

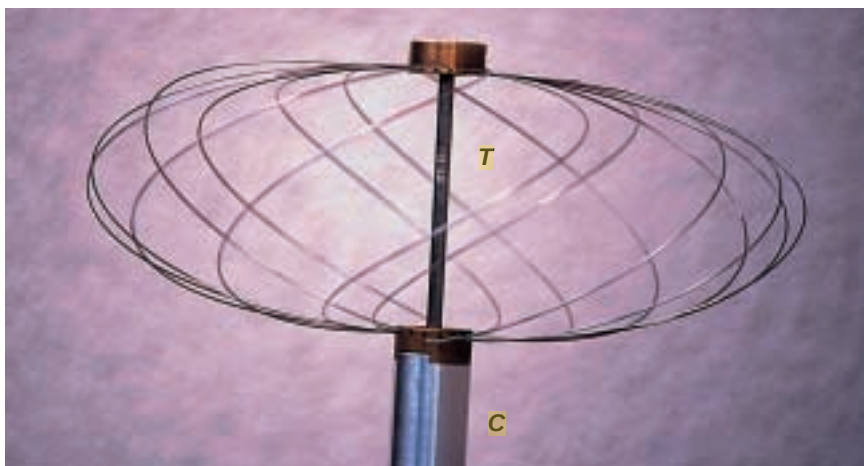
ce qui rend la gastrulation plus simple à décrire.

Le processus consiste à creuser la blastula comme si l'on poussait du doigt la surface d'un ballon dégonflé vers un point opposé : on obtient un bol dont le bord circulaire, en se contractant, forme l'anus et délimite le volume de l'estomac (l'orifice buccal se forme ultérieurement).

Pour mieux comprendre ce processus de gastrulation, réalisons un modèle mécanique qui, s'il ne prétend pas décrire la réalité dans sa complexité, sert au moins à modéliser sa partie géométrique. Prenons un fil d'acier résistant et élastique, d'une longueur de 40 centimètres environ et dont le diamètre est de l'ordre du millimètre. Son élasticité est importante : il doit reprendre sa forme initiale après déformation. On rapproche les deux extrémités : quand ces extrémités se touchent à angle droit pour former un demi huit, rien de particulier ne se passe. En revanche, quand on force les extrémités à s'aligner, le fil formant un cercle, ce dernier tend à se relever ou à s'abaisser brusquement (voir la figure 4). Pourquoi ?

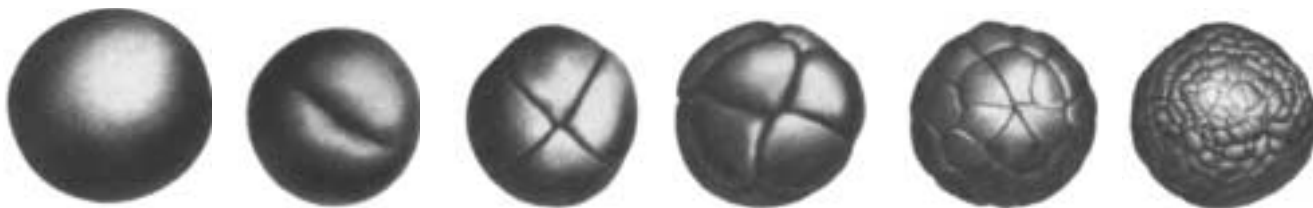
Précisons le phénomène en distinguant quatre objets géométriques : le plan de la boucle, le point A de la boucle où se touchent les deux extrémités du fil, la droite D du plan P tangente en A à la boucle rendue circulaire, le plan Q orthogonal à D en A . Chaque extrémité de la boucle définit une demi tangente. Lorsque ces deux extrémités sont parfaitement alignées au point A , les deux demi tangentes $D+$ et $D-$ sont portées par D . Si, au lieu de maintenir cet alignement, nous faisons décrire à $D+$ et à $D-$, symétriquement par rapport au plan Q , deux cônes de sommet A et d'axe D , alors le plan P de la boucle effectue une rotation autour de D qui serait complète sans les bras de l'expérimentateur, lesquels limitent les mouvements. La rotation est d'autant plus vive que l'angle d'ouverture α des cônes est plus petit. C'est ainsi que, lorsque l'angle α entre $D+$ et $D-$ est quasi plat, on observe le mouvement brusque indiqué précédemment. En effet, pour aller de la boucle en demi huit, où α est égal à 90 degrés, à la boucle circulaire, où α est égal à 180 degrés, il est difficile de maintenir $D+$ et $D-$ dans un plan fixe ; la moindre oscillation, surtout quand α approche de 180 degrés, provoque la rotation de la boucle.

Le phénomène résulte de l'élasticité du fil : avec un fil d'étain, le fil ne bascule pas. L'élasticité du fil d'acier se mesure par un module d'autant plus grand que le fil reprend rapidement sa forme initiale après la disparition des contraintes. Depuis le mathématicien suisse Daniel Bernoulli (1700-1782), on définit l'énergie potentielle d'un fil élastique de longueur fixée



Photographies de François Adéry

2. La formation d'une sphère double à partir d'une sphère simple que l'on aplatit en faisant coulisser vers le haut le cylindre C sur la tige T .



