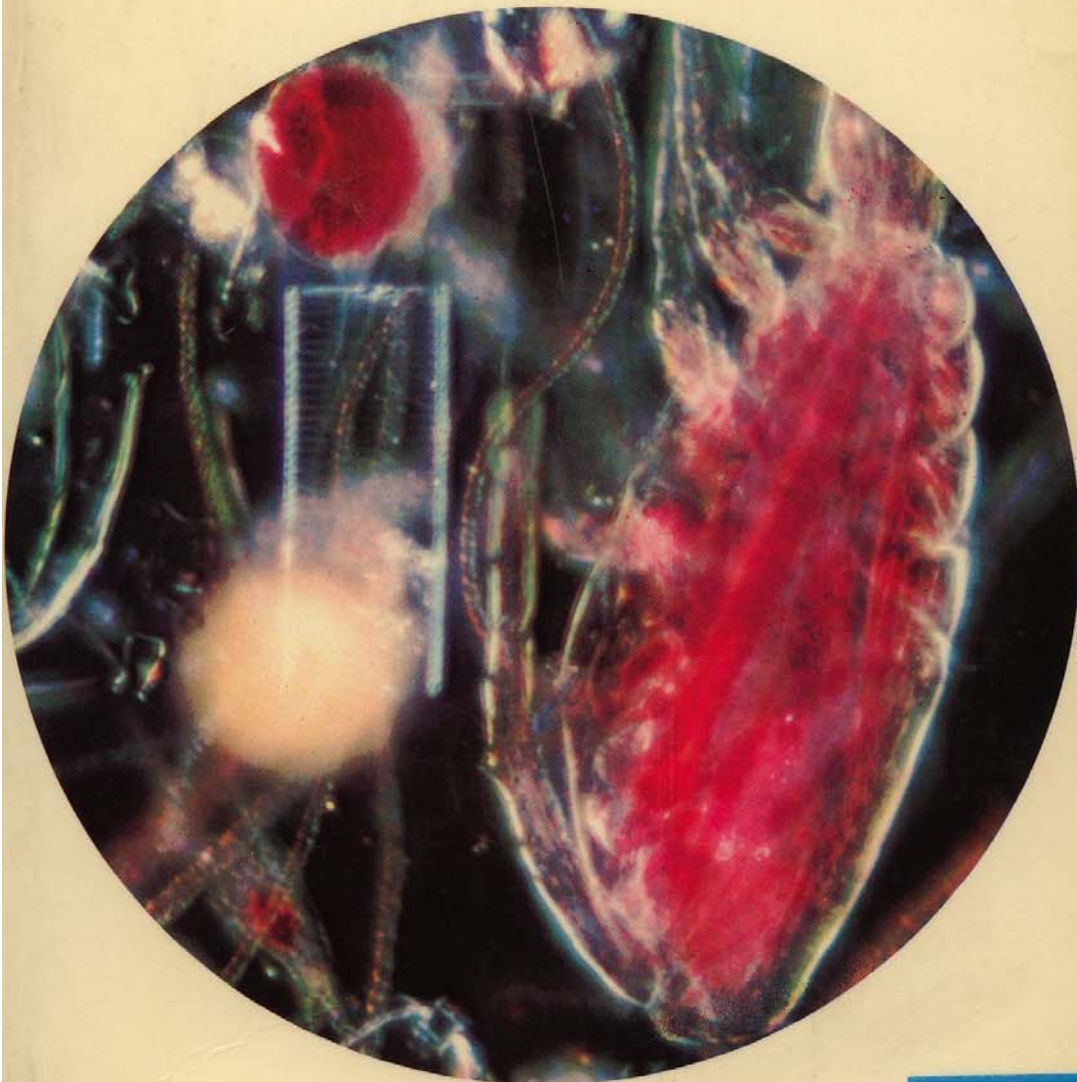


Points

Joël de Rosnay
Les origines
de la vie
de l'atome à la cellule

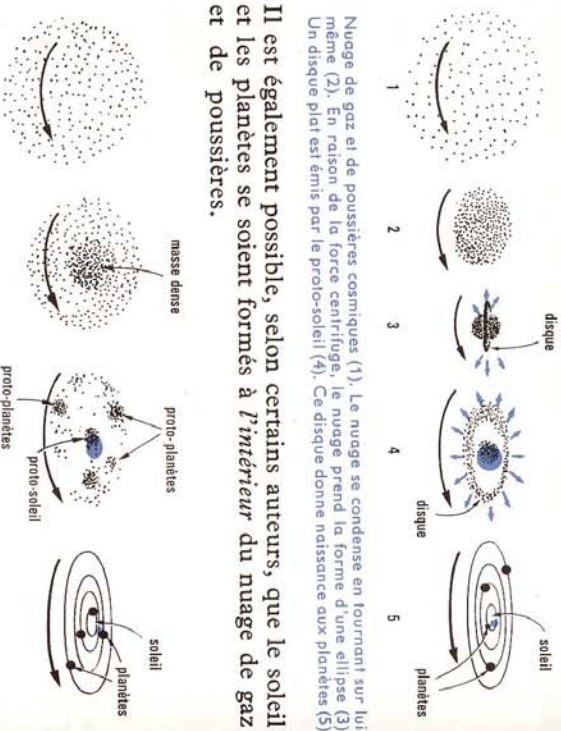


Sciences

L'ORIGINE DE LA TERRE ET LA FORMATION DES PREMIÈRES MOLÉCULES ORGANIQUES

● Un « écrémage » cosmique

Une des proto-étoiles formée dans les bras d'une des nombreuses galaxies devait donner naissance à notre système solaire. On estime que le soleil et ses planètes sont nés d'un de ces vastes nuages de gaz et de poussières cosmiques, résultant – comme on l'a vu – de la fragmentation interne des galaxies. Cette masse gazeuse se serait agglomérée et contractée en tournant de plus en plus vite sur elle-même. Le proto-soleil ainsi formé aurait émis un disque plat, de gaz et de poussières d'où seraient sorties les planètes.



Il est également possible, selon certains auteurs, que le soleil et les planètes se soient formés à l'intérieur du nuage de gaz et de poussières.

Le nuage interstellaire se condense et se contracte en tournant sur lui-même (1). Il se forme une nébuleuse avec une masse dense au centre : le proto-soleil (2). La poussière se coagule en proto-planètes (3). Le système solaire actuel (4).

