
Modéliser la transition de l'inerte au vivant

Ethnographie d'un laboratoire de recherche microfluidique

Modeling the transition from the inert to the living. An ethnography of a microfluidic research laboratory

Cyrille Jeancolas



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/tc/13902>

ISSN : 1952-420X

Éditeur

Éditions de l'EHESS

Référence électronique

Cyrille Jeancolas, « Modéliser la transition de l'inerte au vivant », *Techniques & Culture* [En ligne], Suppléments au n°73, mis en ligne le 01 septembre 2020, consulté le 31 octobre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/tc/13902>

Ce document a été généré automatiquement le 31 octobre 2020.

Tous droits réservés

Modéliser la transition de l'inerte au vivant

Ethnographie d'un laboratoire de recherche microfluidique

Modeling the transition from the inert to the living. An ethnography of a microfluidic research laboratory

Cyrille Jeancolas

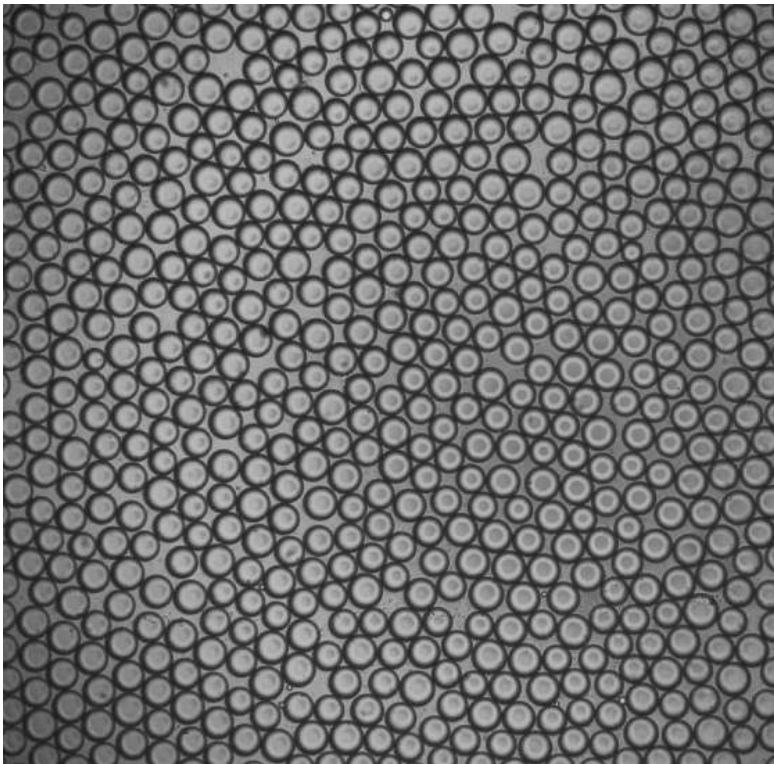
Ce projet a obtenu le soutien de l'université de Paris, de l'École doctorale FIRE - programme Bettencourt, et du CNRS à travers la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI).

« Nous avons percé le secret de la vie ! ». Cette phrase résonne en février 1953 dans un pub de Cambridge. Francis Crick annonce publiquement la découverte de la structure de l'ADN (Watson 1953). Cette même année, une découverte moins connue conforte les ambitions des scientifiques à vouloir repousser toujours plus loin les mystères du vivant. En simulant une atmosphère terrestre primitive dans son laboratoire de Chicago, Stanley Miller synthétise des molécules élémentaires du vivant en l'absence de tout procédé biologique. De ce fait (Miller 1953), il répond à l'injonction émise 40 ans plus tôt par le biologiste Jacques Loeb : « Nous devons soit réussir la production artificielle de la matière vivante, soit comprendre les raisons qui la rendent impossible » (1912). La course pour la création de la vie en laboratoire est lancée ; les équipes de recherche se multiplient et se succèdent dans le monde scientifique en laissant derrière elles des objets hybrides, pas tout à fait vivants, pas tout à fait inertes. Le Laboratoire de biochimie de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), qui constitue mon terrain d'enquête ethnographique, s'inscrit dans cette ambition.

- 1 Le laboratoire se concentre en partie sur des modélisations empiriques et théoriques de la transition de l'inerte au vivant dans une perspective de recherche sur les origines de la vie. Il compte une trentaine de chercheurs aux profils variés. Les biologistes, chimistes, physiciens, expérimentateurs et théoriciens collaborent pour étudier le vivant aux échelles moléculaires dans une perspective fondamentale ou appliquée. La

plupart d'entre eux utilisent et développent une technique en pleine expansion : la microfluidique en gouttelettes. Elle consiste en la production massive de gouttes d'eau de tailles micrométriques en émulsion dans une huile synthétique, ce qui génère des milliers de microcompartiments en quelques minutes (figure 1). Ces gouttes sont produites à l'aide de puces microfluidiques de quelques centimètres de long (figure 2). Elles sont composées de microcanaux gravés dans un matériau formant un circuit microfluidique dans lequel sont injectés les différents liquides non miscibles (eau et huile) pour générer les gouttes, les faire circuler et les manipuler. Les chercheurs du laboratoire utilisent ces gouttes afin de tester des réactions biochimiques par milliers pour une analyse à très haut débit. Dans le projet Chemfit (*Chemical Fitness*), objet de la présente ethnographie, ces gouttes sont utilisées pour imiter des cellules biologiques, dans le but de modéliser expérimentalement une étape possible de l'apparition de la vie, processus qui reste encore un mystère pour les scientifiques.

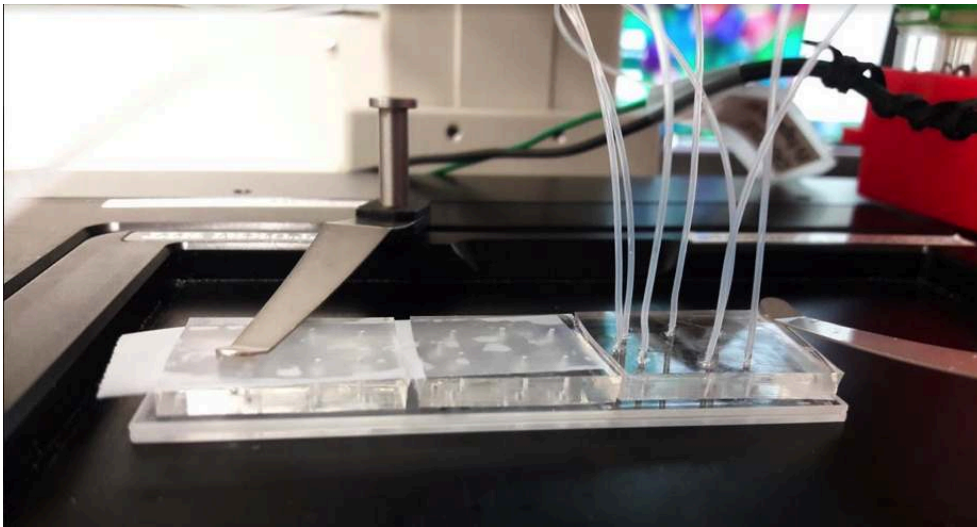
1. Gouttes d'eau dans une puce microfluidique



Le chercheur affiche cette image en temps réel sur l'ordinateur situé à côté du microscope.

Crédits : Cyrille Jeancolas

2. Puce microfluidique placée sous un microscope



L'expérimentateur l'a branchée avec des tuyaux pour y injecter divers fluides. À la suite de la rencontre des liquides, les gouttes bourgeonnent dans le circuit gravé à l'intérieur. Pour une photo de circuit, voir figure 10.

Crédits : Cyrille Jeancolas

- 2 Cette modélisation est la construction d'un système empirique supposé présenter des propriétés communes avec un phénomène, et qui par sa réalisation rendra ce dernier plus intelligible. Le phénomène en question étant l'origine de la vie, il en résulte un problème d'ordre épistémologique et pragmatique. Il n'existe à l'heure actuelle aucun consensus scientifique sur la définition de la vie (Cleland 2012). La plupart du temps les chercheurs établissent ou reprennent des définitions qui défendent des systèmes d'explications des processus vitaux perçus comme tels, autrement dit des théories de la vie (Pitrou 2019) en compétition les unes avec les autres. Cependant il est largement admis par les scientifiques qu'aucune définition ou théorie de la vie ne permet à l'heure actuelle de caractériser le phénomène dans son ensemble. Comment alors envisager de modéliser quelque chose qu'on ne peut toujours pas définir ? Quelles sont les conceptions de la vie des chercheurs du Laboratoire de biochimie intégrées dans une telle modélisation ? Y a-t-il une influence réciproque entre les techniques expérimentales utilisées, les résultats empiriques et les théories de la vie mobilisées ? Je commencerai par détailler quelles sont les conceptions du vivant soutenues par les scientifiques et qui déterminent le choix des techniques utilisées ainsi que les artefacts synthétisés. Je poursuivrai en décrivant les techniques employées pour fabriquer et analyser les gouttelettes microfluidiques conçues comme imitation d'êtres vivants à l'échelle cellulaire. Je montrerai ensuite comment les chercheurs intègrent ces gouttes dans des environnements et des dynamiques pour modéliser la vie. Je terminerai en mettant en lumière la circularité entre théories de la vie et techniques d'imitation et de modélisation, amenant à une reformulation régulière des catégories sollicitées.
- 3 J'effectue une distinction entre le vivant et la vie. Le premier correspond à l'ensemble des êtres vivants, objets matériels qui sont supports de la vie. La vie quant à elle est l'ensemble des causes efficientes qui maintiennent les êtres vivants dans l'existence. Par conséquent, je propose de parler d'*imitation du vivant* pour désigner la production d'objets censés présenter des propriétés observées chez des êtres vivants. En revanche, je parle de *modélisation de la vie* pour faire référence à la mise en place d'un système

reproduisant un environnement dans lesquelles sont fabriquées les conditions propres à faire émerger et à maintenir dans l'existence les êtres vivants. En ce sens, la production de gouttes microfluidiques est envisagée comme une imitation du vivant – en l'occurrence une imitation de cellules – tandis que leur manipulation dans des puces microfluidiques consiste en une modélisation de la vie. Telle est l'hypothèse heuristique à partir de laquelle je souhaite décrire les pratiques concernées observées dans le Laboratoire de biochimie.

