATP et l'ADP. Finalement, l'équation fondamentale de la photosynthèse (Source : futurs-sciences<sup>92</sup>) est :



Ces réactions nécessitent l'absorption de lumière : les principaux pigments absorbant la lumière à des fins de photosynthèse sont :

- les chlorophylles, présentes notamment chez les végétaux.
- les caroténoïdes, qu'on retrouve par exemple dans la carotte.
- les phycobillines, présents exclusivement chez les algues et cyanobactéries.

Ces familles comportent elles-mêmes plusieurs pigments dont les spectres d'absorption varient légèrement. Ceci permet de capter des portions différentes du spectre solaire parvenant jusqu'à la surface de la Terre. Par exemple, il existe deux chlorophylles communes dont les spectres d'absorption sont représentés sur le graphique ci-dessous<sup>93</sup> :

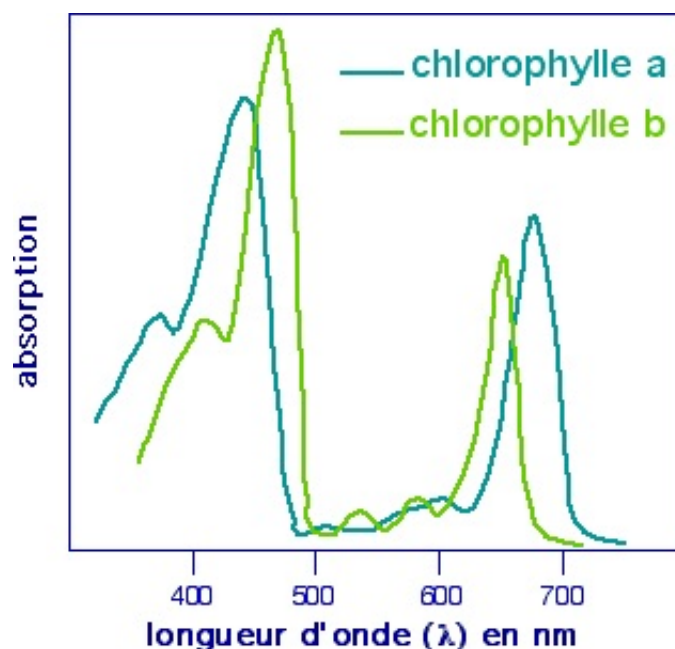


FIGURE 13 – Graphique représentant les spectres d'absorption des pigments les plus communs de chlorophylle (Source : UMR SNV Jussieu<sup>94</sup>)

L'efficacité énergétique globale de photosynthèse est estimée entre 3 et 10% selon les sources consultées (wikipedia, UFR des Sciences de la Vie de Jussieu). Outre des divergences dans l'estimation de son rendement, elle est également dépendante des pigments présents dans les cellules qui l'effectuent. Ce rendement n'est pas spécialement bon, mais il présente l'immense avantage de ne pas faire appel à une ressource rare, ni de rejeter des composés polluants. D'autres mécanismes permettent de capter l'énergie, mais ils présentent des possibilités plus limitées (car dépendantes de la photosynthèse, directement ou indirectement), comme nous allons le voir.

92. <http://www.futura-sciences.com/magazines/nature/infos/dico/d/botanique-photosynthese-227/>

93. L'échelle de la proportion d'absorption n'est pas nécessaire pour illustrer notre propos.

94. <http://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/metabo/photosynthese/014pigments.htm>

## Les autres mécanismes de captation primaire : symbiose et ectothermie

Au cours de l'évolution, certains animaux ont acquis la capacité de se chauffer par leur métabolisme : c'est l'endothermie qui caractérise notamment mammifères et oiseaux, dits à sang chaud. Ceci présente l'avantage de ne pas les rendre dépendants des conditions climatiques pour maintenir leur température interne au niveau nécessaire pour que le métabolisme fonctionne. En contrepartie, la température de ces animaux demeure à peu près constante quoi qu'il arrive, car il faut bien un signal permettant de déclencher la thermorégulation<sup>95</sup>. Pour maintenir la température dans la fourchette fixée, l'organisme a besoin d'un apport d'énergie.

De nombreux animaux ne disposent pas d'un système aussi sophistiqué et sont dits ectothermes, c'est-à-dire que leur température est identique à la température extérieure : leur activité est donc dépendante du moment dans la journée : lorsqu'il fait jour, ils cherchent à "prendre le soleil" pour emmagasiner de l'énergie<sup>96</sup>, puis ils se terrent pendant la nuit pour la conserver au mieux : les squamates et les crocodiliens en train de "bronzer" sont emblématiques de ce mécanisme. A l'inverse, *Homo sapiens* cherche à bronzer en réponse à des codes culturels, mais cela lui fait également consommer de l'énergie puisqu'il doit refroidir son organisme, et le met en danger à cause du rayonnement ultra-violet néfaste à sa santé en trop haute dose et de la perte hydrique associée à la sudation.



FIGURE 14 – Un crocodile s'exposant au Soleil (Source : dreamstime.com)

Il existe un autre moyen de s'assurer une captation primaire, il s'agit de la symbiose photosynthétique, de laquelle la photosynthèse végétale est la version la plus aboutie, puisque l'un des symbiotes habite les cellules de l'autre (son hôte) et se transmet sans le quitter : nous avons déjà croisé un autre endosymbiote avec la mitochondrie<sup>97</sup>. Il existe plusieurs degrés de : de nombreux cnidaires tels que les coraux abritent des algues photosynthétiques. De manière plus originale, la salamandre maculée, un amphibien est en endosymbiose avec une algue photosynthétique dès son stade embryonnaire, lui

95. Ce signal est donc une plage de température

96. Ce dispositif fait appel à la conduction thermique à l'intérieur des tissus : la peau chauffée entraînant un flux de chaleur entrant au-travers des couches composant l'animal.

97. Il est remarquable que les végétaux et les animaux, deux des principaux règnes eucaryotes et pluricellulaires fonctionnent grâce à une endosymbiose : en effet, cela souligne l'importance de ce phénomène dans l'Histoire de la vie sur Terre et les processus de l'évolution. Certaines acceptions de la théorie basent même l'origine des eucaryotes sur une endosymbiose entre procaryotes.

permettant ainsi une meilleure croissance : ceci procède probablement d'un mutualisme passé dont la relation d'interdépendance s'est accrue.

### 2.1.2 La captation à visée informationnelle

La captation à visée informationnelle (vue, synchronisation des rythmes biologiques) est assurée par des photorécepteurs. La vue en tant qu'association d'un système de détection et de cartographie est probablement l'apanage des animaux car ils ont besoin de pouvoir identifier et localiser leurs sources de nourriture. Elle fonctionne grâce à l'oeil qui capte des photons à l'aide des opsines, protéines photoréceptrices associées ou non à une couleur particulière.

Chez les vertébrés par exemple, on peut classer les cellules photoréceptrices en deux types : les cônes, peu sensibles mais possédant des opsines différenciées permettant de composer des couleurs, et les bâtonnets, plus sensibles mais incapables de distinguer les longueurs d'onde. La lumière est ensuite convertie électriquement en "comptant" le nombre de photons de chaque longueur d'onde (ou couleur) capté par chaque type de cônes, avant d'être transmise au système nerveux central qui se charge de recomposer spatialement le paysage. Ainsi, avec ce système, un mélange de orange et de vert sera vu comme du jaune même s'il n'y a pas de jaune, car le jaune correspond à une détection égale par les cônes dits "rouges", les cônes dits "verts" et les cônes dits "bleus" (non sensibles dans ce cas précis) : si le orange et le vert déclenche la même réaction chez le système des trois cônes que ne le fait du jaune, alors nous percevons du jaune, comme si la lumière émise était seulement composée de raies jaunes au spectre très localisé, telle que celles émises par les lampes à vapeur de sodium.

Les différents embranchements d'animaux disposent de visions plus ou moins efficaces selon le seuil de sensibilité à la lumière du processus nerveux et le nombre de protéines spécifiques associées à des plages de longueur d'ondes différentes. Les yeux des oiseaux possèdent généralement quatre types de protéines : ils ont l'une des meilleures vues du règne animal et voient une partie du spectre située dans l'ultra-violet. Les insectes disposent eux de trois types d'opsines, dont une leur permet également de voir l'ultra-violet, ce qui n'est pas le cas des Grands Singes dont nous faisons partie, chez qui ce rayonnement endommage la rétine. Par ailleurs, certains hommes<sup>98</sup> n'ont que deux types de cellules photosensibles : c'est le daltonisme dont certains chercheurs en biologie évolutive pointait l'éventuel avantage pour détecter les proies camouflées<sup>99</sup>, là où le trichromatisme permettrait une meilleure détection des fruits sur les arbres.

La photodétection à l'origine du rythme circadien des vertébrés fonctionne également à l'aide d'une opsine, la mélanopsine. Cette opsine est plus proche biochimiquement des opsines retrouvées chez les invertébrés, montrant par là que les deux sont très probablement des spécialisations ayant fait suite à une même fonction initiale ; de nombreuses spécialisations ou perte de fonctions se sont produites dans le Vivant. Chez les Primates, la duplication d'un gène permet aux catarrhiniens de disposer d'une bonne vision des couleurs que les singes du Nouveau Monde (leurs plus proches parents) n'ont pas.

Toutes ces "technologies du Vivant" reposent sur la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Mais, pour ce faire, elles exploitent en premier lieu un mécanisme physique permettant l'absorption de la lumière afin de la transformer au cours d'un processus global que nous avons appelé la captation. Projetons-nous maintenant à l'échelle régie par la physique quantique pour explorer les bases mêmes de l'interaction entre Vivant et lumière qui dévoilent les arcanes de ces dispositifs d'absorption mais aussi de bien d'autres facettes de la physique exploitée par le Vivant.

## 2.2 Absorption, communication lumineuse et camouflage ou comment utiliser les propriétés physiques de la lumière

L'absorption, la communication lumineuse et le camouflage sont des fonctions essentielles dans le Vivant. Elles reposent sur l'utilisation des propriétés de la lumière solaire par certaines cellules

---

98. Sans majuscule, nous parlons bien des mâles de l'espèce humaine.

99. M.Raymond, Cro-magnon toi-même, Editions Points, 2011

du Vivant, ou bien par l'agencement macroscopique de ces cellules. Plusieurs des mécanismes connus d'interactions entre lumière et matière<sup>100</sup> ont été mis en application par le Vivant.

