

EXPLIQUER LA VIE...

EFFETS D'OSMOSE

Richard-Emmanuel EASTES* (Ecole normale supérieure - Paris)

Clovis DARRIGAN (Université de Pau et des Pays de l'Adour - Pau)

Xavier BATAILLE (Ecole nationale de chimie, physique et biologie - Paris)

Photographie : Stéphane QUERBES (Paris)

Parmi les grands défis lancés à la science au XXe siècle, celui d'*Expliquer la Vie* a tenu en haleine des générations de chercheurs issus de toutes les disciplines. En inventant la « biologie synthétique », Stéphane Leduc (1853 – 1939), nommé Professeur à l'Ecole de Médecine de Nantes en 1883, pensait y être parvenu. Un siècle plus tard, sous le regard et la technique de notre photographe, nous avons reproduit ses expériences historiques et tenté de révéler à nouveau toute la splendeur des formes et des couleurs que sa théorie lui avait permis d'engendrer.

Le propre des sciences expérimentales est d'observer le monde, d'agir sur lui pour l'interroger et étendre le champ des observations possibles puis, conjointement, de le modéliser pour l'expliquer. Mais pour les physiciens, les chimistes et les biologistes, expliciter l'univers, la matière et la vie, c'est surtout essayer de les comprendre pour pouvoir ensuite les utiliser, les contrôler, les reproduire, voire les recréer.

Mercredi 21 juin 2006, 6h54. Entrée en gare de Pau du train de nuit en provenance de Genève.

Dans l'aube naissante de cette petite ville pyrénéenne, c'est dans une entreprise de ce genre que nous nous apprêtons à nous lancer, nous chimistes, depuis toujours fascinés par la puissance quasi démiurgique de notre discipline. Dans la sérénité estivale d'un laboratoire universitaire désaffecté, après plusieurs semaines de documentation et de préparation, les jours qui viennent vont en effet être consacrés à la reproduction de l'une des plus extraordinaires conquêtes auxquelles se soient livrés nos prédécesseurs : recréer la vie.

Les expériences historiques de Stéphane Leduc¹, que nous nous apprêtons à revisiter, sont peu ou mal connues. Tout au plus les vulgarisateurs de la chimie exposent-ils de temps en temps à des publics médusés, les étonnantes formes et couleurs de ses croissances osmotiques, mieux connues de nos jours sous la dénomination de « jardins chimiques » (figure 1)². Elles sont pourtant relativement simples à réaliser, du moins dans leur version élémentaire, comme en témoigne le chapitre *Récréations chimiques* de l'*Oncle Tungstène* d'Oliver Sacks³ :

« Je réquisitionnai notre table de cuisine pour m'y fabriquer un « jardin chimique » en ensemençant une solution sirupeuse de silicate de sodium ou de soude avec des sels de fer, de cuivre, de chrome et de manganèse aux diverses couleurs : il en résulta non point des cristaux, mais une prolifération quasi végétale de vrilles qui se distendirent, bourgeonnèrent et éclatèrent en se remodelant sans arrêt sous mes yeux ».



Figure 1 : Un exemple de « jardin chimique ».
Il aura fallu 30 minutes à ce mélange de cristaux pour s'épanouir en filaments enchevêtrés.

Nous rassemblons nos ustensiles, vérifions la propreté de nos béchers, erlenmeyers et autres fioles jaugées, puis disposons précautionneusement sur notre pailleuse les petits flacons qui, tout à l'heure, délivreront les sels métalliques que nous avons soigneusement sélectionnés (figure 2). De son côté, notre photographe étudie la configuration de la salle, la provenance de la lumière, et déploie ses projecteurs, écrans et appareillages sophistiqués. Mais surtout, nous entreprenons de préparer le composant essentiel de toutes nos expériences, le « liquide vital » des croissances osmotiques : la solution concentrée de silicate⁴ de sodium ou « liqueur de cailloux »⁵, qui jouera le rôle de « solution mère ».



Figure 2 : Quelques uns des sels métalliques utilisés pour élaborer des jardins chimiques.

Nous inspirant de son ouvrage principal publié en 1910, *Théorie physico-chimique de la vie et générations spontanées* (figure 3)⁶, éludant volontairement toute une première partie sur les figures de diffusion obtenues dans l'eau salée avec de l'encre de Chine et sur les champs de cristallisation en milieux colloïdaux, nous adoptons le cheminement de Leduc au moment où il caractérise les premières « cellules osmotiques » et la « morphogénèse »⁷. Il utilise pour ce faire du chlorure de calcium « fondu », que nous obtenons en chauffant le produit commercial hydraté : nous observons une première ébullition, correspondant à l'évaporation de l'eau de cristallisation, puis la fusion vers 770°C. En fait, le chlorure de calcium devient pâteux et on le retire du creuset avec une spatule, pour former des blocs amorphes. Cette fusion permet d'éliminer les bulles d'air emprisonnées, qui gêneraient la croissance en cellule isotrope.

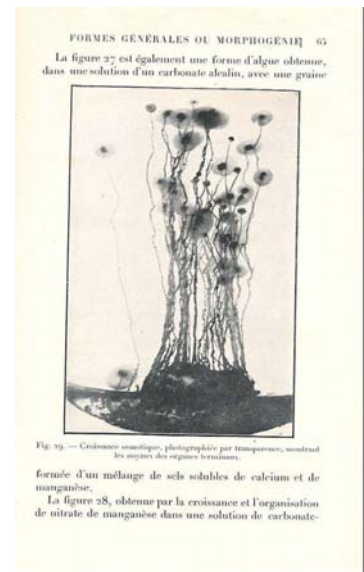
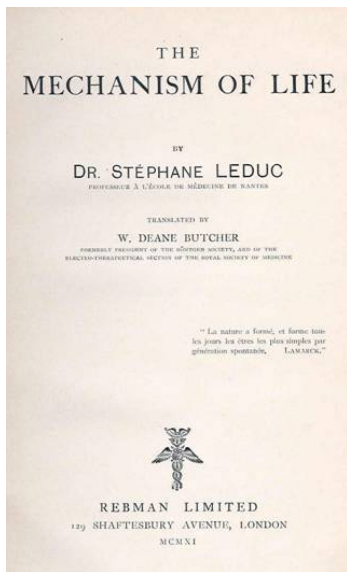


Figure 3 : Trois pages caractéristiques des versions anglaise et française de l'ouvrage de Stéphane Leduc

En guise d'alternative pour la solution mère de silicate de sodium, Leduc préconise la préparation de solutions saturées de diverses natures. Mais la notion de « saturation » est chez lui relativement floue et nous obtenons les meilleurs résultats avec des solutions saturées diluées cinq fois. Les solutions saturées sont en effet trop visqueuses et, à l'inverse, nous nous apercevons plus tard que dans une solution diluée dix fois, les cellules s'affaissent lamentablement. Il s'agit là d'une difficulté que nous rencontrerons souvent par la suite : la description des recettes de Leduc manque de la précision à laquelle le chimiste d'aujourd'hui est habitué, et les unités utilisées il y a un siècle ne lui évoquent parfois plus grand-chose...