- 4 Au sein de cette équipe de recherche, je suis avant tout doctorant en biologie moléculaire. Mais mon projet comporte une dimension réflexive alliant anthropologie sociale et épistémologie. Pour ce faire, j'associe mon lieu de travail à un terrain privilégié d'enquête ethnographique (pour un exemple détaillé d'ethnographie de laboratoire, voir Latour 1979). Je suis à la fois acteur et observateur de la plupart des événements que je vais décrire. L'observation participante que j'expose dans le présent article est ainsi une analyse d'anthropologie des sciences menée par un scientifique s'ouvrant à l'anthropologie et non pas par un anthropologue s'ouvrant aux sciences de la nature, cas bien plus fréquent. Cette incursion de l'anthropologie des sciences dans un laboratoire travaillant sur les origines de la vie répond à une demande de certains scientifiques du domaine eux-mêmes, qui estiment qu'il est nécessaire et urgent d'étudier leurs pratiques et les conceptions qu'ils ont du vivant (Benner 2010). Mon approche s'inscrit dans la convergence de l'anthropologie des techniques et de l'anthropologie de la vie qui vise à rendre compte des variations des conceptions de la vie et du vivant des sociétés à travers le temps et l'espace (Pitrou 2014). Les techniques se révèlent être des vecteurs privilégiés pour étudier les théories de la vie de ceux qui les emploient comme le démontre le travail de Ludovic Coupaye en Papouasie qui utilise la chaîne opératoire pour révéler l'imbrication des processus techniques et des processus vitaux dans la culture d'ignames, assimilés à des artefacts organiques (*growing artefacts*) (Coupaye 2013). Concevoir le vivant à travers le prisme de la fabrication se rencontre aussi bien dans les sociétés traditionnelles que dans les sociétés technoscientifiques. Les enquêtes ethnographiques menées en laboratoire de biologie de synthèse par Sophia Roosth et rapportées dans son livre *Synthetic : How Life Got Made* (2017) s'accordent alors avec celles menées par Perig Pitrou chez les Mixes de la région d'Oaxaca au Mexique pour lesquels la naissance d'un enfant est assimilable à la cuisson d'un artefact de poterie (Pitrou 2017). Les similitudes entre fabriquer et faire pousser des objets, notamment détaillées par Elizabeth Hallam et Tim Ingold dans *Making and Growing* (2016), semblent conforter l'application des outils issus de l'anthropologie des techniques et de l'anthropologie de la vie au sein du Laboratoire de biochimie, où la vie est une affaire de construction. Dans une telle entreprise d'imitation du vivant et de modélisation de la vie, l'assemblage de propriétés choisies et sélectionnées pour des raisons épistémologiques et pragmatiques aboutit à la fabrication d'entités situées quelque part entre l'inerte et le vivant.

Origines de la vie et production d'artefacts

Dans le domaine de la recherche sur les origines de la vie, la frontière entre l'inerte et le vivant n'est pas discrète mais continue. Elle est imaginée comme un chemin ramifié plus ou moins tortueux le long duquel il est théoriquement possible d'établir une échelle de *degré de vie*, traduit de l'anglais *aliveness* ou *lifeness* (Sutherland 2017, Malaterre 2010). Les entités fabriquées ou imaginées entre les deux pôles de l'inerte et

du vivant présentent donc un degré de vie plus ou moins fort. En ce sens, il peut y avoir des objets plus vivants que d'autres. Mais une telle échelle de degré de vie ne se conçoit que rarement en une seule dimension. Elle s'apparente plus à un buisson d'une formidable complexité, au sein duquel « il ne peut rien manquer à un vivant si l'on veut bien admettre qu'il y a mille et une façons de vivre » pour reprendre les termes de Georges Canguilhem (1952). Pour explorer cet espace du degré de vie, les chercheurs du Laboratoire de biochimie optent pour une approche synthétique et non historique. C'est-à-dire qu'ils ne prétendent pas apporter de réponses sur l'origine historique de la vie telle qu'on la connaît mais cherchent à fabriquer des artefacts qui pourraient modéliser une transition universelle de l'inerte au vivant. Cette approche synthétique se retrouve beaucoup en biologie de synthèse dans laquelle le vivant est reconstruit constamment pour être appréhendé, et où la maxime de Richard Feynman « ce que je ne peux pas créer, je ne le comprends pas » est fréquemment reprise.

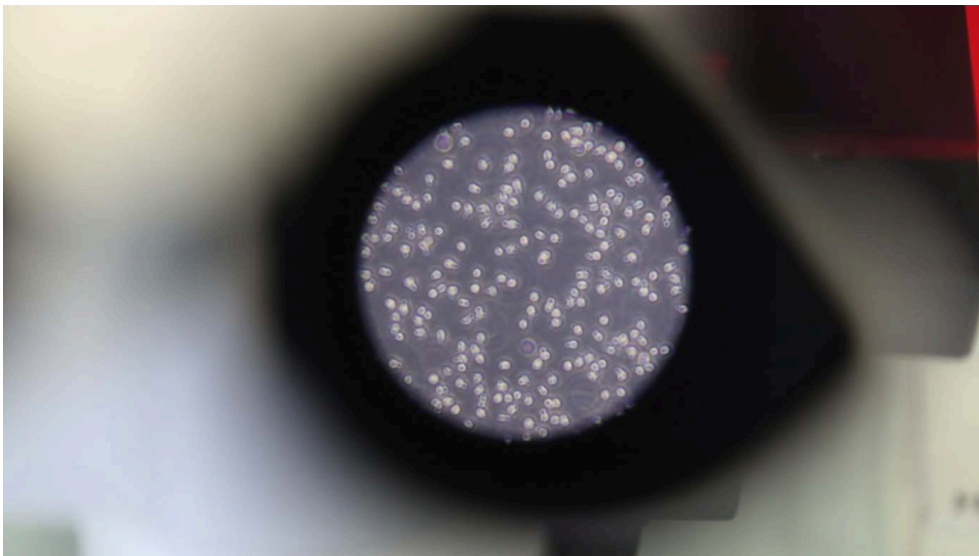
- 5 Dans cette approche, le concept de « théorie matérialisée » (Bachelard 1934) prend tout son sens. Les artefacts produits au laboratoire pour faire le pont entre l'inerte et le vivant incarnent les théories de la vie présupposées, explicitement ou non, par leurs créateurs. Le poids des cultures épistémologiques des chercheurs en question est alors considérable (Fox Keller 2002, Burnam-Fink 2018). Une théorie de la vie différente aboutira donc à un artefact différent que je propose d'appeler *protovie*. Le préfixe « proto » fait référence à la notion de prototype autant dans son acception technologique de « premier modèle réel d'un objet, d'une machine, établi afin de le mettre au point avant d'entreprendre la fabrication en série » (Dew. *Technol.* 1973) que dans son acception biologique de « forme primitive à laquelle on peut faire remonter les formes ultérieures » (Séguy 1967). Une protovie est donc le résultat de la fabrication d'un prototype conçu pour s'inscrire dans une apparition graduelle de vie. Notons que le concept d'infravies développé par Thomas Heams dans *Infravie. Le vivant sans frontière* est différent (Jeancolas 2020). Il fait référence à toutes les entités réelles ou imaginaires, naturelles ou artificielles, situées entre l'inerte et le vivant, ce qui comprend les protovies mais caractérise un ensemble plus large. Les protovies sont en effet des prototypes artificiels qui s'inscrivent dans une élévation du degré de vie, aux regards des théories de la vie de leurs concepteurs. La notion d'infravie ne caractérise pas ce prototypage propre à la recherche sur la transition du non-vivant au vivant.
- 6 Au Laboratoire de biochimie, les protovies fabriquées sont vectrices des théories de la vie de leurs concepteurs qui définissent habituellement un être vivant comme « un système chimique auto entretenu capable d'évolution darwinienne » (seule définition officiellement retenue par la NASA) (Joyce 1994). Les mêmes chercheurs définissent l'évolution darwinienne comme la combinaison de la reproduction avec hérédité, de la variation et de la sélection (Maynard Smith 1958). Cette définition comporte des faiblesses et ils sont conscients de ces limites épistémologiques. Ils ne prétendent pas utiliser des définitions qui rendraient compte de la vraie nature des choses. Elles sont appelées « définitions de travail » et conçues comme des heuristiques permettant de faciliter la tâche du chercheur. Leur utilisation détermine grandement la nature des protovies produites au laboratoire et ces dernières influencent les théories sous-jacentes. Comme la définition de la vie évoquée accorde une place centrale à l'évolution darwinienne, le raccourci est très vite fait pour les scientifiques du projet Chemfit : pour générer la vie, il faut générer l'évolution (sauf mention du contraire, je sous-entendrai une évolution darwinienne derrière le terme « évolution »). Leur but, leur

« Graal » pour reprendre un terme plusieurs fois entendu, est l'émergence de l'évolution. Dans ce projet, l'ensemble des manipulations de gouttes en microfluidique est dévolu intégralement à cet objectif. Cette démarche est une prise de position dans le domaine hétérogène de la recherche sur les origines de la vie. Sans remettre en cause l'importance des mécanismes d'évolution dans le fonctionnement du vivant, d'autres scientifiques ne conçoivent pas que l'évolution ait été un principe fondateur de l'émergence de la vie (Gabora 2006). En ce sens, les expériences de gouttes mises en place au Laboratoire de biochimie rendent manifeste une théorie sur les origines de la vie, et donc sur la vie.

Imiter les cellules, faire des protocellules

Décrite pour la première fois en 1665 par Robert Hooke dans *Micrographia* (1665), la cellule (**figure 3**) est reconnue, dans le cadre de la théorie cellulaire, comme l'unité élémentaire des êtres vivants, qu'ils soient monocellulaires comme les bactéries ou pluricellulaires comme les humains. Ces cellules ont pour caractéristiques communes d'être des compartiments de tailles micrométriques, délimités par une membrane lipidique et possédant de l'information génétique. Elles fonctionnent toutes à peu près de la même manière, mais leurs différentes spécialisations reflètent la phénoménale diversité de la biosphère et des organes d'un même être vivant, du fait de l'expression variable de leurs gènes.

3. Cellules en visualisation directe sous un microscope



La culture cellulaire côtoie la culture protocellulaire au Laboratoire de biochimie.