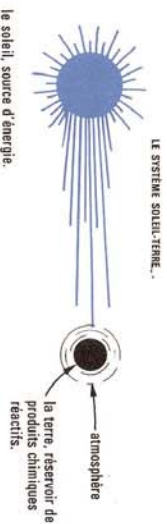
Dans les deux cas, cependant, le comportement de la partie gazeuse du disque (hydrogène et hélium) a dû être différent de celui de la partie solide (poussières). En effet, l'hydrogène et l'hélium se sont échappés dans l'espace, tandis

que les particules rocheuses et métalliques sont restées sur place. On estime que les planètes se sont formées par agglomération de ces poussières, grâce probablement à des matériaux à l'état liquide ou visqueux jouant le rôle de liant ou de glu (eau, bitumes). Ces germes grossirent peu à peu en absorbant les agrégats plus petits qu'ils trouvaient sur leur trajectoire et passèrent de la taille d'un gravier à celle des planètes actuelles. Il ne resta plus dans l'espace entourant l'étoile que de grosses masses trop éloignées pour se gêner¹.

Au fur et à mesure que la masse de la Terre augmentait, les forces de gravitation tendaient à resserrer les unes contre les autres les particules rocheuses qui la constituaient. Il en résulta un fort accroissement de température : les matériaux lourds en fusion sont descendus vers le centre pour former le noyau tandis que les composés légers migraient vers l'écorce. Les volcans déversaient, à la surface, des roches en fusion qui n'ont pas tardé à se solidifier. Au cours de ce processus, il dut se former une très grande variété de composés chimiques. Voyons rapidement quelles ont pu être les premières conséquences de cette évolution cosmique.

1. Lors de la formation des galaxies, nous étions partis d'un nuage de composition extrêmement *homogène* : (99 % d'hydrogène et d'hélium). Or, après la formation du système solaire (et plus généralement sans doute de tout système planétaire), la situation se *trouve presque renversée*. En effet, à la suite du processus d'« écrémage cosmique », les matériaux *les plus rares* de l'univers (1 %) – cristaux et molécules qu'étudient les chimistes – se retrouvent concentrés en des points localisés (les planètes) autour d'une étoile centrale.

2. Le système Soleil-Terre va désormais avoir une grande influence sur la vitesse de transformation de la matière vers



1. Les planètes les plus proches du soleil (Mercure, Vénus, Terre, Mars) sont petites et essentiellement rocheuses (fer et silice), tandis que les planètes éloignées (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune), sont plus grosses et formées, en majeure partie, d'éléments légers (glace, hydrogène, méthane et ammoniac solide).

des états de complexité élevée. En effet, non seulement un véritable « réservoir » rempli de réactifs chimiques (la Terre) se trouve à « bonne distance » d'une puissante source d'énergie (le soleil), mais ce *système ouvert*¹ reçoit en permanence de l'énergie « fraîche » qui va permettre, comme nous le verrons l'apparition et la « survie » de composés chimiques complexes².

● La Terre, réacteur chimique.

Pour bien comprendre la succession des phénomènes qui ont conduit aux premières molécules organiques servons-nous d'une analogie technique.

● Une analogie technique

Un chimiste qui veut réaliser une réaction doit généralement opérer de la manière suivante :

1. Il doit d'abord s'assurer qu'il dispose d'une *source d'énergie* suffisante (bec à gaz, plaque chauffante électrique, calotte chauffante, etc.).
2. Il lui faut ensuite un *appareil de synthèse chimique* (un réacteur). Cet appareil est généralement un ballon de verre destiné à concentrer les réactifs à l'endroit où est appliquée la source d'énergie et à recueillir les produits de la réaction.
3. Le chimiste introduit les *réactifs* dans l'appareil et provoque la réaction en allumant le chauffage, ou en déclenchant toute autre source d'énergie.
4. La *réaction* s'effectue selon les lois des combinaisons chimiques.
5. La dernière opération consiste à *séparer* les produits nouveaux qui se sont accumulés dans le ballon.

● La réalité

1. *La source d'énergie* est évidemment le soleil. Les réactions thermonucléaires dont il est le siège produisent un rayonnement intense diffusé dans tout l'espace environnant : rayons ultraviolets, rayons lumineux, rayons infrarouges.

¹. Un système ouvert échange continuellement de l'énergie ou de la matière avec son environnement. On ne doit donc plus lui appliquer les lois de la thermodynamique classique, valables pour les systèmes isolés, mais les lois de la thermodynamique des systèmes irréversibles. Nous en reparlerons plus en détail à la page 154 sq.

². Répondons-le : cette évolution nous semble unique parce qu'il s'agit de « notre » soleil et de « notre » Terre. Elle est probablement très commune dans l'univers.

2. Le « ballon » chimique

La Terre, en raison de sa taille et de sa masse, possède un champ de gravitation suffisamment important pour attirer et concentrer des molécules gazeuses qui se seraient autrement dispersées dans l'espace. Voilà donc « le réacteur » en place : une surface rocheuse limitée, susceptible de concentrer des réactifs chimiques à proximité d'une source d'énergie et de recueillir les produits d'une éventuelle réaction.

3. Les réactifs

Expliquer comment a pu se « remplir » ce ballon revient à retracer l'histoire de la première atmosphère de la Terre. Il faut rechercher les origines de cette atmosphère, à la fois dans le proto-soleil et dans l'intérieur même de la Terre primitive.

Le soleil, comme la plupart des étoiles, est entouré d'une atmosphère stellaire dans laquelle règne une température très élevée, mais cependant inférieure à celle qui règne à l'intérieur de l'étoile.

Dans cette atmosphère, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le carbone¹ peuvent former des molécules simples et très solides



Protubérances solaires

à deux atomes. Ces molécules résultent, par exemple, d'une association de carbone avec lui-même ; de carbone avec de l'hydrogène, avec de l'azote ou avec de l'oxygène.

Dès que ces molécules tronquées s'éloignent de l'étoile par agitation thermique ou par la pression des radiations – c'est ce qui a dû se passer lors de la formation du système planétaire – elles tendent à se stabiliser en donnant des molécules plus complexes, mais moins réactives. Quelles furent ces molécules ? On a pu récemment montrer que dans un milieu extrêmement riche en hydrogène et à une température relativement basse², le carbone (C), l'azote (N) et l'oxygène (O) ne peuvent exister à l'état libre et se trouvent sous leur forme hydrogénée³. Or, du carbone uni à 4 atomes d'hydrogène, c'est une molécule de méthane (CH₄). De l'azote lié à 3 hydrogènes, c'est de l'ammoniac (NH₃). Enfin, de l'oxygène lié à 2 hydrogènes, c'est une molécule d'eau (H₂O). Ces molécules sont très stables. On reconnaît les trois principaux gaz qu'avec l'hydrogène (H₂), Miller avait introduits dans son ballon. Il avait vu juste car au début de l'année 1969 de vastes nuages de gaz ammoniac, d'eau et de formaldéhyde (voir p. 122) ont été détectés par les radiotélescopes en certaines régions de la galaxie.



