

La symétrie du vivant : des organismes aux molécules

Communication présentée au colloque « Les symétries » - 28 novembre 2014

Marc THIRY

Laboratoire de biologie cellulaire, Département des Sciences de la Vie,
GIGA-Neurosciences, Université de Liège, avenue de l'Hôpital 1,
4000, Liège 1, Belgique

Résumé :

Les êtres vivants possèdent des caractéristiques communes de symétrie et de dissymétrie. Celles-ci ne concernent pas uniquement l'organisation externe des organismes vivants mais impliquent aussi tous leurs niveaux d'organisation jusqu'aux molécules qui les constituent. Le monde vivant se singularise du monde inanimé par l'homochiralité des molécules biologiques.

Abstract :

Living beings have common features of symmetry and asymmetry. These do not just concern external organization of living organisms but also involve all levels of their organization to the molecules that make them up. The living world distinguishes from the inanimate world by homochirality of biological molecules.

La diversité des êtres vivants est immense. Cependant, l'aspect extérieur de la plupart d'entre eux présente des caractéristiques communes de symétrie et de dissymétrie.

Le mot « symétrie » vient du grec (*sun* signifiant avec et *metron* mesure), c'est un procédé scientifique qui autorise la permutation des éléments d'un système en laissant sa forme intacte. Une libellule, par exemple, est symétrique parce qu'on peut échanger tous les points de la moitié gauche de son corps avec tous les points de la moitié droite sans que son aspect ne soit modifié. On peut intervertir les deux moitiés sans changer la forme de l'ensemble. La symétrie se définit de part et d'autre d'un axe ou d'un plan, on parle par exemple de droite et gauche, même si dans la nature la symétrie n'est bien souvent qu'imparfaite.

Les dissymétries se définissent généralement par rapport à un axe, nommé axe de polarité. Un axe de polarité est donc un manque ou une absence de symétrie dans le plan d'organisation d'un organisme, par répartition différentielle des organes et des tissus. L'axe indique les 2 côtés qui ne sont pas symétriques comme le haut et le bas, ou le dos et le ventre ou encore la tête et la queue. Tout comme les autres aspects du plan d'organisation, les axes de polarité sont héréditaires donc déterminés au moins en partie génétiquement. Certains des gènes responsables ont été identifiés chez certains organismes (Chandler *et al.*, 2008 ; Holland, 2013 ; Ryan and Baxevanis, 2007).

Chez un organisme, nous pouvons identifier à la fois des symétries et des polarités. Par exemple chez les vertébrés (Figure 1), en plus d'une symétrie droite-gauche imparfaite, nous observons également trois axes de polarité :

- un axe de polarité dorso-ventral (trait interrompu),
- un axe de polarité antéro-postérieur (trait continu),
- un axe de polarité droite-gauche (trait pointillé), dans le plan d'organisation *interne* (les lobes pulmonaires, le cœur, les intestins, les hémisphères du cerveau ne sont pas symétriques).

