

## Les mille vies de l'énergie<sup>(1)</sup>

par **Richard-Emmanuel EASTES**, **Bastien LELU**,  
**Clovis DARRIGAN** et **Mélie FAURY**  
 Groupe Traces - Département d'études cognitives  
 École normale supérieure - 75005 Paris  
<http://www.groupe-traces.fr>

### TROISIÈME ÉPISODE

#### RÉSUMÉ

*Même si elle se réfère toujours à la même propriété de l'univers, que tous les scientifiques représentent par la même grandeur de même dimension, la notion d'énergie ne revêt pas la même signification pour le physicien, le chimiste ou le biologiste<sup>(2)</sup>. De cette constatation est née l'idée de mettre en scène ces différents points de vue, en les faisant explorer par un personnage naïf. Habités à mettre en scène des spectacles de clowns de sciences, notre choix se porta spontanément sur le clown Molécule, alors héros de l'un des spectacles des Atomes Crochus<sup>(3)</sup>. C'est cette histoire que nous vous contons ici, en plusieurs épisodes.*

Le lendemain de sa visite chez le Professeur SPATULE, surlendemain de celle chez le Professeur NEUTRON (voir épisodes précédents), MOLÉCULE ne prit même plus le temps de préparer son chocolat chaud habituel et c'est tout juste si elle pensa à se vêtir avant de bondir sur le chemin de l'université. Elle avait rêvé d'énergie toute la nuit et, entre deux phases de sommeil paradoxal, elle avait réalisé qu'il lui manquait la vision d'un biologiste, essentielle pour ses préoccupations du moment<sup>(4)</sup>.

(1) **Note de la rédaction** : Le premier épisode de cet article est paru dans *Le Bup* n° 935, juin 2011, p. 675-678. Le deuxième épisode de cet article est paru dans *Le Bup* n° 937, octobre 2011, p. 1003-1007.

(2) Nous tenons à remercier ici André GIORDAN, pour les réflexions qu'il initia chez nous sur ce sujet.

(3) <http://www.atomes-crochus.org>

(4) Nous rappelons ici (voir épisodes précédents) que depuis deux jours, MOLÉCULE cherchait à arrêter le choix du système énergétique qui allait assurer le fonctionnement du chauffage de sa nouvelle maison et tenter de comprendre la différence entre l'énergie qui manquait parfois à son organisme et celle qui allait chauffer son foyer.

Cette quête de l'énergie l'avait finalement emmenée dans un voyage bien plus long et plus riche en nouvelles découvertes qu'elle ne se l'était imaginé en premier lieu. Les nouvelles explications qu'elle avait reçues lui plaisaient. Non parce qu'elle comprenait mieux ce qu'était l'énergie (il lui faudrait encore un peu de temps et de réflexion pour tout assimiler), mais parce qu'elle se rendait compte qu'il s'agissait d'une notion complexe, sans pour autant qu'il soit nécessaire d'en utiliser tous les aspects à la fois. Il suffisait de l'adapter au problème que l'on souhaitait traiter, quitte à en imaginer des prolongements en cas de besoin, comme le faisaient les chimistes.

C'était pour s'en assurer qu'elle avait eu cette idée de se rendre chez un scientifique qui travaillait sur le monde vivant. Elle ouvrit l'annuaire de l'université et parmi les biologistes de renom qu'elle y trouva, choisit le Professeur RIBOSOME, dont elle trouvait le nom rigolo. Elle se précipita dans son laboratoire afin de lui tirer les vers (bio-luminescents<sup>(5)</sup>) du nez...

**M. :** Professeur RIBOSOME, bonjour ! Je suis MOLÉCULE et je voudrais savoir ce que l'énergie représente pour vous, biologiste !

**R. :** Les nerfs J ? Je ne connais pas ces nerfs-là. Où en avez-vous entendu parler ?

**M. :** Euh... Non, l'É-NER-GIE ! J'ai entendu dire qu'en biologie, comme en chimie et en physique, c'était une notion qui pouvait être utile.