Modèles moléculaires correspondants

On estime, d'autre part, que ces mêmes gaz ont pu s'exhaler de l'intérieur de la gangue rocheuse de la Terre en cours de réchauffement⁴. En effet, lors de la fusion des matériaux

1. Ces éléments sont, avec l'hélium, les plus abondants des étoiles et très probablement de l'univers. Il faut noter qu'ils sont aussi (à part l'hélium) les quatre éléments fondamentaux de la matière vivante.
2. Conditions qui étaient probablement celles du nuage primitif de gaz et de poussières qui a donné naissance à la terre et aux autres planètes.
3. On dit : sous leur forme réduite.
4. A ces gaz se joignaient probablement de l'hydrogène sulfuré (SH₂) et de petites quantités de gaz carbonique (CO₂).

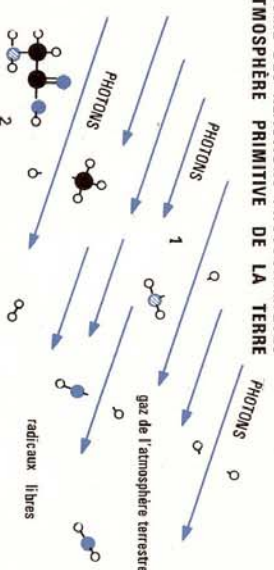
qui constituait la Terre, les composés volatils (c'est-à-dire à point d'ébullition bas), qui leur étaient jusque-là chimiquement liés, s'infiltrèrent vers la surface par l'intermédiaire des fissures du sol ou des volcans, se dégagèrent dans l'espace environnant et restèrent prisonniers de l'attraction terrestre¹. Ces gaz sont, en quelque sorte, les « ancêtres » de la matière organique : ils vont en déterminer la composition chimique. Ces molécules légères flottent autour de la planète sans pouvoir se disperser, *directement offertes aux radiations solaires*.

4. La réaction

Quelle fut l'action du rayonnement solaire sur une telle masse gazeuse ? Quel fut le mécanisme des premières synthèses organiques terrestres ?

On sait que les liens électroniques, qui attachent les atomes les uns aux autres dans une molécule, renferment de l'énergie ; cette énergie est libérée, par exemple, lors des réactions de combustion. Toute la chimie organique est fondée sur la possibilité d'ouverture ou de fermeture de ces liaisons entre atomes ; ce qui permet l'acrochage de morceaux de molécules et la fabrication d'une variété prodigieuse de corps organiques. Or, l'ouverture ou la fermeture de liaisons chimiques est essentiellement une question d'énergie. Les radia-

LE MÉCANISME DES RÉACTIONS PHOTOCHEMIQUES DANS L'ATMOSPHÈRE PRIMITIVE DE LA TERRE



Les liaisons chimiques sont « coupées » par les photons (1). Les morceaux de molécules se recombinent en donnant des composés plus complexes (2).

tions solaires (photons énergiques) seront capables de rompre les liens qui attachent les atomes d'hydrogène au carbone du méthane, à l'azote de l'ammoniac ou à l'oxygène de l'eau.

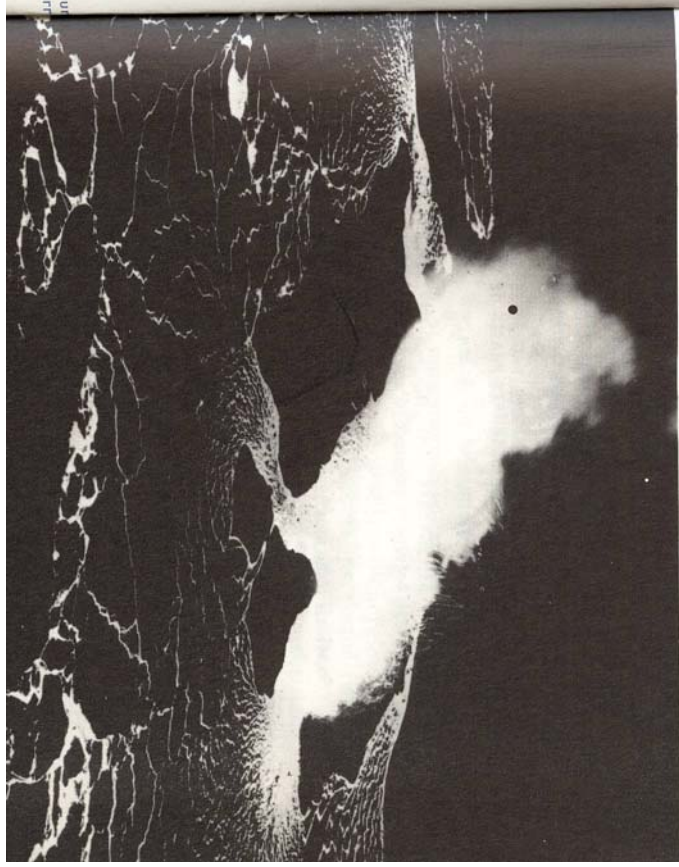
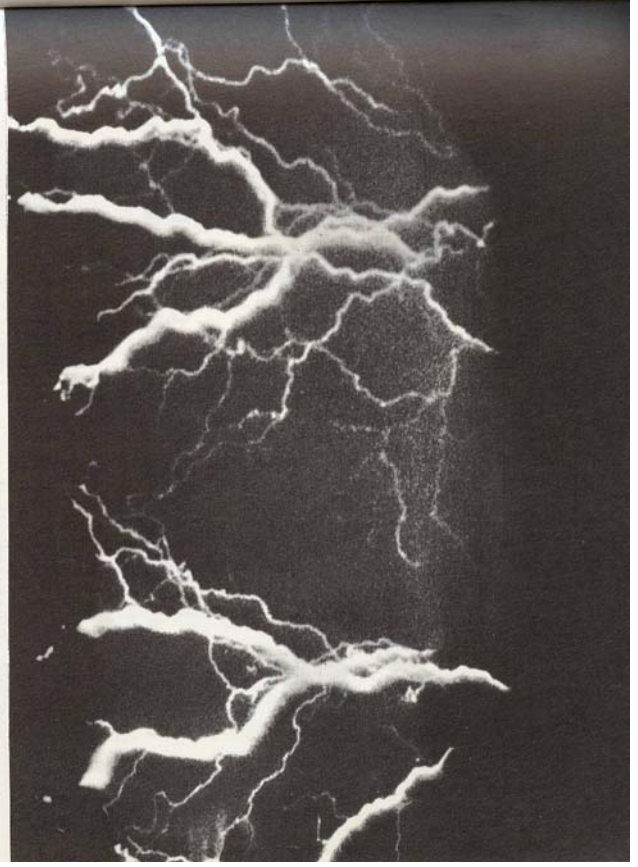
1. Certaines molécules organiques simples ont déjà commencé à se former avant même que la Terre ne soit totalement agglomérée. Hypothèse récemment confirmée par l'examen des comètes, l'analyse de météorites et les observations au radiotélescope.

