

A close-up photograph of a green leaf with a dragonfly perched on its central vein. The leaf's veins are clearly visible, and the dragonfly is positioned in the center, facing downwards.

À L'ORIGINE DE LA VIE

Le passage du minéral au vivant

*LE GROUPE
ÉMERGENCE*

M. GALIANA-MINGOT

2026

LE FIL CONDUCTEUR

Les plus anciennes traces de vie : elle est apparue dès qu'elle le pouvait !

Elle a émergé comme tout le reste : par auto-organisation

Il s'agit d'auto-organisation chimique (création de molécules)

*Le berceau de la vie : dans les cheminées hydrothermales, un endroit
où se dissipe le potentiel oxydo-réducteur de la planète*

La combinatoire issue de la chimie du carbone s'y développe

La catalyse favorise certaines réactions et opère une sélection

L'autocatalyse crée des formules complexes récurrentes et s'imposant

Avec une probabilité de catalyse croissante : fermeture causale

La formation spontanée des vésicules lipidiques crée les protocellules

Elles sont capables d'évolution darwinienne (en l'absence de gènes)

L'évolution darwinienne explique la suite

Les plus anciennes traces de vie

Ce sont des *stromatolithes*

datant de -3,5 Mds a.

produits par des bactéries

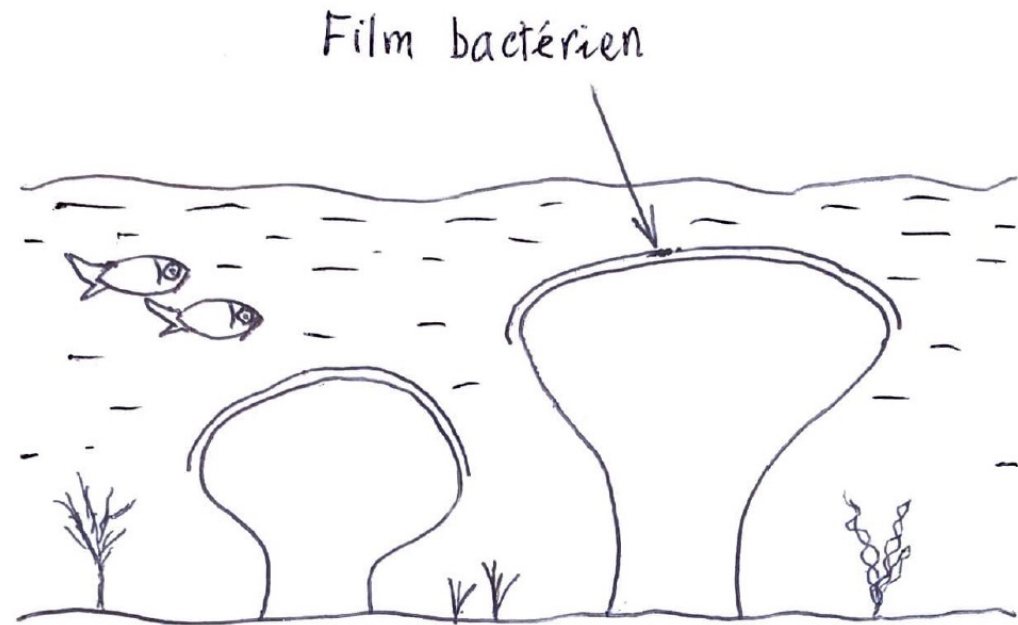
L'eau liquide est apparue il y a

4 Milliards d'années

Deux sources d'étonnement :

1. La vie est apparue « dès qu'elle le pouvait » ! (refroidissement, présence d'eau)
2. Elle a mené très vite à une complexité très grande : celle des bactéries

Je vais décrire les 2 ou 300 premiers millions d'années qui ont pu conduire à l'ancêtre des bactéries (LUCA – *Last Universal Common Ancestor*)



La vie est apparue comme tout le reste : par auto-organisation

« Des obstacles contrarient la descente vers l'entropie maximum »

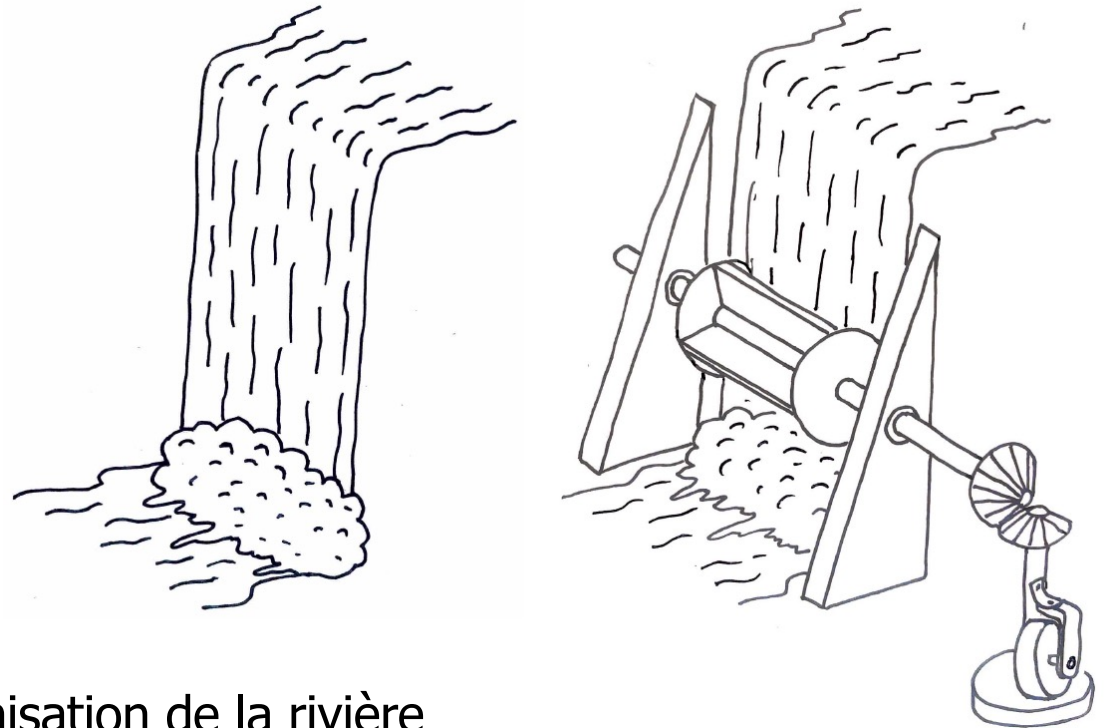
Dans la chute du Niagara : toute l'énergie de l'eau se dissipe dans la chute, sans rien produire d'autre