Ce faisant, nous nous forçons progressivement la conviction que Stéphane Leduc a acquis, au cours de deux décennies de travail acharné et répétitif, une maîtrise et une intuition prodigieuses des substances et phénomènes sur lesquels il a fait porter sa curiosité expérimentale. Il faut nous rendre à l'évidence : il nous sera difficile d'acquérir cette sensibilité, indescriptible sous forme de modes opératoires, en seulement quelques jours de travail, comme il serait impossible à un peintre débutant de reproduire en la copiant la finesse d'Ingres ou la précision de Léonard de Vinci...



Figure 4 : Cellule osmotique produite par l'introduction d'un bloc de chlorure de calcium fondu dans une solution très diluée. Les aiguilles sont des cristallisations microscopiques, invisibles à l'œil nu.

Après quelques efforts, nous obtenons tout de même des résultats très satisfaisants (figure 4) mais nos créations sont éphémères : les plus belles cellules finissent par se percer, donnant naissance à d'étranges arborescences (figure 5). L'émergence de ces cellules primordiales ne constituera donc pas le résultat le plus spectaculaire de notre série d'expériences ; toutefois, elle nous permettra de comprendre et de visualiser simplement le phénomène de « croissance osmotique » que, dans les jours suivants, nous revisiterons avec une pléiade de sels métalliques différents.

Une fois introduit dans la solution mère, le sel métallique (chlorure de calcium et, par la suite, sels de fer, nickel, cuivre, manganèse, cobalt etc.) s'y dissout. Les ions métalliques libérés forment alors immédiatement, en entrant en contact avec les ions silicates, une membrane solide autour du cristal initial⁸. La « cellule » est née.

Cette membrane est semi-perméable : elle laisse passer l'eau mais aucune autre substance. Par suite, elle délimite deux domaines : une solution intérieure contenant uniquement le sel métallique dissout et une solution extérieure contenant uniquement le silicate de sodium (dissout également). Pour des raisons que seule la thermodynamique chimique est capable d'expliquer, cette différence de composition conduit à un afflux d'eau de l'extérieur vers l'intérieur, à travers la membrane. On nomme ce phénomène « osmose », ce qui a conduit Leduc à conférer à la cellule sa qualité d'« osmotique ».

Reste à comprendre la croissance de la cellule : cette entrée d'eau induit une augmentation de la pression interne, puis la rupture de la membrane qui se reforme aussitôt... mais un peu plus loin. Le phénomène se produisant en continu et sur tout son pourtour, la cellule croît.

Dans la plupart des cas cependant, la densité de la solution intérieure est plus faible que celle du milieu extérieur : la rupture se fait donc préférentiellement vers le haut. Cette fois, la croissance est ascendante, filamenteuse et arborescente⁹.

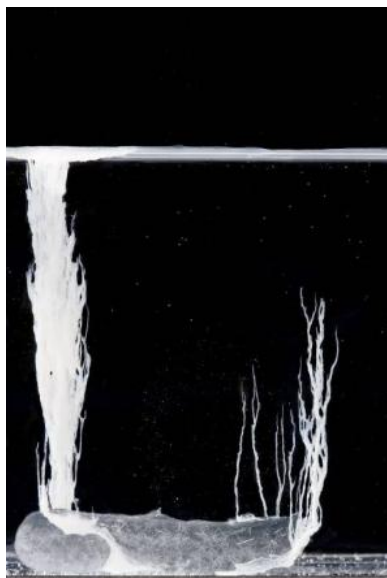


Figure 5 : Arborescence issue de la perforation d'une cellule osmotique de chlorure de calcium fondu.

Fin 1910. Laboratoire de l'Ecole de Médecine de Nantes.

Avec ferveur et attention, Stéphane Leduc relit le texte de la traduction anglaise de sa *Théorie physico-chimique de la vie* qui va paraître dans quelques mois sous le titre *The mechanism of life* (figure 3)¹⁰.

La préface de W. Deane Butcher, en particulier, le ravit :

« Il n'y a, je crois, aucun spectacle plus extraordinaire et plus éclairant que celui d'une croissance osmotique – une masse grossière de matière brute inanimée en train de germer devant nos yeux, de produire un bourgeon, une tige, une racine, une rameau, une feuille et un fruit, sans aucune stimulation provenant d'un germe ou d'une graine, sans même la présence de matière organique. Car ces croissances minérales ne sont pas seulement des cristallisations, comme le pensent certains [...]. Elles imitent les formes, la couleur, la texture et même la structure microscopique d'une croissance organique, de manière si parfaite que cela « trompe les élus mêmes » ».

Mais qui est ce Stéphane Leduc (figure 6), totalement tombé dans l'oubli et seulement récemment reconsidéré par Evelyn Fox Keller¹¹ ? Né à Nantes, Licencié ès-Sciences et docteur en Médecine, il fut professeur à l'Ecole de Médecine de Nantes. Comme ceux de Jöns Jacob Berzélius (1779-1848)¹² que nous ré-évoquerons plus loin, les travaux de Leduc portèrent notamment, à un siècle d'écart, sur l'utilisation de l'électricité comme support thérapeutique. Promoteur de l'électrothérapie¹³, il découvrit ainsi que certaines formes d'épilepsies pouvaient être traitées par des électrochocs, ou qu'une anesthésie générale pouvait être obtenue par l'application de courant électrique. Il s'attacha également à explorer le rôle des ions dans l'organisme. Mais il est plus connu pour ses travaux sur la biologie synthétique, évoqués dans le présent article.

Dans le Dictionnaire de biographies françaises, Stéphane Tirard écrit¹⁴ : « Considérant que l'être est constitué par sa forme et sa structure, Leduc [y] affirme que l'étude des forces responsables de l'acquisition des formes caractéristiques du vivant est une étape préalable à toute véritable compréhension du vivant. L'étude des modalités de la reproduction devra suivre grâce aux méthodes de cette même « biologie synthétique ». Ainsi au-delà des simples analogies de forme Leduc explique la formation de ces structures en s'appuyant sur une conception de la vie, selon laquelle celle-ci est "une forme particulière du mouvement de la matière, un ensemble harmonique de mouvements de liquides comme une manifestation des mêmes énergies moléculaires qui animent la matière non vivante". Stéphane Leduc nie l'existence de toute frontière infranchissable entre la matière inerte et le vivant. Pour lui, "toute la matière à la vie en soi, à l'état actuel ou à l'état potentiel". Fort de ce principe, il défend très activement la méthode qui consiste à produire expérimentalement des structures minérales semblables à des structures vivantes et prétend qu'il est ainsi sur le chemin expérimental de la synthèse du vivant ».

Notons que Leduc n'était pas le premier à créer ce type de paysages mi-lunaires, mi-vivants mais chimiques. Au cours des XVII^e et XVIII^e siècle, Erasme Bartholin (1625-1698), Louis Lémery (1677-1743, fils de Nicolas Lémery) et d'autres expérimentateurs avaient en effet déjà créé les « végétations chimiques » par croissance électrolytique. Ainsi germèrent les premiers arbres de Diane ou de Mars¹⁵.