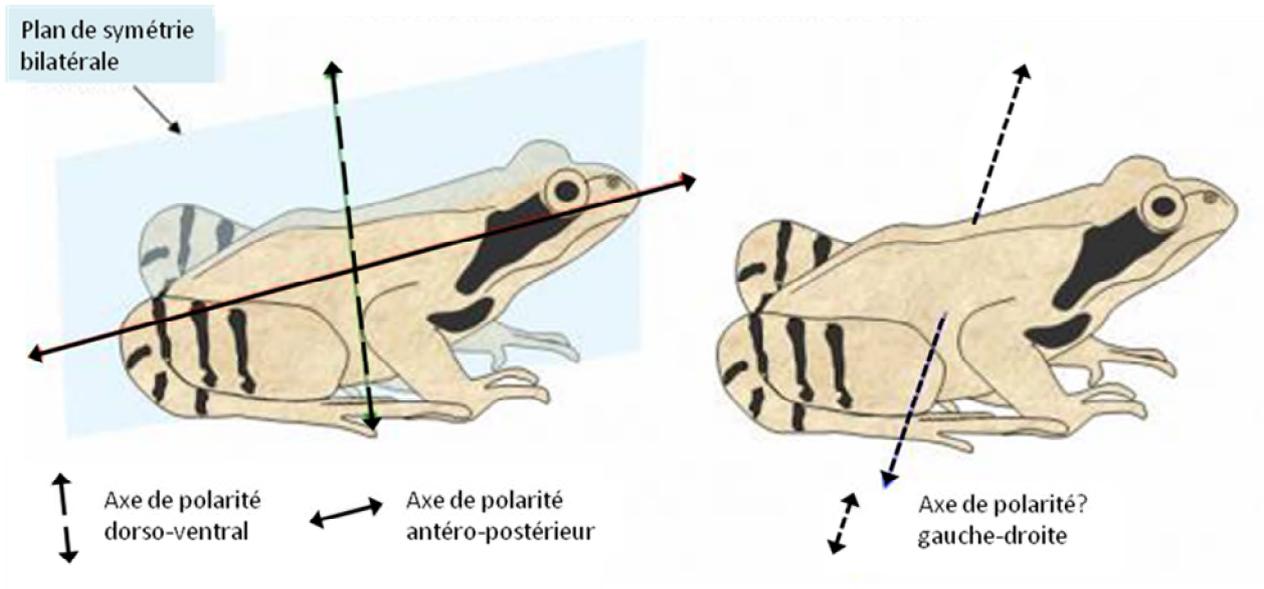


Figure 1 : Plan de symétrie et axes de polarité chez un vertébré : la grenouille

Symétrie et polarité diffèrent selon la taille, la complexité et l'environnement des êtres vivants.

Les formes de vie les plus simples sont d'aspect sphérique ou circulaire, organisées autour d'un point, elles sont aussi les plus symétriques. Cette symétrie sphérique se rencontre chez certains organismes unicellulaires (constitués d'une seule cellule), comme les radiolaires qui font partie du plancton animal (Figure 2). Elle se retrouve chez des êtres de très petite taille (pour lesquels l'effet de la gravité est négligeable comparé aux contraintes de tension superficielle, viscosité du milieu...) qui vivent dans des milieux isotropes, c'est-à-dire dont les propriétés sont identiques dans toutes les directions.

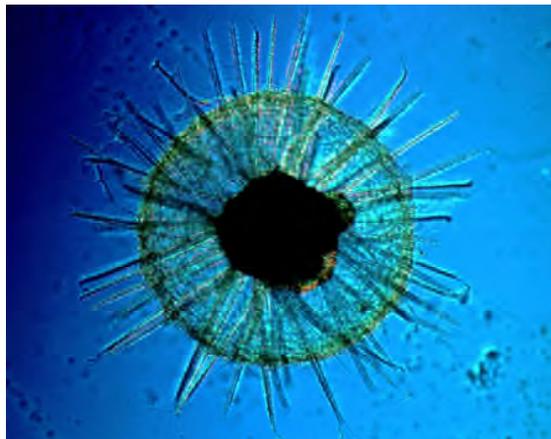


Figure 2 : Un radiolaire : *Aulacantha*.

Avec les organismes pluricellulaires (composés de plusieurs cellules) et l'accroissement de taille, la gravité prend de l'importance et une polarité verticale se met en place avec une région supérieure et une région inférieure. Nous pouvons distinguer 2 grands groupes d'organisation : les êtres ayant un axe de polarité verticale et une symétrie radiale, et ceux ayant 2 axes de polarité et une symétrie bilatérale.

