

Synthèse par combustion

COMPOSITION	APPLICATIONS
CARBURES Carbone plus un élément comme le titane ou le silicium (TiC, SiC)	Abrasifs, outils coupants, renforts en céramique
BORURES Bore plus un métal comme le titane ou le lanthane (TiB ₂ , LaB ₆)	Abrasifs, outils coupants, cathodes
SILICIURES Silicium plus un métal comme le titane ou le molybdène (TiSi ₂ , MoSi ₂)	Éléments de chauffage, connecteurs électriques, barrières de Schottky pour systèmes électroniques
INTERMÉTALLIQUES Aluminium ou titane plus un métal tel que le nickel (AlNi, TiNi)	Industrie aérospatiale et matériaux pour turbines
NITRURES Azote plus un élément comme le niobium ou le silicium (NbN, Si ₃ N ₄)	Éléments de moteur en céramique, roulements à billes, boucliers de sécurité pour l'industrie nucléaire
HYDRURES Hydrogène plus un ou plusieurs métaux (MgH ₂ , ZrNiH ₃)	Stockage de l'hydrogène, matériaux catalytiques
OXYDES Oxygène plus un ou plusieurs métaux (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} , La _{0,8} Sr _{0,2} CrO ₃)	Supraconducteurs à haute températures, détecteurs de gaz, cellules pour combustible
CHALCOGÉNURES ET PHOSPHURES Soufre ou phosphore plus un métal comme le molybdène ou le gallium	Lubrificateurs à haute température, semi-conducteurs

points chauds en sélectionnant rationnellement les conditions expérimentales. Les réactions entre le titane et l'aluminium, par exemple, produisent moins de points chauds – et donc une variation de température inférieure, le long du front de combustion – lorsque nous augmentons la densité de la pastille réactive (obtenue par compression des poudres réactives).

Nos méthodes d'analyse des réactions de combustion ont conduit à l'invention rationnelle de nouveaux matériaux. Par exemple, nous avons amélioré les alliages à base de cobalt dont on fait des implants orthopédiques, tels les hanches et les genoux artificiels. Pendant des décennies, on

a fabriqué ces implants en fondant des lingots d'alliages dans des fours et en coulant le métal liquide dans des moules de forme appropriée. Avec mes collègues, j'ai voulu rendre les alliages plus résistants et supprimer certaines étapes de fabrication en synthétisant directement les implants dans leur moule. La mise au point de cette technique directe et d'autres applications de la synthèse par combustion durera plusieurs années, mais la vidéomicroscopie rapide et les autres méthodes d'analyse des réactions ultra-rapides feront sans doute de la synthèse par combustion solide une des méthodes principales de production des matériaux performants.

Arvind VARMA est professeur à l'Université de Notre-Dame.

A.G. MERZHANOV, *Self-Propagating High-Temperature Synthesis : Twenty Years of Search and Findings*, in *Combustion and Plasma Synthesis of High-Temperature Materials*, sous la direction de Z.A. Munir et J.B. Holt, VCH Publishers, 1990.

A. VARMA, A.S. ROGACHEV, A.S. MUKA-

SYAN et S. HWANG, *Combustion Synthesis of Advanced Materials Principles and Applications*, in *Advances in Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 79-226, 1998.

A. VARMA, A.S. ROGACHEV, A.S. MUKASYAN et S. HWANG, *Complex Behavior of Self-Propagating Reaction Waves in Heterogeneous*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n° 19, pp. 11053-11058, 1998.



L'œuf et la sphère

FRANÇOIS APÉRY

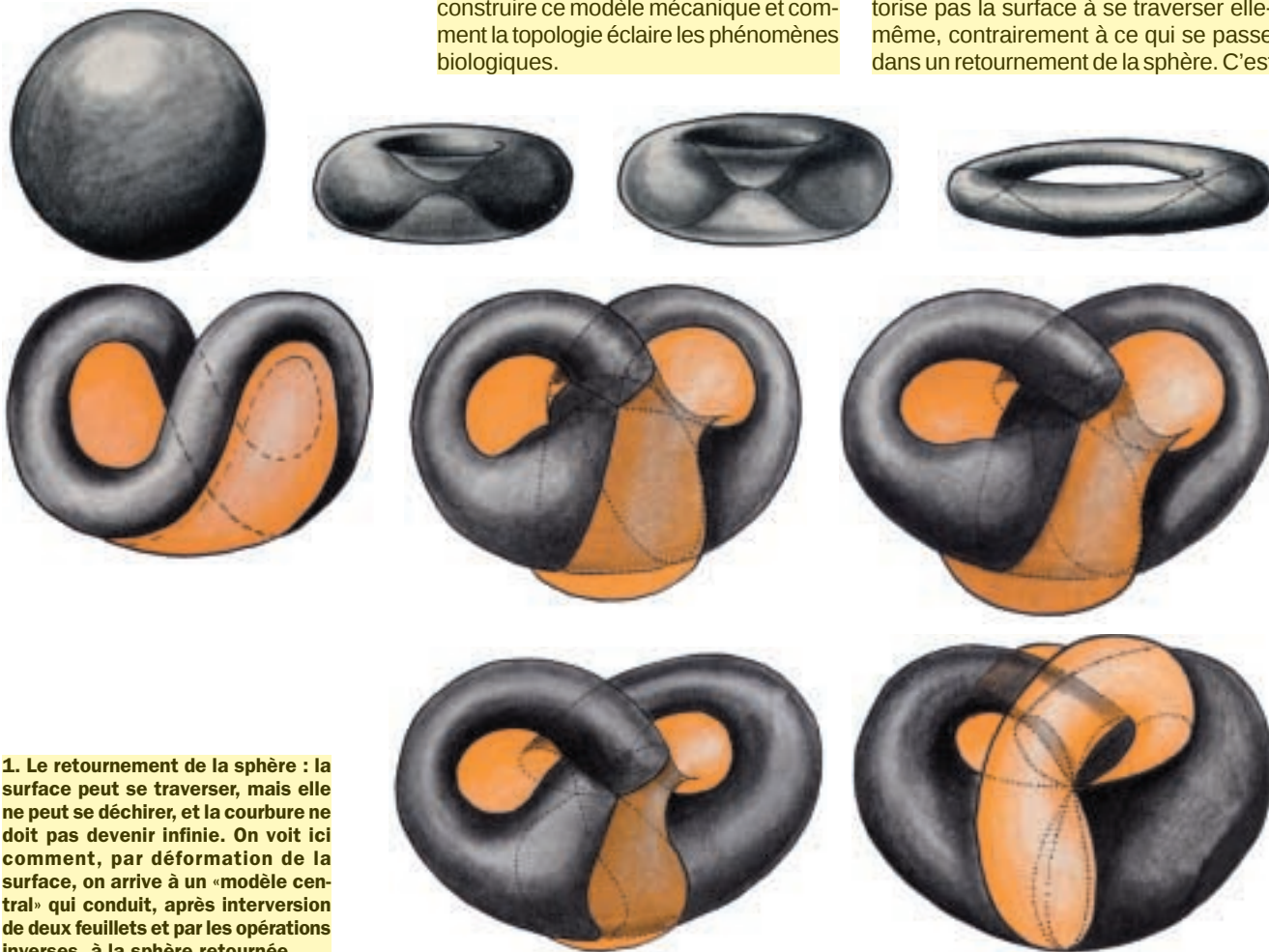
Un modèle mécanique des premières étapes de la formation de l'embryon constitue également un début de solution au problème mathématique de retournement de la sphère.