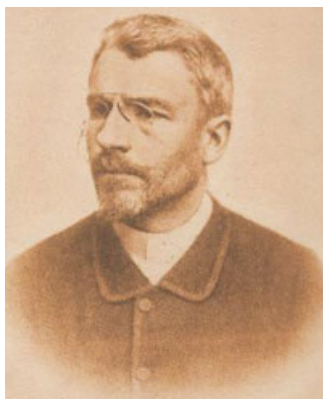


Figure 6: Stéphane Leduc¹⁶.

A ce stade, il convient de resituer la place des travaux de Leduc sur la biologie synthétique¹ dans l'histoire de la biologie et de la chimie. Depuis l'Antiquité, avec les philosophes tels Aristote ou Lucrèce, en passant par le Moyen-Age avec Albert le Grand (~1200-1280), ou en période renaissance avec Van Helmont (1580-1644) jusqu'à la fin du XIX^e siècle, deux dogmes se perpétuent : l'origine de la vie réside dans la génération spontanée, conséquence de l'existence d'une force vitale. Certes ses prédécesseurs chimistes sont-ils parvenus à faire admettre à la communauté scientifique qu'il était possible de synthétiser artificiellement des substances jusqu'ici exclusivement produites par les êtres vivants (voir encadré). Mais en venant combler le fossé théorique qui séparait jusqu'ici le vivant du non-vivant, en proposant une nouvelle version du « chaînon manquant » entre l'inorganique et l'organique, ravivant ainsi les espoirs déçus des anti-vitalistes après le trépas du *Bathybius Haeckelii*¹⁷, ses expériences viennent d'avoir un écho retentissant et beaucoup de ses lecteurs considèrent qu'ils jettent un éclairage déterminant sur la nature et l'origine de la vie.

En effet, comme l'explique Fox Keller : « *Les modèles de Leduc répondaient à un besoin qui était largement ressenti à son époque, même s'il ne l'est plus à la nôtre : ils démontraient que des formes complexes (comparables en complexité à celles que l'on trouve dans le monde vivant) pouvaient être engendrées par des processus physiques et chimiques bien identifiés* »¹⁸, ce en quoi ils contribuaient à déraciner les vestiges persistants du vitalisme¹⁹.

Dans une lettre restée célèbre datée du 22 février 1828, le chimiste allemand Friedrich Wöhler (1800-1882) apprend à son mentor Jöns Jacob Berzélius (1779-1848) qu'il vient de synthétiser un produit naturel organique, l'urée, et ce par le traitement de l'isocyanate de plomb par du chlorure d'ammonium, deux produits d'origine inorganique. « Je dois vous dire que je sais faire de l'urée sans l'aide d'un rein, d'un homme ou d'un chien. Le cyanate d'ammonium est l'urée ».

Même si cette découverte ne surprend pas vraiment les chimistes de l'époque (l'urée est un corps excrété plutôt que participant au monde vivant), l'accueil réservé à cette découverte reste timide et les biologistes ne donnent pas suite. Il n'en reste pas moins qu'à partir des années 1850, un nombre considérable de molécules naturelles vont être (re)produites à partir de composés inorganiques. Le chimiste qui laissera son nom pour ces avancées est le très critiqué Marcellin Berthelot (1827-1907)²⁰, chimiste connu pour son anti-atomisme et devenu l'apôtre de la synthèse organique. Les nombreuses synthèses qu'il effectua sont en effet marquantes. Citons notamment l'expérience de l'œuf électrique (1866) au cours de laquelle Berthelot produit de l'acétylène à partir de carbone et de dihydrogène, la synthèse du benzène par pyrolyse de l'acétylène (1863) et les 53 000 agitations (sic) nécessaires pour obtenir de l'éthanol en mettant contact de l'éthylène avec de l'acide sulfurique, après hydrolyse (1855). Bien que s'étant largement inspiré des travaux connus de son époque, Berthelot a participé activement à l'éveil de la chimie organique en créant les premières synthèses totales, préfigurant ce que de géniaux chimistes tels Robert Burns Woodward, (1917-1979) élèveront un siècle plus tard au rang d'art.

En cette seconde moitié de XIX^e siècle, copier la nature est alors une activité qui occupe beaucoup de chimistes ; la copier pour mieux la comprendre. Rappelons à ce titre le fameux extrait de la conférence intitulée « En l'an 2000 » que Berthelot prononça à l'occasion du discours du Banquet de la Chambre syndicale des produits chimiques, le 5 avril 1894 : « [L]a synthèse des graisses et des huiles est réalisée depuis quarante ans, celle des sucres et des hydrates de carbone s'accomplit de nos jours, et la synthèse des corps azotés n'est pas loin de nous. Ainsi le problème des aliments, ne l'oublions pas, est un problème chimique. Le jour où l'énergie sera obtenue économiquement, on ne tardera guère à fabriquer des aliments de toutes pièces, avec le carbone emprunté à l'acide carbonique, avec l'hydrogène pris à l'eau, avec l'azote et l'oxygène tirés de l'atmosphère. Ce que les végétaux ont fait jusqu'à présent, [...] nous l'accomplissons déjà et nous l'accomplirons bien mieux, d'une façon plus étendue et plus parfaite que ne le fait la nature : car telle est la puissance de la synthèse chimique.

Un jour viendra où chacun emportera pour se nourrir sa petite tablette azotée, sa petite motte de matière grasse, son petit morceau de fécule ou de sucre, son petit flacon d'épices aromatiques, accommodés à son goût personnel ; tout cela fabriqué économiquement et en quantités inépuisables par nos usines ; tout cela indépendant des saisons irrégulières, de la pluie, ou de la sécheresse, de la chaleur qui dessèche les plantes, ou de la gelée qui détruit l'espoir de la fructification ; tout cela enfin exempt de ces microbes pathogènes, origine des épidémies et ennemis de la vie humaine. [...]. L'homme gagnera en douceur et en moralité, parce qu'il cessera de vivre par le carnage et la destruction des créatures vivantes »²¹.

C'est ainsi que, née de considérations sur les gaz dans la deuxième moitié du XVII^e siècle, après un XIX^e siècle laborieux d'édification de ses concepts, de ses théories et de son vocabulaire, la chimie va se construire et aboutir, à l'aube du XX^e siècle, à une discipline en plein essor, riche de la chimie des colorants et des premiers médicaments issus de l'industrie chimique naissante.

Or en Angleterre et aux Etats-Unis, contrairement à la France où il rencontre des oppositions au sein de l'Académie des Sciences depuis 1907 parce qu'ils remettent à l'honneur la génération spontanée²², les récents travaux de Louis Pasteur (1822-1895) sur la question n'occupent pas encore suffisamment de place dans l'opinion pour faire obstacle à ses assertions selon lesquelles la vie aurait pu naître à la faveur d'heureuses rencontres entre substances chimiques. Et de fait, ses efforts sont largement relayés dans la presse scientifique anglo-saxonne entre 1905 et 1913.