Ces « morceaux » de molécules, appelés *radicaux libres*, sont très réactifs ; ils se recombinaient extrêmement vite, en donnant des molécules plus lourdes et plus complexes. Ces nouvelles molécules tombent vers la surface de la Terre et s'y accumulent en continuant de réagir les unes sur les autres. Il est probable que le rayonnement solaire n'a pas été la seule source d'énergie : les volcans crachaient dans l'atmosphère, à de très grandes hauteurs, des matériaux et des gaz extrêmement chauds; des éclairs déchiraient sans cesse l'enveloppe gazeuse de la Terre, entraînant en une fraction de seconde la synthèse de nombreux composés organiques. Pendant ce temps, la vapeur d'eau se condense dans les zones supérieures plus froides de l'atmosphère et retombe en pluie.

LES PREMIERS AGES DE LA TERRE



En plus de l'énergie du rayonnement ultraviolet, celle des éclairs et des volcans contribua pour une part importante aux premières synthèses organiques dans l'atmosphère primitive de la terre.



Quels que fussent les corps intermédiaires formés, seuls s'accumulèrent sur terre des composés *capables de durer*. Pendant des millions d'années, il « tombait ainsi du ciel » des composés que nous appelons « organiques » parce qu'ils font aujourd'hui partie des organismes vivants. A ce stade, ce n'étaient que des substances un peu plus complexes que les autres combinaisons chimiques de l'univers, déjà plus anciennes. Désormais, deux caractéristiques de la vie sont à jamais fixées : les bases de sa composition chimique : carbone, hydrogène, oxygène et azote et sa source permanente d'énergie : le soleil.

LA RECONSTITUTION EN LABORATOIRE DES PREMIÈRES ÉTAPES DE L'ÉVOLUTION PRÉ-BIOLOGIQUE








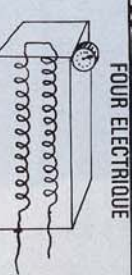
La simulation des conditions primitives

Miller avait réussi à reconstituer dans son ballon des conditions analogues à celles qui viennent d'être décrites. Les chercheurs qui s'engagèrent dès 1953 dans la voie tracée par lui, tentèrent d'aller plus loin encore en faisant varier les conditions opératoires et en utilisant des méthodes nouvelles. Ils purent, en particulier grâce à des données astrophysiques ou géologiques plus nombreuses, déterminer assez précisément les caractéristiques chimiques du milieu ainsi que les sources naturelles d'énergie de la Terre primitive.

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES PROBABLES DE LA TERRE PRIMITIVE DANS LES DERNIÈRES PHASES DE SA FORMATION

- Milieu aqueux (ou alternativement sec et humide).
- Milieu basique : présence d'ammoniacque, (ammoniac dans l'eau), catalyse certaines réactions,
- Milieu réducteur¹ : grande disponibilité en électrons, ce qui favorise les synthèses chimiques.
- Température moyenne d'environ 150° (surfaces plus chaudes à proximité des zones d'activité volcanique).

1. Un réducteur est un corps qui fournit des électrons, tandis qu'un oxydant les arrache aux corps qui en possèdent.

SOURCES NATURELLES D'ÉNERGIE (par ordre d'importance)		MOYEN DE SIMULATION EN LABORATOIRE	
ÉNERGIE SOLAIRE	 radiations ultraviolettes	LAMPES U.V.	
ÉNERGIE DES ORAGES	 éclairs rayonnement ionisant	DÉCHARGES ÉLECTRIQUES	
ÉNERGIE DES DÉSINTÉGRATIONS RADIOACTIVES	 minéral radioactif	CYCLOTRON	
ÉNERGIE DES VOLCANS	 chaleur volcan	FOUR ÉLECTRIQUE	

Toutes ces conditions sont aisément réalisables en laboratoire ; d'autant plus réalisables que les réactifs de départ (les quatre gaz de l'atmosphère primitive) sont abondants et peu coûteux.

● La synthèse des « briques » de la matière vivante

Le Professeur Melvin Calvin, de l'Université de Berkeley en Californie, prix Nobel de Chimie (1961), fut l'un des premiers à utiliser un cyclotron comme source d'énergie (1951). Il voulait simuler le rayonnement ionisant, provoqué par la désintégration de certains minerais radio-acifs. En 1961, de manière à mieux suivre « individuellement » les atomes dans leurs réactions, Calvin utilisa – dans le mélange des gaz « primitifs » – du méthane dont le carbone avait été « marqué » par radio-activité. En exposant ce mélange à un flux d'électrons accélérés à grande vitesse par le cyclotron, il synthétisa des acides aminés, des sucres, de l'urée, des acides gras et d'autres corps organiques d'une grande importance biologique.



M. Calvin, Prix Nobel de Chimie 1961.

Cependant, d'autres expériences devaient conduire à des résultats inattendus et lourds de conséquences.

