

Beste de savoir

Philae : à la recherche de l'origine de la
chiralité du monde ?

12 août 2019

Table des matières

1.	Chiralité?	1
2.	La chiralité nous poursuit!	4
3.	La vie est donc chirale, mais elle a choisi son camp	6
	3.1. Protéines et acides aminés	6
	3.2. D'autres exemples	7
4.	L'importance de la chiralité dans la vie	8
5.	Homochiralité?	9

Le 12 novembre 2014, la sonde Philae s'est posée sur la comète Churyumov–Gerasimenko. À son bord, différents instruments, dont un spécialement conçu pour analyser la *configuration* des molécules qu'on retrouve à la surface et à l'intérieur de la comète, c'est-à-dire déterminer si elles sont *chirales*. Mais qu'est-ce que la chiralité? Pourquoi envoyer une sonde à des milliards de kilomètres pour analyser cela? Qu'espère-t-on découvrir? Cet article va tenter de vous donner quelques pistes de réponse.

1. Chiralité?

Voici peut-être un terme que vous n'avez jamais entendu. Et pour cause, il est généralement employé par les scientifiques. Et pourtant, vous en faites l'expérience tous les jours! Quiconque a déjà essayé de mettre son pied gauche dans sa chaussure droite a déjà expérimenté la chiralité, pareil pour ceux qui se seraient trompés de main pour enfiler leur gant.

Pourquoi? Parce que vos mains et certains de vos biens sont des objets *chiraux* (pluriel de *chiral*). Ce terme provient du grec (*cheir*), qui signifie "la main", et désigne des objets qui sont images dans le miroir l'un de l'autre mais non-superposables. Bien entendu, vos mains répondent à cette définition, puisqu'il est impossible de les superposer si elles sont dans le même sens, alors que l'image de votre main droite dans le miroir donne exactement votre main gauche. On parle alors d'*énantiomorphes*.

1. Chiralité?

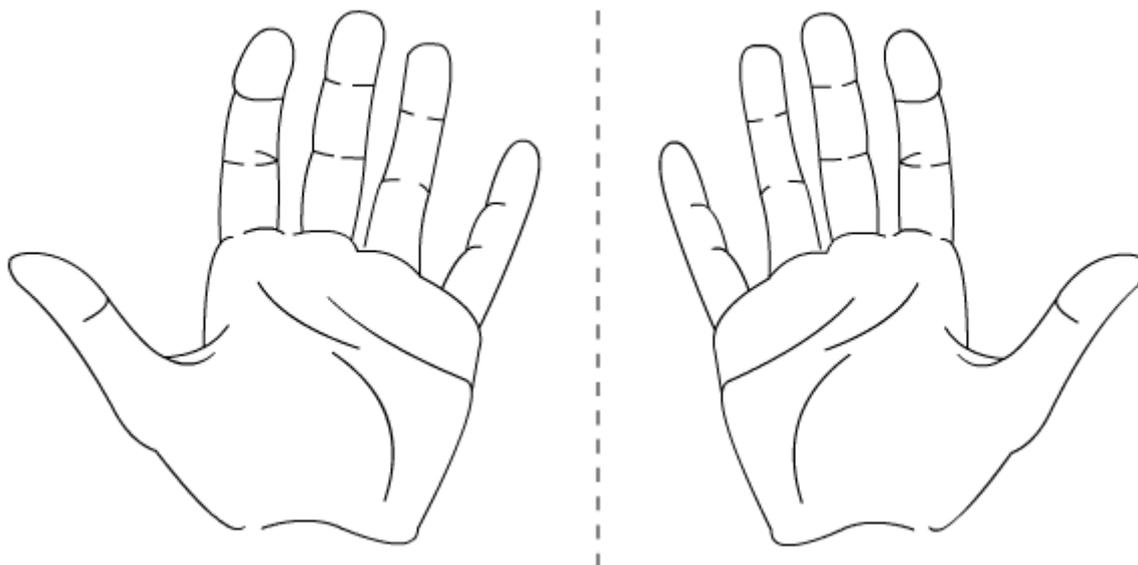


FIGURE 1. – Exemple d'énantiomorphes : votre main gauche et votre main droite sont l'image dans le miroir l'une de l'autre mais non superposables.

À l'inverse, certains objets sont *achiraux*, et leur image dans le miroir est la même et tout à fait superposable à celle l'objet original. Par exemple, un cube dont toutes les faces ont la même couleur est un objet achiral.