Mais bien vite, les idées de Leduc seront balayées par la convergence de nouvelles connaissances issues de la chimie, de l'astronomie et, bien sûr, de la génétique ; c'est pourquoi ce sont les écrits des philosophes et historiens des sciences qui rendent le plus justice à ces théories qui, aujourd'hui, nous apparaissent comme de naïves élucubrations. Une contestation, d'abord minoritaire puis de plus en plus forte, avait d'ailleurs commencé à émerger dès la publication de ses travaux, à tel point qu'en 1907, Henri Bergson (1859-1947) s'opposait déjà à ce genre d'idées dans son *Evolution créatrice*.

Même s'il ne cite par Leduc directement, il écrit, critique²³ : « *Des chimistes ont fait remarquer qu'à ne considérer même que l'organique, et sans aller jusqu'à l'organisé, la science n'a reconstitué jusqu'ici que les déchets de l'activité vitale ; les substances proprement actives, plastiques, restent réfractaires à la synthèse.* » et (page 35) « *Quant à l'imitation artificielle de l'aspect extérieur du protoplasme, doit-on y attacher une réelle importance théorique, alors qu'on n'est pas encore fixé sur la configuration physique de cette substance ? De le recomposer chimiquement il peut encore moins être question pour le moment. [...] Mais ce qui est instructif par-dessus tout, c'est de voir combien l'étude approfondie des phénomènes histologiques décourage souvent, au lieu de la fortifier, la tendance à tout expliquer par la physique et la chimie* ». Puis enfin (page 36) : « *En résumé, ceux qui ne s'occupent que de l'activité fonctionnelle de l'être vivant sont portés à croire que la physique et la chimie nous donneront la clef des processus biologiques. Ils ont surtout affaire, en effet, aux phénomènes qui se répètent sans cesse dans l'être vivant, comme dans une cornue. Par là s'expliquent en partie les tendances mécanistiques de la physiologie. Au contraire, ceux dont l'attention se concentre sur la fine structure des tissus vivants, sur leur genèse et leur évolution, histologistes et embryogénistes d'une part, naturalistes de l'autre, sont en présence de la cornue elle-même et non plus seulement de son contenu* ».

Plus brutalement, vingt ans plus tard, Edouard Leroy (1870-1954), Professeur au Collège de France, écrivait au sujet de la « prétendue biogenèse » de Leduc : « *On n'a pas imité la vie, même de loin [...]. Qu'il me suffise de dire que ce sont des effets d'osmose [n'ayant] guère plus de signification dans le problème qui nous occupe, que les fleurs ou ramures de glace dessinées sur les carreaux d'une fenêtre, un jour d'hiver* ». Et lorsqu'Alexandre Oparine (1894-1980) le cite en 1936 dans son *Origine de la vie*, ce n'est que pour noter que la ressemblance entre ces productions et des cellules vivantes n'est « *pas plus grande que la ressemblance superficielle entre une personne vivante et sa statue de marbre* »²⁴.

A la décharge de Leduc, il faut tout de même admettre qu'il est parfois difficile de ne pas y croire (figure 7). Il nous semble même possible de lui trouver des circonstances atténuantes : quoi de plus fascinant, en effet, que de voir se former des structures si proches des éléments naturels et des formes de vies ? La facilité avec laquelle se développent ces structures tubulaires a de quoi surprendre... et faute des connaissances dont nous disposons actuellement sur la nature des phénomènes biologiques, il n'est pas étonnant que Leduc ait pu trouver dans cette spontanéité un aspect naturel.



Figure 7 : Cet escargot n'en est pas un... mais le produit de la croissance osmotique du chlorure de fer (III).

Et pourtant, on ne peut nier qu'en démontrant la capacité de la matière à produire spontanément une extraordinaire complexité, Leduc aura contribué à faire progresser la compréhension de la vie. Cela n'échappe pas à Reinhard Beutner en 1938 qui écrit : « *Nous pouvons apprendre beaucoup de ces structures artificielles périssables. Elles révèlent de manière frappante l'action répandue de forces formatives dont dispose la nature. [...] Le secret de la vie est donc ainsi un peu dévoilé* »²⁵. Juger Leduc à la lumière de ces apports particuliers, sans oublier son étonnante habileté expérimentale, nous semble par suite plus juste que de ne retenir que *l'amateurisme abstrait* dont l'accusait Pierre Thuillier (1927-1998) en 1978. Malgré ses erreurs et sa naïveté enthousiaste, il nous semble même digne d'une certaine réhabilitation.

Celle que nous lui devons n'est pas sans analogie avec ces lignes du *Docteur Faustus* de Thomas Mann, alors qu'il évoque justement les cultures chimiques et leur nature « profondément mélancolique » : « [...] le père *Leverkuhn* nous ayant demandé ce que nous en pensions, nous répondîmes timidement que ce ne pouvaient être des plantes, sur quoi il déclara : « Non, il n'en est rien, elles font semblant ; mais leur mérite n'en est pas moindre. Précisément, le fait qu'elles simulent et s'y efforcent de leur mieux est digne de toute notre estime. » »²⁶. Et digne de toute notre estime également est la ténacité de Leduc ; certes il s'est trompé, mais son mérite, à lui non plus, n'en est pas moindre. E. Fox Keller écrit notamment à ce sujet¹¹ : « *Les ambitions que reflètent ces efforts, ainsi que l'intérêt qu'ils ont suscité à l'époque, représentent un épisode de l'histoire de l'explication biologique et sont instructifs, exactement à proportion de ce qui peut nous paraître aujourd'hui comme leur absurdité* ».

Jeudi 22 juin 2006, 9h00. Université de Pau.

Après une première journée d'explorations et de tâtonnements expérimentaux, nous décidons d'être plus systématiques et de tester toutes les combinaisons possibles en introduisant, dans chacune des diverses solutions que nous avons préparées, les différents sels métalliques dont nous disposons. Ce faisant, nous obtenons toute une gamme de résultats, du plus prometteur au plus décevant. Nous nous apercevons également que, de toutes les préparations, c'est la simple solution de silicate de sodium qui nous donne les meilleurs résultats et que toutes les autres -mélanges de diverses solutions de concentrations variées- n'ont probablement été imaginées par Leduc que dans des optiques très spécifiques destinées à conforter sa théorie : la création délibérée de formes ressemblant à des êtres vivants tels que champignons, coquillages, feuilles, madrépores et autres vers annelés.

Car c'est pour lui une conviction inextinguible : « *Est-il possible de penser et d'admettre que les conditions si simples de la croissance osmotique ne se soient pas trouvées réalisées bien des fois dans le passé de la terre ?* ». Ce dont il déduit que « *des millions de formes éphémères ont du ainsi se former pour donner la nature actuelle dans laquelle le monde vivant [représente] la matière ainsi organisée par osmose* »²⁷. Il renouvèle ainsi la dimension quasi-métaphysique qu'en 1827 déjà, René Joachim Henri Dutrochet (1776-1847) avait attribué au phénomène de l'osmose : « *[l'osmose] est le point par lequel la physique des corps vivants se confond avec la physique des corps inorganiques* »²⁸.



Figure 8 : Le fond étoilé des bulles d'air adhérentes aux parois donne une ambiance sidérale au mouvement du sulfate de manganèse.