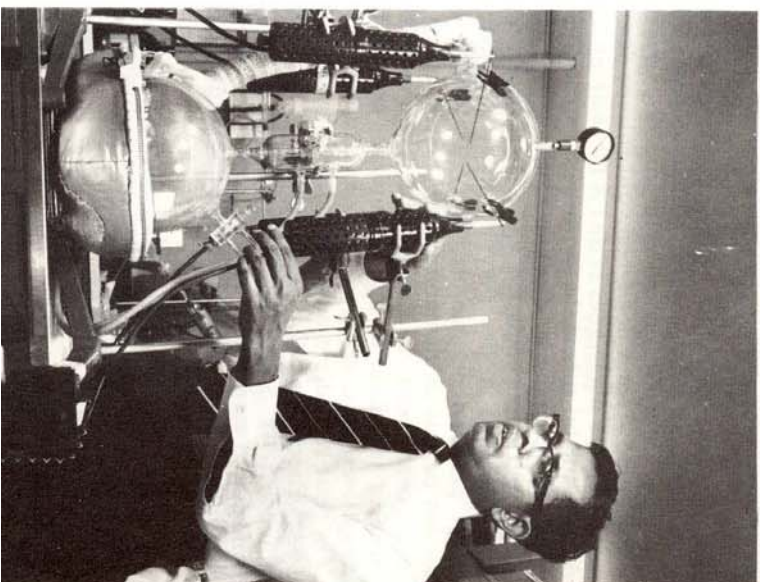
Dès 1960, le Dr J. Oro, de l'Université de Houston dans le Texas, s'intéresse aux réactions que peut donner l'acide cyanhydrique avec de l'ammoniac¹. Il mélange ces deux gaz dans de l'eau et chauffe la solution pendant vingt-quatre heures vers 90°. Il est surpris de découvrir qu'il a ainsi fabriqué de l'adénine, composé biologique essentiel, entrant, comme on l'a vu, dans la composition des acides nucléiques, de l'ATP et de bien d'autres molécules de grande importance (voir p. 52). Convaincu qu'il s'est trompé en analysant les produits de la réaction, Oro ne recommencera pas son expérience avant six mois.

Dans la plupart des expériences entreprises par la suite, on chercha de l'adénine et on en trouva. En 1963, en irradiant pendant une heure, dans le cyclotron de Berkeley, un mélange simulant l'atmosphère primitive, le Dr C. Ponnampерuma, de la division d'exobiologie de la NASA (travaillant en collaboration avec Calvin) obtint des quantités

assez importantes d'un composé non volatil qui s'avère être de l'adénine. Dans une autre série d'expériences, il obtient également des sucres.

L'énergie thermique fut aussi utilisée dans la préparation de molécules organiques importantes. Le Professeur Sidney W. Fox, de l'Institut d'Évolution Moléculaire à l'Université de Miami en Floride, a préparé presque tous les acides aminés connus dans les protéines – sauf les deux acides aminés contenant du soufre, puisque cet élément ne figurait pas dans le mélange gazeux dont il était parti – en portant à 1000° (température communément rencontrée auprès des volcans) le mélange habituel de méthane, d'ammoniac et vapeur d'eau. Fox a poussé son expérience beaucoup plus loin comme nous le verrons bientôt.

C. Ponnampерuma de la division d'exobiologie de la NASA devant l'appareil qu'il utilise pour ses synthèses abiotiques. Le ballon supérieur contient les gaz qui simulent l'atmosphère primitive de la terre. Les produits organiques s'accumulent dans le ballon inférieur qui figure les océans originels.



1. On avait en effet décelé la présence de ces composés dans les comètes.

Plus les expériences se répétaient et plus il apparaissait que les premiers composés organiques qui se formaient dans le mélange « primitif », étaient deux molécules très simples : l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde (voir fig. P. 123), et ceci, indépendamment de la nature de la source d'énergie. Ces deux gaz sont bien connus. L'acide cyanhydrique a une triste réputation puisqu'en raison de son extrême toxicité, il était utilisé comme gaz asphyxiant. Quant au formaldéhyde, on l'emploie souvent en solution dans l'eau (formol) pour la conservation d'organes.

Ces deux molécules simples sont très importantes. En raison de leur grande réactivité, elles furent très probablement les intermédiaires à partir desquels se formèrent les principales molécules biologiques.

Pour étayer cette hypothèse, Ponnampерuma a soumis de l'acide cyanhydrique en solution dans l'eau à l'action d'une batterie de lampes à ultraviolets pendant une semaine : il a obtenu, non seulement de l'adénine, mais encore de la guanine, une des quatre « lettres » du code génétique (voir P. 70), et de l'urée.

En répétant la même opération avec du formaldéhyde, Ponnampерuma et Oró, travaillant indépendamment, ont synthétisé en 1963 du ribose et du désoxyribose, les deux sucres à cinq atomes de carbone qui entrent dans la composition des acides nucléiques et de l'ATP (voir pp. 52 et 68). Par addition sur lui-même, le formaldéhyde conduit également à un sucre à six carbones que nous connaissons bien : le glucose.

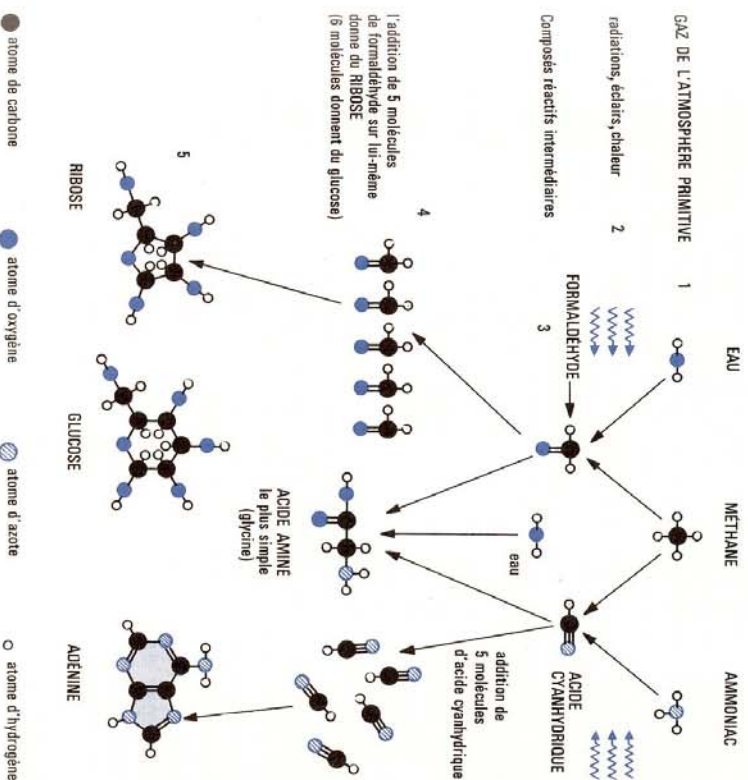
Des expériences effectuées en 1968 et 1969 et mettant en jeu des phosphates et des polyphosphates inorganiques – également produits par simulation de l'environnement primitif – ont permis de démontrer que des réactions de condensation conduisant à des polymères d'intérêt biologique pouvaient se réaliser en solution aqueuse et à des températures compatibles avec celles de la vie actuelle.