**R. :** Ah, l'énergie ! Oui, en effet, nous utilisons cela également. Et vous attendez de moi que je vous en donne une définition ? Avant tout, qu'en savez-vous, au juste ?

MOLÉCULE lui présenta ses notes, comme elle l'avait fait avec le Professeur SPATULE. Le Professeur RIBOSOME avait lui aussi étudié la physique, et bien plus encore la chimie qui lui était indispensable dans ses recherches, de sorte qu'il ne mit pas plus de temps que son collègue SPATULE pour déchiffrer les notes de MOLÉCULE.

Celle-ci en profita tout de même pour se promener dans le laboratoire et contempler les expériences en cours. Peu de choses évoquaient pour elle la notion d'énergie et elle se demandait si le Professeur RIBOSOME lui apprendrait beaucoup plus que ce qu'elle avait déjà entendu les jours précédents.

**R. :** Bien, vos notes me semblent correctes. Mais vous savez, la notion d'énergie pour un biologiste est surtout abordée en terme de transformations et d'utilisation par les êtres vivants !

À ces mots, MOLÉCULE ne put cacher son enthousiasme. Voilà qu'une occasion se présentait de comprendre comment son propre corps disposait et consommait de l'énergie. Des concepts, elle commençait à en faire une indigestion...

**M. :** Chic ! Alors, qu'en est-il ? Vite, dites-moi !

**R. :** Bien, en deux mots, je dirais que :

(5) Parfois appelés vers lumineux... et confondus avec les lucioles.

L'énergie est une des notions utilisées par les biologistes pour décrire l'état et les évolutions des êtres vivants<sup>(6)</sup>. Ces derniers consomment de l'énergie pour la mise en place de leurs cellules, tissus et organes, mais aussi tout au long de leur vie pour assurer leurs fonctions vitales<sup>(7)</sup> : la locomotion, la reproduction ou encore la thermorégulation, etc.

**M. :** (comptant plus de deux mots dans ce qui précède) : Tiens ! En effet, il s'agit d'une définition très différente et bien plus tangible que celles que l'on m'a données jusqu'à aujourd'hui. Mais dites-moi, Professeur, cette énergie, comment les êtres vivants font-ils pour se la procurer ? J'ai appris qu'elle pouvait être *véhiculée* par la lumière et l'électricité et *convertie sous forme d'interactions* entre les constituants de la matière ; utilisent-ils l'une de ces propriétés ?

**R. :** Effectivement ! D'origine lumineuse, l'énergie est initialement captée par les végétaux verts, grâce à un pigment nommé *chlorophylle*.

**M. :** Ça, je connais : c'est ce composé qui donne leur couleur verte aux plantes !

**R. :** Oui, du moins avant la fin de l'été. À cette période en effet, la chlorophylle se dégrade, laissant apparaître les autres pigments contenus dans les feuilles. Ceux-ci peuvent être jaunes, rouges, marrons... et ils habillent l'automne de ses tons orangés. Mais revenons à l'énergie lumineuse : elle est transformée et emmagasinée par les plantes sous forme de matière organique. Cette conversion de l'énergie solaire en matière carbonée<sup>(8)</sup> consomme essentiellement du CO<sub>2</sub> et de l'eau, que les plantes puisent respectivement dans l'air et le sol.

**M. :** Ne serait-ce pas ce que l'on nomme la « photosynthèse » ?

**R. :** La *photosynthèse*, si, exactement. Elle consiste en une suite de réactions chimiques, dont les produits finaux sont le dioxygène et des glucides. Les plantes sont donc capables de transformer l'énergie électromagnétique issue du Soleil, puis de la stocker sous forme d'énergie chimique dans des molécules complexes, de la famille des sucres. *Ces sucres*, ou *glucides*, sont emmagasinés dans les organes de réserves des plantes (graines, tubercules, etc.) et utilisés<sup>(9)</sup> au cours de leur vie, notamment quand les besoins en énergie sont importants (germination, croissance, reproduction, etc.). D'ailleurs, les plantes ne sont pas les seules à réaliser la photosynthèse : il existe des bactéries capables de capter l'énergie solaire<sup>(10)</sup> !