Le phénomène de l'osmose a été étudié pour la première fois en 1748 par l'Abbé Jean-Antoine Nollet (1700-1770)²⁹. C'est ensuite René Joachim Henri Dutrochet (1776-1847), physicien, botaniste et physiologiste français qui continuera les études sur l'osmose dans les années 1827-1832, définissant par la même occasion les termes d'endosmose et d'exosmose. S'ensuivront les études faites notamment par Thomas Graham (1805-1869) vers 1854, par Moritz Traube (1826-1894) vers 1864 et par Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer (1845-1920) en 1877. C'est en 1886 que Jacobus Henricus van 't Hoff (1852-1911, premier prix Nobel de chimie en 1901) étudiera l'osmose sous l'angle de la thermodynamique³⁰. L'osmose était donc un phénomène parfaitement connu des scientifiques lorsque Leduc créait ses premières sculptures osmotiques.

Mais tous nos essais ne sont pas vains pour autant ; chacune des expériences que nous réalisons est l'occasion d'observations nouvelles, que nous consignons avec minutie dans notre cahier de laboratoire. Et c'est l'une d'entre elles qui, plus tard, nous permettra de réfuter définitivement un argument de Leduc relatif au mécanisme du type de croissance que nous avons le plus exploré : la croissance vermiforme et filiforme (figures 8, 9 et 10) :

« L'observation la plus élémentaire démontre l'inanité de l'opinion considérant le phénomène comme dû au soulèvement de traînées de précipités amorphes par le dégagement de bulles de gaz, ou bien comme déterminée par les différences de densité, toutes ces circonstances ne sont que des influences accessoires »³¹.

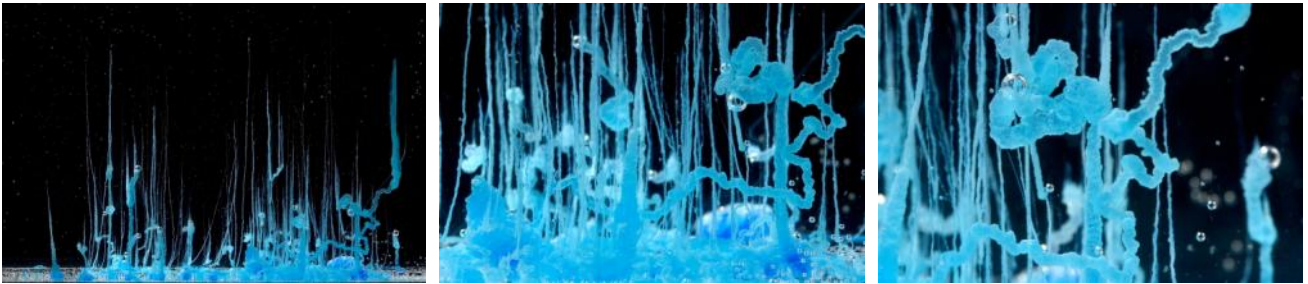


Figure 9 : Différentes étapes de la croissance filiforme de fins cristaux de sulfate de cuivre, illustrant particulièrement bien l'influence des bulles de gaz. Plan large et gros plan.

Or un siècle plus tard, l'observation justement la plus élémentaire, réalisée cette fois par le truchement des techniques modernes de macrophotographie, permet au contraire de mettre en évidence l'influence insigne des bulles d'air, dont la production est stimulée par le dégazage de la solution mère sous l'influence de la chaleur des projecteurs. En effet, lorsqu'elles accompagnent la naissance des tiges arborescentes, ces bulles accélèrent démesurément leurs croissances, avant de s'en dégager parfois brutalement, interrompant de fait le processus³².

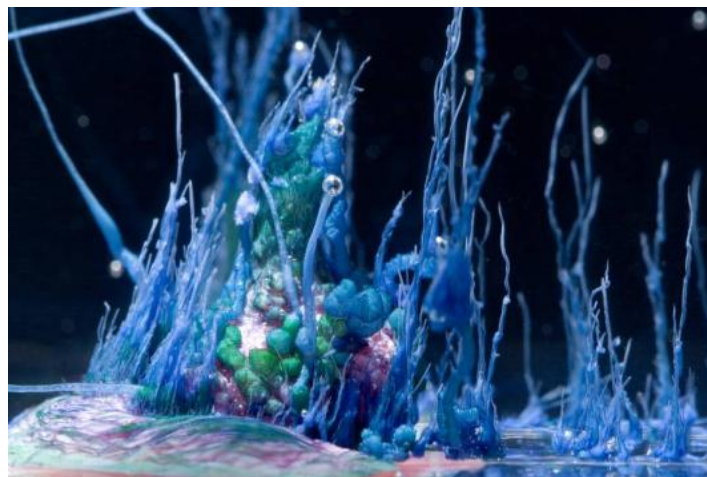


Figure 10 : Toutes les variantes de couleurs et de formes semblent pouvoir être obtenues par l'utilisation du chlorure de cobalt, dont les degrés d'oxydation et le taux d'hydratation contrôlent les teintes.

Certes la poussée est d'abord d'origine osmotique, mais les bulles de gaz peuvent dans certains cas jouer des rôles déterminants, ajoutant leurs effets aux différences de densité qui orientent les croissances dans la direction verticale.

Mais Leduc semblait prêt à tout, même à trahir ses propres observations, pour défendre une idée à laquelle il tenait presque autant qu'à celle de l'origine minérale de la vie : « *De toutes les forces physiques, c'est la pression osmotique et l'osmose qui possèdent la puissance d'organisation la plus remarquable, les facultés morphogéniques les plus étendues* »³³.

Vendredi 23 juin 2006, 7h30. Université de Pau.

Troisième et dernier jour de travail. L'essentiel du travail est fait mais bien des variantes restent à tenter : additions de substances étrangères en cours de croissance, superpositions de « couches » de solution mère de différentes concentrations (figure 11), utilisations de granulés formés par le mélange de différents sels métalliques, entre eux ou avec du sucre en poudre comme le préconise Leduc lui-même... Un millier de photographies ne suffiront pas à reproduire l'infinie diversité des formes et couleurs que les travaux originels de Leduc sont susceptibles de nous offrir (figure 12). Mais au moins compensons-nous cette frustration par la conviction que nous disposons désormais d'une petite partie de son savoir-faire et de son intuition expérimentale.