Si l'on interpose une contrainte, il est possible d'extraire de *l'énergie libre* qui peut travailler (le moulin)

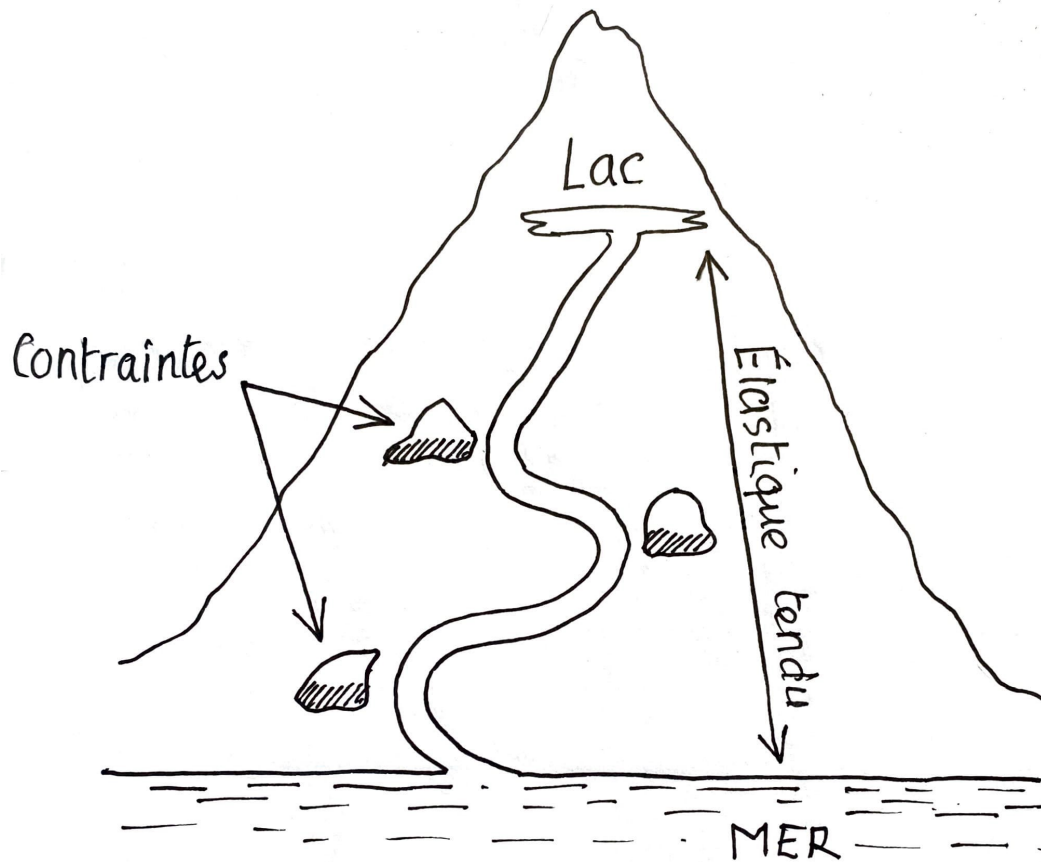
Dans la nature, la rivière rencontre des contraintes rocheuses

Elle sculpte les reliefs, qui deviennent à leur tour de nouvelles contraintes

Ces contraintes permettent l'auto-organisation de la rivière



Le rôle causal des contraintes



L'auto-organisation *des reliefs* :

- Un élastique tendu (*la force de la gravitation*),
- et des obstacles (*contraintes*),
- font apparaître de l'énergie libre,
- qui crée de nouvelles structures
- qui elles-mêmes serviront de nouvelles contraintes, etc.

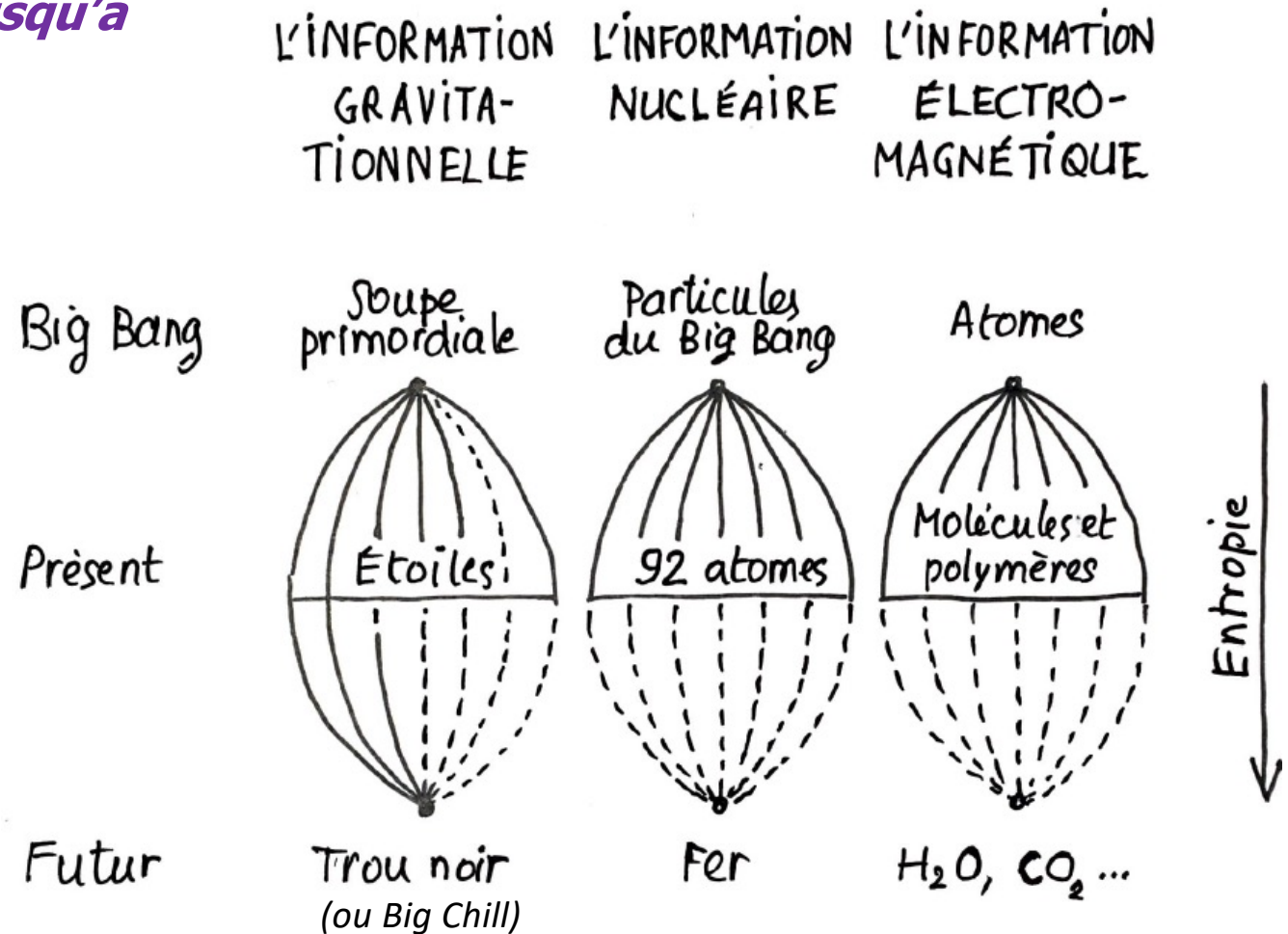
L'auto-organisation s'applique aux 4 forces de la nature :
gravitationnelle, nucléaires et **électromagnétique.**

