

Physique de l'origine des animaux

Vincent Fleury

Après L'origine des espèces (1859)¹, Charles Darwin entre dans un débat très vif avec le paléontologue Richard Owen. Si Darwin l'a emporté - l'évolution par sélection naturelle ne faisant plus aucun doute aujourd'hui²—Owen observe néanmoins que l'évolution des parties des animaux est le plus souvent mineure et ne fait que pousser quelques curseurs d'une forme existante antérieurement, sans doute même chez le plus ancien vertébré, qualifié d'archétype³. Des discontinuités plus importantes, et difficilement imputables à l'évolution, séparent dans le tableau de la vie des animaux aux plans d'ensemble très différents. Ce terme d'archétype est d'ailleurs repris par Darwin, pour qui il existe une sorte de vertébré idéal ou archétypique sur le modèle duquel tous les vertébrés sont ou seraient construits.

De là trois problèmes logiques. 1) celui de la diversité des archétypes (au nombre de 5 pour Darwin, mais le chiffre est sans doute plus proche de 12) et, si archétype il y a, d'où « vient-il ? », si ce n'est de l'évolution ; 2) si l'archétype est l'animal ancestral sur le plan duquel tous les autres sont construits, s'est-il formé en une seule génération, s'il est le plus ancien ? Existe-t-il donc un phénomène capable de produire des archétypes ? Et si oui, à partir de quelle condition initiale, qui, elle, ne serait pas un animal ? 3) Enfin, s'il existe un phénomène capable de produire un archétype en une seule génération, ce phénomène doit échapper par sa nature à l'évolution, il doit être global, définitif, au sens où il produit « d'un coup » un animal « complet » : le premier.

Des travaux récents permettent d'entrevoir une logique morphogénétique physique, à l'existence et à la forme des archétypes d'animaux, au moins pour certains d'entre eux. Pour les évolutionnistes, ce type d'idées est parfois qualifié de « structuraliste ». Terme n'existant pas en physique, qui s'appuie, elle, sur les premiers principes plutôt que sur un corps de doctrines. Pour comprendre l'émergence des plans d'animaux, il faut aussi étudier le mécanisme de morphogénèse en général. D'abord selon la science des cristaux, qui permet d'expliquer la profondeur spatiale et temporelle du sujet, puis par celle des animaux.

Morphogénèse en matière condensée

Les cristaux ont un *faciès* (forme ou aspect extérieur). On ne voit pas à l'œil nu les atomes individuels, mais c'est bien la structure cristalline de la maille atomique qui se révèle dans la forme globale, par un mécanisme de changement d'échelle. Bien que les atomes soient tous *identiques* et *sans projet*, la forme finale exhibe des atomes se distinguant par leur position (ici plus près d'un coin, là au milieu d'une facette, etc.). Si les atomes sont différents, alors qu'ils sont tous identiques, c'est par l'existence d'un *bord*, d'une limite. Par la délimitation d'une surface, les atomes internes

deviennent différents de ceux de cette surface. Les atomes, adoptant certaines directions, sont alors plus ou moins éloignés les uns des autres, selon la direction intersectée par la surface. Le bord suffit à engendrer une forme particulière du contour, dans un réseau d'atomes pourtant tous identiques. Sans plan, ni projet, ni instruction, le déroulé temporel des lois physiques sur l'interface est en lui-même créatif, *morphogénétique*.

En physique, une structure macroscopique se forme par la révélation à grande échelle d'une géométrie initialement invisible à l'œil nu. Des phénomènes discrets concernant un nombre