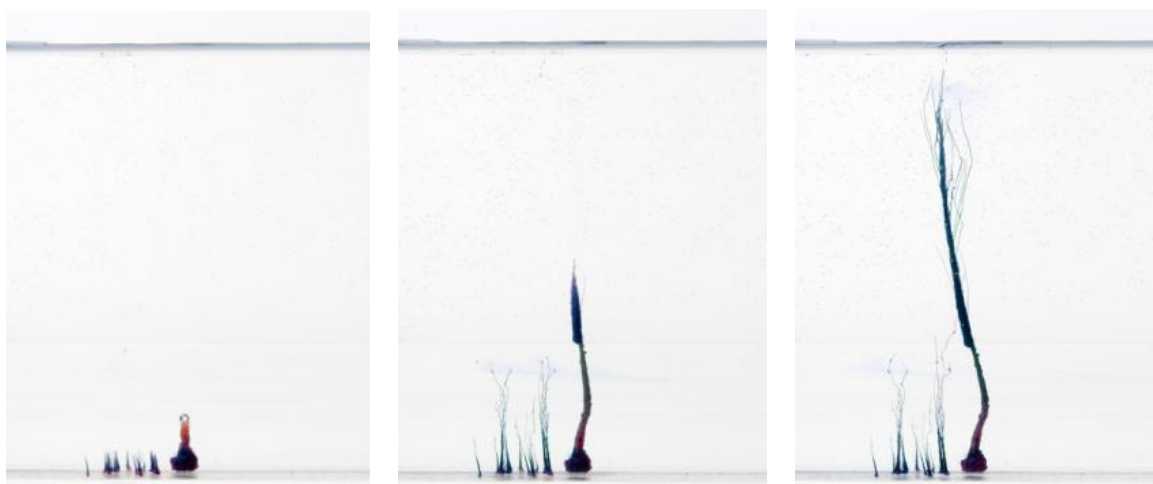


Figure 11 : Deux solutions de silicate de sodium, l'une concentrée, l'autre diluée deux fois, ont été disposées l'une au-dessus de l'autre. L'arborescence de chlorure de cobalt change de structure lorsqu'elle la traverse.

Vu d'aujourd'hui, il est facile de prendre conscience de la déconcertante complexité des mécanismes de la vie. On connaît la composition des cellules, faites de bicouches phospholipidiques, de protéines transmembranaires, d'enzymes, de récepteurs, d'ADN, d'ARN messagers, de transfert, ribosomiques, interférentiels, on sait que les cellules communiquent par des hormones, stéroïdes ou autres, par des neurotransmetteurs divers et variés, le tout étant magnifiquement orchestré par des mécanismes de régulation, des boucles de rétroaction et autres voies de signalisation qui inhibent ou activent tel ou tel processus et qui maintiennent l'autocohérence des êtres vivants. Dans ces conditions, que reste-t-il des travaux de Stéphane Leduc, du point de vue de la recherche contemporaine ? Force est de constater qu'elle n'y puise plus grande inspiration et que hormis l'usage qu'en fit D'Arcy Wentworth Thompson³⁴ (1860-1948), il reste peu de traces de sa vie scientifique. Il en va souvent ainsi : lorsque la science « véritable » se saisit de questions jusqu'alors reléguées à des domaines qualifiés de « parascientifiques », elle fait table rase de toutes les interprétations préexistantes, fussent-elles avoir été invoquées des siècles durant³⁵. Ceci étant, notre travail de réhabilitation fait lentement son œuvre et on retrouve son nom dans la retranscription d'un cours du Professeur Jacques Livage au *Collège de France* à la fin de l'année 2006, sur le thème de la morphogénèse chimique³⁶.



Figure 12 : Parmi tous les sels utilisés, le chlorure de fer est celui dont la croissance est la plus rapide et la plus exubérante. Elle peut se faire par le bas sous forme de plissements ou par le haut, en grappes, donnant naissances aux formes les plus évocatrices.

On retrouve également son nom dans quelques récentes études biomimétiques de matériaux inorganiques³⁷, ou concernant la recherche de traces de vie fossiles³⁸ ou extra-terrestres³⁹. Mais dans des argumentations qui ne lui auraient peut-être pas toujours plu. C'est ainsi que, s'appuyant sur ses travaux, des chercheurs ont récemment montré que certaines concrétions que les paléontologues avaient jusqu'ici considérées comme des fossiles n'étaient probablement rien de plus que des vestiges de formations minérales osmotiques, c'est-à-dire d'origine absolument... inerte.

Comment faire des « jardins chimiques »...

Se procurer une solution commerciale de silicate de sodium et la diluer deux fois avec de l'eau distillée, de préférence dégazée⁴⁰. La filtrer sur verre fritté⁴¹ si elle est troublée par des particules en suspension. L'utiliser dans les heures qui suivent.

La verser dans un récipient en plexiglas⁴², sur une hauteur de 10 à 15 centimètres. La laisser reposer quelques minutes.

Introduire de petits cristaux de sels métalliques bien choisis : CuSO_4 , $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, FeCl_3 , CoCl_2 , MnSO_4 ... Ceux des kits « jardins chimiques » commercialisés par les fournisseurs de produits chimiques conviennent parfaitement. La nature des contre-ions n'est pas déterminante mais des variantes sont obtenues lorsqu'on les substitue les uns aux autres.

Eviter d'amonceler les cristaux, de les déposer trop proches les uns des autres et surtout, de faire bouger le récipient. Observer⁴³.

Bibliographie complémentaire

Une brève biographie de Stéphane Leduc se trouve dans *La santé en Bretagne* (disponible à l'Académie Nationale de Médecine), par Suzanne Ballereau-Dallongeville. Cette dernière y cite la thèse de Leduc à l'Université de Nantes (18xx) mais cet ouvrage semble difficile à trouver. On pourra également lire une bonne critique du travail de Leduc dans "Stéphane Leduc : a-t-il créé des êtres vivants ?" de M. D'Halluin, *Revue des Questions Scientifiques*, XII, 20 juillet 1907, p.5-56.

La *Bibliothèque Nationale de France* (Site François Mitterrand) abrite par ailleurs la retranscription d'une de ses conférences, prononcée sous le patronage de la *Presse Médicale*, le 7 décembre 1906 : « Les bases physiques de la vie et la biogenèse ». On y trouve également l'un de ses premiers rapports sur la synthèse chimique de la vie : « Cytogenèse expérimentale », une communication au Congrès de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences (Ajaccio, 8-14 septembre 1901), dans laquelle il se réfère alors aux Comptes rendus de la séance du 17 juin 1901 de l'Académie de Sciences.

Plus récemment, on trouve par ailleurs des expériences complémentaires à celles que nous avons réalisées dans diverses revues scientifiques, mais sans qu'il y soit question de Stéphane Leduc : injections de solutions d'ions métalliques dans des solutions de silicates⁴⁴ et autres variantes⁴⁵, formations de jardins chimiques en apesanteur⁴⁶ ou en présence de champs magnétiques puissants⁴⁷ ...

Notons enfin que la compréhension de tous ces phénomènes conduit à des applications pratiques dans de nombreux domaines tels que la formation des terres vertes utilisées par le peintre Vermeer⁴⁸, la prise du ciment Portland⁴⁹, la compréhension des réactions produites par les « fumeurs noirs » au fond des océans⁵⁰ ou encore la recherche des origines de la vie⁵¹.