L'évolution de l'Univers jusqu'à son entropie maximum

Selon Hubert Reeves,

l'Univers est né dans
un état très simple, très
faiblement entropique

Il évolue vers l'entropie
maximum en créant
(temporairement) de
l'information



Toutes les structures existantes se créent par auto-organisation

L'astrophysicien Eric J. Chaisson a mesuré combien chaque structure complexe dissipe

d'énergie par gramme de matière : 1 g de galaxie, 1 g d'étoile, 1 g de bactérie, etc.

Plus une structure est

complexe, plus elle dissipe d'énergie

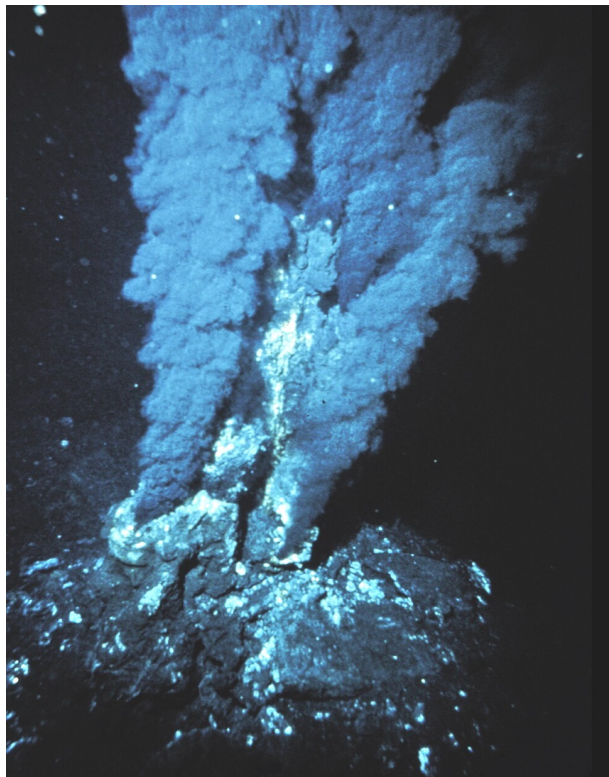
Les structures liées à la vie sont de loin les plus dissipatives

STRUCTURES	FLUX MOYEN D'ÉNERGIE LIBRE PAR GRAMME <i>(ergs/s/g)</i>
La Galaxie	0,5
Le Soleil	2
La Terre	75
Les plantes (la biosphère)	900
Le corps d'un animal, de l'Homme	20 000
Le cerveau humain	150 000
La société humaine	500 000

L' « élastique » chimique a formé une pile à travers la croûte terrestre

Le long des dorsales, le magma interne s'approche de la matière externe (l'océan)

Entre les deux matières, existe un potentiel électrique (une pile)



Les *cheminées hydrothermales* sont des endroits privilégiés

Aujourd'hui, elles sont le siège d'un écosystème florissant :

Une cheminée produit 2,5 kg de biomasse par heure

Elles sont pu être un milieu très fertile pour l'origine de la vie :

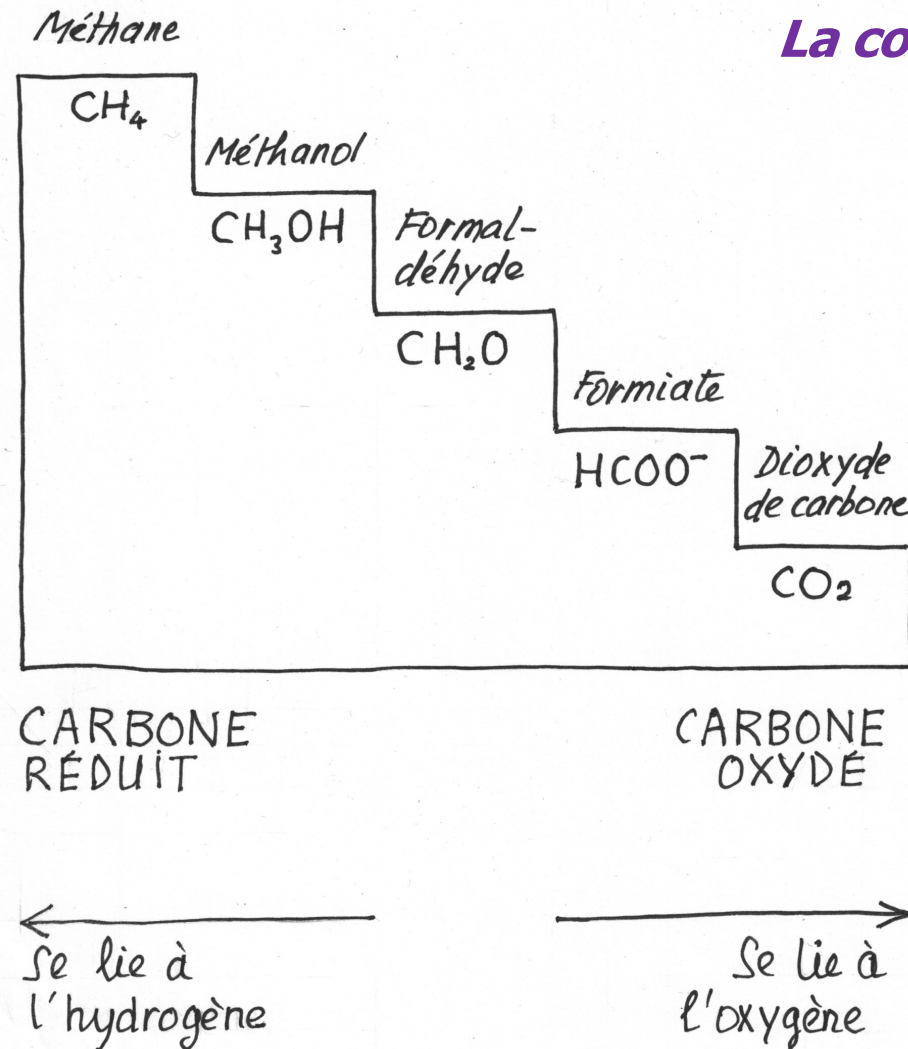
- **source très régulière d'énergie chimique**

- **une constitution fortement catalytique :**

- * constituée de microalvéoles

- * métallisées par le fer, le nickel, le magnésium, etc.