Les objets chiraux et achiraux sont reconnaissables aux éléments de symétrie qu'ils contiennent : un objet chiral ne contient ni plan de symétrie (plan miroir qui ferait que si on coupait l'objet en deux, chacune des deux parties serait l'image dans le miroir l'une de l'autre, un peu comme une table) ni centre d'inversion (point par lequel on peut faire tourner une partie de l'objet et la superposer à l'autre, comme dans les lettres Z, N ou S).¹

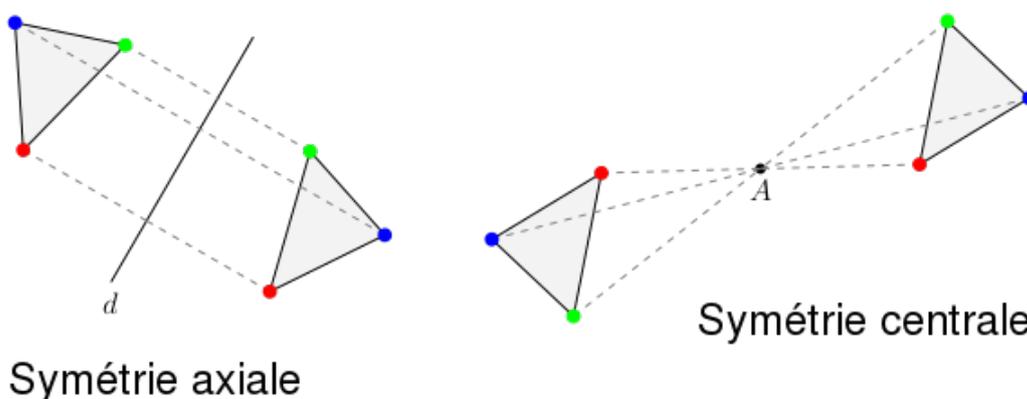


FIGURE 1. – Rappel : symétrie axiale (à gauche) et centrale (à droite) sur un triangle dont les sommets ont été colorés pour voir la différence.

1. En fait, on peut même aller plus loin : un objet chiral ne peut pas posséder d'axe de roto-inversion, c'est-à-dire S_x en notation de Schoenflies (pour rappel, S_1 représente le centre de symétrie et S_2 le plan de symétrie).

1. Chiralité?

Quelques exemples avec des objets que vous manipulez tous les jours, les lettres de l'alphabet :

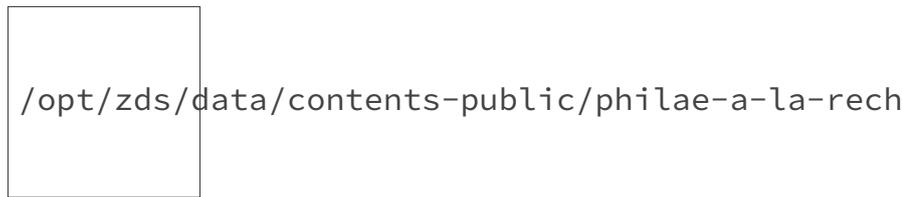


FIGURE 1. – La lettre "M" n'est pas un objet chiral, puisqu'elle possède un axe de symétrie. De même pour la lettre "S", qui possède un centre de symétrie. À l'inverse, si l'on les considère à deux dimensions, la lettre "q" est bien chirale et son énantiomorphe est la lettre "p"!

Comme on l'a dit plus haut, un objet chiral, votre main par exemple, possède deux formes, votre main gauche et votre main droite. Pour les reconnaître, on les nomme assez logiquement "gauche" et "droite", ou encore "lévogyre", gauche et "dextrogyre", droite. Cette dernière notation provient d'une observation assez simple : les hélices sont des objets chiraux, et le "sens" de l'hélice peut être décrit en employant sa main, pouce vers le haut, et en utilisant ses doigts pour reproduire le sens de l'hélice :