### 2.2.1 L'utilisation de la réflexion de la lumière : la couleur pigmentaire

L'utilisation de la réflexion de la lumière est le procédé le plus aisé à comprendre : un faisceau de lumière comportant toutes les couleurs rencontre un objet qui en réfléchit certaines. On peut illustrer ce phénomène par le schéma ci-dessous, où la pomme rouge réfléchit la lumière rouge et la plaque noire ne réfléchit aucune couleur :



FIGURE 15 – Schéma illustrant la réflexion de la lumière (source : université de Bonn<sup>101</sup>)

De façon plus théorique, la réflexion de la lumière résulte de l'interaction entre les électrons gravitant autour des atomes ou des molécules et les photons incidents. Pour se produire, elle nécessite un pigment dont la propriété est d'absorber certaines longueurs d'onde, d'en réfléchir d'autres et de transmettre celles qui restent ceci s'explique par la quantification des photons et des orbitales de niveaux d'énergie sur lesquels gravitent les électrons autour des noyaux atomiques. La couleur d'un pigment donné résulte ensuite de l'interprétation des longueurs d'onde réfléchies que font nos cellules photosensibles, comme évoquées dans la première partie.

Le Vivant s'appuie sur une diversité de pigments qui lui confèrent ainsi des couleurs très variées. Parmi les pigments utilisés par le monde Vivant, on peut citer la mélanine dont l'un des rôles est de protéger l'organisme des rayons ultra-violets. Sa concentration dans les téguments de nombreux animaux leur donnent leur couleur. Ainsi, ces pigments sont généralement responsables de la couleur des plumes des oiseaux, des poils et des yeux des mammifères, de la peau des êtres humains. L'existence de deux types de mélanine explique notamment que certains aient les cheveux roux<sup>102</sup>. Le pigment rouge responsable de la couleur des perroquets et perruches est un autre type de pigment.

Comme nous l'avons vu, la photosynthèse fait elle aussi appel à des pigments qui permettent de capter des plages de photons aux énergies différentes et donc de disposer d'un meilleur rendement en captant plus d'énergie. Par le biais de la nutrition, ces pigments peuvent ensuite se retrouver chez d'autres espèces pourtant incapables de les synthétiser. On peut alors parler de "couleur accidentelle" en quelque sorte. Les flamants roses tirent ainsi leur couleur d'une alimentation faite de petits crustacés roses tels que les artémies, très riche en carotènes<sup>103</sup>, tandis que ces crustacés tirent eux leur couleur d'une alimentation riche en algues photosynthétiques capables de synthétiser ces pigments.

Un phénomène particulier de réflexion de la lumière peut également être utilisé pour se camoufler : la réflexion par multiples diffusions de la lumière par les cristaux de glace transparents. C'est ce phénomène qui explique que l'on perçoive la neige comme étant de couleur blanche. En effet, la neige est constituée de cristaux de glace presque transparents qui diffusent la lumière blanche dans toutes les directions sans filtration<sup>104</sup> : la lumière qui parvient à l'oeil est donc la lumière solaire qui a été

100. la réflexion, la diffraction, la diffusion

101. <http://www.fis.uni-bonn.de/en/recherchetools/infobox/beginners/resolution/spectral-resolution>

102. suite à une mutation génétique qui altère les proportions des deux types de pigments

103. caroténoïdes non-oxygénés de couleur orange

104. par lumière blanche, on entendra lumière contenant toutes les couleurs appartenant au spectre visible de l'Homme ; la neige absorbe en effet une grande partie du rayonnement infra-rouge, ce qui explique peut-être l'expression "fondre

diffusée (presque sans absorption) à de nombreuses reprises. Les ours polaires ont ainsi une fourrure sans pigments colorés grâce à laquelle ils se fondent dans leur paysage lorsqu'ils se cachent pour chasser. Cette fourrure est une bio-inspiration instiguée par le manteau neigeux. C'est ce même phénomène de diffusion qui est responsable de la couleur bleue du ciel : les molécules de l'atmosphère diffusent bien plus les courtes longueurs d'onde que les longues<sup>105</sup> : une partie des photons de longueurs d'onde bleus sont donc diffusés loin de l'axe entre le Soleil et la Terre, dans le ciel, tandis que le jaune et le rouge sont peu diffusés (c'est pourquoi le Soleil est perçu plutôt jaune en journée et vire au rouge en soirée, lorsque la lumière traverse une épaisseur d'atmosphère plus grande et subit donc plus de diffusion). Dans la mesure où aucun pigment n'est responsable de la couleur, ces couleurs sont appelées des couleurs structurelles. Nous venons d'en présenter une manifestation, mais il en existe d'autres, toutes aussi fascinantes, comme celles exploitant les réseaux de diffraction.

## 2.2.2 Les couleurs structurelles

La diffraction est un phénomène qui se produit lorsqu'une onde rencontre des obstacles lors de son déplacement : l'onde qui se propage après l'obstacle peut interférer avec elle-même ou avec celles qui la précèdent et la succèdent si elle le franchit par plusieurs chemins. Dans le cas de la lumière, les ondes qui interfèrent entre elles sont les ondes de probabilité d'un photon émis (il s'agit donc du même photon qui interagit avec lui-même) : le photon peut se situer partout dans l'espace avec une certaine probabilité en sorte qu'il peut interférer avec lui-même après l'obstacle. Ceci est très bien exprimé par le dispositif célèbre des fentes d'Young.

Cette spécificité toujours incomprise de la lumière<sup>106</sup> peut se trouver magnifiée par une succession d'obstacles et de trous qui vont sélectionner les longueurs d'onde en fonction du trajet que l'onde effectue (et de sa longueur). L'onde résultante sera alors composée d'un ensemble d'interférences qui dépendent de la longueur d'onde, et donc de franges colorées aux nuances différentes en fonction de l'angle avec lequel on regarde l'objet diffractant : en effet, selon cet angle, la longueur du trajet depuis la source n'est pas la même<sup>107</sup>. La bulle de savon est un exemple courant de diffraction : elle réfléchit une partie de la lumière, réflexion qui est fonction de l'épaisseur du film de savon et de la couleur de la lumière : les interférences créent alors un phénomène d'irisation qu'on retrouve également sur les CD-roms grâce aux micro-sillons gravés à leur surface. L'angle avec lequel le rayon circule jusqu'à la bulle puis de la bulle au détecteur intervient aussi, car elle augmente ou diminue l'épaisseur de savon traversée. Les femelles de paon et de beaucoup d'autres oiseaux-on peut le voir en regardant avec un peu d'attention le cou des pigeons bisets-ont exploité inconsciemment ce phénomène en sélectionnant ceux des mâles chez qui les réseaux de diffraction étaient les plus perfectionnés<sup>108</sup>, et donc les rendus de couleur les plus excentriques.

D'autres procédés structurels sont également utilisés par le Vivant plus marginalement et parfois de manière encore mal appréhendée. Les cristaux photoniques pourraient compter parmi ceux-ci. Maîtrisant peu le concept, nous ne l'aborderons pas ici, mais il permet d'élargir encore l'horizon des possibles pour l'avenir des recherches en biomimétique.

Qu'en est-il de l'Homme dans tout ceci ? Si sa peau n'utilise pas les réseaux de diffraction pour le parer de couleurs improbables, c'est en revanche le cas de l'iris de son oeil, qui a même donné son nom au phénomène : c'est l'iridescence. Par ailleurs, certains mécanismes inspirés de la Nature sont adoptés depuis longtemps par ses techniques. Il s'est ainsi toujours inspiré du monde Vivant, plus ou moins

---

comme neige au soleil"

105. Diffusion Rayleigh.

106. En fait, c'est pire que cela : toutes les particules se comportent de cette manière singulière, mais nos sens ne nous permettent d'observer que la lumière de façon directe.

107. Il est à noter que dans le cas d'un réseau de diffraction, il y a interaction entre lumière et matière, donc les photons qui interfèrent ne sont pas les mêmes, ce qui constitue, à notre connaissance, un autre paradoxe des interférences de la lumière

108. Ces réseaux fonctionnent avec l'espacement entre microgranules qui réfléchissent une partie des couleurs bleues et vertes.



FIGURE 16 – Photographie représentant une bulle de savon, un exemple de couleur structurelle (Source : lehollandaisvolant.netv)



FIGURE 17 – Un paon faisant la roue (Source : canstockphoto.fr)

---

consciemment. Il diminue les dépenses d'énergie dues à son endothermie<sup>109</sup> en s'habillant à l'aide de vêtements plus ou moins élaborés et chauds, imitant ainsi les mammifères endoderms des régions les plus froides du globe qui sont couverts par d'épaisses fourrures blanches l'hiver comme le lièvre arctique ou le renard polaire déjà évoqué plus haut. Nous avons alors mentionné que ces animaux disposent également d'une fourrure différente l'hiver et l'été, ce qui leur permet de se camoufler dans les paysages enneigés ; la biocénose copie donc son biotope : le mimétisme est aussi une technique utilisée par le Vivant avant que l'Homme ne s'en saisisse.

En fait, il s'agit même d'un phénomène marquant de l'évolution dont les exemples abondent : le syrphe, un coléoptère placide, ressemble aux guêpes communes dont les moeurs effraient certains prédateurs : ainsi, ses prédateurs sont moins enclins à l'attaquer ; le coucou gris pond ses oeufs dans le nid d'autres oiseaux pour ne pas avoir à les élever : pour cela, il imite plus ou moins bien les oeufs des espèces qu'il parasite. Moins anecdotique est le phénomène de convergence évolutive qui fait encore bondir certains créationnistes. Des animaux occupant les mêmes niches écologiques convergent vers des formes ressemblantes<sup>110</sup> : à ce titre, on peut citer les requins et les cétacés qui se ressemblent, bien que très éloignés génétiquement puisque les premiers sont des poissons cartilagineux dépourvus d'un véritable squelette osseux et de vessie natatoire<sup>111</sup> tandis que les cétacés appartient aux cétartiodactyles et sont donc des mammifères assez proches cousins des ruminants, avec lesquels ils partagent la fonction placentaire et l'essentiel de l'agencement du squelette<sup>112</sup>. Vivant sous l'eau plutôt que dans l'air, leur forme a convergé vers une morphologie hydrodynamique adaptée à leur milieu : outre la curiosité que suscite le phénomène, cela indique l'adéquation de cette morphologie avec le milieu aquatique. Jules Verne et Hergé ne se sont donc pas trompés lorsqu'ils ont imité la morphologie partagée par les cétacés et les requins : ils étaient seulement des pionniers du biomimétisme.

Les recherches sondant le potentiel biomimétique sont très variées, mais aucun secteur plus que celui de l'énergie solaire ne doit recueillir notre attention. A l'heure où l'Homme est confronté à la raréfaction des ressources, l'énergie solaire apparaît comme le moyen le plus fiable pour répondre durablement aux problématiques énergétiques auxquelles il se retrouve confronté.

---

109. Rappel : l'endothermie est la caractéristique d'un animal dont le métabolisme maintient la température interne constante.

110. Dans le cas du syrphe, celui-ci imite la robe de la guêpe, alors que dans la convergence évolutive, c'est en réponse à une adaptation au milieu que s'effectue l'évolution.

111. la vessie natatoire est un organe permettant de se stabiliser à une profondeur sous-marine sans effectuer de mouvements, et a probablement évolué à partir des poumons primitifs de certains poissons.