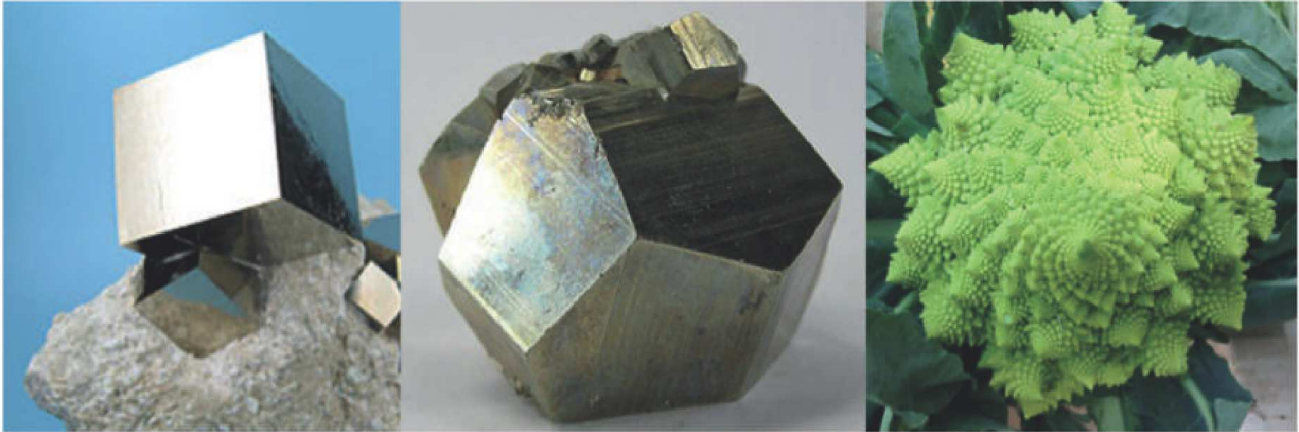


Fig. 1. A gauche cristal classique de pyrite (cubique). Au centre cristal mâclé (pentagonal). À droite arrangement phyllotactique. Dans ces trois cas, une forme régulière est obtenue par ajout successif d'éléments (atomes des cristaux ou « florets » des fleurs). L'espace et le temps rendent différents des éléments a priori identiques (atomes, cellules). C'est le principe de la morphogénèse. Pyrite photos CC Carles Millan and Robert Lewinski.

faible d'atomes, deviennent visibles à grande échelle via la croissance, couplant géométrie et temps pour faire naître la *révélation* d'une structure primordiale physique. Seul le temps est morphogénétique ; les atomes n'ont aucun projet et l'ordre n'est nulle part écrit. Les structures finales sont le résultat d'une sorte de déchiffrement par les lois physiques d'une structure latente dans le germe, devenue macroscopique par les flux de matière fournissant la croissance. Cette analyse peut s'appliquer aux archétypes d'animaux, malgré trois différences essentielles.

Morphogénèse des animaux

Pour les animaux, l'idée que la croissance révèle à grande échelle un phénomène invisible à l'œil nu, est avérée. Il y a bien une révélation, chez l'adulte, d'une structure existant en germe à un stade très précoce, et ayant besoin de l'exercice de lois physiques pour son apparition.

Tous les détails de notre organisme découlent de divisions discrètes intervenant quand l'embryon fait 2 ou 3 millimètres et ses cellules quelques micromètres. Croissance et flux de matière contribuent à rendre ce germe d'animal visible à l'échelle macroscopique, par révélation morphogénétique. Les formes animales sont fixées sur cet embryon rudimentaire d'un seul coup. Y sont déjà organisés les territoires nerveux, digestif ou uro-génitaux, les yeux, la bouche, les vertèbres et le torse,

etc., tous les compartiments usuels étant répartis en des sous-structures emboîtées, idéalement congruentes les unes avec les autres.

Comprendre la forme des animaux, c'est saisir leur organisation interne dans toute sa complexité. Celle-ci, à première vue, semble échapper aux lois physiques en traduisant une différence essentielle avec la croissance cristalline : *les animaux sont des structures physiologiquement différenciées, emboîtées les unes dans les autres*. Toute l'organisation des animaux suppose de fait un ajustement interne des parties les unes avec les autres en une somme de sous-formes parfaitement adaptées, s'épousant les unes les autres telles les poches d'un portefeuille.