La combinatoire issue de la chimie du carbone



Entre les substances *réductrices* venues de l'intérieur (H_2 , CH_4) et l'eau légèrement *oxydante*, de l'océan, se crée une énorme variété de molécules

Sur Terre : une explosion combinatoire

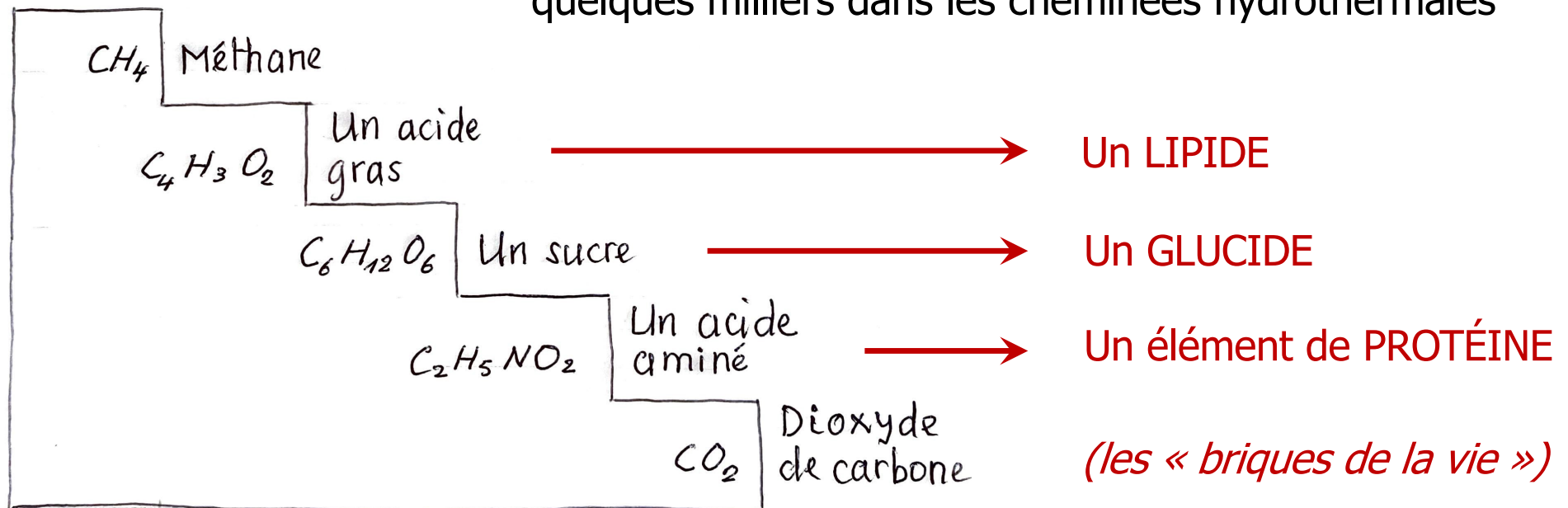
Elles se créent par auto-organisation

Elles créent en permanence de l'information (*néguentropie*)

L'entropie fait, qu'*in fine*, elles se dégraderont en petites molécules

Exemples de molécules plus complexes se formant sur le chemin de l'entropie maximum

3,5 millions de molécules organiques répertoriées. On en a trouvé une cinquantaine dans l'expérience de Miller-Urey, 300 dans le cosmos. Il y en a peut-être eu quelques milliers dans les cheminées hydrothermales



L'expérience de Miller-Urey (1953)

Un ballon contient les gaz que l'on présumait
constituer l'atmosphère primitive

Des éclairs apportent de l'énergie

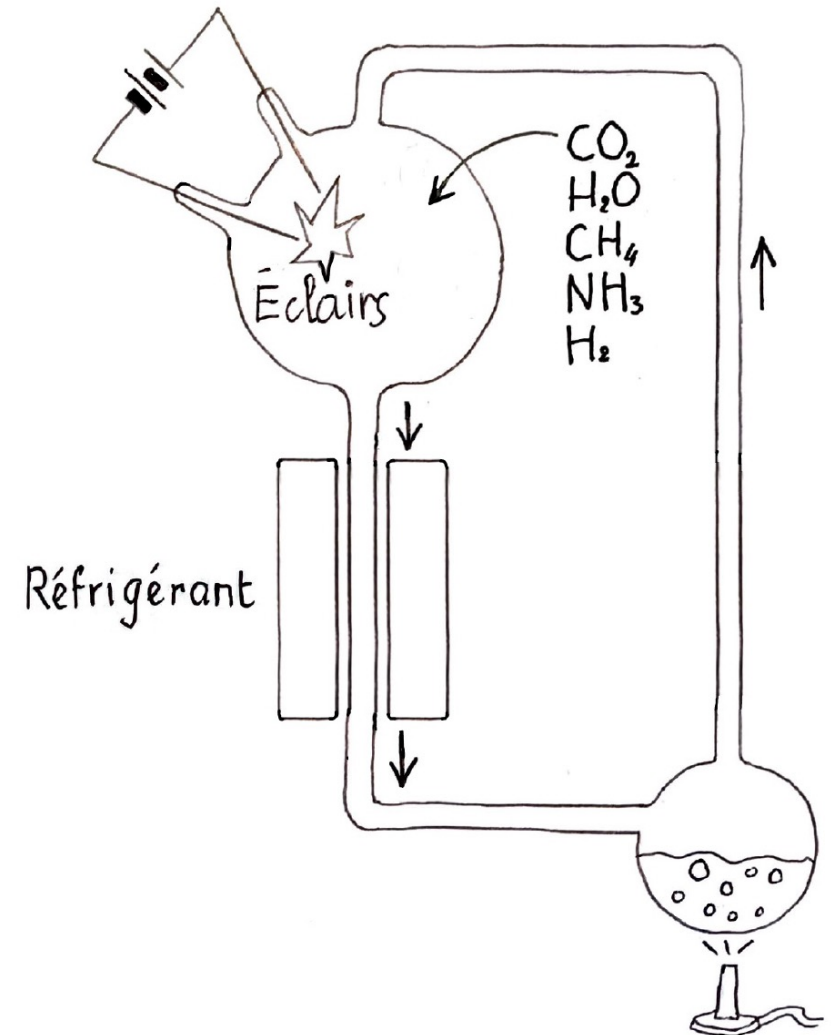
Au bout de 8 jours, Miller recueille un goudron