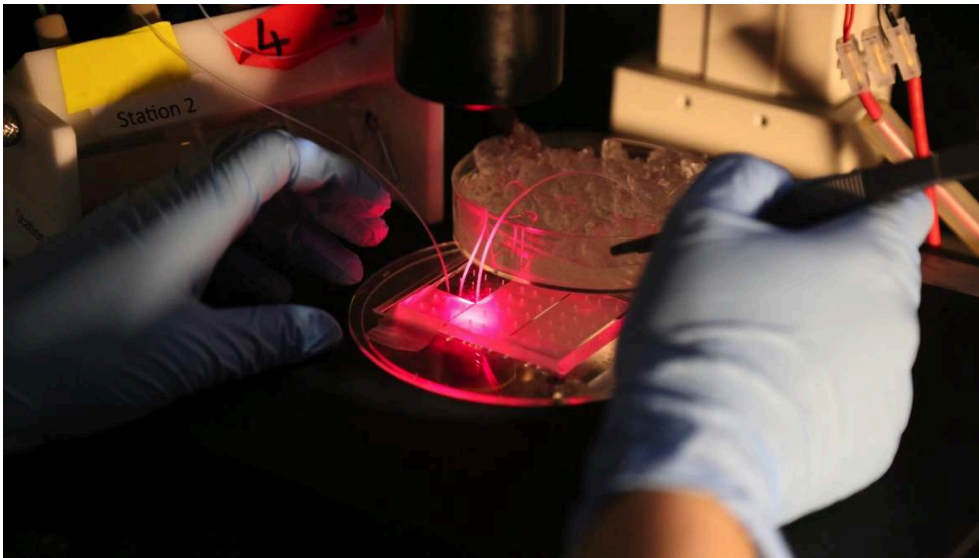
Crédits : Cyrille Jeancolas

- 7 La théorie cellulaire va généralement de pair avec le principe de biogenèse qui stipule qu'une cellule ne peut provenir que d'une autre cellule. Ce principe énoncé par Rudolf Virchow (« *Omnis cellula e cellula* ») et confirmé expérimentalement par Louis Pasteur reste très ancré chez les biologistes. Néanmoins, pour les chercheurs travaillant sur la question des origines de la vie, ce postulat doit être impérativement dépassé. En effet, l'un des objectifs affichés par ce domaine de recherche est l'abiogenèse, c'est-à-dire l'émergence spontanée d'une cellule, ou d'une population de cellules, de façon

graduelle mais sans l'intervention de cellules déjà préexistantes. Dans le projet Chemfit, ce n'est toutefois pas l'apparition de cellules qui retient l'attention des chercheurs mais l'apparition d'une dynamique d'évolution entre ces cellules, conçue comme un palier nécessaire dans l'émergence de la vie. Et pour cause, le pH est si élevé dans les gouttes qu'aucun être vivant connu ne pourrait survivre dans un tel système. Néanmoins le langage de la biologie est omniprésent. Des objets et des processus qui ne sont pas biologiques sont appelés génome, métabolisme, cellule, espèce etc. La plupart du temps ils sont associés au préfixe « proto » qui est essentiel car il indique que les objets fabriqués ne sont pas biologiques mais qu'ils tendent à l'être, à la manière d'un prototype comme évoqué précédemment. Les chercheurs qualifient les gouttes de « protocellules », terme qu'on trouve dans de nombreux autres travaux expérimentaux visant à imiter le fonctionnement de cellules (Lopez 2019). Ces protocellules ont une double ontologie. Il s'agit d'imitations car les scientifiques reproduisent dans ces objets des propriétés qu'ils observent dans les cellules ; mais il s'agit aussi de prototypes car elles s'inscrivent dans une évolution (technologique ou naturelle) vers des cellules plus abouties, c'est-à-dire des copies plus fidèles.

- 8 Pour générer et manipuler des gouttes microfluidiques, l'expérimentateur ne dispose que de forces de pression. Il place des petits récipients en plastique contenant des solutions d'eau ou d'huile dans un générateur de pression, puis il y insère des tuyaux en plastique de petit diamètre. À l'aide d'un ordinateur relié au générateur, il peut changer la pression qui est imposée dans chaque tube. Plus la pression est forte, plus le liquide présent dans le tube passe rapidement dans le tuyau raccordé au tube. Le chercheur relie ensuite l'autre extrémité du tuyau avec l'entrée d'un canal gravé dans une puce microfluidique, en l'insérant dans un trou préalablement percé (**figures 4 et 5**). Une fois les pressions activées, les liquides se répandent dans les canaux de la puce. L'ajustement fin des pressions et la géométrie du circuit aboutissent au bourgeonnement constant de gouttes d'eau dans une solution d'huile. La puce microfluidique étant placée sous un microscope, l'expérimentateur peut observer la circulation des fluides et la formation des gouttes dans le circuit en temps réel sur un écran (**figure 6, vidéo 1**). Toutes les gouttes, quelles que soient leurs utilisations, sont générées de cette façon.

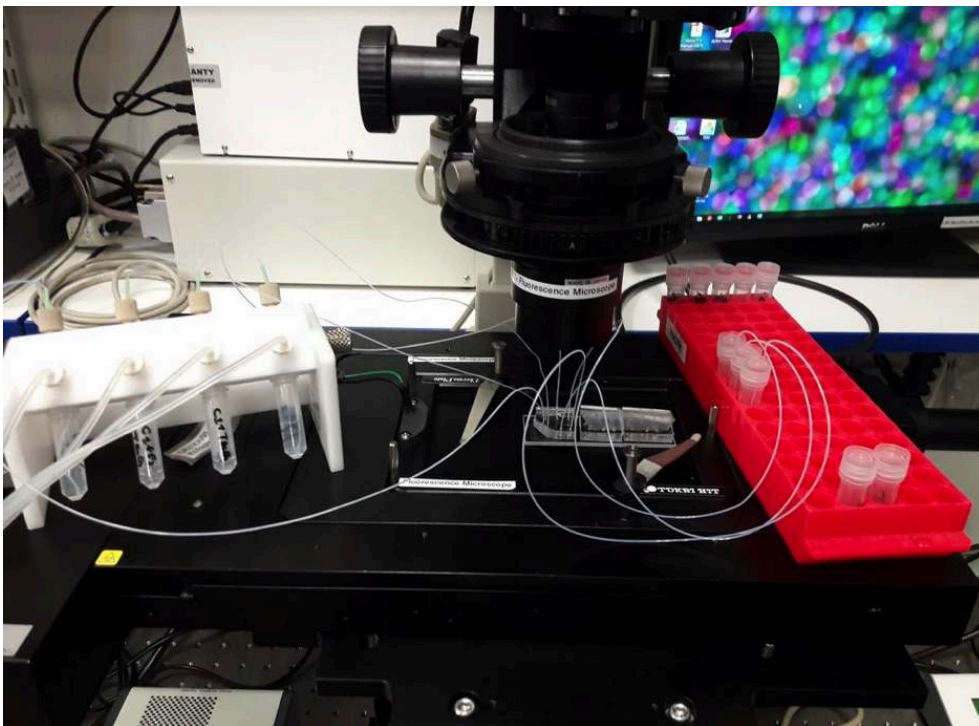
4. L'expérimentateur prépare le dispositif microfluidique



Il insère les tuyaux en plastique aux entrées et sorties du circuit microfluidique.

Crédits : Cyrille Jeancolas

5. Dispositif microfluidique complet



L'expérimentateur a relié la puce microfluidique (au centre) avec un générateur de pression (à gauche) par des tuyaux en plastique pour y faire circuler diverses solutions. D'autres tuyaux relient la puce à des tubes de collecte (à droite).

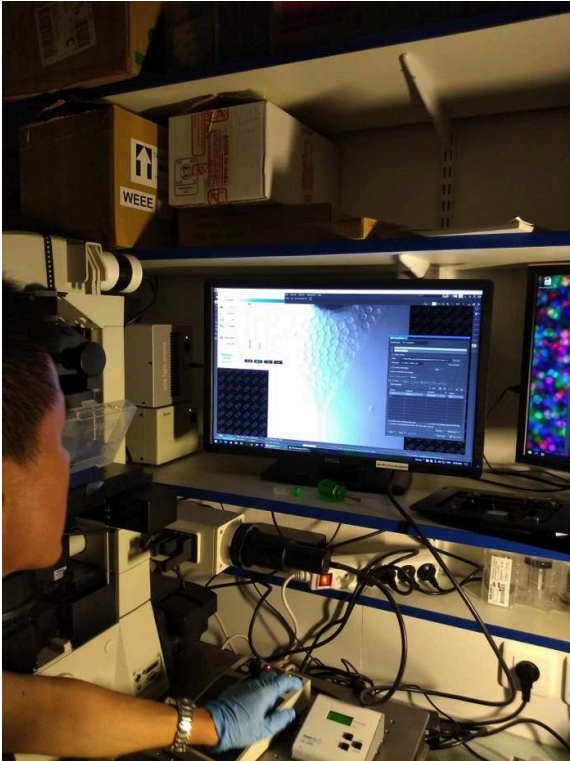
Crédits : Cyrille Jeancolas

- 9 Le simple fait d'être un compartiment liquide est la propriété la plus flagrante qui rapproche gouttes et cellules aux yeux des chercheurs. La compartimentation est en effet l'attribut le plus substantiel de la cellule qui en tire même son nom, « *cellula* » en

latin signifiant « petite chambre ». Suivant la géométrie des circuits et les pressions exercées, l'expérimentateur peut faire varier la taille des gouttes, qui sont un peu plus grandes qu'une cellule biologique. L'intérieur de ces compartiments est rempli d'eau liquide, élément d'une importance capitale pour l'ensemble des êtres vivants connus sur Terre et qui reste la première chose recherchée par les astrophysiciens en quête d'exoplanètes habitables (Helmreich 2015). Intéressons-nous maintenant aux délimitations de ces compartiments. Au moment de la préparation des solutions, le scientifique mélange l'huile avec un tensioactif. Cet agent de surface permet la stabilisation des gouttes afin qu'elles ne fusionnent pas entre elles. Il est composé de molécules amphiphiles, c'est-à-dire qu'une extrémité de la molécule est hydrophobe, tandis que l'autre est hydrophile. Les lipides qui composent les membranes des cellules possèdent exactement cette même caractéristique. La surface des gouttes est tapissée d'un tensioactif comme l'ensemble des cellules connues. Ces gouttes délimitent dans l'espace un compartiment aux frontières fixes mais pas infranchissables pour autant. En effet en fonction de l'environnement, les gouttes sont semi-perméables. Elles laissent seulement passer certaines molécules, permettant un va-et-vient sélectif entre le milieu intérieur et extérieur. On retrouve cette caractéristique chez toutes les cellules qui ne peuvent survivre sans échange contrôlé avec le milieu extérieur.

- 10 Il en résulte que les gouttes microfluidiques sont des compartiments semi-perméables, remplis d'eau et tapissés de molécules amphiphiles, propriétés partagées avec l'ensemble des cellules du monde biologique connu. Toutefois, ces caractères n'ont pas été initialement intégrés en microfluidique dans le but d'imiter des cellules. Ces propriétés découlent soit directement d'impératifs techniques, soit d'effets secondaires fortuits comme la semi-perméabilité. Cette dernière représente souvent un handicap et est considérée comme une limite de la technologie dans les expériences communes de microfluidique car elle induit la fuite de certains composés de la goutte vers le milieu extérieur. C'est *a posteriori* que des chercheurs ont saisi l'opportunité de cette technique pour imiter sciemment des cellules et parler de protocellules. Les scientifiques du projet Chemfit s'inscrivent dans cette démarche. Afin d'appréhender au mieux cette semi-perméabilité, ils ont établi une série d'expériences pour isoler cette propriété du vivant. En ajustant les pressions des liquides dans une puce, l'expérimentateur aligne des gouttes de compositions différentes côte à côte et étudie la diffusion de molécules d'une goutte à l'autre. Les gouttes rapetissent ou grossissent en fonction de la diffusion plus ou moins importante des molécules entre elles ; il s'agit d'un phénomène d'osmose. Autrement dit, certaines gouttes absorbent l'eau des autres (**figure 7**). En calculant les variations de volumes des gouttes sous microscope, le chercheur détermine les paramètres de la semi-perméabilité. Ce type d'expériences isole une propriété unique du vivant pour mieux l'étudier.