**M. :** Finalement, les plantes et certaines bactéries sont de réels « panneaux solaires » :

(6) Les êtres vivants sont considérés par les biologistes comme des « systèmes ouverts », échangeant de la matière et de l'énergie avec leur milieu environnant.

(7) Les principales fonctions vitales des animaux sont la circulation sanguine, la digestion, la respiration et l'excrétion.

(8) Sous forme de glucides végétaux : glucose, fructose, amidon, etc.

(9) *Via* les principales voies du métabolisme : glycolyse et respirations notamment, communes aux végétaux et aux animaux.

(10) Ces bactéries possèdent des pigments différents de ceux des plantes, même s'ils sont parfois très similaires du point de vue structurel.

elles captent l'énergie lumineuse, la convertissent sous une forme utilisable et pouvant être stockée ! Mais qu'en est-il de l'énergie transportée sous forme électrique ? Peut-elle également être captée et utilisée par les êtres vivants ?

**R. :** À dire vrai, les phénomènes électriques naturels, tels que la *foudre* sont rares et généralement violents. Mais là encore, on connaît des bactéries qui les utilisent : elles arrivent ainsi à fixer l'azote de l'air ( $N_2$ ) sous forme d'ions ammonium ( $NH_4^+$ ) ou nitrate ( $NO_3^-$ ) par les racines. L'azote est un composant essentiel, notamment pour la constitution des acides aminés, unités élémentaires des protéines<sup>(11)</sup>.

**M. :** OK, mais comment s'y prennent les êtres vivants incapables de capter directement l'énergie solaire ou électrique ?

**R. :** Hum, je vois que vous avez perçu le cœur du problème. S'ils ne peuvent exploiter les phénomènes qui transportent l'énergie, les êtres vivants ingèrent directement la matière dans laquelle l'énergie est stockée. Ils sautent une étape en quelque sorte.

**M. :** Et c'est la raison pour laquelle les animaux se nourrissent !

**R. :** Pas seulement, mais en grande partie, oui. Comme je vous l'ai dit tout à l'heure, l'ingestion d'aliments leur permet également de se procurer les *briques élémentaires* qui serviront à leur croissance et à l'entretien de leurs cellules. Mais du strict point de vue énergétique, comme ils ne disposent pas de chlorophylle, se nourrir leur est indispensable...

**M. :** Je comprends. Et les herbivores, qui mangent les plantes, se font manger par les carnivores... Pourrait-on considérer que la chlorophylle agit comme l'antenne par laquelle les plantes vertes s'approvisionnent en énergie solaire, et initient ensuite une circulation de l'énergie à l'intérieur de l'ensemble du monde vivant, sous forme de matière organique ?

**R. :** C'est vrai, votre vision résume bien la façon dont fonctionne un écosystème.

**M. :** Une chose me tourmente cependant ; une fois l'énergie assimilée sous forme de sucres, comment est-elle exploitée ensuite ? Les plantes et les animaux peuvent-ils utiliser directement cette forme d'énergie ?

**R. :** Eh bien, l'énergie des glucides est récupérée lors de réactions chimiques, dites réactions du *métabolisme*, comme la glycolyse ou la respiration cellulaire. Les voies métaboliques permettent ainsi de reconvertir l'énergie en une forme cette fois directement utilisable par les cellules !

**M. :** Oulala ! Moi qui croyais que ça devenait simple... Je récapitule : une forme d'énergie pour le transport, que seuls les végétaux sont capables de capter, ainsi que certaines bactéries. Une forme pour le stockage, sous forme de molécules glucidiques disponibles en cas de besoin, et pour finir, une forme utilisable, enfin ! Mais... j'y pense ; nous avons

(11) Les bactéries fixatrices d'azote s'associent parfois avec des plantes (en symbiose), leur apportant un supplément d'azote, issu de l'atmosphère, en plus de celui puisé dans le sol par les végétaux (sous forme d'ions ammonium ou nitrate).

vu la forme de stockage chez les végétaux, mais les animaux n'ont pas de tubercules, ni de graines ! Où engrangent-ils leurs glucides ?