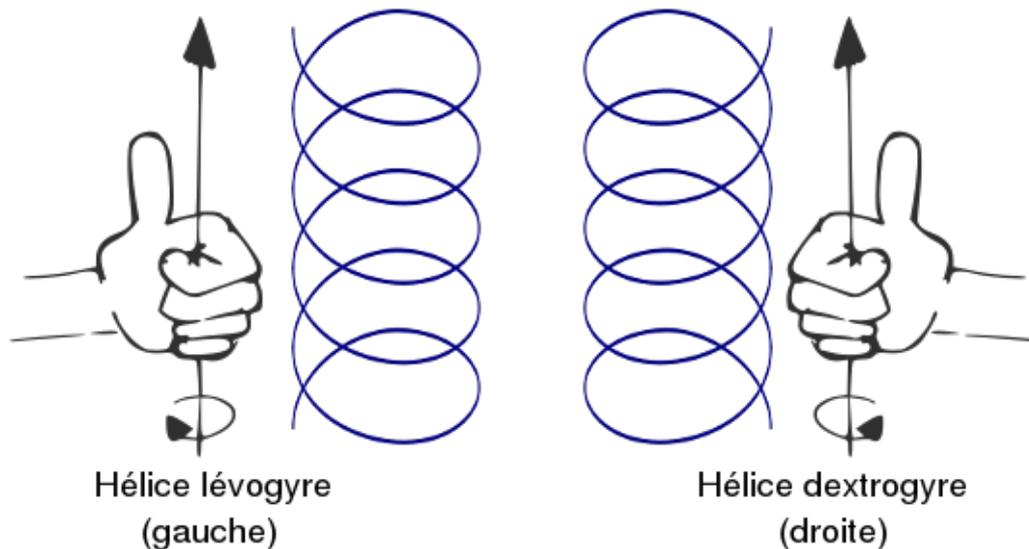


FIGURE 1. – Définition d'une hélice droite et gauche. Le sens des doigts de la main indique le sens de l'hélice.

Si la main gauche doit être employée pour décrire l'hélice, alors cette hélice est lévogyre, et elle est dextrogyre dans le cas contraire. Si vous voulez un exemple concret, tous les escaliers en hélices qui permettent de monter dans une tour d'un château sont dextrogyres.

2. La chiralité nous poursuit !

Plongeons un peu à l'échelle de la molécule. Pour ceux qui auraient oublié, une molécule est un assemblage d'atomes² en 3 dimensions et qui est une structure de base de la matière³, un peu comme une brique de Lego. Il se trouve que ces molécules peuvent elles-mêmes être chirales, car bien qu'il s'agisse d'objets microscopiques, ils n'en restent pas moins soumis aux règles énoncées plus haut : une molécule qui ne possède ni centre de symétrie ni plan de symétrie est une molécule chirale et peut exister sous deux formes, gauche ou droite⁴.

Cette chiralité provient généralement du carbone, qui compose un grand nombre de molécules et qui forme des tétraèdres, de par sa capacité à lier 4 autres atomes :