6. Écran de contrôle de l'expérience microfluidique



Pendant les manipulations microfluidiques, le chercheur a une vision directe de la puce grâce à un écran relié au microscope.

Crédits : Cyrille Jeancolas

Vidéo 1. Formation de gouttes d'eau dans une puce microfluidique

Ce média ne peut être affiché ici. Veuillez vous reporter à l'édition en ligne <http://journals.openedition.org/tc/13902>

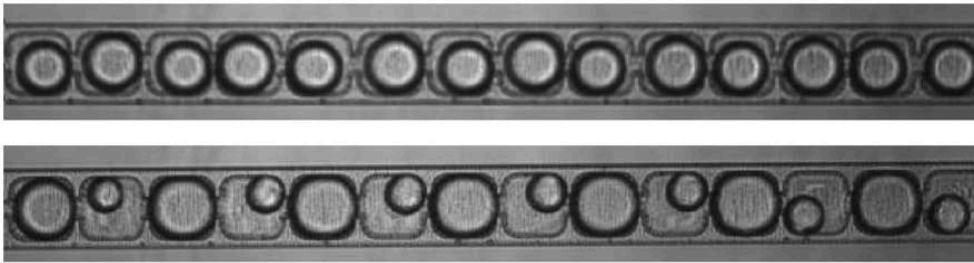
11

En injectant une huile et de l'eau dans différents canaux du circuit microfluidique, l'expérimentateur peut assister en temps réel à la formation de ses gouttes, sur l'écran relié au microscope. La vidéo est ralentie 200 fois.

<https://vimeo.com/396910891>

Crédits : Laboratoire de biochimie, UMR 8231, ESPCI Paris

7. Gouttes d'eau disposées dans une puce microfluidique (image colorisée de microscopie)

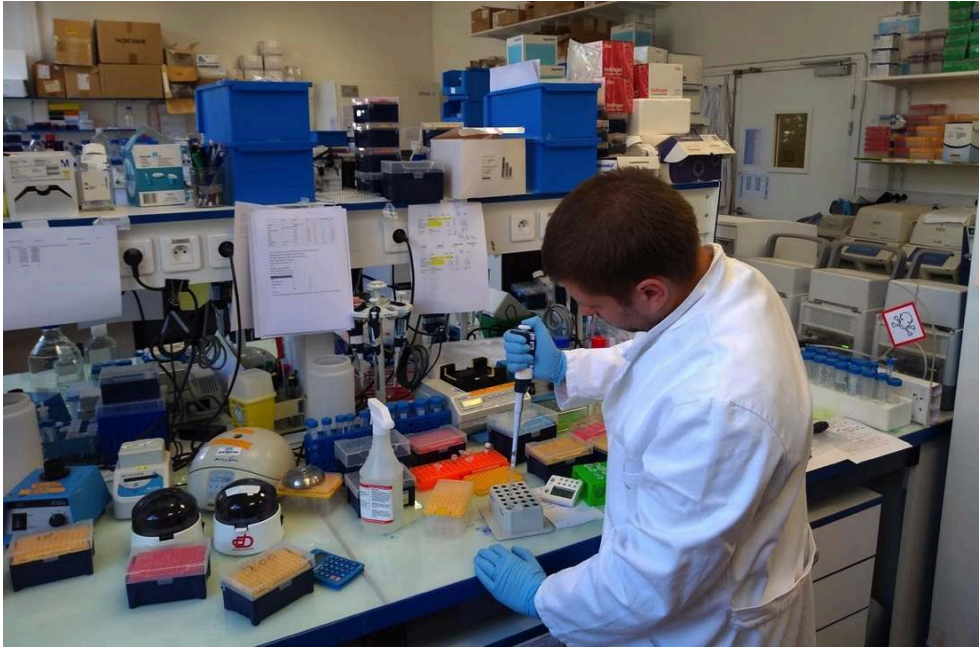


Expérience préliminaire montrant la variation de volumes de gouttes ayant des compositions chimiques alternativement différentes. En haut : début de l'expérience. En bas : fin de l'expérience (quelques heures). Dans la salle microfluidique, les chercheurs extraient et analysent la propriété de semi-perméabilité du vivant.

Crédits : Heng Lu

- 12 Les réactions chimiques qui ont lieu dans les cellules biologiques sont des propriétés intrinsèques du vivant. Mais dans les expériences préliminaires décrites jusqu'à présent, il n'a pas été question de telles réactions. Les gouttes n'y diffèrent que par leur concentration en certaines molécules, ce qui induit une différence de taille par absorption d'eau. Cette différence de concentrations peut être obtenue si certaines gouttes possèdent des réactifs et d'autres non. La réaction chimique qui en découle, dans certaines gouttes seulement, induit une différence en concentration et, *in fine*, une différence de taille *via* le phénomène d'osmose. Une partie de la modélisation du projet consiste à encapsuler de telles réactions dans des gouttes. Néanmoins, tout comme pour la semi-perméabilité, les chercheurs entreprennent des expériences préliminaires pour isoler et étudier cette autre propriété du vivant avant encapsulation. Afin de connaître les concentrations et les conditions optimales de mise en place de cette réaction et son évolution au cours du temps, ils l'étudient en parallèle dans des solutions en tubes, en l'absence totale de gouttes (**figure 8**). Cette réaction chimique est si primordiale au projet que celui-ci est couramment nommé entre les personnes du laboratoire « le projet formose » du nom de la réaction utilisée. Cet effet a l'intérêt de présenter des propriétés communes au métabolisme des cellules, ce qui lui vaut parfois d'être qualifié de « protométabolisme ». Lors de la réaction, de petites molécules s'assemblent pour en former de plus longues qui se dégradent ensuite en petites molécules réactives. Le cycle de réactions ainsi formé est dit autocatalytique et est aussi considéré comme une caractéristique essentielle des êtres vivants.

8. Chercheur manipulant à la paillasse de biochimie



Dans le cadre du projet Chemfit, l'expérimentateur prépare les solutions et étudie les réactions chimiques à intégrer dans les protocellules. Il extrait et analyse dans cette pièce les propriétés métaboliques et chimiques du vivant.

Crédits : Cyrille Jeancolas

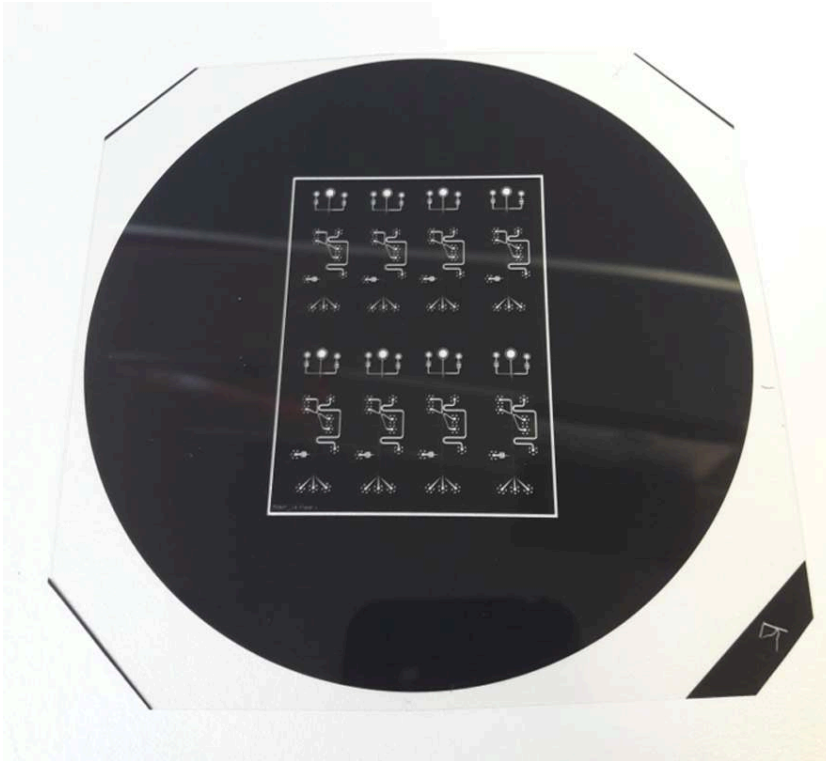
- 13 Les expériences de semi-perméabilité en gouttes et de réactivité chimique en tubes, qui ne se déroulent d'ailleurs pas dans la même pièce, isolent deux propriétés du vivant qui seront dans un deuxième temps intégrées au sein d'une modélisation plus générale. Cette façon de procéder présuppose l'autonomie de ces deux caractéristiques du vivant que les chercheurs peuvent assembler pour tenter de le construire.