Il y trouve toutes sortes de molécules

organiques : *glucides, lipides, acides aminés*

Depuis, une richesse chimique équivalente a
été trouvée dans les nuages cosmiques

Les myriades d'alvéoles des cheminées hydro-
thermales sont autant de « ballons de Miller »



L'importance de la catalyse

Principe de la catalyse : la réaction $A + B \rightarrow C$

est favorisée par le catalyseur E

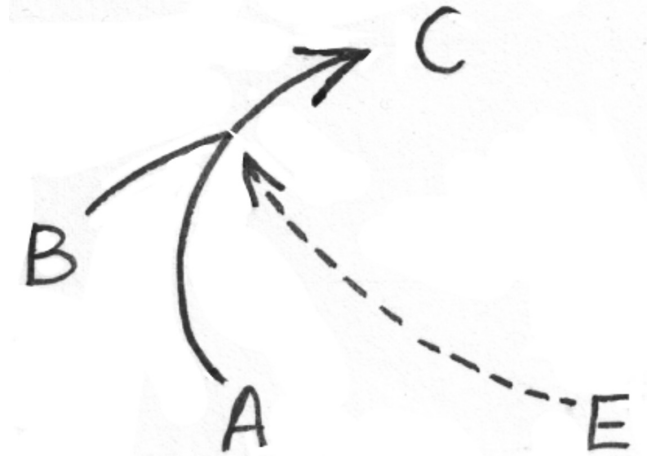
Le catalyseur ne participe pas à la réaction

Il abaisse la *barrière d'activation* de la réaction

Il **reste disponible** pour recommencer

Exemples : il faut une flamme pour que l'essence brûle ; il faut une mèche pour que la cire de la bougie brûle ; il faut des pots catalytiques pour achever la combustion des gaz...

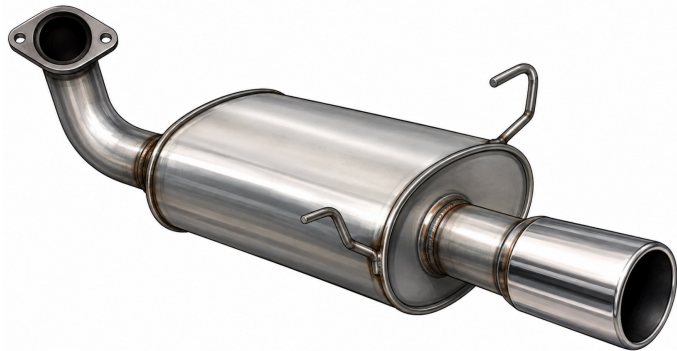
Typiquement, la vitesse d'une réaction est multipliée de plusieurs ordres de grandeur par la présence d'un catalyseur.



Une sélection naturelle opérée par la catalyse

Les premiers catalyseurs ont été minéraux :

- les surfaces (cristaux, parois)
- les métaux : fer, zinc, magnésium, nickel, manganèse...
- les alvéoles métallisées des cheminées hydrothermales

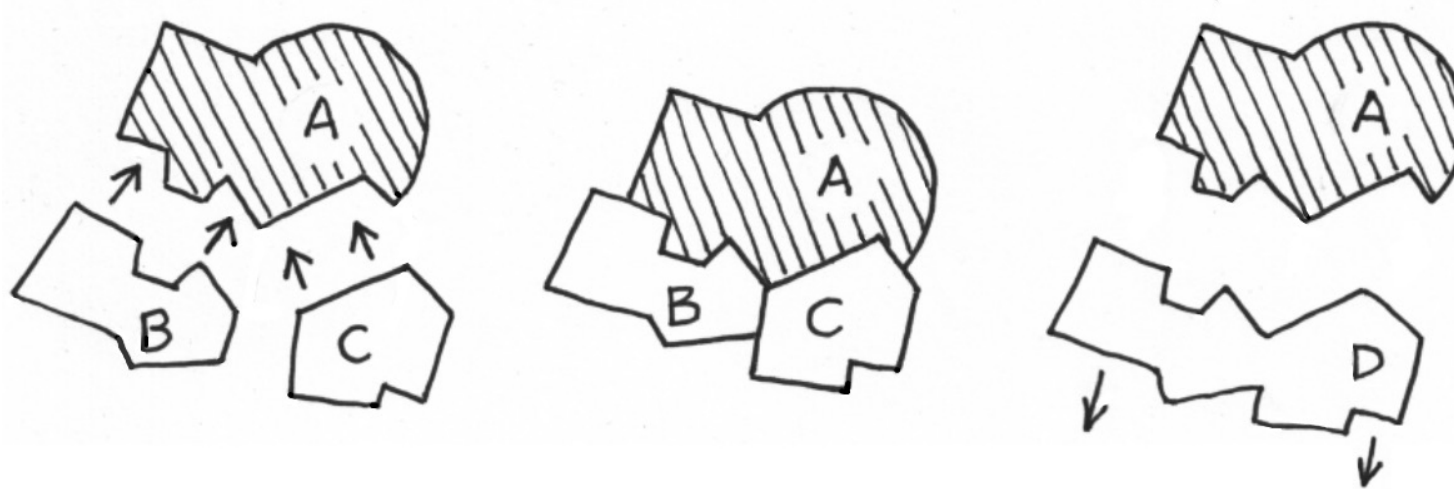


Leur présence opère une **forte sélection** parmi les molécules : certaines substances vont prédominer et les autres « servir d'aliments »
La catalyse extrait de l'ordre du chaos

Une sélection plus fine est opérée par les catalyseurs « spécifiques »