Au moment de la ponte, l'œuf de grenouille mesure moins de deux millimètres de diamètre. Après la fécondation, une division verticale forme deux cellules symétriques. La division suivante, qui est encore verticale, mais perpendiculaire à la précédente, produit quatre cellules en quartiers d'orange. Puis une division dans le plan équatorial engendre huit cellules. Progressivement l'œuf prend une allure de mûre, d'où le nom de morula (voir la figure 3). À ce stade, la symétrie se perd, et les cellules s'écartent du centre pour former une sphère emplie de liquide, la blastula. Puis

commence l'opération nommée gastrulation, qui conduit au futur estomac de l'être vivant.

Cette étape intéresse le mathématicien qui étudie l'opération «topologique» de retournement de la sphère. Dans ce retournement que nous détaillerons plus loin, on cherche à faire venir la face interne d'une sphère à l'extérieur, et *vice versa* ; on admet que la surface peut se traverser, mais les parties coupées doivent se recoller. Il est tout à fait surprenant qu'un système mécanique utilisé pour étudier le retournement de la sphère décrive aussi le phénomène de gastrulation. Nous verrons ici comment construire ce modèle mécanique et comment la topologie éclaire les phénomènes biologiques.

Contrairement à ce qu'aurait espéré l'amateur de simplicité, l'estomac n'est pas la cavité de la blastula : si la bouche et l'anus étaient seulement des trous dans la sphère de la blastula, le milieu intérieur s'échapperait, et il n'y aurait pas de distinction entre le milieu intérieur et le milieu extérieur. La gastrulation conduit à la formation simultanée de l'estomac et de l'orifice anal par une déformation géométrique sans déchirure ni création d'anse. Les mathématiciens nomment isotopie ce type de déformations continues qui conservent la topologie, c'est-à-dire la forme de l'objet considéré comme déformable. Notons que l'isotopie n'autorise pas la surface à se traverser elle-même, contrairement à ce qui se passe dans un retournement de la sphère. C'est



1. Le retournement de la sphère : la surface peut se traverser, mais elle ne peut se déchirer, et la courbure ne doit pas devenir infinie. On voit ici comment, par déformation de la surface, on arrive à un «modèle central» qui conduit, après interversion de deux feuillets et par les opérations inverses, à la sphère retournée.

Pour la Science/Dessins de J.-P. Petit

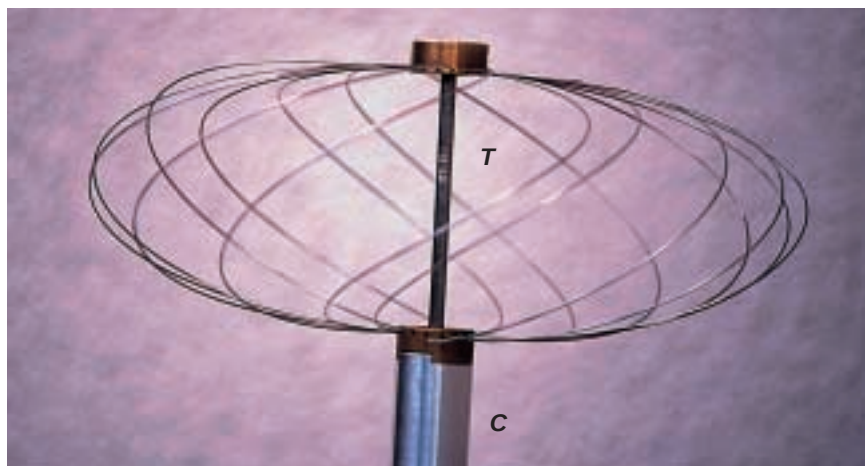
ce qui rend la gastrulation plus simple à décrire.

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 .