Modéliser le milieu, modéliser la vie

La protocellule, qui se réduit ici à une réaction chimique compartimentée en gouttes, n'est que le point de départ d'une modélisation de la vie et son apparition en laboratoire. La goutte ne se pense pas seule mais au sein d'une dynamique de population intégrée dans un milieu que constitue la puce microfluidique. Elle fournit une structure et une agentivité essentielle pour l'évolution des gouttes. En effet, la géométrie du circuit détermine la formation des gouttes, leurs tailles et leur devenir. La plupart du temps, la puce est pensée, construite et utilisée par le chercheur lui-même. Initialement, il dessine le circuit qu'il désire via un logiciel conçu pour l'architecture. Il endosse le rôle d'architecte en concevant les plans de l'environnement de ses futures gouttes, qui va les faire apparaître, grandir, se multiplier etc. Une fois le plan achevé, il le transmet à une entreprise qui lui envoie en retour un masque sous la forme d'un film plastique sur lequel est imprimé un négatif du circuit et qui va lui permettre de le graver dans un matériau par photolithographie (**figure 9**). Comme les puces fabriquées sont souvent à usage unique, les masques sont les formes de stockage des circuits microfluidiques, qu'on retrouve par catalogues entiers au laboratoire. Chaque masque correspond à un circuit, et chaque circuit est lié à une propriété du vivant dans le cadre du projet Chemfit. Ainsi il y a un circuit pour faire apparaître les gouttes, un autre pour

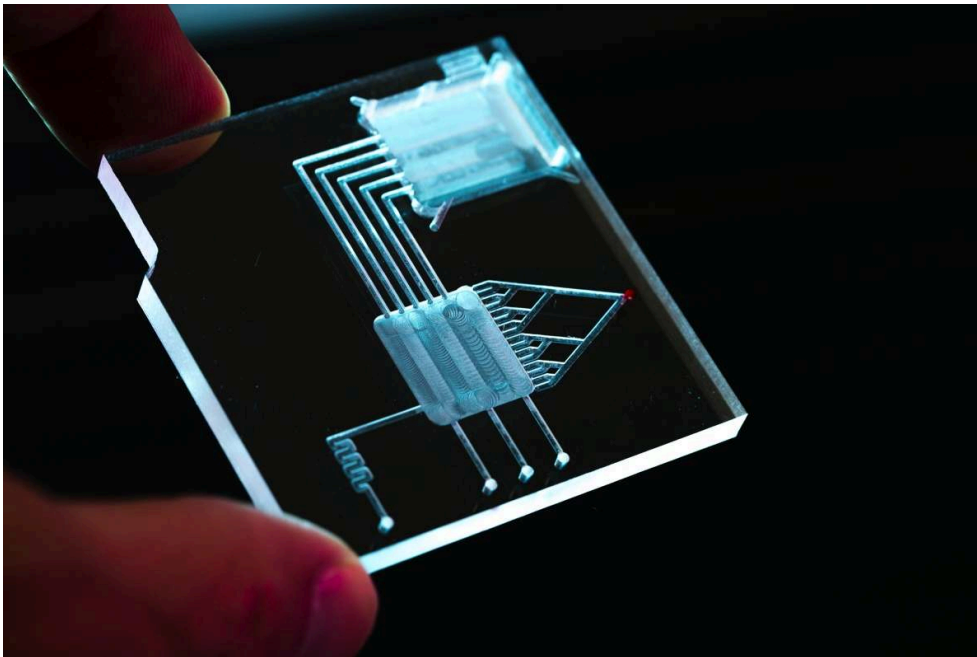
les incuber, un autre pour les diviser etc. Au cours de la modélisation, l'expérimentateur fera passer les gouttes d'un circuit à l'autre à l'aide des tuyaux en plastique décrits précédemment. Pour fabriquer un circuit dans une puce, il choisit le masque correspondant, il se rend à une plateforme de microfabrication et il y confectionne lui-même ses puces en suivant un protocole prédéfini. Une fois la puce fabriquée, et après traitement chimique, elle est prête à être manipulée sous microscope (**figure 10**).

9. Masque présentant en négatif une série de circuits microfluidiques



Ces masques classés en catalogues sont la forme de stockage des circuits.
Crédits : Cyrille Jeancolas

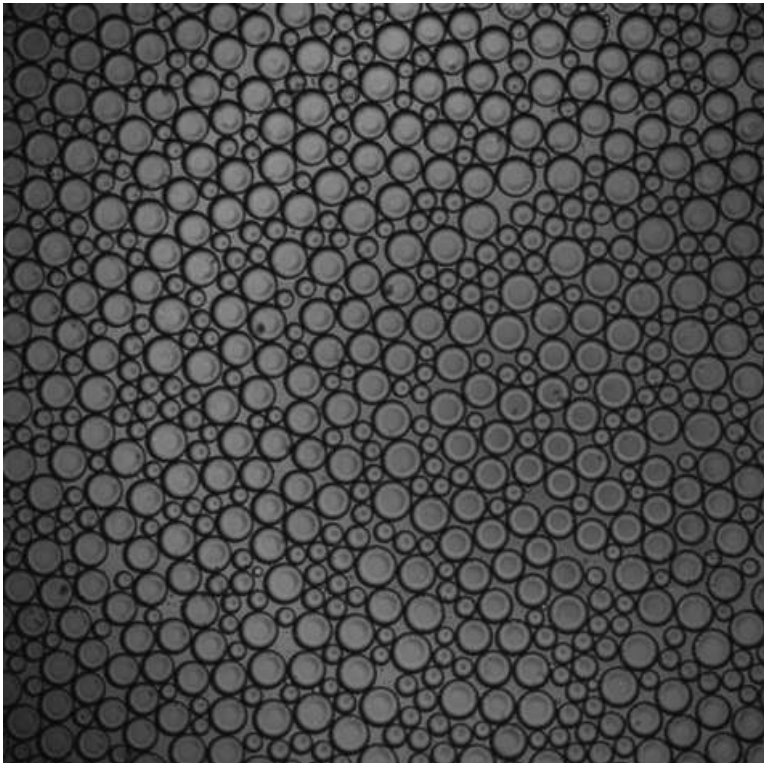
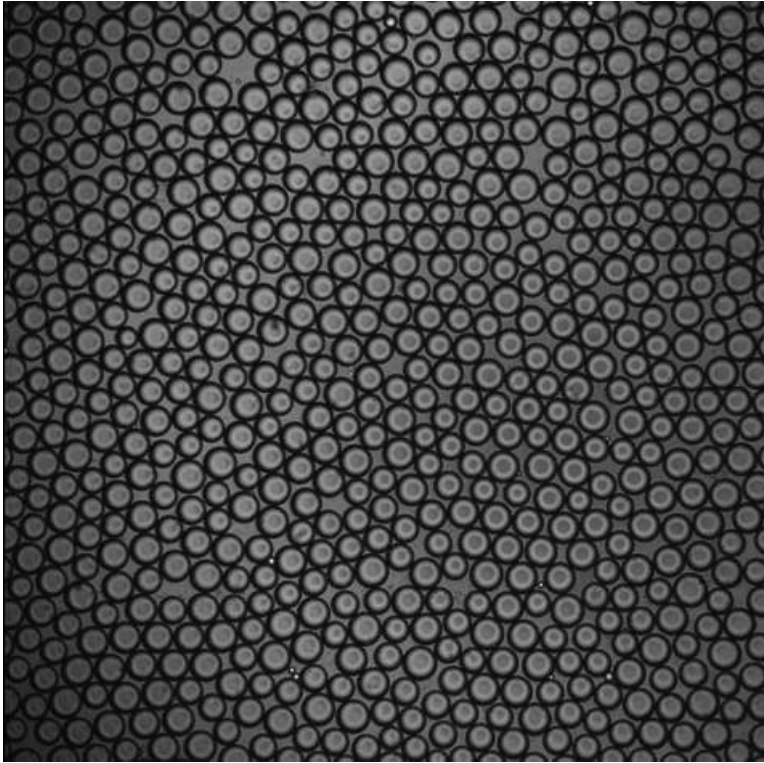
10. Circuit microfluidique gravé dans une puce



Crédits : Adobe Stock

- 14 L'utilisation de la puce permet de faire des expériences de modélisation d'une population de gouttes en interaction au sein de laquelle les chercheurs font émerger une évolution qui se conçoit à l'échelle de la population et non de l'individu. Dans cette modélisation, deux populations de gouttes aux compositions chimiques légèrement distinctes sont produites. Pour reprendre le vocabulaire utilisé dans le projet, je parlerai de gouttes « efficaces » et « inefficaces ». Je détaillerai le choix très significatif de ces mots plus loin. Les gouttes efficaces possèdent toutes les ingrédients nécessaires pour soutenir la réaction de formose évoquée précédemment. Les inefficaces sont déficitaires en un ingrédient, ce qui les empêche de lancer cette réaction. Après avoir généré les deux populations de gouttes et à l'aide de tuyaux, l'expérimentateur les fait passer dans une autre puce qui dispose d'un large espace où elles peuvent se disposer côte à côte en tapis. Après une période d'incubation de quelques heures, les gouttes efficaces ont grossi tandis que les inefficaces ont rapetissé. Du fait de la réaction chimique qui se produit en leur sein, les premières ont littéralement aspiré l'eau constituante des secondes (**figure 11, vidéo 2**). La taille finale des gouttes dépend de leur voisinage avec d'autres gouttes. Une goutte efficace au contact de six gouttes inefficaces grossit plus que dans le cas où elle ne serait voisine que d'une seule. Ces micro-environnements de voisinage induisent la variabilité de leur devenir.

11. Images de microscopie d'une population de gouttes en tapis dans une puce, avant et après incubation



Dans cette expérience de quelques heures une population de gouttes gonfle au détriment de l'autre qui rapetisse.

Crédits : Cyrille Jeancolas

Vidéo 2. Croissance différentielle de gouttes d'eau dans une puce microfluidique

Ce média ne peut être affiché ici. Veuillez vous reporter à l'édition en ligne <http://journals.openedition.org/tc/13902>

15

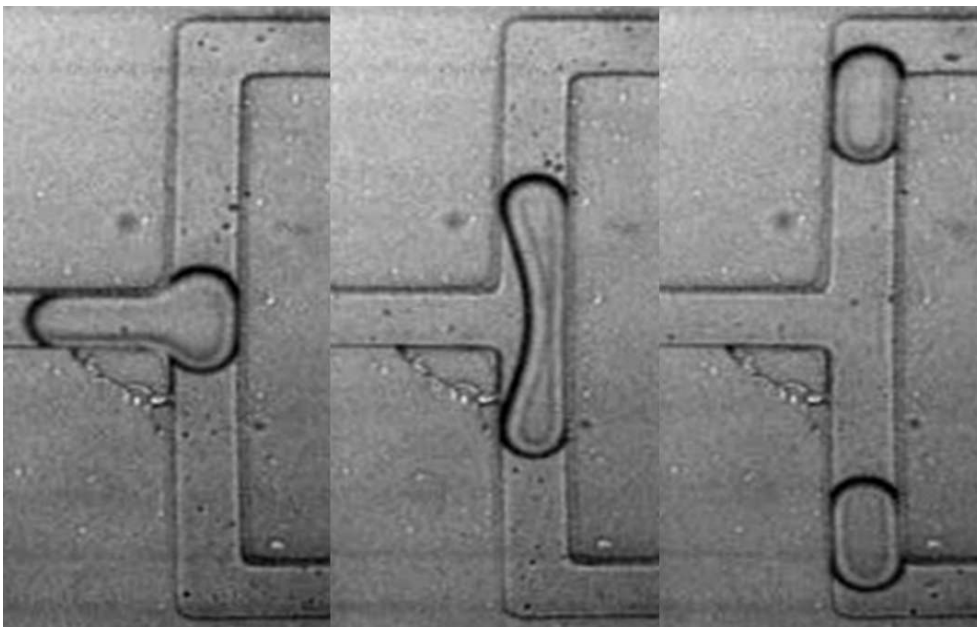
Les gouttes qui possèdent en leur sein l'ensemble des ingrédients nécessaires à l'établissement de la réaction de formose aspirent l'eau des gouttes qui en sont déficitaires. La vidéo est accélérée 120 fois (durée réelle 2 heures).