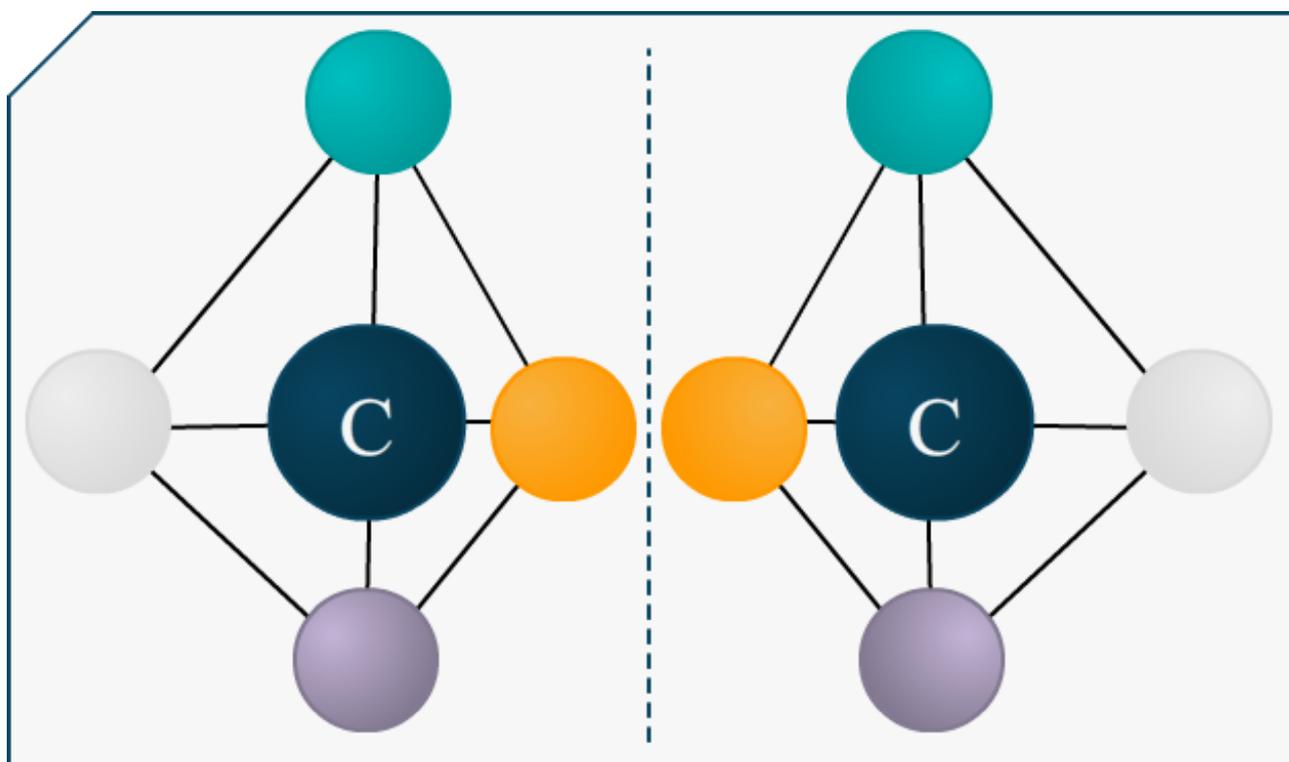


FIGURE 2. – Représentation des liaisons que le carbone (C) peut former avec 4 autres groupements (représentés ici par 4 boules de couleurs différentes), formant un tétraèdre. Cette forme est bien chirale, l'image dans le miroir n'étant pas superposable à la représentation d'origine.

Comme on peut le voir sur l'image, le carbone est au centre d'un tétraèdre (forme à 4 côtés) et celui-ci peut lier 4 atomes qui sont les 4 coins du tétraèdre. Si les 4 groupements sont différents, ce qui est représenté ici en employant des boules de couleurs différentes, la molécule est chirale et les deux formes sont dites *énantiomères* (le terme chimique pour désigner deux énantiomorphes).

2. C'est-à-dire la plus petite partie d'un corps simple qui en conserve les propriétés, par exemple, le carbone (= atome) qui compose le diamant (= corps pur simple)

3. C'est-à-dire la plus petite partie de matière qui possède les propriétés de la substance qu'on considère, par exemple les molécules de H₂O qui composent l'eau.

4. En fait, les chimistes, qui ne font rien comme les autres, n'utilisent pas seulement cette notation L/D, mais aussi +/- ou encore R/S, les trois notations n'étant d'ailleurs pas forcément équivalentes.

2. La chiralité nous poursuit !

On dit également qu'elles ne possèdent pas la même *configuration*. Ceci dit, il est difficile de faire la différence expérimentalement entre ces deux molécules : elles possèdent exactement les mêmes propriétés : même masse, même polarité, même spectre infrarouge, même point d'ébullition, etc. Ceci parce que les mêmes types d'atomes sont connectés avec les mêmes types de liaisons.

L'unique moyen de distinguer deux énantiomères est de les mettre dans un environnement chiral (avec d'autres molécules chirales ou dans un faisceau de lumière circulairement polarisée, voir plus loin). C'est pareil avec les gants, puisque si l'on met le mauvais gant, c'est inconfortable. Il y a donc une tendance instinctive pour vous à "choisir" le gant droit pour votre main droite. De même, si l'on fait réagir un mélange 50 :50 de deux énantiomères, qu'on appelle alors mélange *racémique*, avec une molécule achirale, on aura un mélange racémique de produits. En revanche, si l'on fait réagir ce mélange avec une molécule chirale, l'un des deux énantiomères réagira préférentiellement. Eh oui, la chiralité se révèle dans un environnement chiral, comme on vient de le voir avec les gants.

Pour ceux qui penseraient que la chiralité est un truc de chimiste, détrompez-vous ! La lumière peut par exemple être chirale elle aussi. En fait, dans certains cas, la lumière (qu'on appelle alors lumière circulaire polarisée) tourne comme une hélice, qui peut être ... ben oui, gauche (lévogyre) ou droite (dextrogyre).



FIGURE 2. – lumière circulaire polarisée

Vous avez sûrement déjà expérimenté le phénomène de polarisation de la lumière, parce qu'il est à la base de l'affichage des écrans à cristaux liquides (montres numériques, cadrans) ou LCD, mais aussi à la base du principe derrière les lunettes 3D utilisées de nos jours dans les cinémas. Comment ? À l'aide de polarisateurs, qui ont la propriété de ne laisser passer que la lumière qui possède un certain "sens" (c'est ce qu'on appelle la *polarisation*).