112. Ce sont essentiellement les dimensions des éléments qui ont changé : il reste par exemple aux cétacés de minuscules os à l'arrière du corps, réminiscences des pattes de leurs ancêtres.

## 3 L'Homme et l'énergie solaire

L'épuisement des sources d'énergie non renouvelables et le réchauffement climatique de la planète font de l'approvisionnement en énergie propre et durable l'un des défis scientifiques et techniques les plus importants pour l'humanité au XXI<sup>e</sup> siècle. Pour répondre à la demande mondiale en énergie dans le futur et de manière durable il faudra non seulement accroître l'efficacité énergétique de l'exploitation de ces sources et créer des meilleures méthodes d'utilisation de combustibles carbonés mais aussi et en priorité développer de façon significative les énergies neutres en carbone.

Parmi les ressources énergétiques propres et renouvelables, l'énergie solaire est de loin la plus importante en terme de potentiel puisque le Soleil fournit plus d'énergie à la Terre en une heure que l'humanité n'en consomme en une année. De la même façon que le Vivant en milieu naturel, l'être humain utilise des techniques pour capter, convertir et stocker une partie de cette énergie qui permettent de se servir de la lumière et de la chaleur du rayonnement solaire pour des applications à des fins pratiques divers.

### 3.1 Applications actuelles de la technologie solaire

Les techniques d'utilisation de l'énergie solaire ont des applications qui recouvrent de nombreux domaines de l'activité humaine, que nous nous proposons de passer en revue pour en esquisser un état des lieux.

#### 3.1.1 Architecture et énergie passive

La plus ancienne utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire sur un bâtiment pour faire des économies d'énergie importantes en chauffage et éclairage, à l'instar des animaux ectothermes. Cette énergie solaire dite passive doit être prise en compte lors de la conception architecturale d'un bâtiment pour éviter toute déperdition thermique et profiter au maximum des apports thermiques du soleil (forme compacte, façades doubles, isolation thermique performante, surfaces vitrées orientées vers le sud, etc.). L'énergie solaire passive n'a pas besoin de dispositifs mécaniques ou électriques et permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un coût quasiment nul en tirant partie des conditions d'un site et de son environnement, ceci selon les principes de l'architecture bioclimatique, dont l'objectif est de rendre naturellement la construction la plus confortable pour ses utilisateurs. La maison solaire passive est l'exemple le plus concret de cette application. Il s'agit d'une habitation conçue pour bénéficier au maximum du rayonnement solaire, grâce à sa conception (forme, orientation, répartition des ouvertures, isolation, inertie thermique...), de la qualité de ses composants (murs, toiture, sol, fenêtres, portes...) et d'une ventilation performante pour maîtriser les apports d'air et le degré d'humidité.

#### 3.1.2 Chauffage de l'eau et des locaux

L'énergie solaire thermique est l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle peut être soit utilisée directement (centrales de chauffage solaire) ou indirectement (centrales thermodynamiques à concentration). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement (par conduction et convection) plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques. À l'échelle d'une habitation individuelle ou collective, il est possible d'installer un chauffe-eau solaire ou un chauffage solaire qui permettront de récupérer l'énergie thermique à des niveaux de températures adaptés au chauffage de l'eau sanitaire et des locaux. Il s'agit de capteurs solaires vitrés installés le plus souvent sur la toiture, dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement solaire, qui transmet ensuite la chaleur à un réservoir d'eau ou à une dalle de sol à travers un dispositif appelé "plancher solaire direct". Les centrales de chauffage solaire (SHP, solar heating plant en anglais) fonctionnent sur le même principe que le chauffage solaire individuel mais à plus grande échelle. Une centrale de chauffage

---

113. Source : [http://enrj.renouvelables.free.fr/energie\\_solaire\\_thermique.html](http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_solaire_thermique.html)

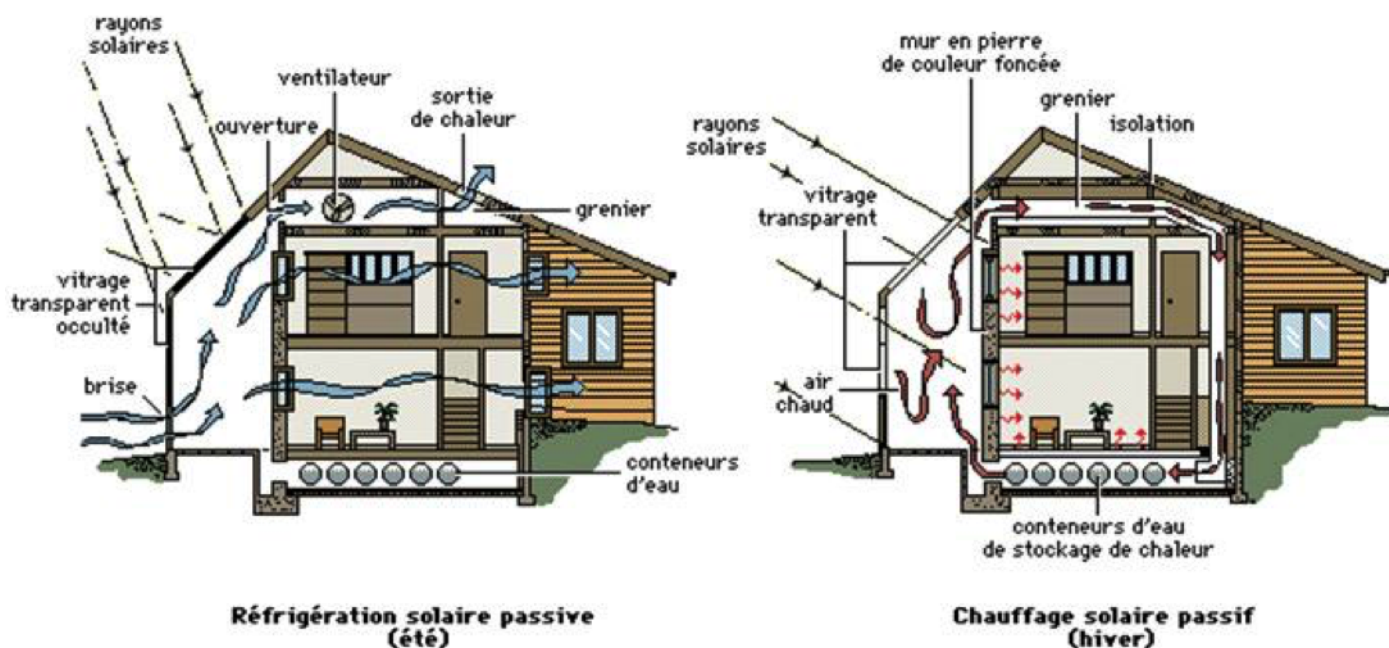


FIGURE 18 – Schéma de principe de la maison solaire passive <sup>113</sup>

solaire utilise l'énergie du rayonnement solaire afin de produire de l'eau chaude de manière centralisée, ensuite distribuée aux consommateurs via un réseau de chaleur. Cette chaleur peut répondre à la fois à des besoins de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. Il existe également toute une panoplie de capteurs et de procédés solaires thermiques adaptés à des applications spécifiques comme la production de froid, la climatisation ou les procédés industriels (dessalement de l'eau de mer, purification de l'eau souillée, production de vapeur...), mais la concurrence des énergies conventionnelles ne leur a pas permis pour le moment de dépasser le stade de projets de démonstration.



FIGURE 19 – Chauffe-eau solaire (Source : Wikipédia, article sur le chauffe-eau solaire)



FIGURE 20 – Centrale de chauffage solaire (Source : Wikipédia, article sur la centrale de chauffage solaire)

### 3.1.3 Production d'électricité

L'énergie du rayonnement solaire peut être convertie en énergie électrique soit directement en utilisant l'énergie photovoltaïque (PV, photovoltaics en anglais), soit indirectement en utilisant l'énergie thermique à concentration (CSP, concentrated solar power en anglais). Ces deux méthodes de conversion sont décrites par la suite.

#### Energie thermodynamique à concentration

Il s'agit d'un type d'énergie solaire thermique qui consiste à utiliser la chaleur issue du rayonnement solaire de façon indirecte puisque cette chaleur sert à un usage autre que le chauffage, dans ce cas, la production d'électricité dans des centrales solaires thermodynamiques. Une centrale solaire thermodynamique à concentration est une centrale constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats qui concentrent les rayons du soleil afin de chauffer un fluide caloporteur dont la vapeur servira à faire tourner une turbine ou mettre en marche un moteur Stirling pour produire de l'électricité grâce à un générateur. Ce type de centrale permet, en stockant ce fluide dans un réservoir, de prolonger le fonctionnement de la centrale plusieurs heures au-delà du coucher du Soleil. Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration. Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour. Dans les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs héliostats concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire. Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole (Dish Stirling).



FIGURE 21 – Centrales solaires thermodynamiques à tour (Source : Wikipedia, article sur le tour solaire thermique)



FIGURE 22 – Centrale solaire thermodynamique cylindro-parabolique (Source : Wikipedia, article sur la centrale solaire de Mojave)



FIGURE 23 – Centrale solaire thermodynamique parabolique Stirling (Source : Wikipedia, article sur la centrale solaire thermodynamique)

#### Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité qui peut être utilisée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux-mêmes composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. La conversion de l'énergie est due à l'effet photoélectrique<sup>114</sup> au sein des matériaux photosensibles semi-conducteurs composant les cellules : leurs électrons sont libérés sous

114. L'effet photoélectrique consiste en l'absorption d'un photon par un électron : en fonction de l'énergie du photon absorbé, l'électron peut changer de niveau d'excitation ou bien être éjecté de l'atome si l'énergie du photon est suffisante pour lui transmettre en plus une énergie cinétique. Si l'énergie du photon n'est pas suffisante ou ne correspond pas au niveau d'énergie d'une des orbitales, le photon n'est pas absorbé. Cette découverte a valu à A.Einstein le Prix Nobel en 1905.

l'influence de l'énergie extérieure apportée par les photons ce qui induit un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (Wc : puissance maximale d'un dispositif) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Plusieurs modules ou panneaux photovoltaïques sont généralement regroupés pour former une installation solaire autonome chez un particulier ou une centrale solaire photovoltaïque raccordée au réseau. Les centrales solaires sont de plus en plus puissantes (plus de 100 MWc en 2012) ; les systèmes solaires photovoltaïques autonomes ont logiquement des puissances plus modestes, généralement inférieures à 100 kWc.



FIGURE 24 – Installation photovoltaïque chez particulier (Source : Wikipedia, article sur le panneau solaire)



FIGURE 25 – Centrale photovoltaïque réseau (Source : <http://lenergeek.com/2012/03/07/une-centrale-photovoltaïque-mise-en-service-en-corse/>)

## Véhicules de transport

Dans le secteur des transports, des actions ont été mises en œuvre depuis des décennies pour développer l'utilisation de sources d'énergie alternatives non polluantes par les véhicules tels que les voitures, les bateaux et les avions. Parmi ces énergies se trouve celle issue du rayonnement du soleil à partir de laquelle des prototypes de véhicules solaires ont vu le jour ces dernières années.