**R. :** Bien vu ! Les animaux, êtres humains inclus, emmagasinent leur énergie principalement sous forme de glycogène, dans le foie et dans les muscles. Il y est consommé sur place, mais peut aussi alimenter les autres organes comme le cerveau, les reins, le cœur. Dans ce cas, il est d'abord transformé en glucose et transporté via la circulation sanguine.

**M. :** Ah d'accord... mais venons-en au fait ! Quelle est donc cette fameuse forme d'énergie que les cellules vont pouvoir utiliser ? Levons le suspense !

**R. :** (qui prend une voix terrible) : L'heure est venue, en effet, de vous révéler ce terrible secret... (il se ressaisit). Euh, veuillez m'excuser, cela me prend parfois, je ne me contrôle plus. Que disais-je déjà ?

Ah oui, la forme d'énergie utilisable... Eh bien, les glucides sont dégradés *via* les réactions de la glycolyse, puis *via* un cycle supplémentaire de réactions chimiques<sup>(12)</sup>. Ces deux ensembles de réactions produisent notre fameuse forme d'énergie exploitable : une sorte de train composé d'une locomotive (en fait, une molécule nommée *adénosine*) et de trois wagons (molécules nommées *phosphates*). C'est l'*ATP*, ou *adénosine triphosphate*<sup>(13)</sup>. Toutefois, ce n'est qu'après ces deux premières étapes que la proportion la plus importante d'*ATP* sera produite...

**M. :** Ah bon, mais à partir de quoi ? Les glucides n'ont-ils pas déjà été dégradés ? D'où vient l'énergie à convertir en *ATP* ? D'ailleurs, c'est toujours de l'énergie chimique puisqu'il s'agit d'une molécule...

**R. :** Vous avez tout à fait raison ! Mais c'est que je ne vous ai pas encore dévoilé une information capitale ! En réalité, de l'énergie a été stockée dans d'autres molécules lors de ces premières étapes : il s'agit des *coenzymes réduits*<sup>(14)</sup>. Des réactions d'oxydoréduction sont donc en jeu...

**M. :** Pffioù, je ne vois plus le lien avec l'*ATP* là...

**R. :** J'y viens. C'est justement lors de la réoxydation de ces coenzymes<sup>(15)</sup>, au niveau de la *mitochondrie*, que la plus grande quantité d'*ATP* est produite ! Pour cela, deux éléments fondamentaux sont nécessaires : il faut d'une part du dioxygène et, d'autre part, une protéine assez incroyable, l'*ATP synthase*, qui rend possible la fabrication de l'*ATP*<sup>(16)</sup>. C'est une véritable turbine moléculaire !

**M. :** L'*ATP synthase* ??

(12) Le cycle de Krebs, également appelé cycle de l'acide citrique.

(13) On appelle aussi l'*ATP* la « petite monnaie énergétique de la cellule », car il s'agit de la principale d'énergie utilisée par les cellules.

(14) NADH, H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>.

(15) *Via* la chaîne de transporteurs d'électrons de la membrane interne mitochondriale.

(16) En utilisant la force protomotrice, résultat d'un gradient de pH et de potentiel électrique à travers la membrane interne de la mitochondrie, mis en place lors de la respiration cellulaire.

**R. :** Une petite merveille technologique, que les chercheurs en nanotechnologies cherchent d'ailleurs à égaler ! En tout cas, la molécule-clé pour la production d'ATP. Imaginez qu'elle permet de subvenir aux besoins humains en énergie, qui correspondent à une utilisation d'environ 50 kg d'ATP par jour !

**M. :** Et le dioxygène dans tout ça ?

**R. :** Le dioxygène est essentiel pour la respiration cellulaire. Il doit être transporté, de l'air jusqu'aux cellules <sup>(17)</sup>... Ce sont d'ailleurs aussi les végétaux qui le fabriquent.