FIGURE 2. – Schéma d'une lumière polarisée après avoir traversé une molécule chirale

D'ailleurs, la lumière polarisée est employée pour reconnaître la *configuration* des molécules, comme mentionné plus haut : certaines molécules feront tourner le plan de la lumière à gauche, et à l'inverse, d'autres feront tourner le plan de la lumière à droite. Quant à un mélange racémique, puisqu'il contient autant de molécules dextrogyres que de molécules lévogyres, rien ne se passera.

3. La vie est donc chirale, mais elle a choisi son camp

Et donc, si l'on en croit les chimistes, il n'y aurait aucune raison que la vie ne soit pas chirale (les molécules du vivant étant principalement composées de carbones, comme le tétraèdre montré plus haut, elles sont pour la plupart chirales), mais aussi et surtout qu'il y a plus de molécules dextrogyres que lévogyres. Sauf que quand on analyse les constituants du vivant, on remarque une très (très!) nette tendance à n'avoir qu'un seul énantiomère à chaque fois!

3.1. Protéines et acides aminés

Preuve en est, les **protéines**. Les protéines, ce sont les petites usines à tout faire d'une cellule (constituant de base de tout être vivant). Chaque protéine possède une fonction et la fait bien. Par exemple, dans le corps humain, il existe des protéines pour transporter l'oxygène, des protéines qui s'occupent de la digestion, des protéines qui servent à nous défendre des agressions extérieures, des protéines qui reçoivent ou envoient des messages pour communiquer entre cellules, ou encore des protéines qui réparent les dommages effectués à la cellule. Et tout ce beau monde est constitué principalement d'acides aminés. Les acides aminés, ce sont des petites molécules, dont il en existe 21 différentes⁵ et qui sont autant de petits blocs qu'assemble la cellule pour construire les protéines. Pour pousser l'analogie, c'est pareil qu'avec des Lègos : à partir des mêmes briques de base, on peut réaliser un avion, un bateau, une voiture ou une maison.

Sauf que tous ces acides aminés⁶ utilisés par les êtres vivants sont d'une certaine *configuration* ("L" pour ne pas la citer), donc n'existent qu'en un seul exemplaire parmi les deux possibles. Cette propriété est également connue sous le nom d'*homochiralité* et intrigue autant les chimistes que les biologistes : à partir de quel moment la vie a-t-elle décidé de ne favoriser que les acides aminés "L" alors que peu de choses ne les différencient a priori? Pour ceux qui se demanderaient le "pourquoi", il n'existe également pas de réponse absolue, mais celle qui est généralement admise est la suivante : un être vivant est quelque chose de très organisé et qui n'aurait probablement pas pu fonctionner avec un mélange des deux formes. Un peu comme si, dans une ville, la moitié des automobilistes décidaient de rouler à gauche et l'autre moitié à droite, ça ne marcherait pas, il y aurait des collisions et toute la circulation serait paralysée. C'est parce que tout le monde roule à droite (ou à gauche) que ça fonctionne.

Attention, ça ne veut pas dire que les acides aminés "D" (les images dans le miroir des acides aminés "L") n'existent pas. Ils sont par exemple synthétisés et employés dans la fabrication de médicaments. Dans la nature, on les retrouve également en quantité non négligeables dans les produits issus de la fermentation (par exemple fromage) et dans les aliments cuits, parce que ces deux procédés induisent tout simplement la *racémisation* des acides aminés, autrement dit la modification de la configuration des molécules sous l'action de la chaleur ou de bactéries. Il y en a d'ailleurs dans certaines plantes, mais aussi et surtout chez un grand nombre de bactéries et de virus. Tous ces acides aminés "D" sont en fait produits à partir d'acides aminés "L" et non directement réalisés en temps qu'acides aminés "D" par ces organismes.

5. Il en existe **principalement** 21. Les possibilités étant infinies, on retrouve parfois quelques acides aminés différents dans certains êtres vivants.

6. Sauf la glycine, qui n'est pas chirale.

3.2. D'autres exemples

On retrouve également le même type de préférence pour l'ADN. L'ADN, c'est une très longue molécule qui sert de support de l'information génétique. Autrement dit, une sorte de grand livre que possède chaque cellule et qui lui dit qui elle est et ce qu'elle doit faire. C'est dans l'ADN que sont codés (un peu comme le langage binaire en informatique, sauf que là, c'est avec quatre "états" différents au lieu de deux) la forme du visage, la couleur des cheveux ou des yeux, le sexe, et ainsi de suite. Comme cette molécule est longue, elle a tendance à se replier afin de prendre moins de place (comme une pelote de laine). Et bien il se trouve que l'ADN se retrouve préférentiellement sous forme d'hélice dextrogyre (droite). Et c'est dû au fait que cette molécule d'ADN est entre autres composée de ce qu'on appelle des désoxyriboses (c'est une molécule de sucre, et la raison du "D" de ADN) qui possèdent une fois encore une *configuration* préférentielle (cette fois-ci "D").

