

EXTRAIT 1 - LA CRÉATION D'INFORMATION DANS L'UNIVERS

La création de l'information dans l'Univers a été remarquablement décrite par Reeves (figure 13). À partir du Big Bang, les quatre forces de la nature sculptent le cosmos en évoluant vers l'entropie maximum, autrement dit, la mort. La *force de gravitation* crée l'information des galaxies, des étoiles, etc., tout cela devant se terminer un jour en trous noirs. Les deux *forces nucléaires* fabriquent une information sous la forme d'atomes variés. Il en existe 92 aujourd'hui, mais dans un avenir lointain, ils se transmuteront tous en fer, le plus stable d'entre

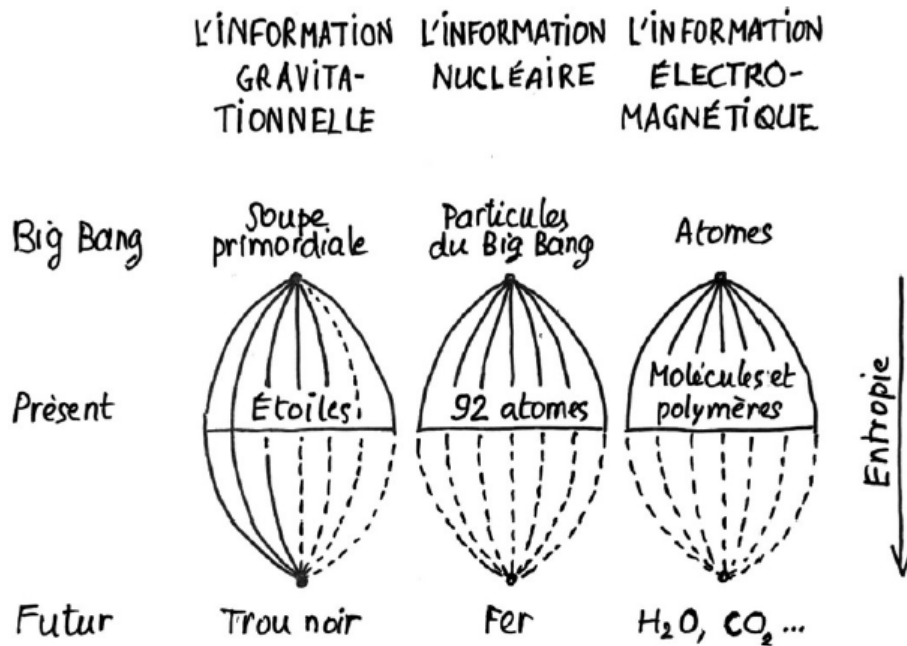


Figure 13 | La création d'information cosmique selon Reeves.

eux. Enfin, la *force électromagnétique* développe aussi l'information en produisant une grande richesse de molécules, la plus complexe étant l'ADN des êtres vivants. Cette immense variété à l'origine de la vie est aussi appelée à disparaître dans un avenir lointain. Alors, seules subsisteront les molécules les plus simples et les plus stables comme celles de l'eau ou du gaz carbonique, avant de se décomposer en particules ou de subir un destin inconnu à l'intérieur de trous noirs.

La leçon de l'expérience du café au lait est que la complexité apparente se développe toujours spontanément jusqu'à un maximum. Dans la suite de l'ouvrage, nous évoquerons souvent cela en parlant d'*auto-organisation*. Certains y voient un *quatrième principe de la thermodynamique* qui pourrait s'exprimer ainsi :

Tout système traversé par un flux d'énergie entre un état faiblement entropique et un autre plus entropique tend à s'auto-organiser.

Dans ce sens, il faut voir dans le deuxième principe (l'entropie croissante), le grand bâtisseur du monde. Cependant, de même que le

meilleur édifice construit par le meilleur architecte ne sera pas éternel, la complexité du cosmos disparaîtra inéluctablement un jour. Quand le Soleil se transformera en géante rouge d'ici quelques milliards d'années, l'immense complexité accumulée sur Terre partira en fumée dans un immense brasier. Entre temps, la vie aura-t-elle essaimé en accumulant plus de complexité ailleurs ? C'est souhaitable, mais rien n'est moins sûr. Même dans ce cas heureux, elle trouvera une fin plus tard.