Dans le premier groupe, nous trouvons généralement des êtres fixés et à croissance verticale,

comme la plupart des plantes et certains animaux comme les anémones de mer. Ces organismes possèdent une partie dorsale (le haut) et une partie ventrale (le bas) mais ils ne comportent ni côté droit, ni côté gauche. Ils ont une symétrie radiale, comme une tarte que l'on peut couper en plusieurs parts égales : selon les organismes, ce sera 4, 5, 6... parts identiques (Figure 3). Il est intéressant de noter qu'à la différence des cristaux classiques qui sont périodiques, les organismes vivants peuvent présenter une symétrie d'ordre 5, par exemples les fleurs à 5 pétales des rosacées ou les étoiles de mer. Une symétrie d'ordre 5 a été identifiée dans les quasi-cristaux qui se distinguent des cristaux classiques par leur structure non périodique (Bindi *et al.*, 2009 ; Shechtman *et al.*, 1984).



Figure 3 : fleurs à 4 (cardamine), 5 (bouton d'or) et 6 (lis) pétales.

L'anisotropie du milieu affecte aussi les plantes pour lesquelles il y a un champ de gravité et un gradient de ressources : la lumière, la pluie ou l'air viennent d'en haut, les ions sont présents dans le sol. Or, toutes ces anisotropies sont orientées dans la même direction ! C'est pourquoi, nous ne trouvons qu'un seul axe de polarité haut-bas (ou racine-feuillage) chez la majorité des plantes.

Le second groupe renferme essentiellement des êtres à croissance ou mobilité horizontales. Il s'agit d'animaux mobiles, aquatiques ou terrestres et des plantes ou parties de plantes à croissance horizontale. À la polarité dorso-ventrale, s'ajoute une polarité avant-arrière ou tête-queue. Ce nouvel axe suit le déplacement ou la croissance et autorise une pénétration aisée dans le milieu environnant. Nous observons l'apparition d'une tête dure, profilée. L'organisme est divisé en 2 images-miroir, droite et gauche. Cela s'accompagne d'une symétrie bilatérale perpendiculaire à l'axe du déplacement ou de la croissance. Cette organisation facilite l'exploration du plan horizontal dans toutes les directions. Elle permet une perception bilatérale et symétrique des signaux provenant du milieu ambiant ce qui favorise les interactions avec l'environnement et les mouvements rapides comme la fuite ou l'attaque. Lorsque l'effet de la gravité est amoindri comme dans un milieu aquatique (la poussée d'Archimède réduit le poids de l'animal), la polarité dorso-ventrale est moins marquée, comme chez les poissons.

La bilatéralité est apparue très précocement au cours de l'évolution du règne animal (Blum *et al.*, 2014 ; Manuel, 2008 ; Finnerty, 2003), il y a 500 millions d'années (l'explosion cambrienne) et concerne la majorité des embranchements de ce règne (Figure 3). Chez de nombreux animaux, la bilatéralité apparaît très tôt au cours du développement embryonnaire (Foucrier *et al.*, 2013). Elle se traduit par la perte de la symétrie sphérique de l'ovocyte. Celui-ci au cours de sa croissance, va accumuler de nombreuses réserves nutritives qui seront réparties de manière inégale, définissant deux hémisphères ou pôles: un pôle animal pauvre en vitellus et un pôle végétal riche en vitellus. La symétrie passe alors de sphérique à cylindrique. Le second mécanisme de perte de symétrie qui va définir l'axe dorso-ventral est tout à fait fascinant. Le spermatozoïde, lors de son entrée dans l'ovocyte, va déclencher une sorte de transition de phase. Des éléments du cytosquelette, les microtubules, auparavant totalement désorientés, vont brusquement s'orienter dans la même

direction. L'effet est spectaculaire : les microtubules tirent sur l'enveloppe rigide de l'ovocyte, appelée cortex, qui va alors littéralement "tourner" autour du cytoplasme de la cellule, (un peu comme si les plaques tectoniques au-dessus du manteau se mettaient toutes à bouger dans la même direction, si bien que l'Europe se retrouverait au pôle Nord !). Ainsi, l'ancien pôle végétal sur le cortex se retrouve "décalé" par rapport au pôle végétal du cytoplasme; une protéine appelée β -caténine va alors s'y accumuler et ainsi définir la future zone dorsale de l'embryon !