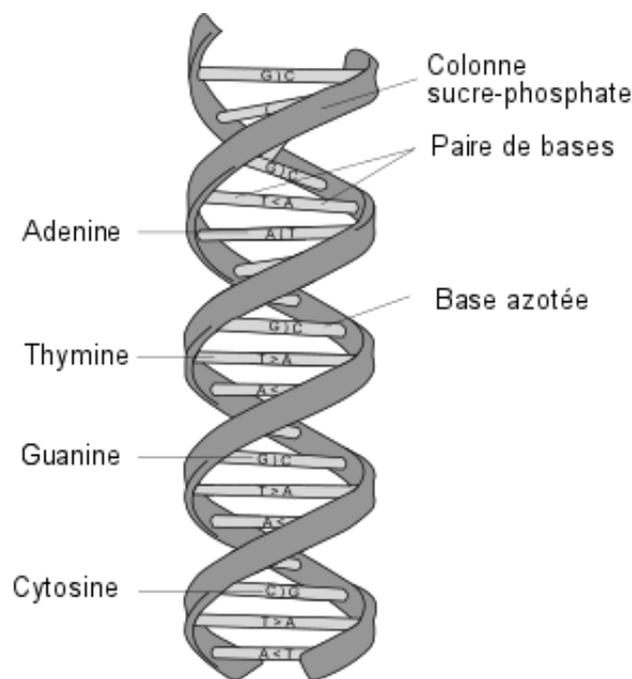


FIGURE 3. – Hélice d'ADN (d'après [Wikipédia](#) [↗](#)). La charpente en hélice est faite d'une suite sucre-phosphate. Les échelons sont constitués de molécules nommées "bases nucléiques" (ou nucléides) qui sont au nombre de 4 et complémentaires deux à deux, s'assemblant en paires. Dans cette représentation, l'hélice de l'ADN est bien dextrogyre.

D'ailleurs, il s'agit encore d'un exemple de molécule qui n'existe pas en mélange racémique dans la nature : les **sucres** (qu'on appelle plus génériquement les *oses*) sont quasiment tous de configuration "D". Autrement dit, les plantes produisent par photosynthèse des sucres qui sont presque tous de même configuration. Les sucres, au-delà d'une forme de stockage d'énergie (c'est principalement pour ça qu'on en mange), servent donc aussi à faire de l'ADN, de la reconnaissance et interaction entre les cellules (par ce qu'on appelle le *glycome*), et enfin au soutien de la cellule.

On a donc pu le voir ici, la nature use et abuse de "briques de bases" chirales.

4. L'importance de la chiralité dans la vie

Puisque les protéines sont composées d'éléments chiraux, elles auront tendance à s'associer avec des molécules de la bonne *configuration* (comme avec le gant). Ceci a une importance fondamentale dans la fabrication de médicaments, puisque comme le chimiste produit de base des mélanges qui sont racémiques, seule une des deux forme aura à priori une activité médicamenteuse. Si l'on caricature, ça fait 50% du produit à jeter à la poubelle. Les chimistes ont donc été obligés de développer des méthodes pour ne produire que le bon énantiomère. Une bonne majorité des médicaments que vous consommez sont donc chiraux, et une loi interdit même aux fabricants que l'énantiomère soit présent en trop grande quantité (à cause de certaines molécules dont l'énantiomère avait un effet toxique⁷).

Sans aller jusqu'aux médicaments, il existe d'autres exemples dans la nature. Prenons par exemple le *limonène*. Comme son nom le laisse penser, cette molécule possède une odeur de citron, mais ceci est uniquement vrai pour une de ses deux formes, la forme "L", qu'on retrouve dans le zeste du citron. En effet, l'autre forme, la forme "D", sent l'orange et on la trouve donc principalement dans cet autre fruit. Notre corps est donc tout à fait capable de faire la différence entre deux énantiomères de la même molécule et de nous les faire ressentir comme différents car nos récepteurs olfactifs sont eux aussi chiraux.