EXTRAIT 2 - LES CONTRAINTES STRUCTURANTES

LE HASARD EST AUSSI SUJET AUX CONTRAINTES QU'IL CRÉE LUI-MÊME

Un second type de contraintes oblige l'énergie à travailler et à construire la complexité : ce sont les obstacles que les systèmes s'imposent à eux-mêmes. Nous disions que la **rivière** creuse son lit, lequel devient ensuite un chemin obligatoire. Poursuivons cette analogie avec l'exemple anecdotique d'un fleuve espagnol : l'Èbre. Il trouve sa source en Cantabrie dans le nord du pays, à 40 kilomètres de l'Océan Atlantique. Pourtant, il a creusé son lit sur plus de 900 kilomètres pour aller se jeter dans la Méditerranée près de Tarragone. Pourquoi ? Dans un massif montagneux, un ruisseau passe parfois sur la crête d'un talus. De là, il peut tomber d'un côté ou de l'autre. Les aléas du terrain, une pierre, une branche d'arbre tombée, l'obligent à « choisir » un côté. D'une façon similaire, lorsque vous êtes face à une bifurcation de la route, vous êtes forcé d'opter pour une des deux directions. Les lois physiques se limitent à dire que les deux versants sont des chemins possibles pour le cours d'eau. Une fois que le hasard a poussé l'eau d'un côté, elle va poursuivre sa route et creuser les reliefs dont elle sera prisonnière, jusqu'à rencontrer une autre bifurcation.

On pourrait dire que c'est le relief qui impose le dessin du lit de l'Èbre. Pourtant, ce n'est pas tout à fait vrai : on observe le même phénomène en terrain presque horizontal et dépourvu de relief. Dans ce cas, une rivière forme d'elle-même ses propres méandres. Dans la

partie externe des virages, l'érosion par l'eau est maximum, ce qui tend à déplacer les lacets. À ce jeu, les parties courbes en rejoignent d'autres, modifiant à chaque fois le lit substantiellement. La figure 17 représente les traces d'anciens méandres observables à l'infini, là où passe le Mississippi aujourd'hui. Le fleuve fabrique et modifie en permanence son lit, c'est-à-dire la contrainte s'imposant à son propre écoulement.



Figure 17 | Le lit du Mississippi croisant ses anciens méandres.

L'analogie avec les rivières ne nous a-t-elle pas égarés vers des choses insignifiantes et fort éloignées de nos préoccupations concernant l'Univers ? Certainement pas : l'exemple de la rivière élaborant ses propres limites se retrouve dans les fondements de... la relativité générale. Que nous dit Einstein ? Le fait que tous les corps tombent de la même façon dans le vide, indépendamment de leur masse, laisse fortement penser que la gravitation n'est pas une propriété des *corps* eux-mêmes. Elle semble plutôt se rattacher à l'*espace-temps* dans lequel ils évoluent. Effectivement, pour le savant, la force de gravitation entre corps massifs n'existe pas en tant que telle. En revanche, selon ses équations, toute masse « creuse » l'espace. Ce terme est

difficile à saisir, car l'esprit humain se représente les courbures en une ou deux dimensions, c'est-à-dire sur les lignes ou les surfaces, mais non dans les volumes et encore moins dans l'espace-temps à quatre dimensions. Une fois une telle « dépression » formée, les autres masses tendent à y tomber naturellement, d'où l'impression de *force à distance*. Bien sûr, ces dernières creusent aussi le tissu de l'espace autour d'elles. De tout cela résulte ce qui ressemble à des forces d'attraction sans l'être vraiment. Le théoricien de la relativité John A. Wheeler résumait la gravitation d'Einstein en disant : « La matière dit à l'espace comment il doit se courber, et l'espace dit à la matière comment elle doit se mouvoir. » En d'autres termes, la rivière dit où il faut creuser le lit, et le lit dit à la rivière où elle doit passer ! Grâce à ce principe très général, la gravitation modèle l'ensemble de l'Univers, ses galaxies, ses étoiles, ses planètes et ses nuages. En courbant l'espace, tous ces objets célestes créent des contraintes s'imposant à eux-mêmes et aux autres. En se perdant dans ces nombreux méandres, le cosmos résiste à sa tendance naturelle à s'effondrer en trous noirs. Il oblige l'énergie faiblement entropique du Big Bang à travailler pour engendrer la complexité.