Richard-Emmanuel EASTES, (AUTEUR CORRESPONDANT)

Département d'Etudes Cognitives – TRACES – Les Atomes Crochus
Ecole normale supérieure – 45, rue d'Ulm – 75005 Paris – FRANCE

Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences
Université de Genève - 40 bd du Pont d'Arve - CH-1211 Genève – SUISSE

E-mail : richard-emmanuel.eastes@ens.fr
Site portail personnel : www.cognition.ens.fr/~reeastes/



Clovis DARRIGAN

Laboratoire de Chimie Théorique et Physico-Chimie Moléculaire
IFR rue Jules Ferry – Université de Pau et des Pays de l'Adour – BP 27540 – 64075 Pau cedex

Anima-Science
3, rue d'Armagnac – 64000 Pau

E-mail : clovis.darrigan@univ-pau.fr
Site portail personnel : www.darrigan.net



Xavier BATAILLE

Ecole nationale de chimie, physique et biologie
11 rue Pirandello – 75013 Paris – FRANCE

E-mail: xavierbataille@free.fr

Remerciements et crédits

Toutes les images employées dans le présent article ont été réalisées par Stéphane Querbes (www.stephanequerbes.com) pour Les Atomes Crochus et Anima-Science. Elles ont été publiées pour la première fois en français par le magazine La Recherche dans un article portfolio en septembre 2006⁵².

Remerciements à Michel Morange, Juli Pereto, Francine Pellaud, Luc Allemand, Sophie Coisne et Stéphane Tirard pour leurs relectures attentives et leurs conseils avisés, ainsi qu'au Professeur Jacques Livage pour son invitation à réaliser un séminaire au Collège de France ainsi que pour la divulgation des mécanismes physico-chimiques mis en œuvre dans les croissances osmotiques.

¹ Ces expériences, pionnières dans le large champ de la « vie artificielle », ont été conduites entre 1905 et 1928. S'intéressant plus spécifiquement à la « biologie synthétique », Leduc déclinait le concept de biogenèse de diverses manières, selon l'échelon du vivant qu'il s'attachait à reproduire : cyto-, plasm-, histo-, morpho- et physiogénie. S. Leduc, *Les bases physiques de la vie et la biogenèse*, Masson, Paris, 1906 puis S. Leduc, *La biologie synthétique, étude de biophysique*, A. Poinat, Paris, 1912. Ce dernier ouvrage est accessible en ligne sur www.peiresc.org/bstitre.htm Dernière consultation le 03/11/2007.

² Voir par exemple Cartwright, J. H. E. Garcia-Ruiz, J. M. Novella, M. L. Otolara, F. *Formation of Chemical Gardens*, Journal of Colloid and Interface Science, **256**, 2002, p. 351–359.

³ Sacks, O. *Oncle Tungstène*, Editions du Seuil, 2003, Paris.

⁴ Constituant plus de 27 % de l'écorce terrestre, le silicium est un élément chimique omniprésent en géologie, deuxième élément le plus important après l'oxygène. Isolé pour la première fois par Jöns Jacob Berzélius (1779-1848) en 1824 sous forme amorphe impure par réduction de la silice, c'est Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) en 1854 qui va l'obtenir pur sous forme cristalline. Homologue supérieur du carbone – atome du vivant s'il en est – le silicium occupe une place de choix dans la classification périodique des éléments. Quant aux silicates, ils sont utilisés depuis l'antiquité dans le traitement des maladies vénériennes et donnent leurs vertus aux eaux thermales et autres boues argileuses qui en sont chargées.

⁵ On pourrait décrire ce liquide comme de la soude concentrée dans laquelle on aurait dissout du verre. Il s'agit d'une solution extrêmement corrosive, qui ne séjourne pas dans un récipient en verre sans y laisser de traces et qui, laissée à l'air libre, en absorbe progressivement le dioxyde de carbone et perd ses propriétés. Cela oblige l'expérimentateur à la préparer juste avant utilisation, de même qu'à utiliser de l'eau distillée pour la fabriquer, toute trace de substances étrangères risquant d'y créer un trouble préjudiciable à la prise de vue.

⁶ Edité à Paris par A. Poinat. Dans la suite, cet ouvrage sera désigné par les initiales TPCV. Cet ouvrage a par ailleurs été largement commenté par Pierre Thuillier (1927-1998) il y a une trentaine d'années : P. Thuillier, *Stéphane Leduc a-t-il créé la vie ?* La Recherche 85, janvier 1978.

⁷ Chapitre XI. Leduc emploie alors une technique dérivée de celle du chimiste Moritz Traube (1826-1894) qui, en 1867, avait synthétisé les premières « cellules artificielles » grâce aux propriétés osmotiques de précipités chimiques.

⁸ La formation de la membrane suit en réalité un double processus d'olation et d'oxolation. En effet, lorsque le sel métallique se dissout, les cations libérés dans la solution se lient fortement avec des molécules d'eau qui, en présence de silicates basiques, perdent des protons. Il en résulte une première précipitation d'hydroxydes métalliques, qui forment la face intérieure de la membrane ; c'est l'olation. De plus, le milieu ayant été acidifié par les protons libérés, les ions silicates cessent d'être solubles dans l'eau et précipitent à leur tour, formant cette fois la face extérieure de la membrane ; c'est l'oxolation. Entre la face intérieure et la face extérieure de la membrane, il a en effet pu être mis en évidence un gradient de composition, celle-ci passant graduellement d'un hydroxyde métallique à de la silice presque

pure. Au milieu, les silicates métalliques prédominent. Voir par exemple : Pagano, J. J. Thouvenel-Romans, S. Steinbock, O. *Compositional analysis of copper-silica precipitation tubes*, Phys. Chem. Chem. Phys., **9**, 2007, p. 110-116 ou Collins, C. Zhou, W. Klinowski, J. *A unique structure of $Cu_2(OH)_3.NH_3$ crystals in the 'silica garden' and their degradation under electron beam irradiation*, Chemical Physics Letters, **306**, 1999, p. 145-148.

⁹ Pour la mise en évidence des tubes creux, consulter par exemple : *Characterization of hollow chemical garden fibers from metal salts and water glass*, Journal of Sol-Gel Science and Technology 23, 2002, p. 253-263.

¹⁰ Edité à New York par *Rebman* et à Londres par *Heinemann*.

¹¹ Fox Keller, E. *Expliquer la vie : Modèles, métaphores et machines en biologie du développement*, (*Explaining life: models, metaphors and machines in development biology*) Bibliothèque des sciences humaines, Editions Gallimard, 2004, Paris.

¹² Illustre chimiste suédois dont les critiques étaient redoutées ; il étudia la médecine avant de s'intéresser à la chimie. Sa thèse, publiée en 1802, portait sur l'action physiologique de l'électricité et s'intitulait *De electricitatis galvanicae apparatus cel. Volta excitæ in corpora organica effectus*.

¹³ Ses expériences sur l'inoculation de strychnine et de cyanure sur des lapins « branchés en série » dans un circuit électrique montrent que selon le sens de polarisation, les lapins peuvent être tués ou épargnés.

¹⁴ Tirard, S. in Prevost, M. d'Amat, R. Tribout de Morembert, H. et Lobies J.-P. *Dictionnaire de biographies françaises*, Paris, Librairie Letouzey et Ané (2006).

¹⁵ Fleury, V. *Arbres de Pierre*, Flammarion, **1998**.

¹⁶ www.mairie-orvault.fr/images/photos/0005/img_1151323407967.jpg Dernière consultation le 03/11/2007.