<https://vimeo.com/396911595>

Crédits : Cyrille Jeancolas

- 16 Après quelques heures d'incubation, la puce microfluidique est remplie de gouttes ayant grossi ou rapetissé. Dans le processus de modélisation, le chercheur passe ensuite à l'étape de division sélective. Il fait passer les gouttes dans une nouvelle puce qui présente dans son circuit une jonction en forme de T (**figure 12**). La géométrie de cette jonction est telle que seules les gouttes ayant atteint une taille suffisamment grande se divisent en deux lorsqu'elles passent par ce circuit. Les gouttes en deçà de cette taille se cognent mais ne se divisent pas (**vidéo 3**). Il en résulte que ce passage induit le doublement des gouttes efficaces par rapport aux inefficaces. En résumé, parce qu'une population de gouttes a une composition chimique différente, elle aspire l'eau d'une autre population ; cette aspiration augmente le volume de ses individus qui se multiplient au détriment de l'autre population. La division sélective met en avant le caractère agentif de l'environnement. En effet c'est une population de gouttes spécifiques dans un environnement spécifique qui aboutit à une division. D'une certaine façon, la fonction de division cellulaire est externalisée au niveau de l'environnement, brouillant encore plus les frontières de l'individu.

12. Trois images de microscopie montrant la division d'une goutte à travers une jonction T



La goutte est propulsée de gauche à droite et ne se divise que si elle a atteint un volume minimal.

Crédits : Cyrille Jeancolas

Vidéo 3. Division sélective de gouttes d'eau à travers une jonction T

Ce média ne peut être affiché ici. Veuillez vous reporter à l'édition en ligne <http://journals.openedition.org/tc/13902>

17

En traversant les jonctions T dans une puce microfluidique, seules les gouttes qui ont atteint une taille suffisante se divisent. Il s'agit aux yeux des chercheurs de l'émergence d'une sélection naturelle.

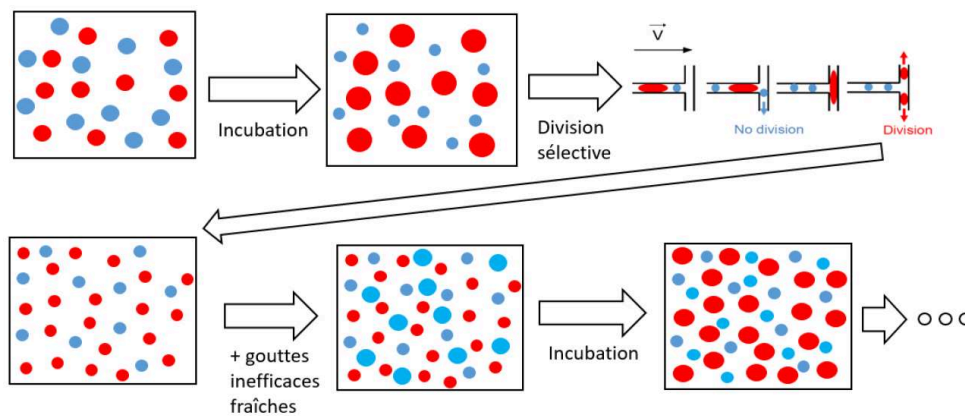
Temps réel.

<https://vimeo.com/396912176>

Crédits : Cyrille Jeancolas

- 18 Une fois la division faite, le chercheur collecte l'ensemble des gouttes à la sortie pour effectuer ce qu'il appelle un « second round ». Il s'agit d'injecter une nouvelle population de gouttes inefficaces. Lors d'une nouvelle incubation, à leur contact, les gouttes efficaces issues de la division pompent une fois de plus l'eau des nouvelles venues et voient leur volume de nouveau augmenter. En les repassant à travers une jonction en forme de T, l'expérimentateur peut reproduire le résultat et maintenir dans le temps la reproduction des protocellules. Mais pour des raisons de lourdeurs techniques l'expérience n'est pas reconduite au-delà du deuxième round. L'association de périodes de croissances puis de divisions est une très grande satisfaction pour les scientifiques qui y voient un « cycle protocellulaire » (**figure 13**), en analogie avec le cycle cellulaire qui comprend des étapes de croissance et division. Lors de ces cycles, la formation des gouttes, leur croissance et leur division se font dans trois puces différentes. Les propriétés propres au vivant dans cette modélisation de la vie résultent de l'interaction de populations d'individus avec un milieu monté pièce par pièce.

13. Schéma représentant les principales étapes du cycle protocellulaire établi



Les carrés représentent des puces microfluidiques. Les ronds rouges sont des gouttes efficaces et les ronds bleus sont des gouttes inefficaces. Les ronds bleu clair sont des gouttes inefficaces ajoutées ultérieurement.

Crédits : Cyrille Jeancolas

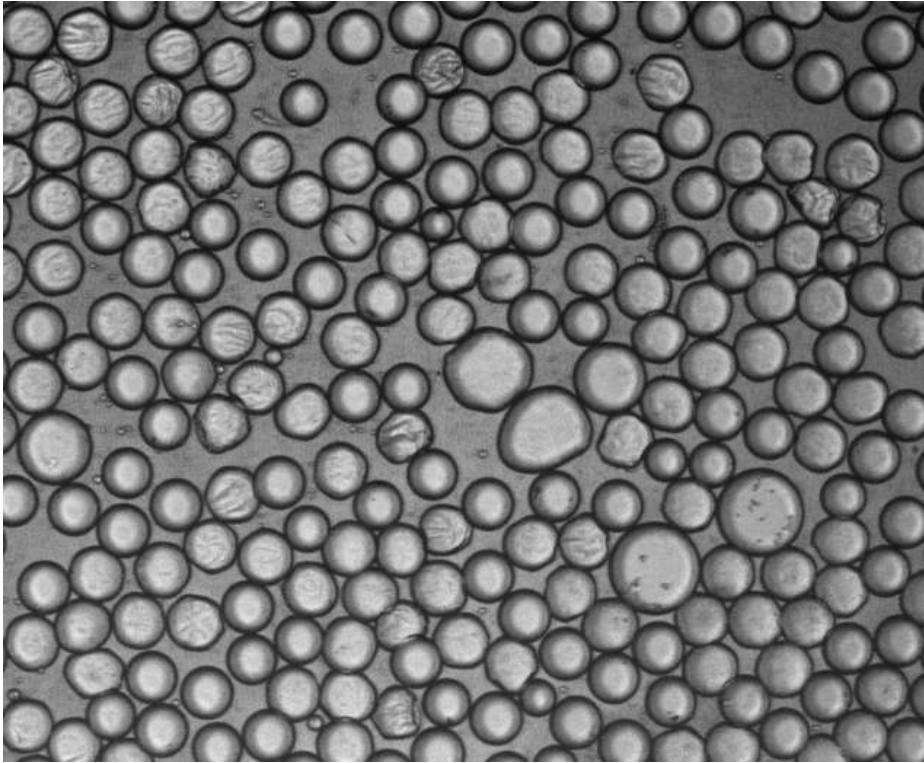
Théories et expériences : relations de circularité

À la lumière des résultats expérimentaux, les concepts biologiques sont remodelés. Ces successions d'étapes, fruit d'un travail laborieux et répétitif, suffisent aux chercheurs pour conclure à l'émergence d'une sélection naturelle, à défaut de pouvoir parler

d'évolution darwinienne qui requiert plus de propriétés. Par analogie entre processus vitaux naturels observés et processus artificiels induits : des génotypes différents (compositions chimiques) aboutissent à des phénotypes différents (tailles des gouttes) ; et soumis à une pression de sélection (jonction en forme de T), seuls les individus présentant un caractère particulier (grand volume) voient leur population augmenter. Un des enjeux de la modélisation décrite est de trouver des équivalents physico-chimiques à des notions purement biologiques comme celles de génotype ou de phénotype. Ce travail est indispensable pour pouvoir modéliser une transition graduelle du monde physico-chimique vers le biologique. Il incite à une redéfinition continue des catégories conceptuelles et de leurs applications à la lumière des résultats expérimentaux. La notion d'hérédité par exemple subit plusieurs redéfinitions au fur et à mesure des expériences pour être finalement remplacée par celle d'héritabilité considérée comme plus flexible. Le concept de variation environnementale est aussi reconfiguré. Avant les expériences, le milieu est conçu comme une variation de l'environnement de la puce microfluidique (température, environnements chimiques). Mais des résultats empiriques inattendus étendent l'environnement à la population des protocellules. La répartition hétérogène des différentes gouttes les unes par rapport aux autres dans la puce induit une variabilité de l'environnement par des effets de voisinage. Les gouttes deviennent à la fois objets et causes des variations environnementales.

- 19 Cette influence de l'expérience sur la théorie est encore plus manifeste lorsqu'un phénomène empirique imprévu suscite rapidement l'émergence d'une nouvelle notion de « mort ». Si les gouttes inefficaces rapetissent pendant trop longtemps, elles concentrent du calcium qui précipite en surface pour former une couche calcaire entourant toute la goutte. La forme de cette dernière prend les aspects d'une pierre, elle est dite « pétrifiée » (**figure 14**). Les chercheurs remarquent ensuite que cette coquille empêche tout échange entre l'intérieur et l'extérieur de la goutte. Ainsi, même en présence de molécules propices à la croissance dans le milieu, ces gouttes demeurent inertes et ne peuvent plus grandir. Le mot est vite lâché : « elles sont mortes ». La cessation de tout échange et l'incapacité à changer de formes se révèlent suffisantes pour enrichir le paysage conceptuel du chercheur d'une nouvelle notion de mort appliquée aux protocellules, c'est-à-dire la mort d'un objet pas tout à fait vivant, mais pas tout à fait inerte non plus. L'attribution subjective de la capacité à mourir, propriété exclusive du vivant, constitue le franchissement d'un palier supplémentaire sur l'échelle du degré de vie. Dans ce contexte, un organisme doit être ouvert vers l'extérieur pour être considéré en vie. De la même façon, la notion de vieillissement s'est développée dans le discours des scientifiques au fur et à mesure des expériences. En effet une réaction parasite épuise les gouttes en réactifs au bout de quelques heures (réaction de Cannizzaro) et il faut l'ajout de gouttes « fraîches » pour relancer un deuxième cycle. Pour les chercheurs, la vieillesse au niveau protocellulaire peut alors se comprendre comme l'épuisement d'une réaction chimique induisant un ralentissement de la croissance.

14. Image de microscopie de gouttes dites « mortes »



Si l'incubation est trop longue durant l'expérience, un dépôt solide se forme autour des gouttes, empêchant tout échange avec l'extérieur.