Un véhicule solaire est un véhicule électrique alimenté complètement ou significativement par la conversion directe de l'énergie solaire. Habituellement, ce sont des cellules photovoltaïques contenues dans des panneaux solaires intégrés qui transforment l'énergie du soleil directement en énergie électrique pour alimenter la totalité ou une partie de la propulsion du véhicule. L'énergie solaire peut également être utilisée pour fournir de l'énergie pour les systèmes de communication ou de contrôle ou pour d'autres fonctions auxiliaires. Actuellement, les véhicules solaires ne sont pas vendus comme des appareils pratiques de transport utilisables tous les jours, mais sont encore au stade de la démonstration et des exercices d'ingénierie, souvent parrainés par des organismes gouvernementaux. Les véhicules solaires les plus communs sont les voitures, les bateaux et les avions.



FIGURE 26 – Véhicules solaires : Nuna7 (voiture), PlanetSolar (bateau), SolarImpulse (avion) <sup>115</sup>

## Satellites artificiels

Tout satellite en orbite dans l'espace a besoin d'énergie électrique pour assurer sa mission en autonomie et doit donc disposer d'une plateforme capable de fabriquer, stocker et distribuer cette énergie. Dans leur grande majorité, les satellites utilisent l'énergie solaire ; ils sont équipés d'un générateur constitué d'un assemblage de cellules photovoltaïques qui transforment directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Un ensemble de convertisseurs et de régulateurs gèrent à la fois le stockage et la distribution de cette énergie électrique vers les équipements de la plate-forme. Aujourd'hui très largement répandue, cette technologie assure des rendements de 12 à 17 % avec des cellules en silicium et jusqu'à 29 % avec des cellules en arséniure de gallium. Pour pallier le manque de rayonnement solaire et faire face aux pointes de consommation des équipements, les satellites sont également équipés de batteries qui stockent de l'énergie électrique <sup>116</sup>.



FIGURE 27 – Panneaux photovoltaïques sur un satellite NASA <sup>117</sup>

## Agriculture et horticulture

L'agriculture et l'horticulture cherchent à optimiser la capture de l'énergie solaire afin d'optimiser la productivité des plantes. Des techniques telles que les cycles de plantation temporels, l'orientation adaptée des rangs étagés et le mélange des variétés végétales peuvent améliorer les rendements des cultures. Bien que la lumière du soleil soit généralement considérée comme une ressource abondante, les exceptions soulignent l'importance de l'énergie solaire pour l'agriculture. Pendant les périodes de grand froid, des agriculteurs français et anglais mettaient en place des murs de fruits afin de maximiser la collecte de l'énergie solaire car ces murs apportaient de l'inertie thermique et accéléraient la maturation des plantes en les gardant au chaud. Les serres convertissent également la lumière solaire en chaleur en empêchant que l'énergie ne s'échappe par convection, permettant la production et la croissance annuelle (dans des environnements clos) de cultures spéciales et d'autres plantes non adaptées au climat local. Il existe actuellement des serres bioclimatiques, dites serres solaires passives, qui stockent l'énergie solaire durant la journée et la restituent la nuit ou lors de séquences nuageuses. Elles sont isolées pour réduire les pertes thermiques et ne nécessitent aucun panneau solaire.

115. Source : Site internet de Lenergeek

116. Ces dispositifs de stockage sont très coûteux ; s'ils sont donc pertinents pour les objets nécessaires et peu nombreux que sont les satellites, ils demeurent beaucoup trop onéreux pour nos consommations électriques gargantuesques.

117. Source : [http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le\\_photovoltaique\\_pour\\_satellite](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovoltaique_pour_satellite)

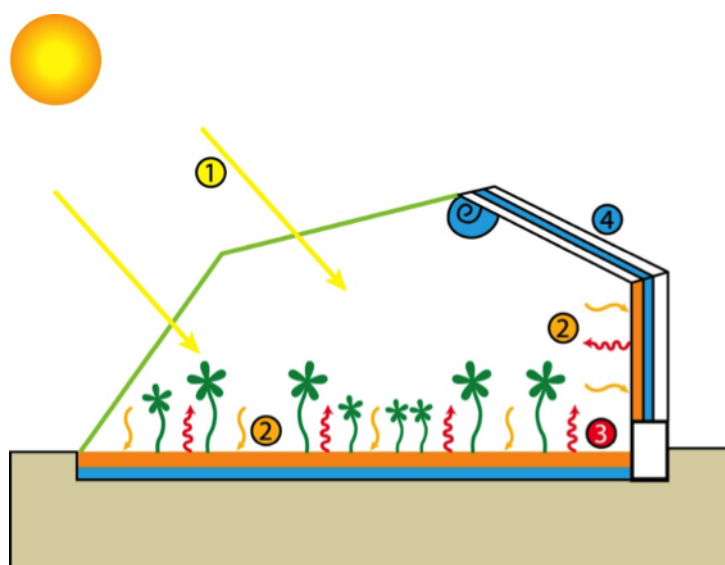


FIGURE 28 – Schéma de principe de la serre bioclimatique<sup>118</sup>

### 3.2 Les grands enjeux de l'énergie solaire pour l'Homme

En 2011, l'Agence Internationale de l'Énergie a déclaré que "le développement de technologies d'énergie solaire abordables, inépuisables et propres aura d'énormes avantages à long-terme. Il permettra d'accroître la sécurité énergétique des pays en s'appuyant sur une ressource locale, inépuisable et surtout indépendante de l'importation, d'améliorer la durabilité, de diminuer la pollution, de réduire les coûts du réchauffement climatique et de garder les prix des combustibles fossiles inférieurs à ce qui est attendu. Ces avantages auraient un impact au niveau mondial. Ainsi, les coûts supplémentaires des mesures incitatives pour le déploiement de ces technologies doivent être considérés comme des investissements ; des investissements qui doivent être utilisés à bon escient et être largement partagés". Des pays tels que l'Allemagne, l'Espagne, le Japon et la Chine ont une longueur d'avance quant à la fabrication et la mise en œuvre de systèmes solaires thermiques et photovoltaïques. Ces pays montrent clairement ce qui peut être accompli rapidement lorsque des mécanismes réglementaires appropriés sont mis en place.

Bien que l'énergie solaire présente des avantages non négligeables au niveau du développement durable, elle présente aussi des inconvénients bien connus relevant de sa propre nature : le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre est très dilué (puissance d'environ 1 KW/m<sup>2</sup>), intermittent (disponible uniquement pendant la journée), et inégalement réparti (la plupart du temps entre 30° nord et 30° sud de latitude). De plus, l'utilisation de l'énergie solaire nécessite la capture, la conversion et le stockage de cette énergie ; la capture et la conversion (et la consommation instantanée) se font actuellement à-travers les moyens de l'énergie thermique et l'énergie photovoltaïque décrits précédemment mais le stockage représente encore un véritable défi à relever si l'on souhaite que l'énergie solaire contribue plus significativement à l'approvisionnement en énergie propre et renouvelable. En effet, en l'absence d'un moyen de stockage rentable, l'électricité solaire ne pourra jamais être une source d'énergie primaire pour la société, en raison de la variation diurne de l'insolation locale.

Pour surmonter ces difficultés, différentes technologies sont en cours de développement. La possibilité d'intégration des fonctions de capture, conversion et stockage exhausse la technologie solaire thermique en une option qui devrait être poursuivie ardemment pour profiter de cette ressource potentiellement neutre en carbone (et pourquoi pas à captation de carbone comme dans les feuilles) qu'est le rayonnement solaire. Néanmoins, ces technologies souffrent toujours de la comparaison avec les énergies conventionnelles fossiles, que la nature déjà bien connue (non réparties sur tout la surface

118. Source : <http://agrithermic.fr/serre-bioclimatique.html>

de la terre mais denses et de facilité de transport) et les moyens d'exploitation maîtrisés (efficaces et générateurs des profits) rendent plus avantageuses à court-terme (financièrement) que les énergies renouvelables peu répandues et aux techniques encore en développement.

Ainsi, la recherche mondiale actuelle dans le domaine de l'énergie solaire porte surtout sur l'amélioration des systèmes pour avoir un meilleur rendement et une baisse des coûts des équipements de façon à la rendre plus compétitive vis-à-vis des énergies d'origine fossile. En effet, seulement une fraction de l'énergie du rayonnement solaire reçu par la Terre est convertie en énergie utilisable pour produire de la chaleur ou de l'électricité (rendements maximales de 30% pour les centrales solaires thermodynamiques et de 15-20% pour les centrales solaires photovoltaïques) par rapport au rendement de l'ordre de 75% des technologies basées sur les hydrocarbures. Même si les systèmes de production d'énergie solaire ont un coût proportionnel (à l'exploitation) quasiment nul car il n'y a pas de combustible et seulement des frais qui dépendent très peu de la production, il faut tenir compte des coûts d'installation, beaucoup plus élevés que pour les techniques fossiles ou bien les autres renouvelables (éolien et hydraulique, par exemple). En dépit de sa profusion, et à cause de ses coûts d'investissements lourds, l'énergie solaire est aujourd'hui une énergie peu compétitive, sauf situations particulières (exemple des satellites), et qui ne se développe qu'au gré des aides d'Etat.

## 4 La bioinspiration pour l'optimisation de l'utilisation de l'énergie solaire : un laboratoire d'idées durables à prospecter

En dépit des exemples cités plus haut, le biomimétisme peut apparaître comme le passe-temps ludique de quelques ayatollah de l'écologie, passionnés et passionnants mais absolument déconnectés des réalités contemporaines. Pourtant, Steve Jobs, peu réputé pour sa sensibilité aux causes environnementales et au bien-être animal<sup>119</sup>, déclarait peu avant de mourir : "Je crois que l'innovation au XXIe siècle commence au carrefour de la biologie et de la technologie." Si ses qualités de visionnaires<sup>120</sup> se révèlent toujours aussi aiguisées, alors la biomimétique devrait très bientôt se détacher de ces a-prioris idéologiques pour devenir un secteur prolifique de l'ingénierie. Afin de conforter cette idée, nous allons montrer qu'elle imprègne déjà nos activités plus ou moins consciemment, avant de nous projeter sur ce à quoi pourrait ressembler une ingénierie bio-inspirée. Cette analyse sera menée à partir d'exemples, car l'ingénierie correspond aux sciences appliquées : il nous paraît donc opportun de passer en revue plusieurs techniques appartenant à différents secteurs, plutôt que de nous focaliser sur l'un d'entre eux.