Des travaux récents montrent que cette complexité n'est qu'apparente. C'est justement parce qu'un phénomène physique est capable de produire cette organisation *d'un seul coup* que les animaux sont des organisations autonomes, rendues possibles par les lois de la dynamique. Ils sont constitués de tubes digestifs ou reproducteurs, de tubes nerveux, de divers organes comme le sac amniotique ou les yeux, dont on peut retrouver des analogues (au sens biologique) chez des animaux ayant des plans d'ensemble très différents. Néanmoins, les types cellulaires analogues peuvent être distribués de façon complètement différente dans des organismes également fonctionnels. Ceci est rendu possible par une autre différence essentielle entre les cristaux et les organismes vivants : *les organismes vivants sont extrême-*

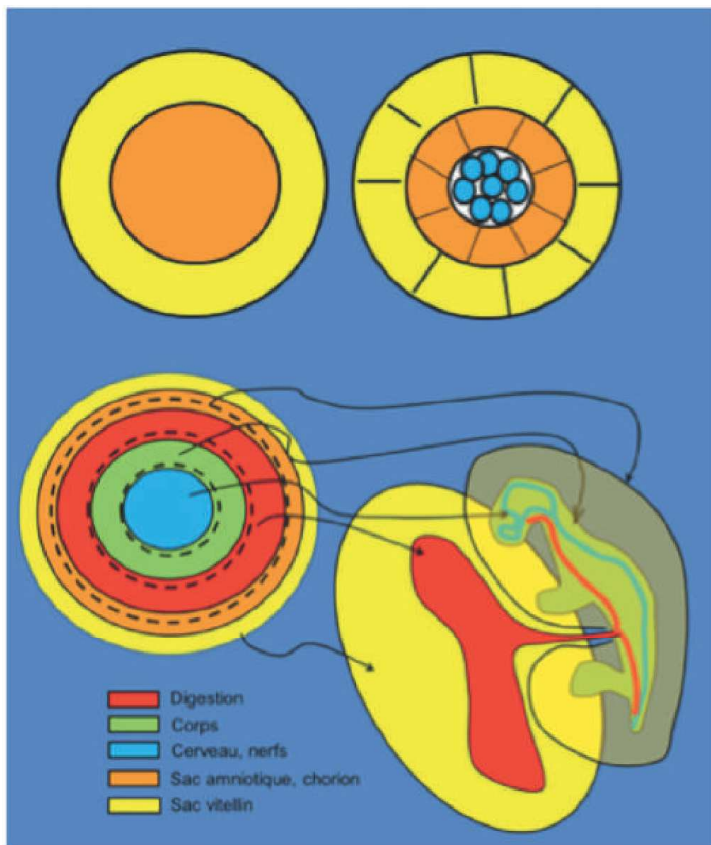


Fig. 2. Principe de formation des animaux. Un zygote (énorme cellule), se casse en anneaux ayant une loi d'échelle. Les anneaux exercent sur eux-mêmes des forces de contraction en anneaux (pointillés), la force de contraction étant la même que la force de division. Les anneaux étant très mous, ils plient. Le résultat est un animal ayant des compartiments emboîtés, et mobiles. Pendant le développement, l'embryon est enfermé dans un sac (la poche des eaux produite par le même mécanisme).

ment mous, leur complexité étant une conséquence subtile de cette mollesse. Comme les embryons sont des surfaces très molles, cette mollesse rend possible des chiffonnages et des plis très différents, composés structurellement de compartiments analogues présentant une organisation très différente, pour peu que les plis aient eu lieu dans un ordre très différent. Le mécanisme de formation des animaux comme les vertébrés provient du « chiffonnage » d'une structure planaire sur laquelle existe un ordre séquentiel de proto-organes appelés à exercer des physiologies différentes. Cet ordre séquentiel est « plat » et a une forme très banale voire simplissime : une structure en anneaux emboîtés. Si l'on prend des physiologies organisées en anneaux (un anneau de cellules plutôt digestif, un anneau nerveux, un anneau musculaire, etc.), et qu'on

les plie *comme il faut*, on obtient un animal formé, avec cerveau, tube digestif, muscles, nageoires, etc., qui, de plus, se déplace, car la force nécessaire pour plier/chiffonner la structure reste disponible pour son déplacement.