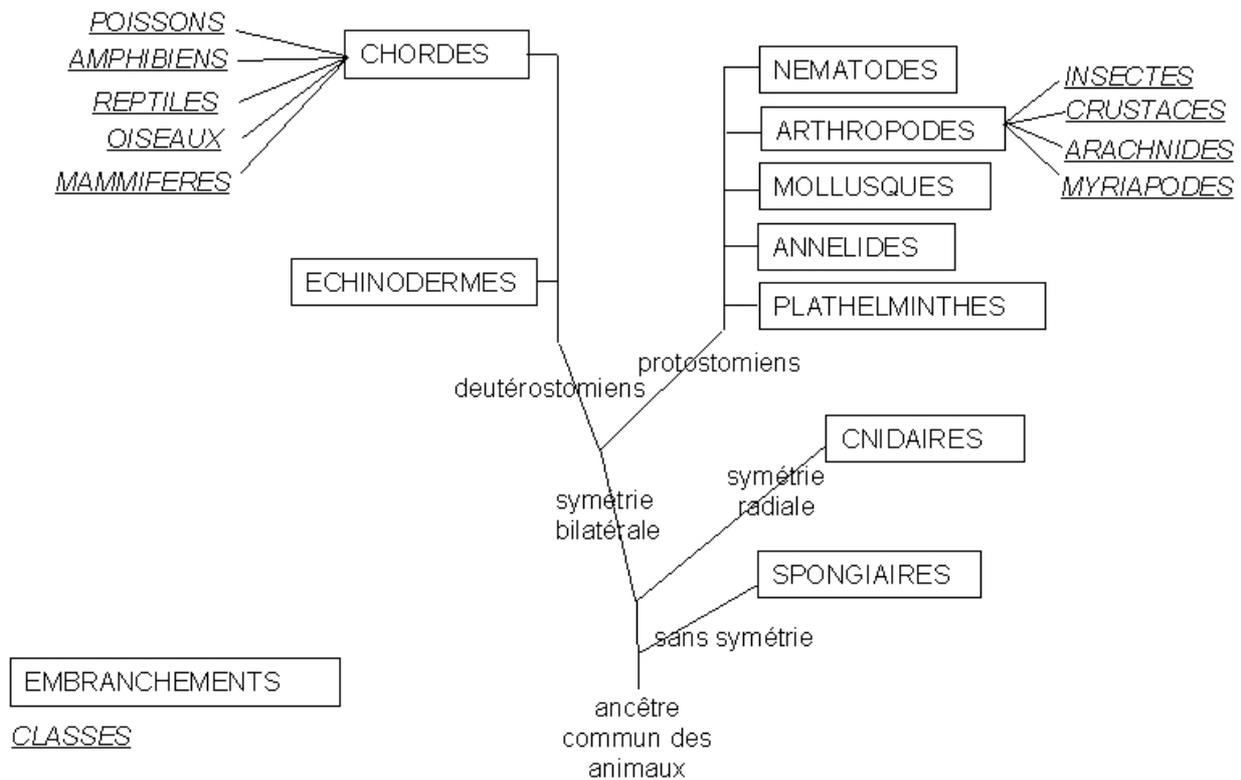


Figure 4 : Arbre phylogénétique des métazoaires.

La polarité droite-gauche de l'organisation interne des vertébrés est peu marquée mais est incontestable. Quel facteur de l'environnement a pu favoriser ce manque de symétrie ? En toute hypothèse, aucun. Car les organes internes sont peu en relation avec l'environnement. Si le cœur bat à gauche, et, si l'intestin s'enroule d'un côté et pas dans l'autre cela est dû...au hasard. En effet, si le cœur pointe vers la gauche chez tout le monde, c'est un effet de hasard, de dérive génétique qui a fixé un allèle donné dans les populations. Les cas de *situs inversus* (maladie congénitale dans laquelle les principaux viscères et organes sont inversés dans une position en miroir par rapport à leur situation normale) montrent que le sens de la polarité droite-gauche interne n'est pas fondamental pour bien vivre (Morelli *et al.*, 2001). Le sens de la polarité droite-gauche serait un caractère neutre, vis-à-vis de la sélection naturelle.