### 4.1 Au siècle de la bio-inspiration : les pistes actuelles

#### 4.1.1 Photosynthèse artificielle

Actuellement, la variation diurne de l'insolation locale et l'absence d'un moyen de stockage rentable après capture et conversion de l'énergie solaire en énergie électrique signifie que l'électricité solaire ne pourrait pas devenir dans les années à venir une source d'énergie primaire pour la société. Néanmoins, une méthode de stockage qui s'inspire du design de la nature est en cours de développement, dans laquelle des liaisons chimiques sont cassées et formées pour produire des carburants solaires stockables dans un processus connu sous le nom de photosynthèse artificielle. La photosynthèse artificielle est une nouvelle façon de produire de l'énergie en imitant la photosynthèse naturelle des plantes. Plusieurs types de photosynthèse artificielle sont à l'état de recherche ou de prototype, parmi lesquels deux méritent d'être considérés avec attention<sup>121</sup> :

119. Même si, dans la lignée des grandes fortunes américaines, il n'était pas complètement insensible au bien-être humain, les activités qui l'ont fait prospérer étaient très coûteuses en termes social et environnemental.

120. Selon nous, sa principale qualité était de prévoir avec perspicacité ce qui pouvait être vendu en masse.

121. Non pas que les autres n'aient aucun avenir ni intérêt, mais ils sont insuffisamment aboutis pour pouvoir représenter des solutions viables à court-terme.

- La feuille artificielle développée par Daniel Nocera, ancien chercheur au MIT, est le système le plus abouti technologiquement. Il utilise l'énergie solaire et l'eau pour produire de l'oxygène et du dihydrogène, ce dernier agissant comme un stock d'énergie. Cette feuille est composée d'un assemblage de fines couches de différents métaux (silicium, cobalt et un alliage nickel, molybdène, zinc) qui catalysent l'oxydation de l'eau une fois plongé dedans et exposé au soleil. Elle oxyde l'eau (comme ce qu'il se produit lors de la photosynthèse naturelle), et réarrange les atomes qui la composent de façon différente. Ces nouvelles molécules pourront être utilisées pour produire de l'énergie. En effet, la feuille artificielle ne produit pas d'énergie de façon directe, elle ne produit que du dioxygène et du dihydrogène. C'est l'hydrogène qui peut être ensuite utilisé pour faire fonctionner une pile à combustible, et donc produire de l'électricité, pour un rendement de 2,5%. On comprend néanmoins que, pour l'instant, la feuille artificielle n'est pas très compétitive. Mais son créateur reste optimiste : selon Daniel Nocera, on pourrait adapter son système pour l'usage domestique : une seule feuille immergée dans 4 litres d'eau suffirait à alimenter une maison en électricité pendant une journée.

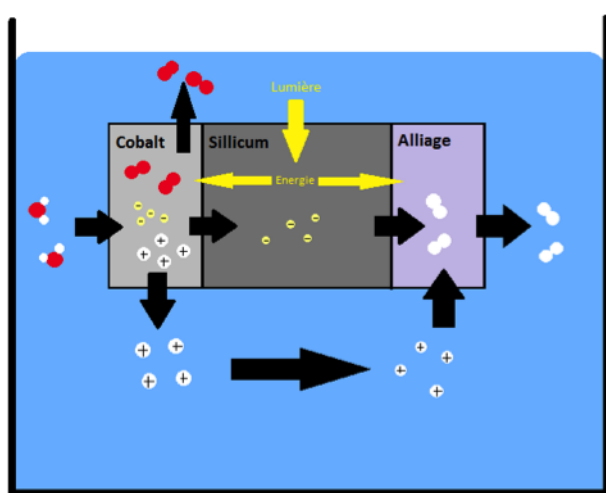


FIGURE 29 – Schéma de principe de la feuille artificielle (Source : Wikimédia, article sur la feuille artificielle)



FIGURE 30 – Illustration d'une feuille artificielle<sup>122</sup>

- La technologie à nano-catalyseur en or développée par Toshiba utilise l'énergie solaire pour produire des composés de carbone à partir du dioxyde de carbone et de l'eau et fournir de la sorte une charge d'alimentation chimique viable ou du combustible potentiellement utilisable par l'industrie avec une efficacité de 1,5 %, le niveau le plus élevé jamais enregistré. L'objectif à long-terme de ces travaux de recherche est de développer une technologie compatible avec les systèmes de capture du dioxyde de carbone installés dans des installations telles que les usines et les stations d'énergie thermique, en utilisant le dioxyde de carbone pour fournir une énergie stockable et transportable. En effet, ces technologies de photosynthèse artificielle qui utilisent l'énergie solaire pour générer des composés de carbone à partir du dioxyde de carbone sont considérées comme des moyens prometteurs de faire d'une pierre deux coups : résoudre les problèmes d'épuisement de combustibles fossiles tout en pompant le dioxyde de carbone à l'origine du réchauffement climatique. À ces fins, Toshiba cherche encore à améliorer l'efficacité de conversion en augmentant l'activité catalytique avec pour objectif affiché une mise en œuvre pratique au cours de la décennie 2020.

122. Source : <https://archivesmillenairesmondiales.wordpress.com/2013/06/17/energie-une-feuille-artificielle-qui-produit-de-lhydrogene-a-partir-de-la-lumiere>

123. Source : <http://www.enerzine.com/603/17928+toshiba-la-photosynthese-artificielle-la-plus-efficace-au-monde+.html>

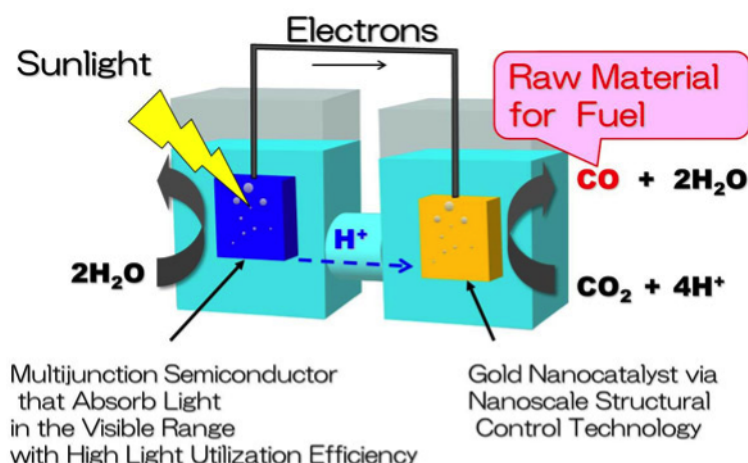


FIGURE 31 – Schéma de principe de photosynthèse par nano-catalyseur (Source :Enerzine)<sup>123</sup>

#### 4.1.2 L'enveloppe du bâtiment

Selon Christophe Ménézo, spécialiste de l'enveloppe du bâtiment titulaire de la chaire Habitats et Innovations énergétiques portée par la fondation INSA de Lyon, le principal défaut actuel des enveloppes est leur manque, voir leur absence, d'adaptabilité. Comme nous l'avons vu, le climat n'est pas une donnée fixe, mais une variable spatiale et temporelle dont on ne tient pas assez compte. L'objectif des recherches qu'il mène est d'améliorer cette adaptabilité des bâtiments. Et où trouver meilleure inspiration qu'au sein du monde Vivant, qui a justement dû s'acclimater à ces environnements variables. Ces adaptations présentent donc un vif intérêt pour la biomimétique, dont certains commencent à être exploitées. Très partisan de cette démarche, Christophe Ménézo a, entre autres, participé à l'élaboration de prototypes de bâtiments double-peau tel que celui présenté ci-dessous, dont il pense que les prochains développements sont à trouver du côté de la biomimétique :



FIGURE 32 – Photographie représentant un bâtiment double-peau jouant sur la pigmentation des façades (Source : le moniteur)<sup>124</sup>

Selon ETI construction, spécialiste des solutions techniques et réglementaires dans la construction, "le premier effet de cette façade doublée en panneaux photovoltaïques est [...] de permettre une

124. Source : <http://www.lemoniteur.fr/183-recherche-developpement/article/solutions-techniques/17323119-les-effets-positifs-d-une-double-peau-photovoltaïque>

meilleure isolation, que ce soit sur le plan thermique comme acoustique, en été comme en hiver. En effet, cette réalisation s'adapte à toutes les saisons, tour à tour, en créant, par la fermeture de l'espace entre les deux façades, une protection thermique supplémentaire. Cet espace peut, à l'inverse, être ouvert en été pour amener un flux d'air et ainsi rafraîchir l'espace en même temps que les cellules photovoltaïques. L'un des effets est alors d'augmenter le rendement de ces panneaux solaires, tout en permettant de profiter de cet espace abrité et ventilé." <sup>125</sup>

D'autres concepts d'enveloppes écologiques ont vu le jour récemment comme le Solar Ivy Building Integrated Modular System, qui consiste à habiller la façade de modules ressemblant à des feuilles. Ces feuilles photovoltaïques récupèrent également l'énergie issue du vent et peuvent être intégrées au sein de structures personnalisées à la discrétion du client : elles répondent donc à des besoins énergétiques et esthétiques. On trouve ci-dessous un prototype de bâtiment basée sur cette technologie :



FIGURE 33 – Photographie représentant un bâtiment paré de feuilles artificielles <sup>126</sup>

En complément à ces habilllements de façade, la piste des réseaux de diffraction est intéressante afin de rendre la captation d'énergie plus modulable, mais aussi d'augmenter les rendements de la photosynthèse. Ainsi, le papillon *Morpho melaneus* utilise la diffraction associée au vol erratique pour être vu de ses congénères et les attirer tout en étant camouflé aux yeux de ses prédateurs, qui ne le voient pas en continu. Les ailes du papillon sont marrons, mais se teintent de couleurs bleus lorsqu'on les regarde sous certains angles. Ce procédé pourrait être exploitée afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, qui dépendent de l'angle avec lequel le rayonnement solaire leur parvient, ainsi que de permettre de choisir quand l'on capte la lumière et à quelles fins. Cela pourrait également être mis à profit par les architectes pour concevoir des façades originales, dont la couleur changerait en fonction de la position de l'observateur.

125. Source : <http://www.eti-construction.fr/la-double-peau-photovoltaïque-avenir-de-l-habitat-7124/>

126. Source : <http://inhabitat.com/solar-ivy-building-integrated-modular-photovoltaic-system-grows-bigger-better/solar-ivy-update-2/?extend=1>



FIGURE 34 – *Morpho melaneus*, ou comment ne montrer de soi que ce que l'on veut <sup>127</sup>

Dans le même esprit d'adaptabilité, l'héliotropisme du tournesol pourrait être exploité pour que l'orientation des panneaux photovoltaïques soit calquée sur la trajectoire du Soleil. Chez le tournesol, le côté ombragé pousse plus vite en raison de la migration de l'hormone impliquée dans l'élongation cellulaire <sup>128</sup> : ce phénomène incline le capitule de tournesol du côté du Soleil, optimisant ainsi la photosynthèse. Un tel dispositif paraît tout à fait adapté à l'échelle du bâtiment et est d'ailleurs en partie exploitée par des panneaux solaires dont on fait varier l'angle en fonction de l'ensoleillement. Néanmoins, l'avantage du système du tournesol est qu'il est directement adapté à son environnement, là où les panneaux inclinables nécessitent d'être pensés pour chaque bâtiment et en fonction des différentes saisons.