**M. :** Si je me souviens bien, c'est le sang qui transporte le dioxygène.

**R. :** Oui, grâce à l'*hémoglobine*. Tiens, encore un pigment ! Qui sert à fixer le dioxygène dans les globules rouges cette fois. S'il y a un tissu particulièrement avide d'oxygène, c'est bien le muscle, surtout lorsqu'il est en plein exercice !

**M. :** Ah oui ! Et qui dit exercice, dit dépense d'énergie ! Je crois que je commence à comprendre comment tout cela s'articule... Le muscle a besoin d'ATP, donc pour en produire, il doit être alimenté en dioxygène. Mais ensuite, que devient l'ATP utilisé ?

**R. :** L'ATP, notre train a trois wagons, libère l'énergie chimique qu'il contient par libération de l'un de ses « wagons » phosphate. Il y a ainsi production d'un « train court » : une molécule d'ADP, ou *adénosine diphosphate*, qui ne contient que deux « wagons » phosphate <sup>(18)</sup>. La réaction chimique de consommation de l'ATP est tout simplement une hydrolyse. C'est cette réaction qui permet par exemple la contraction musculaire. Notez qu'il s'agit dans ce cas précis d'une conversion d'une énergie chimique en énergie mécanique !

**M. :** Dites, Professeur RIBOSOME, du coup, les crampes ont-elles un lien elles aussi avec l'ATP ? Je crois que l'*acide lactique* fait partie des responsables...

**R. :** En effet ! Il y a un lien non seulement avec l'ATP, mais aussi avec le dioxygène. Lorsque le muscle manque d'oxygène, il ne peut plus produire suffisamment d'ATP : le muscle ne se décontracte plus aussi efficacement. En effet, l'ATP rend possible non pas la contraction musculaire, mais bien la décontraction ! De l'absence de décontraction proviennent les crampes. Et c'est l'accumulation d'acide lactique, à cause du manque d'oxygène, qui provoque la douleur...

**M. :** D'accord ! Mais il doit bien y avoir d'autres types d'utilisations de l'ATP, compte tenu de la quantité consommée chaque jour !?

**R. :** Oui. La construction des protéines par l'association d'acides aminés, ou encore celle de l'ADN, composé d'une succession de nucléotides, en sont des exemples. On peut également citer l'activation de certaines enzymes, la mise en mouvement des spermato-

(17) Il faut distinguer la respiration cellulaire, correspondant aux réactions d'oxydoréduction consommatrices de dioxygène qui permettent aux cellules de fonctionner, de la respiration pulmonaire qui correspond à l'entrée de dioxygène dans le sang *via* les poumons (et à la sortie corrélative de CO<sub>2</sub>). Les deux types de respirations sont bien sûr liés et correspondent à deux niveaux de description différents : l'échelle cellulaire et celle de l'organisme.

(18) L'énergie libérée provient de l'énergie de liaison phosphore-oxygène, entre lesdits groupements phosphates.

zoïdes lors de la reproduction, etc. Autant de processus qui consomment de l'énergie sous forme d'ATP et qui sont essentiels à la vie de nos cellules ; et donc de l'organisme ! C'est vrai pour les animaux, les plantes, mais aussi les champignons ou les bactéries. L'ATP est un intermédiaire universel pour le transfert d'énergie.

**M. :** J'apprends vraiment des tas de trucs, aujourd'hui. C'est compliqué, mais passionnant ! Bien, je crois en savoir assez à présent et vous demande l'autorisation de prendre congé, cher Professeur RIBOSOME. Merci pour tout.

**R. :** À votre service, MOLÉCULE. Revenez me voir un de ces jours et je vous ferai découvrir d'autres merveilles de la biologie moléculaire, voire de la génétique si vous avez un peu de temps !

**M. :** Avec plaisir Professeur ; au revoir !

L'hypothèse de MOLÉCULE se confirmait. Tous utilisaient finalement la notion d'énergie, mais selon des approches variées et en en exploitant ses propriétés différemment. Elle comprenait aussi que la définition du physicien était très utile au chimiste, qui l'appliquait ensuite aux objets de ses études en la prolongeant par de nouvelles grandeurs physiques, et que ces dernières étaient elles aussi fort appréciées par le biologiste qui les employait à son tour.