En revanche, la symétrie droite-gauche a été favorisée par la sélection naturelle, car il n'y a pas de différence droite-gauche dans l'environnement. Si un prédateur arrive par la gauche il faut savoir fuir par la droite et inversement...

Chez les plantes, un deuxième axe de polarité peut apparaître si, par exemple, la lumière vient d'un côté seulement (phototropisme). L'intérêt fonctionnel du phototropisme est de permettre aux plantes d'accéder au meilleur ensoleillement possible pour assurer la photosynthèse. On retrouve aussi une double polarité dans les fleurs zygomorphes (Citerne *et al.*, 2010 ; Hileman, 2014). Mais, c'est là encore en relation avec l'environnement et avec la polarité d'un aspect du milieu, et plus exactement celle des animaux pollinisateurs qu'elles attirent (Figure 5).



Figure 5 : A gauche, une fleur actinomorphe (à symétrie radiaire) d'un cosmos (famille des astéracées) et à droite, une fleur zygomorphe (à symétrie bilatérale) d'une violette (famille des violacées).

Enfin il existe parfois une asymétrie triaxiale. Il s'agit d'une altération de la symétrie bilatérale : droite et gauche ne sont plus symétriques, à leur place nous observons un troisième axe de polarité. C'est le cas de l'escargot et de sa coquille, de la limande et de ses deux yeux du côté droit ou encore du crabe violoniste mâle et de sa pince démesurée par rapport à l'autre (Levinton *et al.*, 1995)... Chacun de ces organismes a acquis la particularité d'être devenu « chiral », c'est-à-dire qui n'est pas superposable à son image dans un miroir plan.



Figure 6 : Crabe violoniste mâle à asymétrie triaxiale.

Cependant, symétrie et polarité ne se limitent pas uniquement à l'aspect extérieur des êtres vivants. Nous en trouvons également aux différents niveaux de leur organisation.

Citons par exemple, la valvule spirale des requins (Chatchavalvanich *et al.*, 2006) et la cochlée en coquille d'escargot des mammifères (Barald and Kelley, 2004 ; Cloes and Thiry, 2011 ; Wu and Kelley, 2012). La première structure est un repli interne de l'intestin qui permet d'accroître la surface d'absorption sans allongement de l'organe (Figure 7). La seconde structure est une partie essentielle de l'oreille interne. Elle permet de détecter une large gamme de fréquences du son (Figure 7).

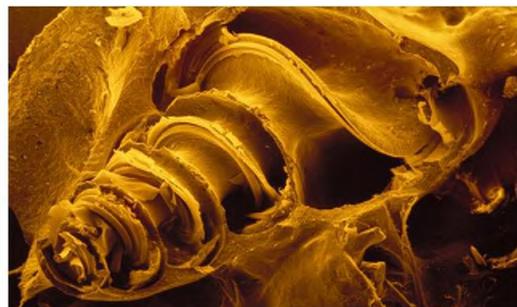
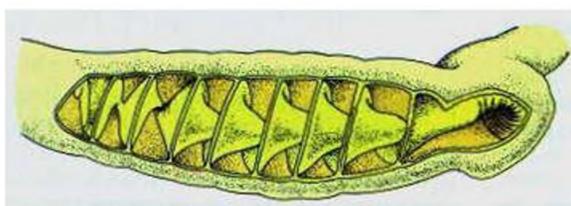


Figure 7 : Schéma de la valvule spirale de l'intestin d'un requin (à gauche) et vue générale de la cochlée