La morphogénèse est donc un ensemble de mouvements de plis exercés par des proto-muscles réalisant cette forme finale, mouvante : l'animal. Ainsi, les animaux sont les attracteurs d'une dynamique utilisant les lois ordinaires de la physique pour déchiffrer temporellement un « code », soit une succession d'anneaux mous avec une division de second ordre en secteurs⁴. Un mécanisme physique simple est donc capable de transformer un plan d'animal séquentiel « plat » formé d'anneaux concentriques en une succession de tubes emboîtés les uns dans les autres, et qui, de surcroît, *avancent* en exploitant la même force de contraction qui a permis la transformation de l'anneau en tube.

Vient alors la troisième différence essentielle entre les formes cristallines et les formes animales. Tandis que les cristaux se forment au cours de leur croissance par ajout de matière (agrégation ou accréition successive d'atomes), *la formation des animaux se fait par division en morceaux de plus en plus petits d'une cellule énorme* nommée zygote, ou ovule fécondé. Ils se forment par réorganisation, à masse pratiquement constante de cet ovule fécondé « cassé » en petits morceaux (les premières cellules apparaissant par clivage dichotomique du zygote), qu'on appelle *blastula*.

La physique modèle donc l'origine des plans d'ensemble des animaux qui s'effectue par un *plan* fait d'anneaux concentriques différenciés, plié suivant ces anneaux via l'exercice de forces dans l'embryon. Une succession d'anneaux mous emboîtés se contractant eux-mêmes crée un phénomène physique dont le produit est une série de tubes emboîtés qui se déplacent (la force de contraction sur les anneaux devenant une force sur les tuyaux, assurant à la fois digestion et déplacement de l'animal).

Reste à comprendre l'origine des anneaux et leur lien avec la différenciation cellulaire. Pourquoi existe-t-il, à la source physique

des embryons, des anneaux aux propriétés différentes alors que toutes les cellules ont le même code génétique ? Les biologistes étudiant cette question observent que la plupart des zygotes se divisent en anneaux (clivage *radial* ou *discoïdal*). Des clivages plus sophistiqués ont évolué à partir du clivage radial, mais le clivage ancêtre de tous les autres est le clivage en anneaux ; l'organisation *princeps* consiste en anneaux « en poupées russes ». Pour le biologiste J. W. Valentine, ce clivage n'est pas évolué en tant que tel, mais résulterait d'un processus global⁵. Une propriété frappante de ce clivage radial *ancestral* est qu'il présente une loi d'échelle, les cellules formant des anneaux dans lesquels elles ont des tailles variables : petites au centre, grandes au bord⁶. Cette organisation se raffine au cours du temps, opérant un glissement vers les petites tailles. Une littérature scientifique parfois ancienne⁷, à prendre avec réserve, reconnaît

l'existence de cette hiérarchie de tailles et attribue cette structure en anneaux, avec cellules plus grandes dans les anneaux périphériques, à l'existence d'inhibiteurs de la division cellulaire. Ceux-ci seraient les lipides (les graisses), quoique ces graisses soient quasi absentes chez les mammifères. Les zygotes seraient donc des objets asymétriques « polarisés », avec une zone grasse et une zone aqueuse, une démixtion (séparation) spontanée des phases hydrophiles et hydrophobes.

Si l'on suppose que les cellules se divisent plus vite du côté « aqueux » que du côté « gras », on obtient une cascade de divisions formant des anneaux concentriques emboîtés telles des poupées russes, avec, comme on l'a vu, des cellules à tailles variables, les plus petites au centre (partie la plus éloignée du jaune, Fig. 3) et les plus grosses au bord (partie la plus proche du jaune, pour un poulet)⁸. On obtient