MOLÉCULE avait bien travaillé, son enquête s'était révélée fructueuse. « Finalement la science, ce n'est pas beaucoup plus compliqué que les poupées russes », dit-elle en enfouissant les mains dans ses poches.

En prononçant ces mots, elle eut tout de même un doute... Elle n'avait rencontré que des scientifiques universitaires, issus de disciplines très classiques. Et si d'autres éclairages étaient possibles ? Il y avait certes pour commencer les géologues, qu'il faudrait songer à interroger un de ces jours. Mais au-delà des disciplines académiques, existait-il d'autres métiers susceptibles d'employer cette notion dont on entendait si souvent parler ? Peut-être certains ingénieurs pourraient-ils lui être utiles ? Ou les écologues ? Se rappelant ses préoccupations initiales, elle se rendait compte que si, grâce au Professeur RIBOSOME, elle avait compris d'où venaient ses faiblesses occasionnelles, elle était toujours aussi perdue lorsqu'il s'agissait d'établir un distinguo entre ce qu'on appelait « énergies durables » et « énergies renouvelables »<sup>(19)</sup>.

D'ailleurs, il lui semblait bien avoir entendu son médecin traitant, qui avait fait une

(19) Le langage courant a introduit l'usage commun de l'expression « énergies renouvelables » pour évoquer en réalité les « énergies durables », c'est-à-dire celles qui causent un minimum de torts à la planète. Certes (et c'est la raison pour laquelle cet usage s'est développé), la plupart des énergies renouvelables (marées, vents, biomasse...) sont durables dans une grande mesure (nous insistons sur « la plupart » : dans certains cas, la construction d'un barrage hydroélectrique à énergie très renouvelable peut n'être absolument pas durable). Mais beaucoup d'énergies durables sont également non renouvelables (on les appelle d'ailleurs, pour cette raison mais à tort, des énergies renouvelables) : géothermie, solaire. Compte tenu de la quantité d'énergie stockée, elles devraient plutôt être qualifiées d'inépuisables. Notons enfin que dans tous ces cas, un autre abus de langage est commis : ce sont bien les sources d'énergie qui sont durables et renouvelables, pas les énergies elles-mêmes...

formation en acupuncture, parler un jour de « circulation des énergies », mais apparemment dans un tout autre sens que celui que lui avaient donné les scientifiques. Et à la réflexion, elle se rappela que son professeur de yoga, qui lui conseillait de son côté d'exploiter les « énergies telluriques » pour se sentir plus stable, lui avait récemment parlé d'un agriculteur biodynamicien de ses amis qui utilisait « l'énergie de la Lune » pour faire pousser ses carottes ! Voilà qui ouvrait des perspectives infinies à MOLÉCULE. Pourtant, cette fois, plutôt que d'aller les rencontrer, elle décida de faire appel aux lecteurs du *Bup*.

Et c'est ainsi, chère lectrice, cher lecteur, que vous voilà sollicité(e) pour nous proposer un prochain épisode des mille vies de l'énergie ! Vous déguiserez-vous en ingénieur, en mécanicien, en agriculteur, en médecin, en yogi ou en géomancien ? Sentez-vous libre de nous présenter une manière différente de percevoir l'énergie ; pour peu qu'elle soit opératoire, tout sera permis<sup>(20)</sup>. Les meilleures propositions seront publiées ! La suite, donc... au prochain épisode !



**Richard-Emmanuel EASTES**  
Groupe Traces & Les Atomes Crochus  
École normale supérieure  
Paris



**Bastien LELU**  
Groupe Traces  
École normale supérieure  
Paris



**Clovis DARRIGAN**  
Groupe Traces  
École normale supérieure  
Paris



**Mélodie FAURY**  
Groupe Traces  
École normale supérieure  
Paris

(20) Sauf de croire que parce qu'elle en précise le sens, la science a également le droit de confisquer ce concept utile à tant de monde, en en interdisant les usages qu'elle n'aurait pas validés...