Enfin, des concepts d'enveloppe en symbiose avec des algues photosynthétiques sont à l'étude et pourrait constituer une alternative aux enveloppes à base de panneaux photovoltaïques dont nous venons de parler. Le principe serait sensiblement identique, sauf qu'il utiliserait des organismes vivants pour produire une partie de l'électricité.

### Le solaire pour se refroidir ?

Parmi les adaptations nécessaires dans le monde du bâtiment et l'industrie photovoltaïque, le refroidissement tient une place majeure. En effet, le rendement des panneaux photovoltaïques dépend de la température à laquelle il est soumis et diminue au-delà d'un certain seuil. Par ailleurs, l'Homme aspire au confort et cherche donc des moyens de se rafraîchir moins importunants et plus efficaces que la sudation lorsque les températures sont élevées en période estivale. Là encore, la Nature pourrait venir à notre rescousse. En effet, des kyrielles d'animaux ont dû s'accommoder d'une chaleur parfois torride. Les mécanismes permettant de supporter la chaleur sont un sujet d'autant plus d'actualité que le changement climatique semble faire son oeuvre.

Parmi les pistes envisagées à l'heure actuelle, le frelon oriental constitue l'une des plus sérieuses. Ce frelon éveillait la curiosité des spécialistes depuis de nombreuses années déjà, car son pic d'activité avait lieu au moment le plus chaud de la journée. Des études israéliennes se sont attelées à démystifier les adaptations de cet hyménoptère et leurs découvertes sont tout à fait prometteuses. Le frelon présente son pic d'activités au moment même où les rayons UV-b sont les plus nombreux dans la journée.

Cette lumière de haute énergie est captée au niveau de la bande marron du frelon, grâce à un phénomène de diffusion qui empêche en partie la réflexion de la lumière (basée sur une structure nanométrique), et de pénétration (basée sur une structure en feuillets de chitine), et au niveau de la bande jaune grâce à des structures ovoïdes anti-reflets. Sous la bande jaune de la cuticule se situerait ensuite une sorte de centrale électrique capable de la convertir en énergie utilisable à des fins métaboliques grâce à un pigment nommé Xanthoptérine, connu pour son implication dans des processus de conversion photochimique. Cette théorie est accréditée par des expérimentations menées par ces chercheurs

127. Source : <http://insectafgseag.myspecies.info/fr/taxonomy/term/11943/media?type=Allpage=1>

128. Source : Wikipédia

qui sont parvenus à créer une cellule photosynthétique (de rendement très faible pour l'instant) à partir du pigment photosensible qu'est la Xanthoptérine. Il reste désormais à éclaircir le rendement que peut avoir cette photosynthèse animale, ainsi qu'à découvrir à quoi est utilisée l'énergie récupérée : certains avancent qu'elle pourrait servir de climatisation intégrée. Si cela était véridique, la cuticule du frelon oriental pourrait bien devenir le modèle architectural de demain.

---



FIGURE 35 – Un frelon photovoltaïque pour l'énergie de demain (Source : Pour la Science)<sup>129</sup>

---

De leur côté, les éléphants sont célèbres pour affronter avec flegme un climat pourtant très chaud. Dès lors, les poils échevelés qui surmontent leur peau se montraient très intrigants, puisqu'on a tendance à associer les poils à un dispositif de protection au froid. Des chercheurs se sont donc penchés sur la question, et, grâce à des modélisations de mécanique des fluides, sont parvenus à montrer que les poils de l'éléphant lui servent à se rafraîchir en augmentant les échanges convectifs avec l'air<sup>130</sup>. Ce phénomène prendrait une place d'autant plus importante en proportion que le vent est faible. Il existerait donc une densité de poils critique séparant la fonction d'isolation de la fonction de rafraîchissement (Source : Pour la Science<sup>131</sup>), que les ingénieurs pourraient mettre à profit dans des systèmes de refroidissement mécanique.

---



FIGURE 36 – Les poils d'éléphant, ou la fourrure climatisante (Source : Pour la Science)<sup>132</sup>

---

129. Source : [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/actu-le-frelon-a-panneaux-solaires-26396.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-le-frelon-a-panneaux-solaires-26396.php)

130. Echange de chaleur entre une surface et un fluide mobile qui entre en contact avec elle

131. [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/actu-rafraichissant-comme-un-poil-d-elephant-30567.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-rafraichissant-comme-un-poil-d-elephant-30567.php)

132. Source : [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/actu-rafraichissant-comme-un-poil-d-elephant-30567.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-rafraichissant-comme-un-poil-d-elephant-30567.php)

Enfin, d'autres pistes commencent à être explorées avec le même esprit : le cloporte<sup>133</sup> de Réaumur qui vit dans les déserts d'Afrique du Nord suscite beaucoup de fascination pour l'ensemble des dispositifs qui lui permettent de vivre dans un habitat très aride. Les phénomènes d'évaporation au-travers de son exosquelette pourrait servir à l'avenir à concevoir des enveloppes refroidissantes exploitant l'énergie solaire.

## 4.2 Au siècle de la bio-inspiration : une vision futuriste

Le Vivant étant le fruit d'une prolifération réalisée suite à la "sélection non-aléatoire de mutations aléatoires"<sup>134</sup>, il recèle toutes sortes d'adaptations extraordinaires mettant à profit les mécanismes physiques et chimiques. Aussi singuliers soient-ils, certaines d'entre elles pourraient bien, dès demain, faire partie de nos technologies car, tout en étant respectueux, ils présentent un potentiel fantastique qui n'est pas forcément onéreux. A ce titre, l'éclairage biologique est l'objet de réflexions très sérieuses et approfondies qui pourrait déboucher rapidement ; pour cette raison et car il est un sujet d'actualité (Les législations se succèdent pour réguler l'éclairage public et ce secteur se situe à un carrefour où plusieurs voies d'avenir sont esquissés, présentant toutes des avantages considérables, comme la LED) nous l'abordons en premier.

### 4.2.1 L'éclairage biologique

On connaît depuis longtemps des animaux tels que le ver luisant, dont les femelles aptères<sup>135</sup> diffusent une lumière la nuit en vue d'être reconnue par leurs partenaires. C'est également le cas des lucioles qui appartiennent à la même famille des lampyridae, mais dont les femelles sont des imagos. Ce phénomène de bioluminescence suscite l'intérêt car il permet une forme de stockage puis de restitution de l'énergie. L'émission lumineuse de ces animaux est d'autant plus écologique qu'il s'agit d'une "lumière froide", émettant peu de chaleur et donc de très bon rendement, tout en étant entièrement naturelle grâce à une suite d'oxydoréductions stimulée (mais non déclenchée) par l'ATP et le magnésium<sup>136</sup>.

De plus, ces organismes sont capables de clignoter sous l'effet de certaines stimulations : une technologie basée sur ce principe pourrait donc potentiellement être adaptée pour agir en fonction de l'environnement proche (détection de mouvement), voir qui sait, servir d'inspiration dans la transmission de signal comme le procédé du Li-Fi (Transmission de signal par le clignotement de la lumière des LEDS), en cours de développement.

Plus prosaïquement, plusieurs projets ont vu le jour dernièrement et se trouvent en phase de test : ils cherchent à domestiquer des bactéries bioluminescentes pour produire une forme douce d'éclairage dont la vocation serait notamment à trouver du côté de l'éclairage public nocturne (voiries, éclairage d'équipements, vitrines<sup>137</sup>). Un géant du domaine, Philips, a misé sur le concept et tente de le développer sous l'appellation Bio-light<sup>138</sup>, tandis que Glowee, une start-up de biotechnologies s'attelle à réaliser des prototypes. On trouve l'illustration de ces projets en page suivante :

---

133. Les cloportes sont les seuls crustacés terrestres.

134. Citation célèbre et récurrente de R.Dawkins, présente dans son ouvrage *Le Plus Grand Spectacle du Monde* ou certaines de ses interviews et conférences

135. Elles ne peuvent pas voler car elles restent à l'état larvaire toute leur vie et se reproduisent dans cet état : on parle de néoténie, comme pour l'axolotl qui est une forme de salamandre.

136. Source : Wikipédia

137. Ce n'est pas à proprement parler de l'éclairage public, mais il en assure la fonction tout de même

138. Source : <http://www.actinnovation.com/innovation-technologie/philips-bio-light-bacteries-bioluminescentes-eclairer-maison-3898.html>

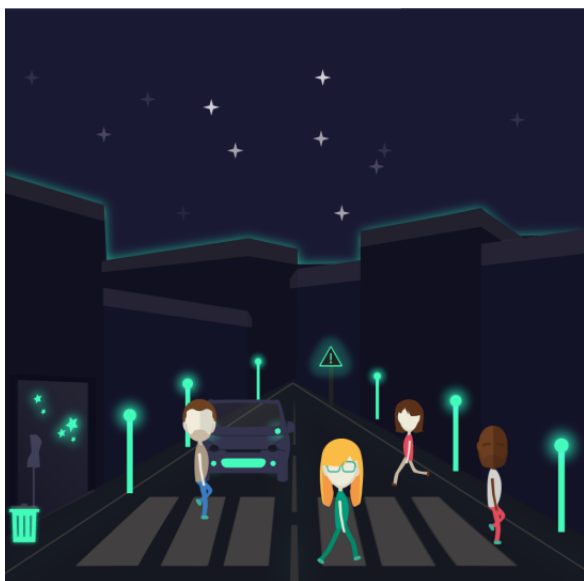


FIGURE 37 – Le bio-éclairage biologique  
(Source : Glowee)



FIGURE 38 – Exemples d'alvéoles  
bioluminescentes du concept  
Bio-light<sup>139</sup>

La lampyridae possède une autre curiosité, celle de transmettre de la lumière au-travers de sa cuticule, grâce à des nano-structures diffusant la lumière. Ceci pourrait servir à l'avenir de source d'inspiration pour la conception de nano-structures diffusantes, capables de laisser passer une partie de la lumière, mais pas d'autres, et peut-être même aucune. Ces applications sont très prisées par la médecine et des débouchés seront probablement trouvés du côté de l'imagerie ou des traitement par rayonnement.

#### 4.2.2 L'invisibilité ne sera plus réservé aux super-héros

Qui n'a jamais rêvé de devenir invisible ? Au-delà d'un rêve d'enfant, cela pourrait s'avérer une technologie très intéressante dans les domaines de la sécurité et de la défense militaire. En effet, les forces de police, entre autres, pourraient utiliser cette technique de camouflage de pointe pour mener à bien leur mission. Outre que ceci créerait une peur de se faire prendre en flagrant délit sans le savoir, ce pourrait devenir un argument de poids pour lutter contre l'autorisation du port d'armes en usant du même procédé rhétorique que les lobbyistes de ce secteur, qui tient à ceci : si chaque citoyen détient une arme, alors chaque criminel en puissance aura peur que sa victime potentielle en possède une et ne l'attaquera donc pas. Il n'y a et n'y aura ainsi jamais assez d'armes. Si l'Homme parvenait à domestiquer l'invisibilité, l'argument pourrait être transmuté : chaque criminel potentiel aurait peur qu'un agent soit camouflé par ce mécanisme dans son voisinage et ne le prenne en flagrant délit. En rendant caduc l'argument des armes, le nombre d'armes en circulation diminuerait et ainsi, deux leviers agiraient de conserve pour diminuer la criminalité : le recul du nombre d'armes et la peur du flagrant-délit.