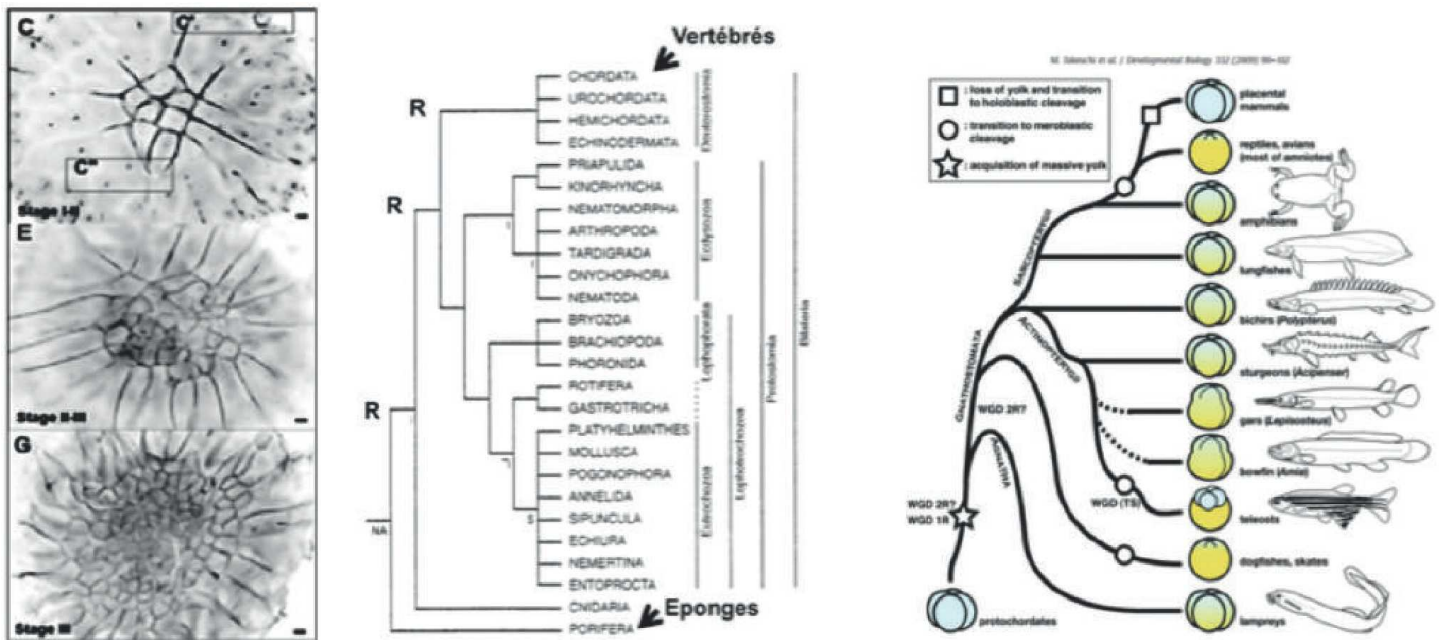


Fig. 3. Les blastulas d'embryon présentent un clivage généralement radial et/ou discoïdal qui constitue le « plan » de la forme finale (à gauche, trois étapes du clivage d'un zygote de poulet, une structure radiale apparaît avec de grandes cellules à la périphérie, des petites au centre). Ce clivage radial est ancestral. L'arbre évolutif (au centre) montre la structure du clivage en fonction de la position dans la taxonomie : R=clivage radial (d'après Valentine⁹). Il est modifié dans ses paramètres par une plus ou moins grande présence de « jaune » dans l'œuf (à droite, d'après M. Takeuchi *et al.*¹⁰), sans changer le plan d'ensemble.

un escalier de tailles de cellules glissant progressivement vers des tailles de plus en plus petites (Fig. 4). Comme la flèche temporelle des divisions va du bord vers le centre, les cellules plus petites, au centre, sont plus avancées en matière de nombre de divisions.