3. La formation de la morula.

comme le produit du module d'élasticité par la moyenne du carré de la courbure (ou de l'écart entre la courbure sous contrainte et la courbure au repos, quand le fil n'est pas rectiligne, comme cela arrive quand il est fourni en bobine). Plus le fil est tordu ou courbé, plus sa courbure est grande, et plus grande est son énergie potentielle.

D'après le principe général de moindre action (qui, dans ce cas particulier, était déjà mis en équation par le mathématicien Leonhard Euler), le fil tend à minimiser son énergie potentielle, ce qui impose notamment à la boucle de rester dans un plan, qui est donc nécessairement le plan P' , défini par $D+$ et $D-$, d'où la rotation de P pour se confondre avec

P' . Sauf évidemment dans la situation idéale où $D+$ et $D-$ sont portées par D , auquel cas tous les plans contenant D font l'affaire, et aucune rotation de P n'est nécessaire.

Ces considérations nous ont fait un peu oublier la gastrulation. Revenons-y en construisant un modèle mécanique, fondé sur le mécanisme que nous venons de considérer. L'objet que nous construisons est une sphère rendue déformable par la flexibilité du fil d'acier, qui matérialise ses méridiens. Chaque méridien subira la déformation précédente (voir l'encadré ci-dessous). La manipulation du modèle se décompose en deux mouvements : une translation du pôle Sud

vers le pôle Nord, que l'on obtient en poussant le moyeu inférieur vers le moyeu supérieur, le long de la tige, au moyen de la poignée, et une rotation des deux moyeux l'un par rapport à l'autre, autour de l'axe de la tige.

La translation aplatit la sphère, en forçant les méridiens à se plier en leur milieu. L'énergie potentielle des fils et l'effort à fournir deviennent excessifs, et on risque de franchir la limite d'élasticité, au-delà de laquelle le métal se déformera irréversiblement. Cependant, toujours grâce au principe de moindre action, le fil minimise son énergie en se vrillant, imposant un mouvement de rotation au moyeu qui le tient : on s'en aperçoit en libérant la poignée et en se contentant de la pous-

La construction d'un modèle de gastrulation

Seize méridiens sont des fils d'acier de type corde à piano de 40 centimètres de long. J'ai obtenu de bons résultats avec un acier inoxydable au nickel-chrome de un millimètre de diamètre, et de grande résistance à la traction (environ 2 000 mégapascals). Un tel acier est utilisé en orthodontie sous le nom de jonc. Le fil est initialement courbé, si bien qu'il prend facilement la forme d'un demi cercle.

Deux moyeux en laiton forment les pôles du système. Chaque moyeu est un cylindre plein, de trois centimètres de diamètre, traversé dans son axe vertical par un trou de six millimètres de diamètre, et dont une des faces horizontales est fendue d'une mortaise de quatre millimètres de profondeur et de douze millimètres de largeur. D'autre part, 16 rayons horizontaux, régulièrement espacés, sont percés au diamètre de 1,1 millimètre, afin de recevoir les méridiens. La face du moyeu non fendue est percée au diamètre de 1,5 centimètre, à une profondeur suffisante pour faire apparaître les 16 orifices.

Une tige d'acier inoxydable de 35 centimètres de long et de 5,5 millimètres de diamètre, filetée à une extrémité, est soudée, à l'autre, à un tenon devant s'ajuster exactement dans la mortaise d'un moyeu.

Enfin la poignée de manipulation est composée de trois pièces : un disque d'aluminium de 5 centimètres de diamètre et de 8 millimètres d'épaisseur, percée en son centre



d'un filetage qui recevra la tige filetée ; un écrou permettant de solidariser la tige et le disque ; un cylindre d'aluminium de 9 centimètres de long et de 3 centimètres de diamètre, dont une extrémité est munie d'un tenon qui s'ajuste à l'un des moyeux et l'autre est un disque identique au précédent. L'axe de ce cylindre est percé d'un trou de 6 millimètres qui laisse coulisser la tige. Il est pratique de canneler les deux disques d'aluminium sur la tranche pour faciliter la prise.

On commence par monter les méridiens sur un moyeu. Chaque fil d'acier est glissé dans

l'un des orifices du moyeu jusqu'à ressortir franchement de l'autre côté. Avec un chalumeau, on fond l'extrémité qui est apparue par le centre du moyeu de façon à produire une petite boule qui empêchera le fil de ressortir. Une fois les 16 rayons montés sur le premier moyeu, on répète la même opération avec l'autre moyeu, de sorte que les mortaises des deux moyeux soient du côté extérieur à la sphère formée par les 16 méridiens. On glisse alors la tige à travers les deux moyeux en bloquant son tenon dans la mortaise d'un des moyeux. À l'autre extrémité, celle qui dépasse de la sphère, on enfle le cylindre d'aluminium dont le tenon vient s'adapter à la mortaise du second moyeu. Puis on visse le disque d'aluminium à l'extrémité de la tige et on bloque avec l'écrou. Le modèle ainsi construit se présente comme une sphère montée sur un pied et rappelle une pièce de batteur à œuf.