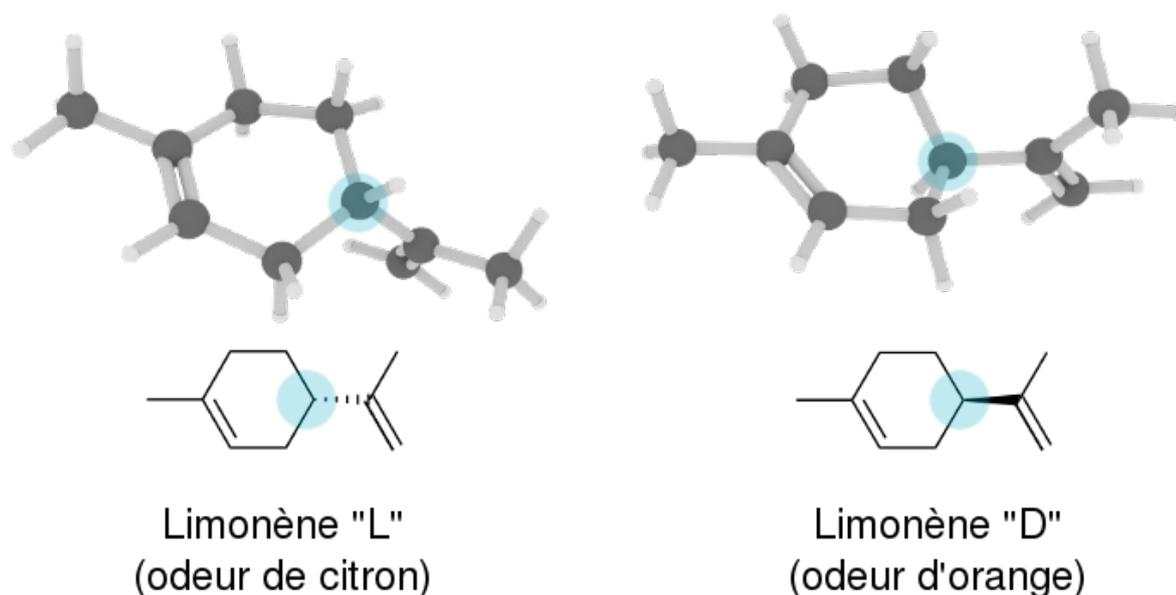


FIGURE 4. – Les deux formes du limonène, représentés en 2 dimensions (sans les hydrogènes) et 3 dimensions : ces deux molécules sont l'image dans le miroir l'une de l'autre mais ne sont pas superposables. Le carbone responsable de cela est mis en évidence en bleu.

7. Mais pas d'inquiétude à avoir, les contrôles dans l'industrie pharmaceutique sont TRÈS stricts.

5. Homochiralité ?

Les êtres vivants font tellement bien la différence qu'ils s'en servent comme mécanisme de défense. Ainsi, les acides aminés "D", qui existent bien qu'ils ne soient pas employés par notre organisme, on l'a vu plus haut, sont reconnus par le système de défense de l'organisme et éliminés au niveau des reins, parce qu'ils pourraient potentiellement appartenir à des agents pathogènes, c'est donc un moyen de défense simple à mettre en oeuvre pour lui. Ceci dit, les acides aminés "D" en eux-mêmes n'ont généralement aucune incidence pour l'organisme⁸, qui les élimine simplement sans les utiliser.

5. Homochiralité ?

La dernière question à se poser, maintenant qu'on a établi que la chiralité faisait partie intégrante de ce qui nous entoure, c'est de savoir comment et à partir de quel moment les êtres vivants ont commencé à être composés de molécules chirales de même *configuration*.

Il faut savoir que personne ne possède la réponse à cette question aujourd'hui, et c'est là qu'une partie de la mission de Philae prend tout son sens.

Pour commencer, la formation d'acides aminés n'est elle-même pas élucidée. Une expérience souvent citée est celle de Miller-Urey qui, dans les années 1950, a cherché à reproduire les conditions dans lesquelles la vie s'était formée. Il a donc enfermé dans un ballon de l'eau, du méthane, de l'ammoniac et du dihydrogène (qui étaient selon lui les constituants de l'atmosphère terrestre à cette époque), puis a effectué des cycles de chauffages (durant lequel il soumettait le milieu à des étincelles pour reproduire des éclairs) et de refroidissement. Après environ une semaine, il obtenait un certain nombre d'acides aminés. Si les conditions de l'expérience ont été critiquées, on admet aujourd'hui qu'il est possible qu'il y ait eu production de ces briques élémentaires de cette manière aux premières heures de la Terre. Rien n'indique par contre comment elles se sont assemblées pour former des cellules à la base de la vie. Par ailleurs, Miller obtenait les acides aminés en mélange racémique, donc malgré ces découvertes, la question de l'homochiralité reste ouverte.