À l'échelle cellulaire, de nombreuses structures présentent aussi des symétries. Citons notamment la symétrie radiale d'ordre 9 des structures stables construites par les microtubules telles les cils, les flagelles et les centrioles présents dans les cellules eucaryotes (Carvalho-santos *et al.*, 2011 ; Thiry *et al.*, 2014) ou l'organisation en double spirale (Cloes and Thiry, 2011 ; Tilney and Porter, 1967) des microtubules qui supportent les fins prolongements des héliozoaires (unicellulaires en forme de soleil). Un autre exemple est celui des complexes du pore nucléaire. Ce sont des assemblages de protéines qui régulent les échanges entre le noyau et le cytoplasme (Beck and Glavy, 2014 ; Hoelz *et al.*, 2011). Ils sont constitués de deux anneaux de symétrie radiale orthogonale. Leur diamètre extérieur est d'environ 150 nanomètres. Leur face cytoplasmique comporte huit fibrilles de 50 nanomètres de long s'étendant vers le cytoplasme tandis que leur face nucléaire comprend également des fibrilles qui se regroupent pour former une structure en forme de panier de 100 nanomètres de hauteur. Le complexe formant le pore nucléaire présente une symétrie d'ordre 8: les deux anneaux présentent huit rayons disposés autour du tunnel central (Figure 8).

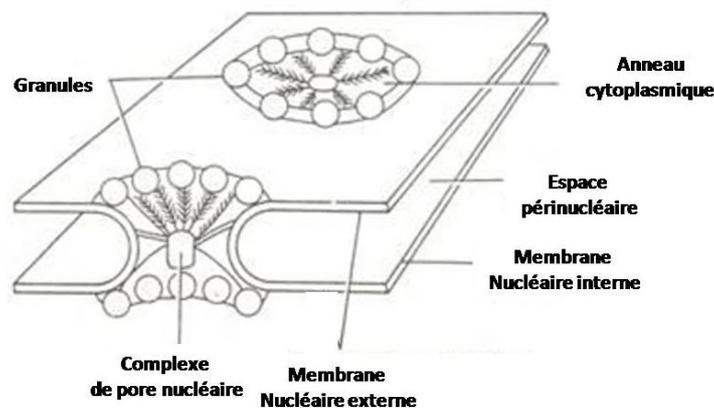


Figure 8 : Représentation de l'enveloppe nucléaire avec deux pores nucléaires.

Les vésicules mantelées constituent encore un autre exemple de symétrie présente au niveau cellulaire. Ces édifices en forme de panier sont impliqués dans l'endocytose par l'intermédiaire de récepteurs membranaires mais aussi dans des processus de transport vésiculaire (Faini *et al.*, 2013 ; McMahon and Boucrot, 2011). La fixation des molécules sur leur récepteur s'accompagne de l'agrégation des récepteurs en plaque de petite taille qui se tapisse le plus souvent d'un matériel dense aux électrons sur sa face cytoplasmique. Le cas des vésicules recouvertes de clathrine est le plus connu. La clathrine, hétérohexamère de trois sous-unités de 180000 daltons et de trois sous-unités de 25000 daltons, élabore, en se polymérisant, une charpente polyédrale à motifs hexagonaux et pentagonaux (figure 9) qui rappelle la forme typique d'un dôme géodésique.

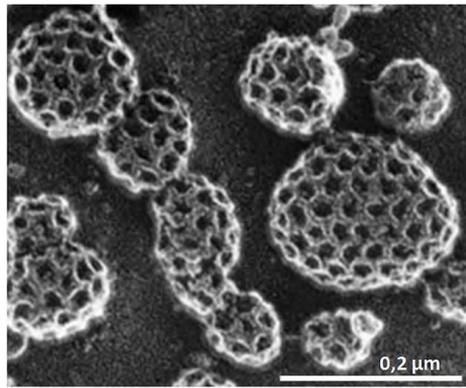


Figure 9 : Vésicules mantelées de clathrine observées au microscope électronique.