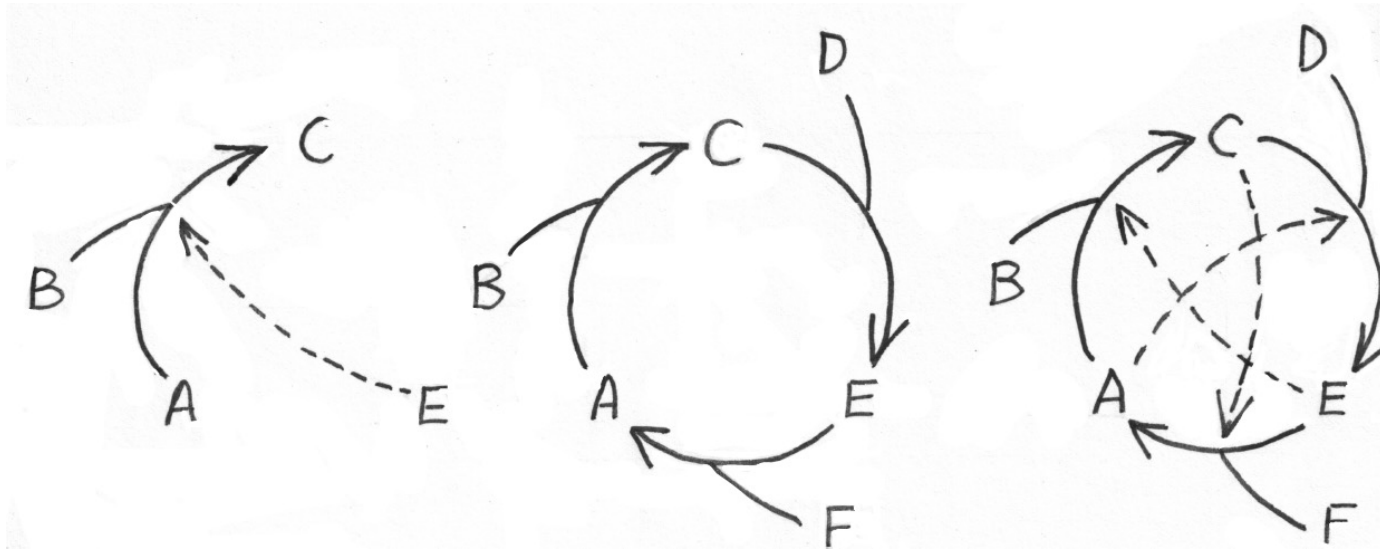
Catalyseur spécifique : une molécule dont la forme permet de favoriser une réaction particulière

Les *coenzymes* (e.g. certaines vitamines), puis de courts *peptides* (proto-enzymes)



Métabolisme du corps humain : 5 000 réactions, catalysées par 7 000 *enzymes*

La reproduction au niveau moléculaire



Lorsque se forme un cycle autocatalytique, les molécules du cycle se « reproduisent » (*autopoïèse*) et prédominent en quantité.

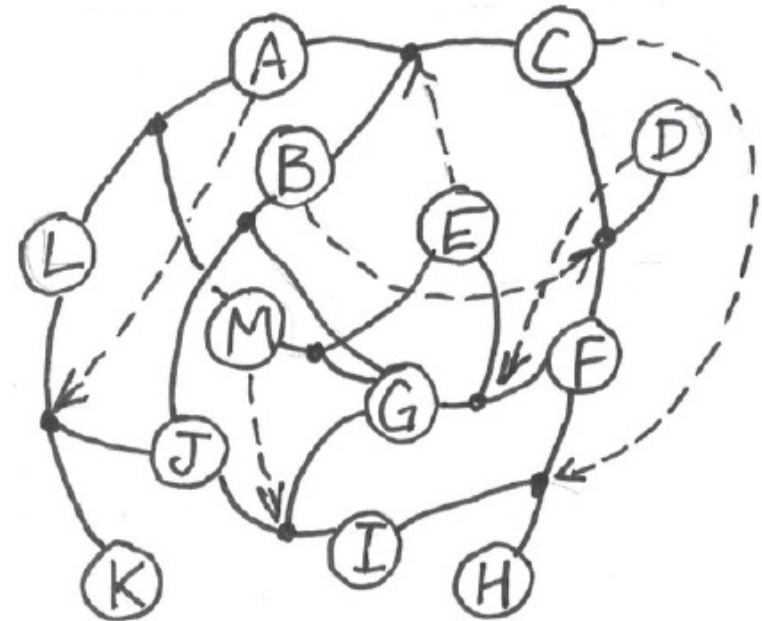
Ex : Dans le métabolisme de tous les êtres vivants figure le *cycle de Krebs* formé de 11 réactions essentielles

L'ensemble autocatalytique forme un tout qui s'auto-entretient

Ce concept de cycle autocatalytique se généralise à un **ensemble autocatalytique** pouvant comprendre, dans le milieu prébiotique, des centaines ou des milliers de molécules

L'ensemble contient une grande proportion de courts peptides (au maximum 8 maillons) et dans une moindre mesure, de courts ARN

Certains dipeptides sont fortement catalytiques. On a mis en évidence un effet catalytique entre peptides et ARN, qui doit être à l'origine du code génétique.



La fermeture catalytique

La *fermeture catalytique* est réalisée lorsque toute réaction du métabolisme est catalysée, et tout catalyseur est produit par au moins l'une des réactions

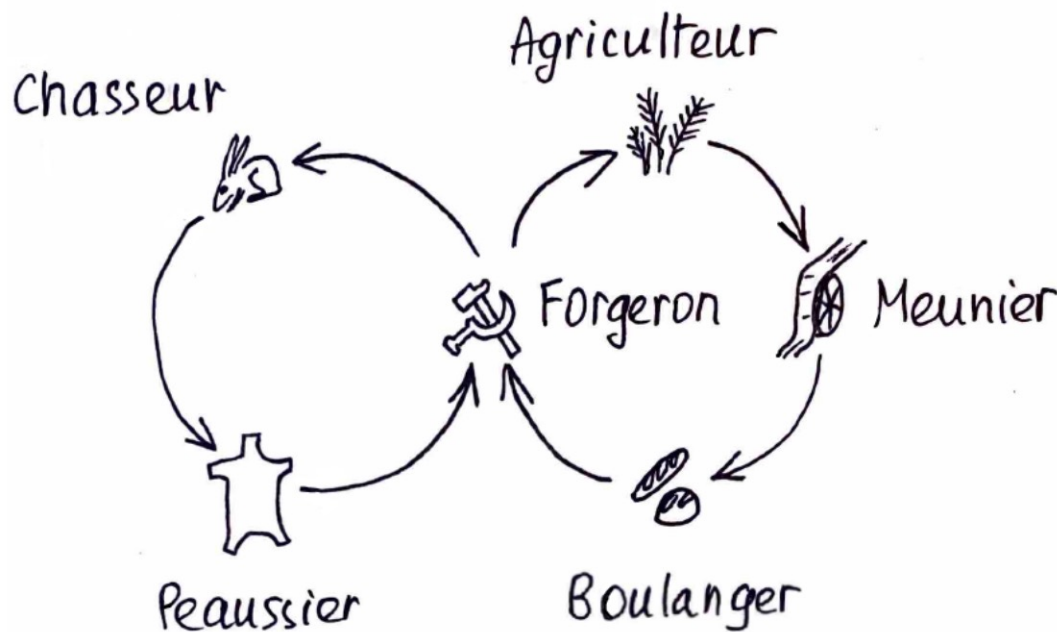
En se fermant causalement, l'ensemble autocatalytique acquiert l'**autonomie**