Une autre idée très répandue énonce que les bases de la vie proviennent de météorites qui se seraient écrasées sur la Terre. Il est vrai que l'analyse du contenu des protéines révèle la présence d'acides aminés, avec un certain excès de forme "L", donc celle dont nous (et la plupart des êtres vivants) sommes constitués. Au-delà du fait qu'on ne fait que déplacer le problème (elles ont bien dû être produites quelque part, ces molécules, si ce n'est sur la Terre!), on possède aujourd'hui une petite idée du pourquoi de cette prédominance. En effet, comme expliqué plus haut, la lumière peut également se comporter comme un objet chiral, si elle est circulairement polarisée. Or des expériences ont été réalisées en exposant des réactions à l'action de telles lumières, et on a démontré que des excès de forme "L" se formaient en faible quantité. On sait par ailleurs que les étoiles peuvent produire ce genre de lumière, et qu'il est possible que ces conditions soient réunies dans les nébuleuses ou se forment les étoiles. Il s'agit donc également d'une piste intéressante, puisqu'elle permettrait d'élucider la question qui nous concerne ici.

Philae est dès lors équipée d'un instrument capable de reconnaître les molécules chirales et de déterminer leur configuration lorsqu'elle analysera les échantillons issus de la comète sur laquelle

8. Pas question, donc, d'arrêter de manger du fromage ou de cuire des aliments pour cette raison

5. Homochiralité ?

elle s'est posée (cet instrument est nommé COSAC⁹). On espère ainsi en savoir un peu plus sur la présence de ces molécules et leur tendance à se présenter sous une seule forme.

À noter que jusqu'à présent, [l'instrument n'a malheureusement pas livré de résultats](#) , mais on espère un réveil prochain.

En conclusion, l'homochiralité est un sujet dont peu de personnes entendent parler, mais qui a, on l'a vu, de nombreuses implications dans la vie courante. Ce domaine de recherche méritait donc bien un petit article pour le présenter

La vie nous réserve encore bien des surprises. En particulier, l'énigme du commencement de celle-ci est loin d'être résolue, et de nombreuses années de recherches seront encore nécessaires pour y répondre. Des missions telles que celles de Philae sont des étapes décisives dans un certain nombre de domaines, mais il en faudra encore beaucoup pour percer à jour tous les mystères du monde qui nous entoure. Derrière de telles missions se cachent de nouvelles réponses, mais parfois aussi de nouvelles questions, toujours plus passionnantes.

Merci à [mathiasm](#) et [Blackline](#) pour leurs modifications, leurs conseils et leurs remarques, ainsi qu'à Loïc J. pour sa relecture [IRL](#) sans pitié !

Merci une fois encore à [Blackline](#) pour ses quelques images ainsi que pour l'icône de l'article.

Merci finalement à [Arius](#) pour sa relecture attentive lors de la validation.

Sources :

- « [L'asymétrie du vivant viendrait de l'espace](#) » de Pour la Science ;
- « [L'homochiralité à l'origine de la vie ?](#) » de la Banque des Savoirs ;
- « [Les premiers acides aminés de la vie apportés par les météorites ?](#) », de Futura-Sciences Santé ;
- « [Nouvelle lumière sur l'énigme de la chiralité de la vie](#) » de Futura-Sciences Espace ;
- « [Pourquoi la vie a choisi la gauche](#) », du journal Libération ;
- « [Origine de la vie : nouvelle version de l'expérience de Miller-Urey](#) », de Sciences et Avenir ;
- « [COSAC, the cometary sampling and composition experiment on Philae \(en\)](#) », du Max Planck Institute for Solar System Research ;
- Les articles de Wikipédia sur les [acides aminés D](#) , [l'expérience de Miller-Urey](#) , sur les [acides aminés](#) et sur la [chiralité](#) .

9. Pour ceux que ça intéresse, il s'agit simplement d'une chromatographie gazeuse avec une colonne chirale suivie d'un analyseur par spectrométrie de masse (soit une instrumentation GC-MS relativement courante). Tout le challenge de l'instrument a été de faire en sorte qu'il soit le plus léger, faible consommateur en énergie et hautement précis qu'il soit... À l'époque où le satellite a été lancé, donc avant 2004.

Liste des abréviations

IRL In Real Life. 10