La division du zygote en anneaux a donc un caractère auto-organisé et une structure en loi d'échelle se raffinant au cours du temps, les marches des anneaux plus fins de l'embryon plus *raffiné* étant obtenues en « splittant » les anneaux plus grossiers de la dichotomie précédente. Ces anneaux deviennent un animal par contraction. Nos travaux ont montré que la contraction en anneaux a pour résultat une succession de cylindres délimités par les anneaux et emboîtés¹¹. Ce phénomène s'explique par les différenciations cellulaires ayant lieu lors des divisions. Des divisions plus nombreuses sont associées à des tissus davantage différenciés, les anneaux « splittés » correspondant à des cellules plus avancées en différenciation. Ainsi, le tissu le plus différencié sera le tissu central, nerveux, et le tissu le moins différencié le tissu périphérique, plutôt digestif. La logique de l'embryogénèse, et de l'évolution, repose sur une cascade de divisions concomitante d'une cascade de différenciations et d'une cascade de contractions. Le résultat est un animal formé de tubes /dans des tubes /dans des tubes, ayant des rôles différents. Et ces tubes sont mobiles.

Bien sûr, des brisures de symétrie contribuent à la stabilisation de contractions plutôt radiales pour les radiés comme les polypes/méduses, ou à des contractions plus asymétriques pour les bilatériens tels les vertébrés. D'autres phénomènes viennent contribuer à la diversité des animaux, comme la quantité de jaune¹². Les animaux présentent une quantité de jaune dans l'œuf plus ou moins grande. Minimale pour les mammifères, énorme pour les oiseaux, celle-ci contribue sans doute à certaines de leurs différences. Différences qui sont reliées aux gènes de synthèse du *vitellus* [réserves énergétiques utilisées par les embryons durant leur développement], pour la plupart perdus chez les mammifères placentaires¹³.

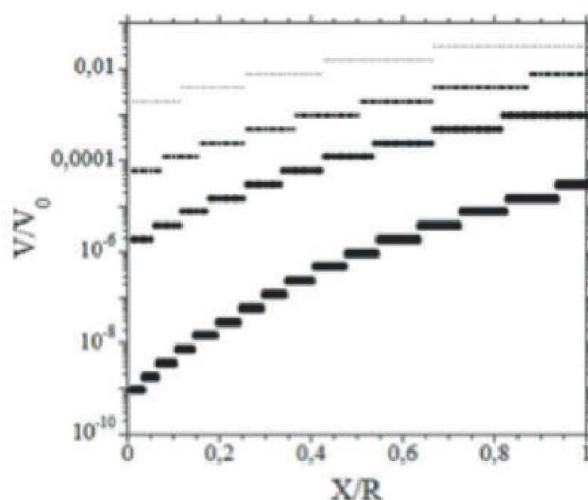


Fig. 4. Principe de division d'une blastula. Dans le graphe, les marches correspondent aux tailles de cellules du centre (à gauche) vers le bord (à droite). Au fil du temps, les marches « descendent » (les cellules sont plus petites), et sont plus nombreuses (l'embryon « se raffine »). A tous les stades, l'embryon est constitué d'une succession d'anneaux discrétisés. Aux premiers stades, les anneaux sont nerveux vers le centre, digestif vers le bord. Les anneaux intermédiaires forment le corps. Plus il y a d'anneaux au moment où l'embryon plie, plus l'animal est complexe. L'épaisseur des traits représente le temps.

Une mouvance se dessine donc dans la science contemporaine pour expliquer l'émergence des formes animales et des animaux eux-mêmes par des phénomènes physiques pratiquement auto-organisés présentant une logique interne¹⁴. La réussite du mécanisme de formation des animaux tient à la concomitance de quatre facteurs essentiels : 1) la présence de tissus différenciés ; 2) des tissus distribués d'une façon fonctionnelle ; 3) une force disponible pour effectuer les déformations morphogénétiques des tissus différenciés ; et 4) une évolution de l'ensemble pour conserver la fonctionnalité des étapes antérieures. L'existence d'une solution physique permettant dans le même temps la cohérence spatiale et temporelle de ces quatre éléments résout cette idée de l'archétype, le ramène aux premiers principes et garantit sa robustesse. En effet, la division du zygote avec une cascade en loi d'échelle permet la différenciation des tissus suivant des anneaux (1) ; l'existence des anneaux et la variation de taille des cellules