(Stuart Kauffman)

Exemple du village gaulois :

- l'activité de tout Gaulois **catalyse** celle d'autres Gaulois
- l'activité de tout Gaulois **est catalysée** par celle d'autres Gaulois

L'autarcie du village en résulte

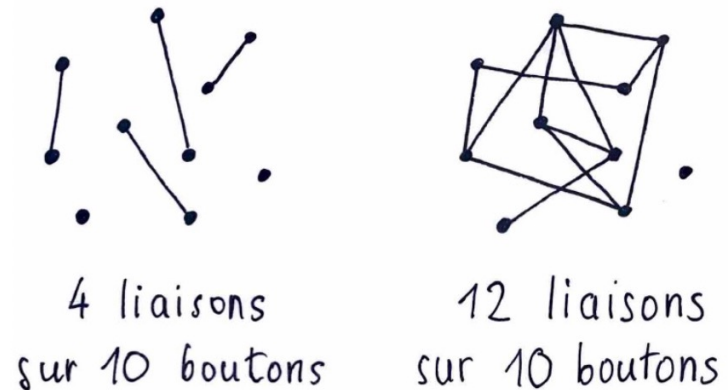


La transition d'Erdős-Rényi

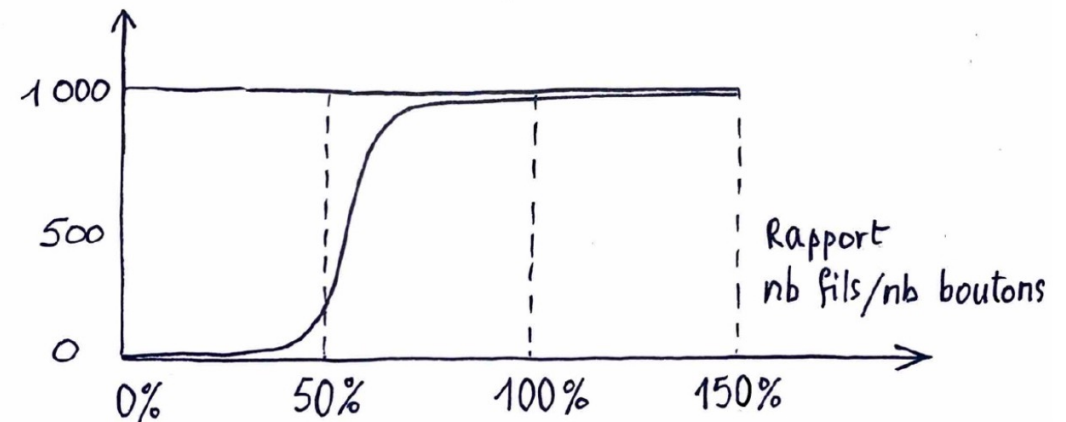
La fermeture catalytique passe par une transition de phase lorsque le nombre de catalyseurs dépasse une proportion du nombre d'espèces moléculaires

Il s'agit d'un phénomène de *percolation* tel qu'on l'observe dans :

- les réseaux sociaux (la création du *petit monde*)
- la fracturation hydraulique, etc.



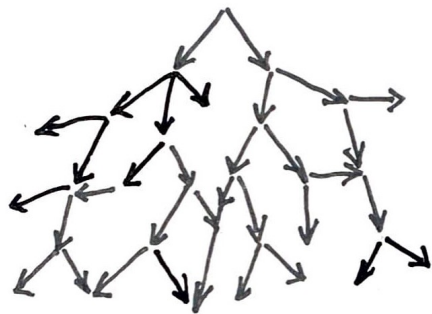
Taille du plus grand ensemble interconnecté



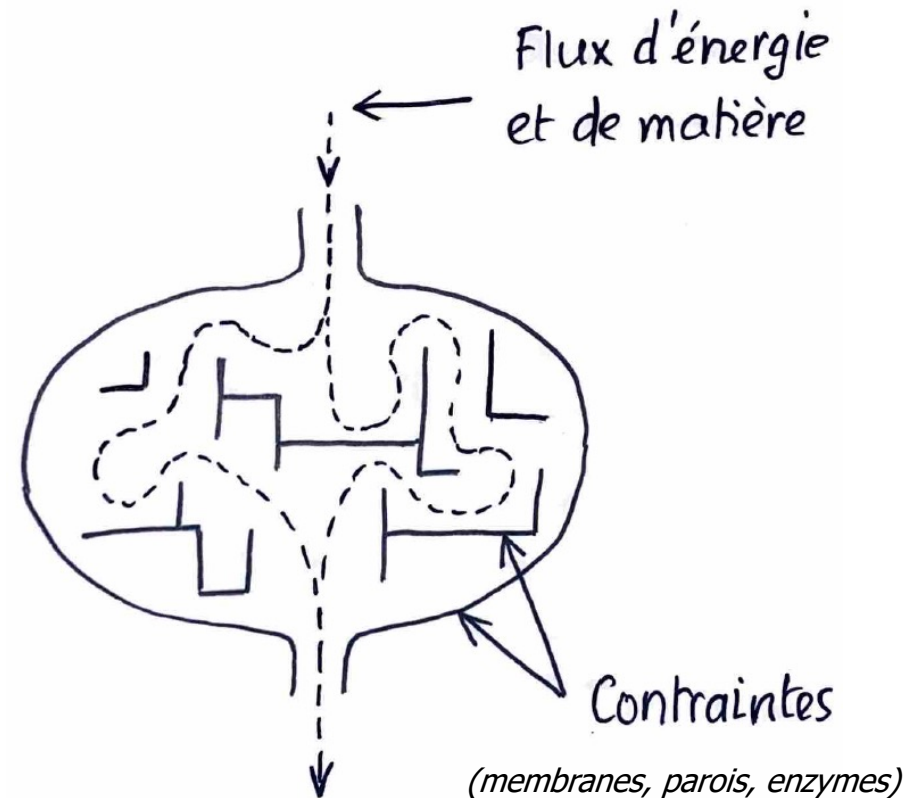
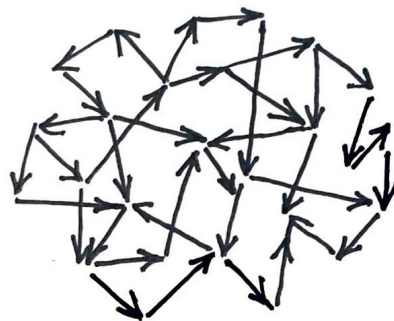
L'être vivant réalise la fermeture causale