On peut considérer aujourd'hui, grâce aux récents travaux de A. Katchalsky, L. E. Orgel, C. Ponnampерuma, J. Rabinowitz, G. Steinman, que la grande majorité des types de molécules essentielles aux organismes biologiques ¹ ont pu être synthétisés par voies purement abiotiques.

1. Polypeptides, bases nucléiques et polynucléotides, sucres, lipides, pigments, phosphates... Une bibliographie regroupant plus de mille références a été publiée par M. W. West et C. Ponnampерuma (cf. bibliographie).

Le tableau ci-dessous résume toutes ces réactions importantes. Il représente, en quelque sorte, les premières branches de cet « arbre de l'évolution moléculaire » que les chimistes cherchent à reconstituer et à raccorder avec l'arbre de l'évolution biologique.

LES PREMIÈRES RÉACTIONS DANS L'ATMOSPÈRE PRIMITIVE DE LA TERRE



Par souci de simplification, nous n'avons pas représenté les mécanismes des réactions intermédiaires qui ont conduit à ces substances importantes. Seuls les produits de départ et d'arrivée sont figurés. On voit que ces produits finaux (ceux qui vont durer et s'accumuler) résultent, globalement, de l'addition sur eux-mêmes du formaldéhyde ou de l'acide cyanhydrique, - réactifs intermédiaires. On peut s'en assurer en comptant par exemple le nombre d'atomes de 5 molécules de formaldéhyde - 5 carbones, 5 oxygènes et 10 hydrogènes - et celui d'une molécule de ribose : ils sont identiques. Il en est de même pour l'adénine.

Pour alléger le tableau, nous n'avons pas non plus représenté les autres composés de la même famille, obtenus dans des conditions prébiologiques (d'autres sucres : une vingtaine d'acides aminés ; et d'autres bases : guanine, thymine, uracil, cytosine).

● La « survie » des molécules

A la suite des importantes expériences qui viennent d'être rapidement décrites, une première constatation s'impose : Si les seules molécules à se former en quantités notables sont « justement » celles de la vie (acides aminés, adénine, sucre...), c'est peut-être la preuve que de telles molécules ne demandaient qu'à apparaître ! Expliquons-nous, car ce point est très important.

Si, dans une réaction chimique, certaines conditions sont fixées dès le départ, les diverses catégories de produits qui peuvent se former ne varient que dans des *limites très étroites*. Or c'était justement le cas de la Terre primitive, puisque la composition de son atmosphère et la nature de ses sources d'énergie dépendaient – nous l'avons vu – de la succession rigoureuse de phénomènes antérieurs. On peut donc dire dans des conditions données (celles de la Terre primitive), la *probabilité pour que se forment des acides aminés, de l'adénine ou des sucres était extrêmement forte*, beaucoup plus qu'on aurait pu le penser a priori.

D'autre part, le milieu dans lequel s'accumulent ces molécules n'est pas *statique* : il se modifie constamment grâce à l'apport continu d'énergie provenant – sous diverses formes – du soleil. Dans ces conditions, comme l'a fait remarquer le professeur R. Buvel, des molécules complexes (et donc thermodynamiquement instables) qui se seraient décomposées dans un environnement statique (système isolé) peuvent *durer* et même se complexifier davantage dans le milieu dynamique qu'est la Terre primitive¹. L'adénine, par exemple, est une substance très stable. Elle résiste bien aux radiations ultraviolettes. Mais en absorbant ce rayonnement elle aura tendance à réagir avec d'autres molécules et à se débarrasser ainsi d'un excès d'énergie qui diminuait sa stabilité. L'adénine aura donc tendance, sous l'effet des radiations, à se complexifier².

Donc : seules les molécules capables de durer et d'entrer dans des combinaisons d'ordre plus élevé, auront des chances d'être conservées par la sélection naturelle. Mieux vaudrait dire que ces molécules s'imposent ; car il s'agit bien d'une *auto-sélection*, et non d'un « choix » extérieur.

Malgré leur stabilité dynamique et leur pouvoir de complexification, ces molécules organiques devront cependant avoir le temps de réagir les unes sur les autres et de constituer ainsi une base suffisamment importante pour la suite de l'évolution pré-biologique. Il est possible que d'autres caractéristiques du milieu aient favorisé une telle « survie » des molécules, en effet :

1 – Les composés lourds qui se forment dans la haute atmosphère, tombent vers des couches plus basses et plus denses ; ils s'enfoncent dans l'eau ou s'accumulent dans des crevasses et des fissures du sol ; *ce qui les protège de la destruction* par les radiations ultraviolettes.

2 – Si certaines molécules jouent un rôle de *catalyseurs de transformation*, leur concentration en régime stationnaire peut augmenter très rapidement.

3 – *Il n'y a pas encore d'oxygène* dans l'atmosphère terrestre. Par conséquent, les composés organiques – qui aujourd'hui « pourrissent » rapidement par oxydation à l'air – pouvaient se conserver *beaucoup plus longtemps*.

4 – Enfin, *il n'existe aucun être vivant* capable de détruire – comme aujourd'hui – les matières organiques.

Rien ne pouvait donc empêcher les molécules organiques de s'accumuler sur la Terre, dans les lagunes ou dans les mers primitives, et de continuer à réagir pendant des centaines de millions d'années.

1. Nous dirons désormais que ces molécules possèdent une *stabilité dynamique*.

2. Nous verrons plus loin que des expériences récentes le démontrent.

La complexification des molécules organiques

Où vont s'accumuler les composés organiques synthétisés dans l'atmosphère primitive de la Terre ? Pour le savoir, il faudrait connaître la répartition des terres et des mers à l'époque de la formation de notre planète. Nous verrons que d'après des travaux géologiques récents, cette répartition aurait été très différente de celle que nous connaissons aujourd'hui.

D'autre part, les molécules organiques, nouvellement formées et baignées dans le flux énergétique émis par le soleil, continuent de réagir les unes sur les autres, de se complexifier, et de modifier les conditions de l'environnement : la matière organique acquiert des propriétés nouvelles qui préfigurent celles du vivant. Pour les mettre en évidence, nous avons choisi arbitrairement de considérer séparément quatre types de molécules complexes : des molécules capables de grandir, de proliférer, de conduire de l'énergie à distance et de s'isoler de l'eau.