Certes, mais comment s'y prendre pour être invisible ? Le calamar *Euprymna scolopes*, un mollusque vivant dans les eaux de l'océan Pacifique nous apporte la réponse. Il héberge une espèce de bactérie bioluminescente qu'il coordonne en sorte qu'elle émette par le dessous plus ou moins exactement la même lumière<sup>140</sup> que celle qu'il reçoit du dessus, dissimulant ainsi son ombre à d'éventuels prédateurs lors des sorties nocturnes<sup>141</sup>. Pour exploiter un tel dispositif afin d'être véritablement invi-

139. Source : <http://www.actinnovation.com/innovation-technologie/philips-bio-light-bacteries-bioluminescentes-eclairer-maison-3898.html>

140. En proportions, mais pas en longueurs d'onde (couleurs).

141. Source : Asknature

sible, il faudrait être en mesure de recomposer le spectre incident avec exactitude, ce dont ce calamar n'est pas capable. Mais, à l'ère des objets connectés et intelligents, rien ne semble impossible, alors pourquoi ne pas se prendre à rêver que les travaux pratiques du Vivant incarnés par Euprymna ne trouvent une application aussi extraordinaire qu'inattendue ?

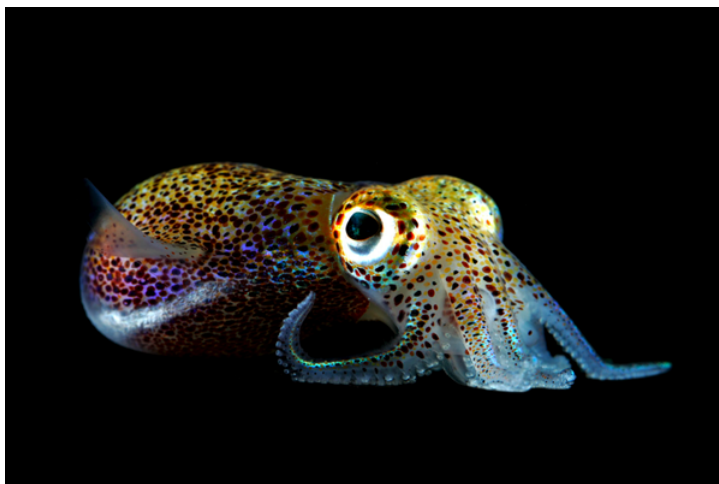


FIGURE 39 – Ce calamar iridescent cache bien des originalités<sup>142</sup>

Attention, ce n'est pas tout. Ce calamar regorge décidément d'originalité. En effet, il a été récemment découvert qu'il ne doit pas sa couleur à des pigments faits de cristaux de purine vertébrés ou de couches de chitine insecte, mais à des protéines appelées réflectines<sup>143</sup> (i.e. reflectin in english). Il semblerait que les propriétés particulières de ces protéines soient à l'origine de l'iridescence dynamique de cet animal. Nous avons déjà parlé de l'iridescence due à la diffraction, pour les plumes du paon par exemple. Ce qui est inédit chez ce calamar est la capacité de moduler à court-terme son iridescence en fonction de stimulus extérieurs. Chez certains lézards, l'iridescence est modulée par des chromatophores mobiles, alors qu'ici, il s'agit bien de la structure elle-même qui évolue, avec des temps de réaction très courts<sup>144</sup>. Cela ouvre la voie à de nouvelles pistes pour l'exploitation de l'énergie solaire et son adaptabilité aux conditions, un point clé que nous avons évoqué plus haut.

#### 4.2.3 La détection sous-marine par photosensibilité sélective

On sait depuis longtemps que les serpents perçoivent les rayonnements infra-rouge, ce qui leur permet de détecter leurs proies qui rayonnent en raison de leur chaleur interne. Plus méconnu est en revanche le système des piranhas, capables de détecter les photons du rayonnement rouge lointain<sup>145</sup> dans l'eau. Ce mécanisme a été sélectionné par l'évolution car le rayonnement rouge pénètre mieux dans les eaux riches en végétation en décomposition. En effet, ces éléments absorbent plus complètement le reste du spectre visible qui disparaît dès les premières profondeurs, tandis que les rayons rouges sont seulement absorbés par l'eau (mais, ils sont plus absorbés que les petites longueurs d'onde, donc leur nombre diminue également rapidement et les rend rares en profondeur). Les piranhas peuvent donc voir les réflexions des rayons rouges sur les objets qui les entourent et ainsi détecter leurs proies. Ce système pourrait être utilisé dans la navigation en eaux troubles et profondes, où seuls quelques photons rouges émis par le Soleil pénètre.

142. Source : <http://animalworld.tumblr.com/post/3921810888/glowing-hawaiian-bobtail-squid-euprymna-scolopes>

143. Reflectins : the unusual proteins of squid reflective tissues. Crookes WJ, Ding LL, Huang QL, Kimbell JR, Horwitz J, McFall-Ngai MJ Science. 2004 Jan 9; 303(5655) :235-8.

144. Changes in reflectin protein phosphorylation are associated with dynamic iridescence in squid, Michi Izumi,1,2 Alison M. Sweeney,1,2 Daniel DeMartini,1,2 James C. Weaver,1,2 Meghan L. Powers,1,2 Andrea Tao,1,2 Tania V. Silvas,1,2 Ryan M. Kramer,3 Wendy J. Crookes-Goodson,3 Lydia M. Mäthger,4 Rajesh R. Naik,3 Roger T. Hanlon,4 and Daniel E. Morse1,2, Journal of the Royal Society, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2842800/>

145. Le rouge lointain, traduction de far-red, est la lumière visible aux plus grandes longueurs d'onde



FIGURE 40 – Le piranha voit l’infra-rouge lointain dans l’eau (Source : Asknature<sup>146</sup>)

---

#### 4.2.4 Des yeux artificiels à facette : vers une vision vivifiée ?

Les insectes ont une vue très différente de celle des vertébrés. Cela s’explique par une structure d’oeil très différente : l’oeil est dit "à facettes" chez les animaux de cet embranchement : il leur permet de voir dans toutes les directions et de détecter des mouvements beaucoup plus rapides que celui d’un Homme ne le pourrait. En fait, chez l’insecte, chaque ommatidie (ou facette) fonctionne comme un oeil qui voit ce qui se situe devant lui, et seulement devant lui (grâce à un système de piégeage basé sur la mélanine), n’interagissant pas avec les autres ommatidies. L’ensemble des signaux lumineux captés par chaque oeil est intégré dans une représentation en forme de mosaïque : c’est la vue de l’insecte. Un tel système leur permet notamment d’éviter les collisions tout en effectuant des mouvements très rapides : les abeilles ne se rentrent pas dedans autour de la ruche car elles détectent très bien les mouvements. Le fourmilion<sup>147</sup> possède également ces yeux à facettes mis en évidence sur la photographie ci-dessous par l’effet de diffraction qu’ils induisent sur la lumière :

---



FIGURE 41 – Le fourmilion et ses yeux à facettes (Source : Wikipédia, article sur les yeux composés)

---

Des applications aussi variées que les dispositifs anti-collision (dont l’actualité nous a rappelé une fois encore la pertinence), la détection d’objets par les non-voyants ou les vêtements connectés sont envisagées, grâce à ce système permettant de discriminer précisément la lumière en fonction de sa provenance spatiale.

---

146. Source : <http://www.asknature.org/strategy/b92d4ffaf375eccc464009849c409dc0.VRsBCVxbSQs>

147. un insecte ressemblant aux libellules et fameux pour avoir "inventé" une sorte d’entonnoir creusé dans le sable qui lui sert à faire tomber ses proies vers lui.

## Conclusion : Le Vivant à la rescousse de l'Homme

Selon Mathieu Bouyer, responsable développement durable sur le campus de la Doua et coordinateur de l'ouverture thématique sur le même thème, le développement durable contient en lui-même une forme de contradiction qui rend la mission très délicate pour ne pas dire vaine. Pourtant, force est de constater que le Vivant s'est développé de manière durable grâce au processus de l'évolution. L'Homme n'est certes pas prêt à renoncer à son confort, ni à l'idée de progrès technologique qui régit son fonctionnement depuis sa sédentarisation grâce à la maîtrise de l'agriculture, mais cela ne signifie pas, à notre sens, qu'il ne peut pas le faire en harmonie avec son environnement.

Avec cet exposé illustré de nombreux exemples, nous espérons avoir réussi à démontrer que la bio-inspiration n'a pas seulement de l'avenir, mais bien qu'elle est notre avenir, tout en stimulant la curiosité et une certaine forme de fascination vis-à-vis de ce monde vivant étourdissant de diversité que nos sociétés maltraitent et saccagent plus ou moins consciemment et directement. Le Vivant est d'une richesse extraordinaire accumulée par des milliards d'années d'une évolution plus ou moins chaotique. Il en est résulté la Terre telle que nous la connaissons, et l'ensemble des surprises dont nous pouvons nous inspirer pour nos technologies, mais qui sont également une source d'émerveillement et de découverte permanents. Nous ne sommes qu'une minuscule branche de cet éventail qui n'aurait jamais pu naître sans certains de ses lointains cousins : nous avons tendance à l'oublier, mais le Vivant n'a pas besoin de nous tandis que nous sommes dépendants de lui. Qu'on se sente concerné par l'environnement ou non, la durabilité d'une société est essentielle pour son épanouissement et ne peut pas être pris à la légère comme nous le rappelle le rapide déclin des Mayas au début du millénaire en raison de la surexploitation des sols<sup>148</sup>. Pour ne pas assister au déclin de l'espèce tout entière, il est urgent de prendre conscience de ces enjeux, sans quoi l'Univers, la Terre et le Vivant continueront leur chemin sans nous, et cela ne leur arrachera pas le premier battement de sourcil, car ils n'obéissent à aucune finalité.