Symétrie et asymétrie se rencontrent aussi très fréquemment au niveau des molécules biologiques. Un premier exemple est celui des protéines oligomériques qui présentent des arrangements quaternaires. Si les sous-unités qui interagissent sont identiques, l'assemblage protéique est symétrique. Les dimères (fibronectine : glycoprotéine dimérique de la matrice extracellulaire des tissus conjonctifs) et trimères (tropocollagène : glycoprotéine trimérique de base des fibres de collagène) sont généralement les plus fréquentes. L'unité répétée à partir de laquelle est construit l'oligomère peut-être soit un monomère, soit une association de chaînes polypeptidiques différentes. Par exemple, l'hémoglobine qui est constituée de quatre chaînes polypeptidiques ($\alpha_2\beta_2$) est un dimère symétrique de 2 sous-unités (ab). L'unité asymétrique à partir de laquelle le complexe symétrique s'échafaude s'appelle un protomère.

Un cas intéressant de symétrie des molécules biologiques est celui des acides aminés qui représentent les pierres de base des protéines. La quasi totalité des acides aminés existent sous deux formes, images l'une de l'autre dans un miroir (Figure 10). Ce sont des molécules chirales car elles renferment un carbone asymétrique. Celui-ci possède quatre liaisons chimiques disponibles. Si les atomes ou groupes d'atomes qui se lient à cet atome de carbone sont différents, la molécule résultante est asymétrique. Elle peut être droite ou gauche. Les deux formes symétriques sont appelées énantiomères et qualifiées respectivement de L et D suivant les conventions adoptées universellement. Curieusement, la grande majorité des protéines dans le vivant ne sont constituées

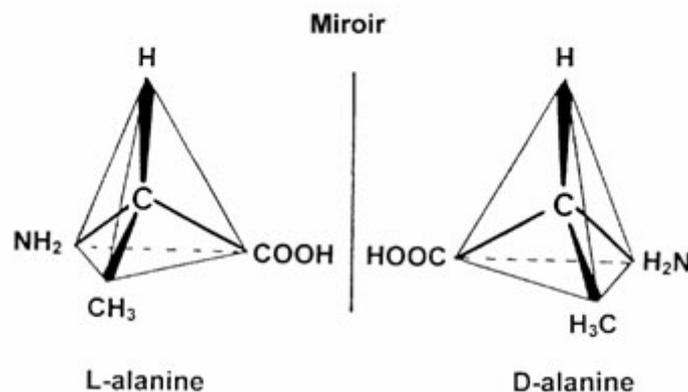


Figure 10 : les deux formes d'un acide aminé : L-alanine et D-alanine.

que par des acides aminés de la forme L. On parle de l'homochiralité des molécules biologiques (Blackmond, 2010 ; Fujii and Saito, 2004). Celle-ci impose la structure des protéines : les acides aminés s'assemblent en formant des hélices α enroulées à droite et des feuilletts β tordus gauches, ce

qui restreint les possibilités topologiques de la molécule construite à partir de ces éléments structuraux.

L'organisation structurale de la molécule d'ADN, le matériel génétique, est aussi une conséquence de l'homochiralité des molécules du vivant. L'ADN est formé de 2 chaînes polynucléotidiques antiparallèles qui interagissent entre elles par la formation de liaisons hydrogène entre leurs bases azotées complémentaires et qui s'enroulent en une double hélice droite, d'environ 2 nanomètres de diamètre (Thiry and Cloes, 2011). Cette hélicité est déterminée par la forme gauche (D) des glucides qui constituent l'ossature de la molécule d'ADN. Cette asymétrie fondamentale du vivant pose une question sur son origine. De nombreuses explications ont été avancées (Meinert *et al.*, 2011), mais la réponse demeure à ce jour incertaine. C'est là une des grandes énigmes de la nature.

Références :

Barald KF, Kelley MW. From placode to polarization: new tunes in inner ear development. *Development*. 2004 131 : 4119-4130.

Beck M, Glavy JS. Toward understanding the structure of the vertebrate nuclear pore complex. *Nucleus*. 2014 5 : 119-123.

Bindi L, Steinhardt PJ, Yao N, Lu PJ. Natural quasicrystals. *Science*. 2009 324 : 1306-1309.