¹⁷ Ensemble granuleux de matière gélatineuse, considéré en 1872 par Thomas Huxley (1825-1895) comme un protoplasme originel suite aux recherches de Ernst Haeckel (1834-1919) sur la composition des fonds marins. Selon leur hypothèse, cette forme la plus simple des organismes imaginables se formait spontanément au fond de l'océan et constituait ainsi un des exemples du chaînon manquant tant recherché, entre l'inerte et le vivant. Voir P. Thuillier, *Requiem pour un Bathybius*, Le petit savant illustré n°3, La Recherche n°62, déc. 1975.

¹⁸ Voir note 11.

¹⁹ Et avec lui presque au même moment (1917), D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948) dans le désormais classique *Forme et Croissance*. Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) lui-même s'était déjà opposé au vitalisme et, en 1809, avait écrit dans sa *Philosophie zoologique* : « La nature n'a pas besoin de lois particulières ; celles qui régissent généralement tous les corps lui suffisent parfaitement pour cet objet ». D'A.W. Thompson, *Forme et croissance*, édition abrégée, Edition du Seuil/CNRS, Paris, (1994).

²⁰ Jacques J. Berthelot, *autopsie d'un mythe*, Belin, 1987.

²¹ Berthelot M. *Science et morale*, Calmann-Lévy, Paris, p. 512-513, **1896**.

²² Le bureau de l'Académie des Sciences décidera même d'exclure ses recherches de ses *Comptes Rendus*, sanctionnant ainsi ses affirmations impardonnables.

²³ Bergson, H. *L'évolution créatrice*, PUF, coll. Quadrige (1907), p. 34.

²⁴ Oparin, A. I. *The Origin of Life*, Macmillan, New York [1936] (1938), p. 57.

²⁵ Beutner, R. *Life's Beginning on the Earth*, Williams&Wilkins, Baltimore (1938).

²⁶ Mann, T. *Le Docteur Faustus*, Albin Michel, Paris (1950).

²⁷ TPCV, page 202.

²⁸ René Joachim Henri Dutrochet (1776-1847) cité par Pierre Thuillier (1927-1998), *Annales de chimie et de physique*, 35 (1827), page 400.

²⁹ L'abbé Nollet est connu pour ses travaux sur l'électricité, et notamment pour ses controverses avec Benjamin Franklin (1706-1790). Il étudia en effet l'osmose entre des mélanges d'eau et d'éthanol à travers des vessies animales. On peut ici souligner une filiation assez curieuse puisque l'Abbé Nollet est aussi l'auteur, comme Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) et Stéphane Leduc, de travaux sur l'électrothérapie.

³⁰ Pour plus d'informations, se reporter au célèbre ouvrage de Wilhelm Ostwald : *L'évolution d'une science, la chimie*, Flammarion, 1916, p. 97-109.

³¹ TPCV, page 149.

-
- ³² Cette impression est confirmée par la publication suivante : Thouvenel-Romans, S. Pagano, J. J. Steinbock, O. *Bubble guidance of tubular growth in reaction precipitation systems*, Phys. Chem. Chem. Phys., **7**, 2005, p. 2610.
- ³³ TPCV, page 152.
- ³⁴ Voir ci-dessus la note 19, relative aux travaux de D'Arcy Wentworth Thompson.
- ³⁵ Tel a été le cas de l'appropriation par la science des « pierres de nuages » transformées en météorites par Jean-Baptiste Biot (1774-1862) lors d'un discours à l'Académie des Sciences en 1803.
- ³⁶ Le diaporama de ce cours est disponible à la page www.labos.upmc.fr/lcmcp/livage/cours_college.html Dernière consultation le 03/11/2007.
- ³⁷ Garcia-Ruiz, J. M. Hyde, S. T. Carnerup, A. M. Christy, A. G. Van Kranendonk, M. J. Welham, N. J. *Self-Assembled Silica-Carbonate Structures and Detection of Ancient Microfossils*. Science, 14 novembre 2003, vol. 302, p. 1194-1197.
- ³⁸ Kerr, R. A. *Minerals Cooked Up in the Laboratory Call Ancient Microfossils Into Question*. Science, 14 novembre 2003, vol. 302, p. 1134.
- ³⁹ Garcia-Ruiz, J. M. Carnerup, A. Christy, A. G. Welham, N. J. Hyde, S. T. *Morphology: An Ambiguous Indicator of Biogenicity*. Astrobiology, 2002, Vol. 2, Number 3, p. 335-351.
- ⁴⁰ On peut dégazer de l'eau simplement en la faisant bouillir.
- ⁴¹ Toute autre matière risque d'être dégradée et de passer en solution.
- ⁴² La solution, extrêmement basique, attaque le verre, et les croissances osmotiques y adhèrent avec une force extrême. Pour de meilleurs résultats si des photographies doivent être prises, utiliser un récipient aux parois parallèles, de type aquarium, pour éviter les effets de dioptré sphérique.
- ⁴³ Le récipient peut ensuite être recouvert et disposé à l'abri des vibrations, où les arborescences pourront conserver une certaine intégrité pendant plusieurs semaines.
- ⁴⁴ Thouvenel-Romans, S. van Saarloos, W. Steinbock, O. *Silica tubes in chemical gardens: radius selection and its hydrodynamic origin*, Europhys. Lett., **67** (1), 2004, p. 42-48.
- ⁴⁵ Stone, D. A. Lewellyn, B. Baygents, J. C. Goldstein, R. E. *Precipitative Growth template by a fluid jet*, Langmuir, 2005, **21**, p. 10916-10919.
- ⁴⁶ Jones, D. E. H. Walter, U. *The silicate garden reaction in microgravity: a fluid interfacial instability*, Journal of colloid and interface science, 1998, **203**, p. 286-293.
- ⁴⁷ Yokoi, H. Araki, Y. Kuroda, N. Usuba, S. Kakudate, Y. *Double helical formation of cobalt silicate tubes under magnetic fields*, Journal of physics; Conference Series, 2006, **51**, p. 454-457 ou Uechi, I. Katsuki, A. Dunin-Barkovskiy, L. Tanimoto, Y. *3D-Morphological chirality in zinc membrane tube using a high magnetic field*, J. Phys. Chem. B, 2004, **108**, p. 2527-2530 ou encore Duan, W. Kitamura, S. Uechi, I. Katsuki, A. Tanimoto, Y. *Three-dimensional morphological chirality induction using high magnetic fields in membrane tubes prepared by a silicate garden reaction*, J. Phys. Chem. B, 2005, **109**, p. 13445.
- ⁴⁸ Goldschmidt, E. *Glauconite nucleation in silica tubular microstructures from low-temperature solution experiments*, 2000, Oxford.
- ⁴⁹ Double, B.D. Hellawell, A. *Portland concrete hydration*, Nature, 1976, **261**, p. 486.
- ⁵⁰ Stone, D. A. Goldstein, R. E. *Tubular precipitation and redox gradients on a bubbling template*, PNAS, 2004, **101**, p. 11537.
- ⁵¹ Russel M. J. Hall, A. J. *The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front*, Journal of the Geological Society, London, 1997, **154**, p. 377-402.
- ⁵² Eastes, R.-E. Darrigan, C. *Recréer la vie ?* La Recherche, numéro spécial **400**, septembre 2006.