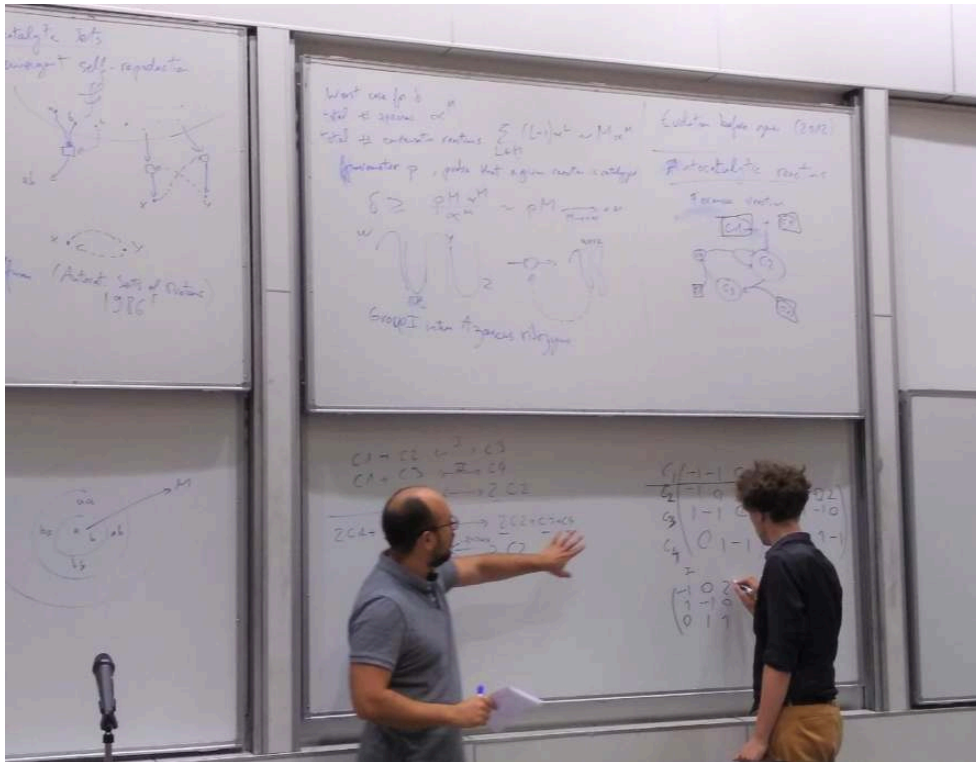
Crédits : Heng Lu

- 20 Fortes de l'accumulation de résultats théoriques et empiriques, les discussions entre chercheurs deviennent des moments où se jouent réellement la stabilisation et le renouvellement des concepts. Ils discutent des principaux concepts biologiques pouvant s'appliquer à leur système. Ils passent en revue les résultats et les analogies pour estimer leur pertinence et leur pouvoir explicatif. Le but implicite de ces réunions est d'élever le plus possible le degré de vie des artefacts produits tout en restant rigoureux. Les scientifiques du projet Chemfit sont convaincus du degré de vie élevé de leurs gouttes, à en croire le vocabulaire habituellement utilisé verbalement. Les gouttes avant divisions sont appelées « parents » ou « mères » et une fois divisées « enfants » ou « filles ». Les réactifs de la réaction de formose sont appelés « nourriture », voire familièrement « bouffe » et les gouttes en « mangent » et s'en « nourrissent ». Le degré de vie des gouttes prises dans une telle dynamique est si élevé pour les chercheurs qu'il devient même possible de se mettre à la place d'une goutte et de penser comme une goutte. En réunion un scientifique avance par exemple : « ça veut dire que dès que j'ai de la bouffe, je la consomme immédiatement » et un autre lui répond : « oui, et tu vas essentiellement manger ta propre bouffe ». L'emploi de ces pronoms est sans appel. Par un accord tacite, un chercheur devient une goutte et les participants de la réunion rentrent dans ce jeu de rôle comme s'il s'agissait d'une évidence. Dans ce travail d'imagination façonné par le dialogue, la goutte est bel et bien vivante.
- 21 Il est aussi essentiel de souligner que la métaphore du vivant / machine, très répandue dans le monde de la recherche en biologie (Nicholson 2013), est définitivement absente du discours des chercheurs du projet. Lorsque la nourriture est souvent assimilée à du « carburant » dans de nombreux discours de biologistes (Boldt 2018), eux sont formels.

Leurs réactifs sont de la nourriture, mais aucune mention de carburant n'est jamais faite. Ils ne se pensent pas ici comme des constructeurs de machines mais plutôt comme des cuisiniers qui parlent régulièrement des « ingrédients pour faire la vie ». Leur objectif est de mettre les bons ingrédients dans les bonnes conditions pour lancer le processus de vie et non pas d'assembler pièce par pièce un être vivant.

- 22 Au cours des expériences, des analyses et des discussions, le vocabulaire change. Ce changement est notamment motivé par les restitutions de vive voix, en réunions de laboratoire et en conférences, où il s'agit dorénavant de convaincre la communauté scientifique de la réussite d'avoir élevé significativement le degré de vie d'une protovie. Les modifications du vocabulaire employé pour nommer les deux principales populations de gouttes sont alors très révélatrices. Pour rappel ces deux populations correspondent d'une part, à des gouttes qui grossissent puis se divisent, et, d'autre part, à des gouttes qui rapetissent et ne se divisent pas. Au début de l'observation participante, ces populations étaient qualifiées d'« efficaces » et d'« inefficaces », et ce sont d'ailleurs les termes que j'ai employés précédemment. Ces mots présupposent une finalité apparente dans l'action. Les gouttes sont jugées efficaces si elles atteignent un but (ici croissance et division) et ne le sont pas si elles y échouent. Un objet, comme un être humain, peut être qualifié d'efficace ; ce n'est pas une qualité propre aux êtres vivants. Mais après plusieurs mois d'emploi de ces mots, un chercheur innove lors d'une communication pour le séminaire hebdomadaire du laboratoire. Dans sa présentation, les gouttes sont dorénavant « chanceuses » ou « malchanceuses ». Ce changement est très lourd de présupposés. Dans le quotidien du laboratoire, comme ailleurs, l'emploi du mot « chanceux » fait généralement référence à un être vivant qui rencontre par hasard des événements favorables à la réalisation de ses projets. Si l'idée de projet était déjà présente derrière le terme « efficace », les deux nouvelles notions de vie et de hasard font leur entrée derrière le qualificatif « chanceux ». Insérées dans une nouvelle narration de restitution, les gouttes sont pleinement vivantes et leur destinée advient par hasard. Je pense que l'introduction volontaire du hasard dans la narration ne doit rien au hasard, si je puis dire. Cette propriété est en effet un prérequis essentiel à l'évolution darwinienne au sein de laquelle les variations doivent apparaître aléatoirement. Introduire cette propriété revient à augmenter significativement le degré de vie du système expérimental. D'autres restitutions orales voient ensuite l'apparition des vocables « gagnante » et « perdante ». La notion de hasard disparaît mais celle de compétition, aussi très chère à la théorie de l'évolution, fait son entrée. Chaque mot se révèle être un outil rhétorique utilisé pour convaincre la communauté des réussites du projet (**figure 15**).

15. Restitution de résultats en conférence

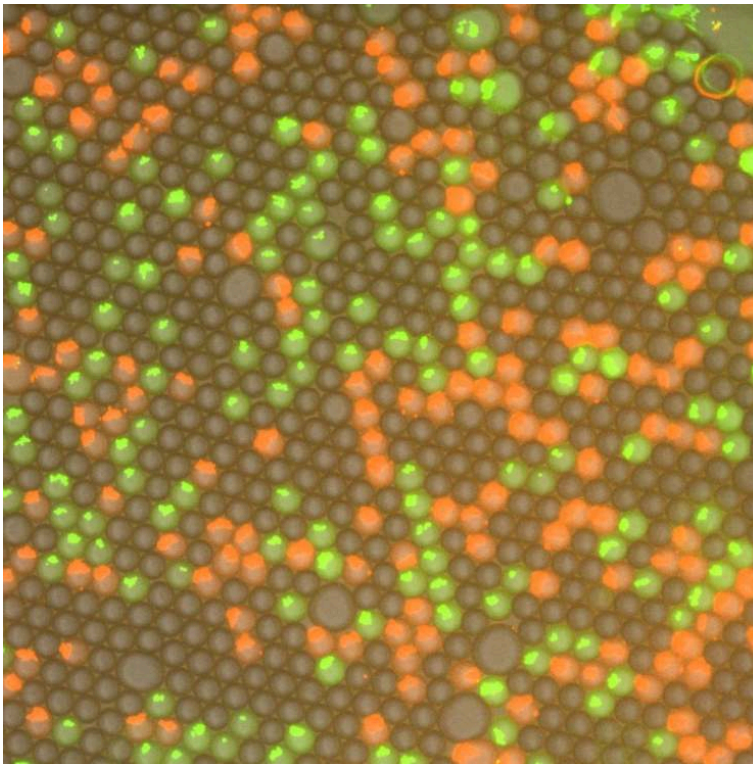


Pendant les restitutions orales de leurs résultats, les chercheurs tentent de convaincre leurs collègues de la pertinence de leur modélisation du vivant.

Crédits : Cyrille Jeancolas

- 23 Si personne n'a encore réussi à faire émerger le vivant de l'inerte, de nombreux travaux ont produit et produisent encore une multitude de protovies, dont les gouttes microfluidiques décrites sont un exemple (**figure 16**). Derrière ce terme, je fais référence à des objets fabriqués et supposés s'inscrire dans une transition de l'inerte vers le vivant. Ces derniers sont des incarnations des théories de la vie soutenues par les scientifiques qui les fabriquent. Ils sont donc des objets hybrides, à la fois matériels et épistémiques. Parce que les protovies sont synthétisées dans l'intention de faire émerger une ou des propriétés perçues du vivant, elles sont indissociables d'une dynamique qui vise à faire accroître leur qualité de vie, comme cela est le cas dans le projet Chemfit.

16. Image de microscopie présentant trois populations de gouttes dans une puce microfluidique



Ces populations de gouttes en interactions dans un milieu sont des prototypes de systèmes vivants, ou des protovies.