Blackmond DG. The origin of biological homochirality. *Cold Spring Harb Perspect Biol*. 2010 2 : a002147.*8/

Blum M, Feistel K, Thumberger T, Schweickert A. The evolution and conservation of left-right patterning mechanisms. *Development*. 2014 141 : 1603-1613.

Carvalho-Santos Z, Azimzadeh J, Pereira-Leal JB, Bettencourt-Dias M. Evolution: Tracing the origins of centrioles, cilia, and flagella. *J Cell Biol*. 2011 194 : 165-175.

Chandler J, Nardmann J, Werr W. Plant development revolves around axes. *Trends Plant Sci*. 2008 13 : 78-84.

Chatchavalvanich K, Marcos R, Poonpirom J, Thongpan A, Rocha E. Histology of the digestive tract of the freshwater stingray *Himantura signifer* Compagno and Roberts, 1982 (Elasmobranchii, Dasyatidae). *Anat Embryol (Berl)*. 2006 211 :507-18.

Citerne HC, Jabbour F, Nadot S, Damerval C. The evolution of floral symmetry. *Adv Bot Res*. 2010 54 : 85-137.

Cloes M, Thiry M. Les spirales caches du vivant. *Tangente*. 2011 42 : 134-137.

Faini M1, Beck R, Wieland FT, Briggs JA. Vesicle coats: structure, function, and general principles of assembly. *Trends Cell Biol*. 2013 23 : 279-288.

Finnerty JR. The origins of axial patterning in the metazoa : how old is bilateral symmetry? *Int J*

Dev Biol. 2003 47 : 523-529.

Fujii N, Saito T. Homochirality and life. Chem Rec. 2004 4 : 267-278.

Foucrier J, Franquinet R, Vervoort M. Atlas d'embryologie descriptive. Edition Dunod, Paris 2013 pp 1-167.

Hileman LC. Bilateral flower symmetry - how, when and why? Cur Op Plant Biol. 2014 17 : 146-152.

Hoelz A1, Debler EW, Blobel G. The structure of the nuclear pore complex. Annu Rev Biochem. 2011 80 : 613-643.

Holland PW. Evolution of homeobox genes. Wiley Interdiscip Rev Dev Biol. 2013 2 : 31-45.

Levinton JS, Judge M, Kurdziel J. Functional differences between the major and minor claws of fiddler crabs (*Uca*, family Ocypodidae, Order Decapoda, Subphylum Crustacea): A result of selection or developmental constraint. J Exp Marine Biol Ecol. 1995 193 : 147-160.

Manuel M. Early evolution of symmetry and polarity in metazoan body plans. C R Biol. 2009 332 : 184-209.

McMahon HT, Boucrot E. Molecular mechanism and physiological functions of clathrin-mediated endocytosis. Nat Rev Mol Cell Biol. 2011 12 : 517-533.

Meinert C, de Marcellus P, d'Hendecourt L, Nahon L, Jones NC, Hoffmann SV, Bredehöft JH, Meierhenrich UJ. Photochirogenesis: photochemical models on the absolute asymmetric formation of amino acids in interstellar space. Phys Life Rev. 2011 8 : 307-330.

Morelli SH, Young L, Reid B, Ruttenberg H, Bamshad MJ. Clinical analysis of families with heart, midline, and laterality defects. Am J Med Genet. 2001 101 : 388-392.

Ryan JF, Baxevanis AD. Hox, Wnt, and the evolution of the primary body axis: insights from the early-divergent phyla. Biol Direct. 2007 2 : 37.

Thiry M, Cloes M. La structure géométrique de l'ADN. Tangente. 2011 42 : 38-40.

Thiry M, Racano S, Rigo P. Biologie cellulaire : exercices et méthodes. Edition Dunod, Paris, pp 1-352.

Tilney LG, Porter KR. Studies on the microtubules in heliozoa. II. The effect of low temperature on these structures in the formation and maintenance of the axopodia. J Cell Biol. 1967 34 : 327-343.

Wu DK, Kelley MW. Molecular mechanisms of inner ear development. Cold Spring Harb Perspect Biol. 2012 4 : a008409.