La fermeture catalytique crée une situation
où tous les processus sont contraints
Ces contraintes maximisent l'extraction
d'énergie libre

Dans le monde
minéral



Dans l'être
vivant



Elle explique le caractère circulaire de
de la causalité chez l'être vivant

La formation des protocellules

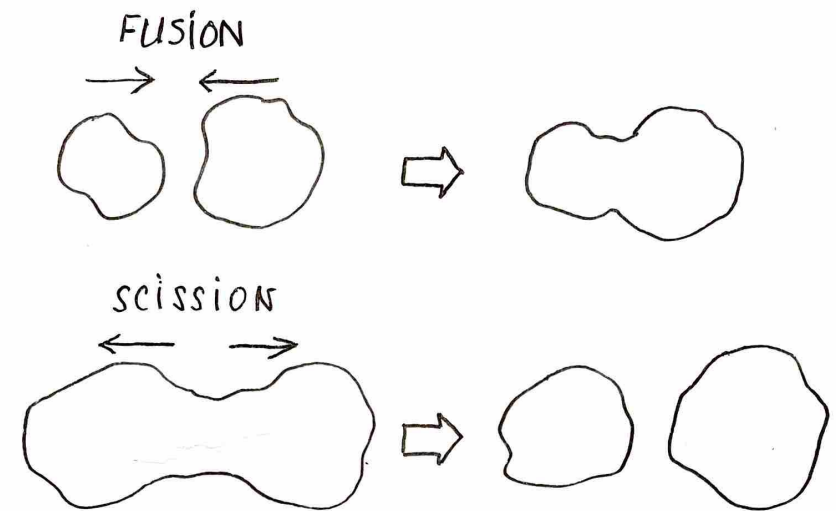
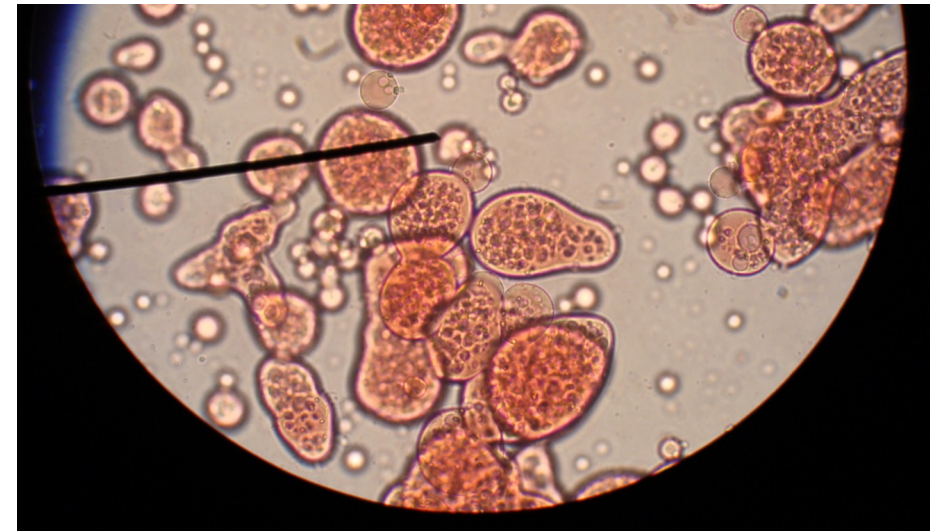
Dans un milieu suffisamment riche, les *acides gras* forment spontanément des membranes

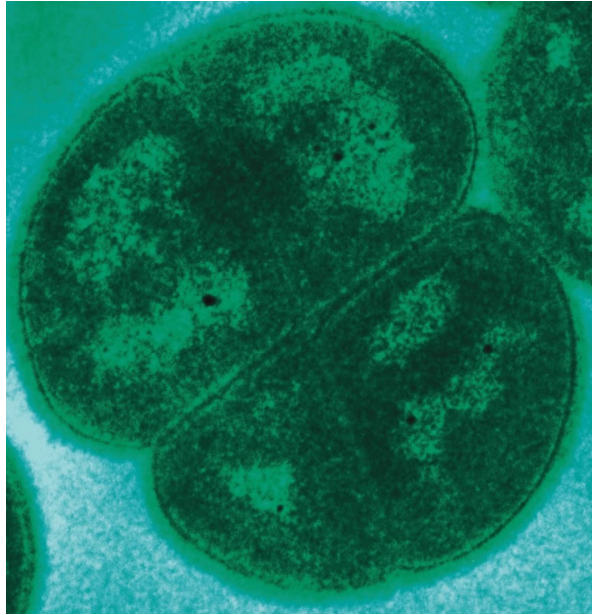
Elles se referment en vésicules

En 1981, D. Deamer voit se former des vésicules lipidiques à partir de poussière extraite de la météorite de Murchison

Ces *protocellules* fusionnent jusqu'à une certaine taille. Au-delà, elles se scindent :

- C'est une *division cellulaire*
- Elles ont pu abriter les cycles autocatalytiques





L'enclenchement de l'évolution darwinienne

La protocellule dotée d'un métabolisme autonome devient sujette à sélection darwinienne

L'information transmise dans les générations n'est pas encore un gène, mais une simple *information compositionnelle* (le répertoire des molécules de son métabolisme)

À partir de là, **la vie est apparue** ; la sélection naturelle a pu faire le reste :

- molécules de plus en plus longues (macromolécules : protéines, ARN, ADN...)
- apparition de la *réplication par modèle* (un ARN catalyse le montage d'une protéine)
- séparation des rôles entre l'ARN (gène) et les protéines (enzymes)
- formation du code génétique

« La vie est une manifestation
obligatoire des propriétés
combinatoires de la
matière. »

Christian de Duve.

Michel Galiana-Mingot

m.galiana@mgm-ec.fr

<https://mgm-ec.fr/livre-univers-millefeuille>