EXTRAIT 3 - LES GRANDES TRANSITIONS DU VIVANT

À son tour, la vie a entraîné une transformation très profonde de la **planète**. Un jour lors d'une promenade dans les Préalpes, je me suis rendu compte qu'autour de moi, tout avait été forgé par la vie : la faune et la flore bien sûr, mais aussi la terre, les roches calcaires de la montagne et l'asphalte de la route. L'oxygène que je respirais venait aussi de la vie. Au total, cette modification par la biosphère a pris 3,8 milliards d'années. Les phénomènes géologiques et l'évolution naturelle sont en général très lents. Cependant, comme nous allons le voir, l'histoire de la vie est ponctuée de transitions rapides (figure 27).

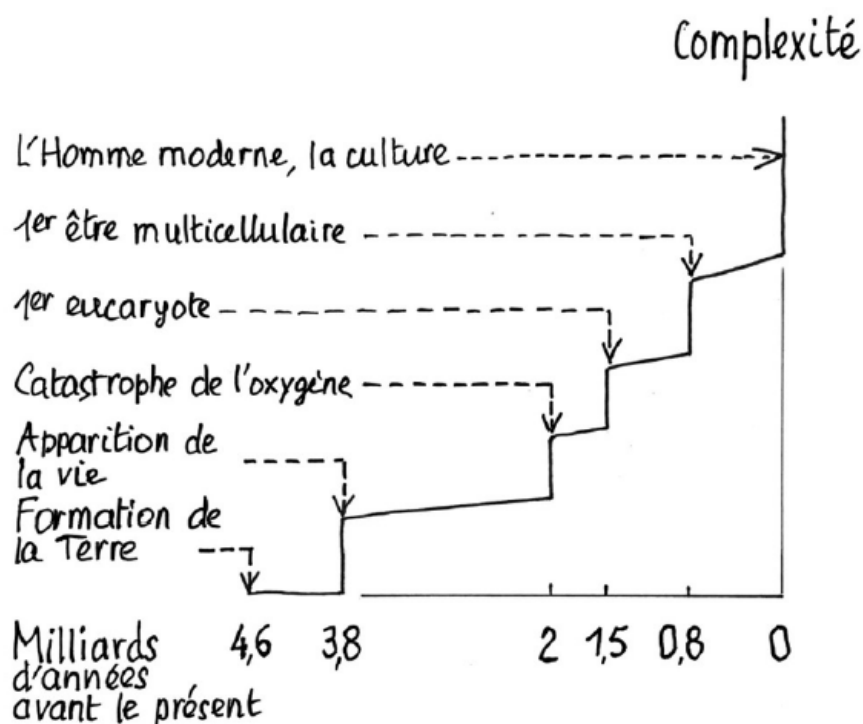


Figure 27 | Les transitions majeures depuis l'apparition de la vie.

35. cf. *LES CLÉS*. Page 258.

Pendant plus de 2 milliards d'années, la vie s'est résumée aux bactéries (*procaryotes*). L'apparition de la photosynthèse a provoqué la *catastrophe de l'oxygène*, une conversion fondamentale déjà évoquée : la surface de la Terre s'est radicalement transformée chimiquement en passant de réductrice à oxydante. Une évolution profonde du vivant devait s'ensuivre. Ainsi est apparue, il y a 1,5 milliard d'années, une forme de cellule beaucoup plus grosse et complexe que la bactérie : l'*eucaryote*, qui constitue aujourd'hui l'ensemble des êtres multicellulaires (végétaux, champignons et animaux). Il présente une membrane plus souple permettant d'absorber les aliments et de les digérer intérieurement (*phagocytose*), un coffre-fort préservant l'ADN (le noyau), et des organites servant à faciliter l'élaboration des protéines, l'assimilation de l'oxygène, etc. Le saut de complexité du procaryote à l'eucaryote est tel que, pour certains biologistes, il est encore plus improbable que l'émergence de la vie.

Cette deuxième transition en a favorisé une troisième : la naissance de l'être **multicellulaire**, il y a environ 800 millions d'années. Il est frappant de constater l'extrême improbabilité de ces deux derniers événements. Après l'apparition relativement rapide de la vie sur Terre, il a fallu plus de 3 milliards d'années pour passer de la bactérie à l'être multicellulaire. On éprouve le vertige en pensant au nombre de réplifications cellulaires qui se sont déroulées pendant une telle durée. Cela illustre deux faits : l'évolution naturelle est très lente, mais si elle dispose de beaucoup de temps, elle est capable de créations extrêmement improbables.