Notre propos était avant tout de sensibiliser aux potentialités qui siègent à côté de nous, au sein même du Vivant. Nous n'avons donc pas discuté des moyens pour parvenir à valoriser ce potentiel. Il apparaît en tout cas que le fonctionnement des sociétés contemporaines, très standardisé par aversion du risque, n'est pas le paradigme idoine. Christophe Ménézo propose ainsi de promouvoir la biomimétique dans le processus d'innovation : celui-ci gagnerait à s'inspirer de l'évolution des espèces, où les succès durables sont le fruit des quelques réussites parmi l'ensemble des essais effectués. Un tel processus permettrait de diversifier les voies du progrès et ainsi de le catalyser. Malheureusement, il nécessite un remaniement fondamental des sociétés et des objectifs qu'elle porte et promeut. Ceci ne peut s'effectuer que sur le plan économique et c'est pourquoi le développement durable doit aussi s'appuyer sur une écologie politique et économique<sup>149</sup> dont l'économie circulaire pourrait poser les jalons : une société du bien-être par la connaissance et la fonctionnalité où la technologie serait le moyen et non la fin.

---

148. J.N.SALOMON, Le déclin de la civilisation classique Maya : explications, Cahiers d'Outre-Mer,[en ligne]

149. Cela ne signifie pas que cela doit passer par un parti politique dédié à l'écologie, mais plutôt à notre sens que les partis d'avenir seront ceux qui intègrent l'écologie au sein d'un cadre plus large de société du bien-être.

## Table des figures

1	La rhytine de Steller, victime de sa placidité et de ses réserves de graisse (Source : <a href="http://edward.centerblog.net">http://edward.centerblog.net</a> ) . . . . .	5
2	Les réactions de fusion de l'hydrogène, un "moteur physique" durable pour le Soleil (source : Wikipédia) . . . . .	7
3	Le Soleil, un rayonnement proche du corps noir idéal à T=5800K (source : Wikipédia (article sur les raies de Fraunhofer)) . . . . .	8
4	La calanque de Paul Signac, illustration de la synthèse additive en peinture (source : Wikipédia (article sur le pointillisme)) . . . . .	9
5	Chiennne avec sa progéniture (Source : <a href="http://sritweets.com">sritweets.com</a> ) . . . . .	12
6	Croissance d'un végétal (Source : <a href="http://francais.istockphoto.com">francais.istockphoto.com</a> ) . . . . .	12
7	Un âne en train de paître (Source : Wikimini) . . . . .	12
8	Eléphant en phase de musth avec sécrétions visibles au niveau des temps . . . . .	14
9	L'araignée-paon, une espèce récemment découverte aux robes et aux parades nuptiales extraordinaires (Source : Sciences et avenir) . . . . .	15
10	Convergence évolutive dans le camouflage en paysage enneigé : le cas du lièvre et du renard arctiques . . . . .	16
11	Processus d'utilisation de l'énergie solaire (production personnelle) . . . . .	17
12	Le moteur rotatif moléculaire (Source : cultures-sciences, ENS) . . . . .	18
13	Graphique représentant les spectres d'absorption des pigments les plus communs de chlorophylle (Source : UMR SNV Jussieu) . . . . .	21
14	Un crocodile s'exposant au Soleil (Source : <a href="http://dreamstime.com">dreamstime.com</a> ) . . . . .	22
15	Schéma illustrant la réflexion de la lumière (source : université de Bonn) . . . . .	24
16	Photographie représentant une bulle de savon, un exemple de couleur structurelle (Source : <a href="http://lehollandaisvolant.net/v">lehollandaisvolant.net/v</a> ) . . . . .	26
17	Un paon faisant la roue (Source : <a href="http://canstockphoto.fr">canstockphoto.fr</a> ) . . . . .	26
18	Schéma de principe de la maison solaire passive . . . . .	28
19	Chauffe-eau solaire (Source : Wikipédia, article sur le chauffe-eau solaire) . . . . .	28
20	Centrale de chauffage solaire (Source : Wikipédia, article sur la centrale de chauffage solaire) . . . . .	28
21	Centrales solaires thermodynamiques à tour (Source : Wikipedia, article sur le tour solaire thermique) . . . . .	29
22	Centrale solaire thermodynamique cylindro-parabolique (Source : Wikipedia, article sur la centrale solaire de Mojave) . . . . .	29
23	Centrale solaire thermodynamique parabolique Stirling (Source : Wikipedia, article sur la centrale solaire thermodynamique) . . . . .	29
24	Installation photovoltaïque chez particulier (Source : Wikipedia, article sur le panneau solaire) . . . . .	30
25	Centrale photovoltaïque réseau (Source : <a href="http://lenergeek.com/2012/03/07/une-centrale-photovoltaïque-mise-en-service-en-corse/">http://lenergeek.com/2012/03/07/une-centrale-photovoltaïque-mise-en-service-en-corse/</a> ) . . . . .	30
26	Véhicules solaires : Nuna7 (voiture), PlanetSolar (bateau), SolarImpulse (avion) . . . . .	30
27	Panneaux photovoltaïques sur un satellite NASA . . . . .	31
28	Schéma de principe de la serre bioclimatique . . . . .	32
29	Schéma de principe de la feuille artificielle (Source : Wikimédia, article sur la feuille artificielle) . . . . .	34
30	Illustration d'une feuille artificielle . . . . .	34
31	Schéma de principe de photosynthèse par nano-catalyseur (Source : Enerzine) . . . . .	35
32	Photographie représentant un bâtiment double-peau jouant sur la pigmentation des façades (Source : le moniteur) . . . . .	35
33	Photographie représentant un bâtiment paré de feuilles artificielles . . . . .	36
34	<i>Morpho melaneus</i> , ou comment ne montrer de soi que ce que l'on veut . . . . .	37

35	Un frelon photovoltaïque pour l'énergie de demain (Source : Pour la Science) . . . . .	38
36	Les poils d'éléphant, ou la fourrure climatisante (Source : Pour la Science) . . . . .	38
37	Le bio-éclairage biologique (Source : Glowee) . . . . .	40
38	Exemples d'alvéoles bioluminescences du concept Bio-light . . . . .	40
39	Ce calamar iridescent cache bien des originalités . . . . .	41
40	Le piranha voit l'infra-rouge lointain dans l'eau (Source : Asknature) . . . . .	42
41	Le fourmilion et ses yeux à facettes (Source : Wikipédia, article sur les yeux composés) . . . . .	42

## Bibliographie sélective

### Ouvrages

P.David et S.Samadi, 2011, La théorie de l'évolution, Une logique pour la biologie, Editions Flammarion Champs sciences, Version revue et augmentée.

### Revues

R.Pin et al., Dossiers Science et Connaissance, Vol.5, Les théories de l'évolution

L. Arthur et al., Espèces, Revue d'Histoire Naturelle, n°11, Mars à Mai 2014, Kyrnos Publication

### Cours

RAHBE Y., Support de cours sur le développement durable, INSA Lyon, 2015

### Articles scientifiques

IZUMI M. et al., Changes in reflectin protein phosphorylation are associated with dynamic iridescence in squid, Journal of the Royal Society, Pubmed. [en ligne]  
Disponible sur : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19776150> (consulté le 28.03.2015)

LEWIS Nathan S., NOCERA Daniel G. Powering the planet : Chemical challenges in solar energy utilization. PNAS [en ligne]. 2006, vol. 103, n°43, pp. 15729-15735. [en ligne]  
Disponible sur : <http://www.pnas.org/content/103/43/15729.full.pdf> (consulté le 21.03.2015)

VEDRAINE S., Intégration de nanostructures plasmoniques au sein de dispositifs photo-voltaïques organiques : étude numérique et expérimentale. Optics / Photonic. Aix-Marseille Université, 2012, French. [en ligne]  
Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00799088/document> (consulté le 20.03.2015)

WENDY et al., Reflectins : The Unusual Proteins of Squid Reflective Tissues, Science Mag. [en ligne]  
Disponible sur : <http://www.sciencemag.org/content/303/5655/235.abstract> (consulté le 25.03.2015)

POLTROON M., Solar energy harvesting in the epicuticle of the Oriental hornet, National University of Singapore. [en ligne]  
Disponible sur : [http://nas-sites.org/bioinspired/files/2012/01/Marian\\_Plotkin.pdf](http://nas-sites.org/bioinspired/files/2012/01/Marian_Plotkin.pdf) (consulté le 20.03.2015)

J.N.SALOMON, Le déclin de la civilisation classique Maya : explications, Cahiers d'Outre-Mer,[en ligne]  
Disponible sur : <http://com.revues.org/5626>

### Encyclopédies en ligne (références exactes en notes de bas de page lors de la citation)

AskNature, disponible sur : <http://www.asknature.org>

Wikipédia (français), disponible sur : <http://wikipedia.fr>

Wikipedia (anglais), disponible sur : <http://wikipedia.en>

### **Cours en ligne (références exactes en notes de bas de page lors de la citation)**

Biologie et Multimédia, UFR des Sciences de la Vie, disponible sur : [www.snv.jussieu.fr/bmedia](http://www.snv.jussieu.fr/bmedia)

### **Revue scientifique en ligne (références exactes en notes de bas de page lors de la citation)**

Futura-sciences, disponible sur : <http://www.futura-sciences.com>

Sciences et Avenir, disponible sur : <http://www.sciencesetavenir.fr>

Pour la Science, disponible sur : <http://www.pourlascience.fr>

### **Sites internet**

ENS. SAUVAGE J.P., Les nanomachines moléculaires : de la biologie aux systèmes artificiels et aux dispositifs. [en ligne]

Disponible sur : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/nodeimages/images/NanomachinesJPSauvage.pdf> (consulté le 29.03.2015)

CHABOT Bernard. Énergies Renouvelables. Encyclopædia Universalis [en ligne].

Disponible sur : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/energies-renouvelables> (consulté le 21.03.2015)

AGRITHERMIC. Cultivez sans chauffer des légumes, fleurs et plants en hiver grâce aux serres bioclimatiques Agrithermic [en ligne].

Disponible sur : <http://agrithermic.fr/serre-bioclimatique.html> (consulté le 21.03.2015)

AIRBUS Defence Space. Comment les satellites transforment-ils l'énergie du soleil en électricité [en ligne].

Disponible sur : <http://www.space-airbusds.com/fr/actualites/comment-les-satellites-transforment-ils-l-energie-du-soleil-en-electricite.html> (consulté le 21.03.2015)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Solar Energy Perspectives : Executive Summary [en ligne].

Disponible sur : <http://www.iea.org/Textbase/npsum/solar2011SUM.pdf> (consulté le 22.03.2015)

FONDATION DAVID SUZUKI. L'énergie solaire [en ligne].

Disponible sur : <http://www.davidsuzuki.org/fr/champs-d'intervention/changements-climatiques/enjeux-et-recherche/energies/lenergie-solaire/> (consulté le 22.03.2015)

ENERZINE. Toshiba : la photosynthèse artificielle la plus efficace au monde [en ligne].

Disponible sur : <http://www.energine.com/603/17928+toshiba-la-photosynthese-artificielle-la-plus-efficace-au-monde+.html> (consulté le 23.03.2015)

ETI CONSTRUCTION, La double-peau photovoltaïque, avenir de l'habitat ? [en ligne]

Disponible sur : <http://www.eti-construction.fr/la-double-peau-photovoltaique-avenir-de-l-habitat-7124/> (consulté le 30.03.2015)