entre anneaux fixent le lieu des plis par « accrochage de mode » et fabriquent ainsi le plan des futurs plis (2) ; du point de vue dynamique, la distribution des cellules sur des anneaux génère des forces en anneaux colocalisant la dynamique des plis et leur géométrie, ça tire exactement là où c'est plus favorable pour plier (3). Enfin, le caractère hiérarchique, en loi d'échelle, des dichotomies rend possible une évolution par raffinements successifs de l'animal, tout en préservant les acquis des étapes antérieures (4). La division cellulaire utilise les mêmes forces que les tractions morphogénétiques qui assurent les mouvements. Il y a bien une logique interne et universelle. Ainsi la formation de structures organisées appelées « animaux » serait inhérente au monde physique, en serait-elle un attracteur, au sens ordinaire, de la dynamique des masses molles qui se divisent.

the shell coat and yolk in mammals : an marsupial perspective », *J. of experimental zoology (Mol Dev Evol)* 312B, 2009, 625-638.

¹³ D. BRAWAND, W. WHALI, H. KAESSMAN, « Loss of egg yolk genes in mammals and the origin of lactation and placentation », *PLoS Biol* 6, 2008, e63.

¹⁴ V. FLEURY, N. CHEVALIER, F. FURFARO *et al.*, « Buckling along boundaries of elastic contrast as a mechanism for early vertebrate morphogenesis », *op. cit.* ; V. FLEURY, « An Elasto-Plastic Model of Avian Gastrulation », *Organogenesis* 2(1), 2005, 6-16 ; E. ROZBICKI, M. CHUAI, A.I. KARJALAINEN *et al.*, « Myosin II mediated cell shape changes and cell intercalation contribute to primitive streak formation », *Nat. Cell. Biol* 17, 2015, 397-408.

¹ C. DARWIN, *On the Origin of Species*, Londres, Murray, 1859.

² Déconsidéré en raison de ses positions spiritualistes et de diverses entorses à l'éthique scientifique, Owen est l'un des pères fondateurs de la paléontologie, inventeur notamment du mot « dinosaure ».

³ R. OWEN, *On the Archetype and Homologies of the Vertebrate Skeleton*, Londres, van Voorst, 1848.

⁴ V. FLEURY, A. V. MURUKUTLA, N. CHEVALIER *et al.*, « Physics of Amniote formation », *Phys. Rev. E* 94, 2016, 022426-022444.

⁵ J. W. VALENTINE, « Cleavage patterns and the topology of the metazoan tree of life », *PNAS* 94(15), 1997, 8001-8005.

⁶ V. FLEURY, « The Angel's staircase : Cell cycle, and the embryogenesis of vertebrates », *Chaos, Solitons and Fractals* 105, 2017, 230-234.

⁷ E. B. WILSON, *The Cell and development in heredity*, New York, Macmillan, 1928.

⁸ V. FLEURY, « The Angel's staircase », *op. cit.*

⁹ J. W. VALENTINE, « Cleavage patterns and the topology of the metazoan tree of life », *op. cit.*

¹⁰ M. TAKEUCHI, M. TAKAHASHI, M. OKABE *et al.*, « Germ layer patterning in bichir and lamprey ; an insight into its evolution in vertebrates », *Developmental Biology* 332(1), 2009, 90-102.

¹¹ V. FLEURY, N. CHEVALIER, F. FURFARO *et al.*, « Buckling along boundaries of elastic contrast as a mechanism for early vertebrate morphogenesis », *Eu. Phys. J. E* 38(6), 2015, 1-19 ; V. FLEURY, A. V. MURUKUTLA, N. CHEVALIER *et al.*, « Physics of Amniote formation », *Phys. Rev. E* 94, 2016, 022426-022444.

¹² M. TAKEUCHI, M. TAKAHASHI, M. OKABE *et al.*, « Germ layer patterning in bichir and lamprey », *op. cit.* ; E. MENKHORST, A. NATION, S. CUI *et al.*, « Evolution of