EXTRAIT 4 - LA CELLULE S'AUTO-ASSEMBLE

Parmi les composants des cellules, le **flagelle** est un exemple particulièrement intéressant pour illustrer jusqu'où peut aller l'auto-assemblage. Beaucoup de bactéries sont dotées d'un cil mobile qu'elles agitent pour se déplacer, à l'image des spermatozoïdes nageant frénétiquement vers leur but. Certains flagelles sont alternatifs et agissent comme une godille. D'autres, plus sophistiqués, sont rotatifs telle l'hélice d'un bateau à moteur. Ils tournent aux environs de 3 000 tours par minute. Nous découvrons que l'homme n'a pas inventé la roue ! La bactérie l'a fait avant lui (figure 36). Elle est allée bien plus loin en réalisant aussi le premier moteur électrique !

Le dispositif comprend une quarantaine de protéines qu'il va falloir apparier dans un certain ordre. Comment une mécanique aussi complexe peut-elle s'auto-assembler ? Quand un enfant construit un

appareil avec les pièces d'un Meccano, il dispose d'un mode d'emploi ou, au moins, d'un schéma global qu'il a imaginé. Il suit une séquence précise pour fixer les pièces l'une après l'autre. Bien que la bactérie ne possède ni un mode d'emploi, ni une procédure pour présenter les 40 protéines dans le bon ordre, elle parvient à les placer par le seul jeu du hasard. Elle commence par les produire et les laisser flotter librement. Ces pièces ont été conçues pour se fixer l'une à l'autre dans un certain ordre. La première est faite pour s'attacher à la membrane. Elle le fait spontanément comme beaucoup d'autres protéines dont le rôle est de faire transiter des substances à travers celle-ci. La seconde vient s'accrocher à la précédente dès que le hasard la fait passer par le bon endroit. L'assemblage résulte simplement du fait que les deux protéines ont exactement la forme idoine et les charges localisées aux bons endroits. Ainsi se construit un stator (partie fixe du moteur). Ensuite un cylindre vient s'y insérer. Sur cette pièce se fixent des protéines sensibles à l'électricité (une circulation de protons) pour constituer le rotor du moteur. Autour, se placent d'autres protéines, donneuses de protons, pour les alimenter. Enfin, le flagelle se monte, solidaire du rotor. À chaque étape, seule la pièce possédant la clé adaptée peut prendre son tour.

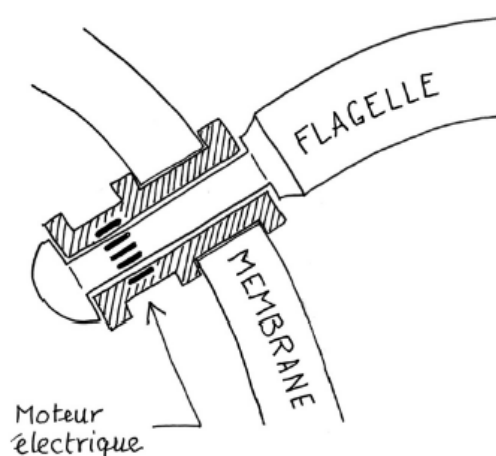


Figure 36 | Le flagelle des bactéries, premier moteur électrique.

Cet auto-assemblage se fait spontanément grâce à la géométrie des protéines en jeu et aux charges électriques qui les « aimantent ».

Le mode d'emploi, à l'origine codé dans le génome, se retrouve dans ces formes après traduction. Il suffit de produire les bonnes protéines en quantité suffisante et le hasard s'occupe du montage. On peut résumer cela en disant que « la recette de cuisine est inscrite dans les ingrédients » ou, plus scientifiquement, que l'organisation est potentiellement présente dans le substrat. La forme de chaque pièce est héritée de milliards d'années d'évolution pendant lesquelles ont été sélectionnées les meilleures : les protéines disposant des caractéristiques idoines pour se réunir et le faire dans le bon ordre. Pour parler plus crûment, si une bactérie s'avère incapable d'assembler correctement son flagelle et son moteur, elle meurt sans descendance.