Crédits : Heng Lu

- 24 Dans le projet Chemfit, les scientifiques incorporent dans de nouveaux objets des propriétés du vivant qu'ils perçoivent et théorisent. Mais il n'est pas pour autant un projet pleinement biomimétique ; ce terme n'est d'ailleurs jamais employé par les chercheurs. Dans son acception courante, fortement popularisée par Janine Benyus (1997) mais déjà effective dans des travaux anciens, le biomimétisme consiste généralement à observer le monde biologique puis à transposer certaines de ses propriétés pour la fabrication de nouveaux objets. Cette apparente simplicité cache un enchevêtrement de processus techniques et de processus vitaux, où par exemple l'observation est le résultat d'un apprentissage de la perception et des regards techniques et écologiques (Kamili 2019). Le biomimétisme, formé des racines grecques « *bios* » pour « forme de vie » et « *mimêsis* » pour « imitation », suggère une singularité du vivant. Mais les scientifiques de Chemfit conceptualisent les formes de vies comme de simples états particuliers du monde physico-chimique. La notion de degré de vie reconfigure largement ce « bios » en un ensemble de processus imbriqués. De nombreux chercheurs ne s'inspirent d'ailleurs pas de la partie la plus vivante de l'échelle du degré de vie pour imaginer et produire des protovies, au contraire. C'est aussi en s'inspirant du monde physico-chimique qu'ils imaginent le passage de l'inerte au vivant (Saladino 2018). Pour penser le vivant, ils doivent penser le non-vivant dans un cadre élargi et unifié (Pross 2011).
- 25 La diversité des savoirs sur la vie est en partie traduisible par la diversité des protovies, issues de productions techniques variées. Parmi elles, nous retrouvons la technique de la microfluidique en gouttes, qui n'est habituellement pas utilisée dans cette

perspective. Elle sert principalement à former des milliers de compartiments pour tester des milliers de réactions chimiques différentes. Les chercheurs de Chemfit, quant à eux, les utilisent pour modéliser une apparition graduelle de la vie. Il s'agit de modéliser l'inconnu par un processus nouveau. Toutefois il reste une composante biomimétique dans ce projet. Elle se situe au niveau de l'objectif à atteindre qui est une propriété du vivant vers laquelle il faut faire tendre la protovie ; dans notre cas il s'agit principalement de l'évolution par sélection naturelle. Mais le biomimétisme se restreint ici à l'identification des propriétés que les protovies doivent acquérir. Le plus gros du travail des chercheurs consiste à mettre au point un ensemble d'artefacts synthétiques en interaction, au sein desquels émergeront de telles propriétés, sans nécessairement s'inspirer du vivant. La démarche épistémologique de modélisation des scientifiques du projet Chemfit sur laquelle j'ai enquêté est la suivante : en se fixant des objectifs biomimétiques (évolution darwinienne), ils mettent au point des procédés techniques nouveaux (réactions chimiques compartimentées) pour élever le degré de vie des protovies produites (populations dynamiques de gouttes). Cette modélisation de la transition de l'inerte au vivant est l'aboutissement d'influences réciproques entre théories de la vie et expérimentations. La place centrale accordée à l'évolution darwinienne détermine en partie la forme des protovies à synthétiser et les attributs inattendus qu'elles présentent modifient en retour le paysage conceptuel relatif au vivant. La phase expérimentale du projet étant révolue, il s'agit dorénavant pour les chercheurs du Laboratoire de biochimie de retranscrire dans un article la théorie de la vie qu'ils ont incorporée momentanément dans leurs protovies grâce aux techniques de microfluidiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Bachelard, G. 1934 *Le Nouvel Esprit Scientifique*. Paris : Presse Universitaire de France.
- Benyus, J. 1997 *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*. New York : Harper Collins.
- Boldt, J. 2018 « Machine metaphors and ethics in synthetic biology », *Life Sciences, Society and Policy* 14 : 12.
- Burnam-Fink, M., Desch, J., Scalice, D., Davice, H. *et al.* 2018 « Impact of the Arizona NExSS winter school on astrobiology knowledge and attitudes », *Astrobiology* 3 : 365-375.
- Benner, S. 2010 « Defining life », *Astrobiology* 10 : 1021-1030.
- Canguilhem, G. 1952 *La Connaissance de la Vie*. Paris : Vrin.
- Cleland, C. E. 2012 « Life without definition », *Synthese* 1 : 125-144.
- Coupaye, L. 2013 *Growing Artefacts, Displaying Relationships*. New York : Berghahn.
- Fox Keller, E. 2002 *Making Sense of Life : Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Cambridge : Harvard University Press.

- Gabora, L. 2006 « Self-other organization : Why early life did not evolve through natural selection », *Journal of Theoretical Biology* 241 : 443-450.
- Hallam, E., Ingold, T. 2016 *Making and Growing. Anthropological Studies of Organisms and Artefacts*. Abingdon-on-Thames : Routledge.
- Heams, T. 2019 *Infravies. Le vivant sans frontière*. Paris : Seuil.
- Helmreich, S. 2015 *Sounding the Limits of Life : Essays in the Anthropology of Biology and Beyond*. Princeton : Princeton University Press.
- Hooke, R. 1665 *Micrographia : or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon*. Londres : The Royal Society.
- Jeancolas, C. 2020 « Thomas Heams, *Infravies. Le vivant sans frontières*. Paris: Éditions du Seuil, 2019 », *History and Philosophy of the Life Sciences* 42 : 22. Doi : 10.1007/s40656-020-00320-3.
- Joyce, G. F. 1994 « Foreword » in D.W. Deamer & G. Fleischaker dir. *Origins of Life : The Central Concepts*. Boston : Jones and Bartlett Publishers.
- Kamili, L. 2019 « Faire comme la Nature » *Techniques et représentations du vivant dans les pratiques biomimétiques en France*, mémoire de Master en Ethnologie et anthropologie sociale. Paris : École des hautes études en sciences sociales.
- Latour, B. & S. Woolgar 1979 *Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts*. Princeton : Princeton University Press.
- Loeb, J. D. 1912 *The Mechanistic Conception of Life*. Chicago : The University of Chicago Press.
- Lopez, A. & M. Fiore 2019 « Investigating prebiotic protocells for a comprehensive understanding of the origins of life : A prebiotic systems chemistry perspective », *Life* 9 : 2.
- Malaterre, C. 2010 « Lifeness signatures and the roots of the tree of life », *Biology and Philosophy* 25 : 643-658.
- Maynard Smith, J. 1958 *The Theory of Evolution*. Cambridge : Cambridge University Press
- Miller, S. L. 1953 « A production of amino acids under possible primitive earth conditions », *Science* 117 : 528-529.
- Nicholson, D. J. 2013 « Organisms ≠ Machines », *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44 : 669-678.
- Pitrou, P. 2014 « La vie, un objet pour l'anthropologie ? », *L'Homme* 212 : 159-190.
- Pitrou, P. 2017 « Life as a making », *Nature culture* 4 : 1-37.
- Pitrou, P. 2019 « La voie des techniques » in N. Martin, T. Manicone, P. Le Roux, G. Cometti dir. *Au seuil de la forêt. Hommage à Philippe Descola, l'anthropologue de la nature*. Mirebeau-sur-Bèze : Éditions Tautem : 859-879.
- Pross, A. 2011 « Toward a general theory of evolution : Extending Darwinian theory to inanimate matter », *Journal of Systems Chemistry* 2 : 1-14.
- Roosth, S. 2017 *Synthetic : How Life Got Made ?* Chicago : The University of Chicago Press.
- Saladino, R., Šponer, J. E., Šponer, J., Costanzo, G et al. 2018 « Chemomimesis and molecular darwinism in action : From abiotic generation of nucleobases to nucleosides and RNA », *Life* 8 (24).
- Séguy, J. 1967 « Structures sémantiques des noms désignant en gascon les catégories d'animaux d'élevage », *Via Domitia* t. III fasc. 6 : 1-13.

Sutherland, J. 2017, « Studies on the origin of life-The end of the beginning », *Nature Chemistry Reviews* 1 : 1-8.

Virchow, R. 1858 *Die Cellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre*. Berlin : Verlag A. Hirschwald.

Watson, J. D. & F. H. Crick 1953 « The structure of DNA » *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 18 : 123-131.

RÉSUMÉS

Dans la recherche scientifique sur les origines de la vie, la frontière entre l'inerte et le vivant se conçoit de façon graduelle et il existe des entités ayant un degré de vie variable. Afin d'explorer cette transition, des chercheurs du Laboratoire de biochimie de l'ESPCI Paris fabriquent des prototypes de systèmes vivants supposés s'inscrire dans une progression vers la vie. Ces artefacts que l'auteur propose d'appeler *protovies* incarnent les conceptions de la vie de leurs créateurs et influencent en retour ces dernières par la manifestation de leurs propriétés, imbriquant processus techniques et processus vitaux. Un projet en particulier mobilise la technique de la microfluidique en gouttelettes pour mettre au point une protovie engagée dans une modélisation expérimentale de la transition de l'inerte au vivant. Par la production de gouttes d'eau microscopiques assimilées à des protocellules, les chercheurs imitent des cellules biologiques. L'établissement d'une population interconnectée de ces gouttes dans une dynamique de sélection naturelle aboutit alors à une modélisation de la vie selon les critères retenus. Au fur et à mesure des assemblages techniques, des résultats empiriques, des analyses et des discussions, les chercheurs perçoivent une élévation du degré de vie de leurs artefacts dans un exercice constant d'interprétation des propriétés émergentes du système. L'ethnographie mobilisée est l'aboutissement d'une observation participante menée par un scientifique du même laboratoire engagé dans un projet réflexif anthropologique. La recherche sur les origines de la vie et la synthèse de protovies gagnent à être resituées dans les contextes déterminants de cultures épistémologiques propres aux communautés scientifiques impliquées.

In scientific research on the origins of life, the boundary between the non-living and the living is conceived as gradual and there are entities with varying degrees of aliveness. In order to explore this transition, researchers at the Laboratory of Biochemistry of ESPCI Paris are building prototypes of living systems that are supposed to progress towards life. These artefacts, which the author proposes to call *protolives*, embody their creators' conceptions of life and influence them in return by the manifestation of their properties, interweaving technical and vital processes. One project in particular involves the technique of droplet microfluidics to develop a protolife engaged in experimental modeling of the transition from the non-living to the living. By producing microscopic water droplets assimilated to protocells, the researchers are mimicking biological cells. The establishment of an interconnected population of these drops in a dynamic of natural selection then leads to a model of life according to the selected criteria. As the technical assemblies, empirical results, analyses and discussions progress, the researchers perceive an increase in the degree of aliveness of their artefacts in a constant exercise of interpreting the emerging properties of the system. The ethnography mobilized is the result of a participatory observation conducted by a scientist from the same laboratory engaged in an anthropological reflexive project. Research on the origins of life and the synthesis of protolives benefit from being resituated in the contexts of the determining epistemological cultures specific to the scientific communities involved.

INDEX

Keywords : origins of life, scientific research, epistemological culture, microfluidics, protolife, ethnography

Mots-clés : origines de la vie, recherche scientifique, culture épistémologique, microfluidique, protovie, ethnographie

AUTEUR

CYRILLE JEANCOLAS

Cyrille Jeancolas est doctorant au Laboratoire de biochimie de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) - PSL, en contrat doctoral avec l'université de Paris. Il est aussi engagé dans un projet réflexif anthropologique au sein de l'équipe Anthropologie de la vie du Collège de France. Il mène un travail expérimental pour modéliser des étapes de l'apparition de la vie et il analyse en parallèle les influences réciproques entre conceptions de la vie et recherche sur ses origines.