Il est évident que la matière organique évoluait dans son ensemble; aussi notre description rappellerait-elle un peu celle qui consisterait à retracer l'histoire du piston, du carburateur et de la dynamo, pour expliquer la naissance du premier moteur ! Mais cette description aura l'avantage de montrer comment les molécules essentielles à la vie, que nous avons rencontrées dans la première partie, ont pu apparaître dans le milieu primitif.

L'ACCUMULATION DES PRODUITS ORGANIQUES ET LES PREMIÈRES RÉACTIONS

● L'accumulation de matières organiques sur la Terre et dans les mers primitives

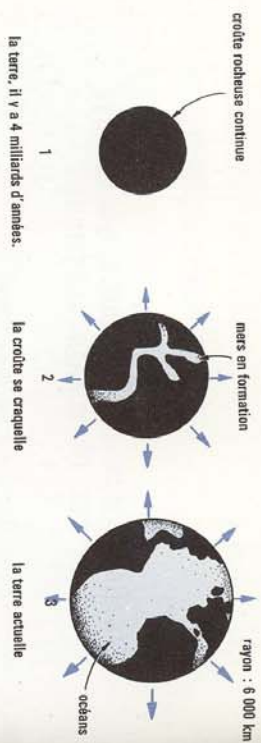
Notre planète a-t-elle toujours eu cet aspect familier que nous produisent les atlas ? Nous serions tentés de répondre affirmativement. Les formes découpées des continents et les contours des océans semblent aussi immuables que l'univers lui-même. Cependant aujourd'hui, il n'est pas impossible que ces vues soient à reviser... En effet, grâce à de nombreuses observations, grâce à la concordance d'une foule de résultats expérimentaux, il semblerait que notre Terre, comme l'univers, soit elle aussi en expansion. Son « tour de taille » augmenterait régulièrement au fil des millénaires.

Avec des modèles réduits, on a démontré qu'en prenant une Terre environ *deux fois plus petite*, les continents (avec la superficie qu'ils occupent aujourd'hui) s'encastrent les uns dans les autres, comme les pièces d'un puzzle. Les océans disparaissant, la croûte terrestre aurait ainsi formé à l'origine, selon certaines hypothèses audacieuses, un *continent unique* recouvrant la planète d'une peau solide et continue.

Par suite de l'expansion de la Terre, cette croûte se brisa et se fragmenta – comme se craquelle la couche rigide de peinture dont serait enduit un ballon que l'on gonfle ; les continents parurent à la dérive en s'écartant les uns des autres, tandis que la superficie des océans s'agrandissait sans cesse¹.

1. On retrouve ici la théorie de la dérive des continents proposée par A. Wegener, en 1912. Selon lui, les continents actuels proviennent d'un continent unique qui se serait fragmenté sur une Terre de taille identique à celle d'aujourd'hui; alors que selon certaines théories actuelles, c'est la Terre elle-même qui aurait grossi, forçant les continents à se séparer. Cette théorie est mise en doute par celle de la tectonique des plaques : les continents sont portés par des plaques qui peuvent s'enfoncer dans le magma sur lequel elles flottent. La terre conserverait ainsi le même diamètre.

L'HYPOTHÈSE DE L'EXPANSION DE LA TERRE



Les produits organiques nouveaux, dont la synthèse avait commencé dès la formation de la Terre – et peut-être avant –, avaient ainsi de grandes chances, dans un premier temps, de s'accumuler à la surface même de la Terre.



La Terre, prise de l'espace par l'équipage d'Apollo XI.



Source de boue dans une région volcanique. A la surface chaude de la terre primitive existaient probablement des zones alternativement sèches et humides, milieu propice à la synthèse de certains types de composés organiques.

La Terre devait être encore très chaude à cette époque, et les nappes de lave provenant des volcans encore mal refroidies. D'autre part, affleuraient vraisemblablement d'immenses couches de minéral capables de promouvoir et d'entretenir certaines réactions chimiques. Des synthèses de composés organiques plus complexes ont pu se produire à la surface même du sol, à proximité de zones d'activité volcanique.

L'eau des pluies devait rapidement entraîner toutes les substances organiques complexes qui se formaient sur la croûte terrestre. Conduites par les cours d'eau vers des lacs, des lagunes ou des mers en formation, elles s'y déposaient. Le Professeur C. Sagan, de l'Université d'Harvard, a calculé que la quantité de matière organique synthétisée en un milliard d'années, était suffisamment grande pour former une solution à 1 % dans un volume équivalent à celui des océans actuels. Cette concentration aurait été dix à vingt fois supérieure dans les mers de faible superficie d'il y a plusieurs milliards d'années.

Ce « bouillon » de matières organiques, riche en sels et en sucres dissous, le biologiste britannique J.B.S. Haldane

le nomma : « la soupe chaude primitive ». Que se passait-il au sein d'une telle « soupe » ?

● Les réactions chimiques et les zones sub-vitales

C'est dans ce milieu radicalement nouveau – à ce stade de l'évolution cosmique – que va se poursuivre et s'accélérer la transformation chimique de la matière organique.

L'eau, en effet, est un solvant universel. Elle dissout de nombreux composés organiques et minéraux, ce qui favorise les rencontres entre molécules individuelles et augmente les chances de réactions chimiques.

Cependant, les molécules organiques, qui réagissent et se complexifient, ne s'accrochent pas les unes aux autres en n'importe quel endroit : elles portent dans leur structure chimique certains groupements d'atomes plus réactifs que d'autres. On les nomme groupements fonctionnels¹. L'accrochage de deux molécules résulte le plus souvent du choc entre deux groupements fonctionnels. Cependant, dans la « soupe primitive », les probabilités de rencontre au « bon » endroit étaient extrêmement faibles car les chocs se réparaient au hasard. Au contraire, dans les organismes vivants, les réactions vitales se déroulent en quelques fractions de secondes, les parties réactives des molécules étant maintenues en position, jusqu'à ce que la réaction se fasse, par des catalyseurs organiques : les enzymes.

Dans une première phase de l'évolution moléculaire, il est très probable que des catalyseurs minéraux aient joué ce rôle. Certaines surfaces minérales ou certains ions métalliques² ont en effet la propriété de fixer des molécules organiques et de les disposer dans un ordre qui facilite le déclenchement des réactions d'accrochage chimique. Dans ces zones localisées, que le physicien britannique J.-D. Bernal a appelé des unités « sub-vitales », il va donc régner une grande activité chimique. Des couches d'argile, de sable, ou de laves, ont pu jouer le rôle de surfaces actives. En 1970 A. Katchalsky du Weizman Institute, Israël, a confirmé l'hypothèse de Bernal en faisant ressortir le rôle de certains types d'argile comme la montmorillonite dans la condensation d'acides aminés en chaînes polypeptidiques. Il est possible, comme l'a encore suggéré Bernal, que l'action cata-

1. Groupement alcool, amine, aldéhyde, cétone, acide, etc.

2. Un ion est un atome qui a perdu ou gagné des électrons.

lyrique des argiles ou des quartz ait conduit, dès ce stade, à la formation de molécules dissymétriques, caractéristiques de la matière vivante¹. Comme le dit A. Dauvillier, « l'asymétrie moléculaire, base de la vie, aurait été ainsi conditionnée par l'existence préalable de l'asymétrie du réseau cristallin et ceci est bien en harmonie avec l'évolution géologique ».

Quels ont été les produits des myriades de réactions qui se déroulaient simultanément sur la terre ou dans les mers ?

DES MOLÉCULES ORGANIQUES COMPLEXES DONT LES PROPRIÉTÉS PRÉFIGURENT CELLES DE LA VIE

● Des molécules qui grandissent.

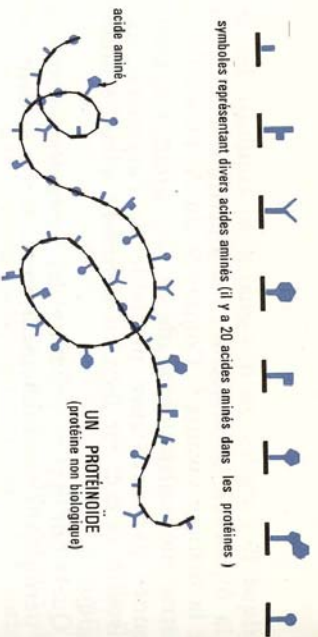
Les « ancêtres » des protéines

Les acides aminés (nous l'avons vu page 63) possèdent un double « système d'accrochage chimique » leur permettant de s'unir à des molécules simples du même type pour former de longues chaînes : les protéines. Le professeur S.W. Fox voulait démontrer que ces molécules géantes pouvaient se former en l'absence des êtres vivants par simple union en chaîne, sur des surfaces actives, d'acides aminés fabriqués dans l'atmosphère primitive de la Terre. Pour cela, il recréa les conditions qui avaient dû régner à la surface de la croûte rocheuse terrestre, il y a plus de quatre milliards d'années. Il plaça un mélange sec de dix-huit acides aminés différents – dont certains se trouvaient en plus grande proportion que d'autres² – sur un morceau de lave qui fut introduit dans un four et chauffé pendant plusieurs heures à une température de 170°. Dans de telles conditions, on peut généra-

1. De même qu'il y a une main droite et une main gauche, il existe des molécules droites et des molécules gauches : leurs formules ne sont pas superposables. Les molécules qui constituent la matière vivante sont d'un même type. Les causes de cette dissymétrie moléculaire ne sont pas encore totalement éclaircies.

2. Ces acides aminés sont l'acide aspartique et l'acide glutamique. Fox et son collaborateur Harada s'étaient en effet aperçus que ces acides aminés se retrouvaient en plus forte proportion dans les protéines actuelles (du quart à la moitié de la composition totale).

symboles représentant divers acides aminés (il y a 20 acides aminés dans les protéines)



lement s'attendre à retrouver un goudron noir (désespoir des chimistes !). Cela veut dire que les produits organiques ont été complètement carbonisés. Or il n'en fut rien : les acides aminés s'attachèrent les uns aux autres pour donner des *protéinoïdes*¹, formés chacun de plusieurs centaines de molécules soudées.

Selon Fox, l'analyse de ces protéinoïdes — qu'à priori on aurait pu croire anarchiques — montre un certain ordre dans la répartition des acides aminés. Cet ordre résulterait de contraintes physico-chimiques encore imparfaitement connues, intervenant lors de la formation de la chaîne. Certains de ces protéinoïdes possèdent une faible activité catalytique. Fox estime que la sélection naturelle a conservé les catalyseurs les mieux adaptés à telle ou telle fonction chimique pour aboutir finalement à ces véritables automates moléculaires que sont les enzymes.

Malgré les spectaculaires expériences de Fox, l'origine des protéines n'est pas encore totalement élucidée. De nombreux chercheurs estiment que c'est l'énergie photochimique et non l'énergie thermique, qui a joué un rôle déterminant dans la condensation des acides aminés en solution aqueuse. D'autres considèrent que les protéines ont pu se former directement, sans acides aminés intermédiaires, à partir de l'union en chaîne de petites molécules réactives telles que l'acide cyanhydrique. On a également suggéré que les protéines avaient pu évoluer par suite des redoublements successifs de motifs originels très simples, composés seulement de quelques acides aminés, et formés dans des conditions abiotiques.

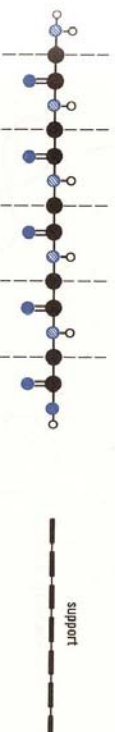
1. Un *protéinoïde* — terme que nous emploierons souvent dans la suite — est une protéine non biologique.



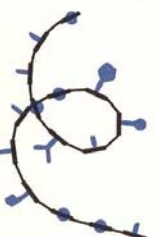
S. W. Fox, directeur de l'Institut d'évolution moléculaire de l'Université de Miami en Floride.

La naissance de l'activité biologique des protéines
Voyons comment a pu s'amorcer l'activité biologique des protéines.

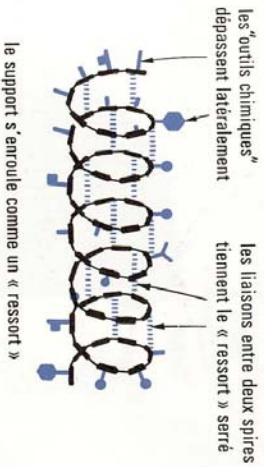
Une chaîne continue d'acides aminés soudés les uns aux autres peut être grossièrement comparée à un *support* souple, sur lequel seraient accrochés divers *outils*. Le support moléculaire est constitué par l'enchaînement régulier, figuré ci-dessous.



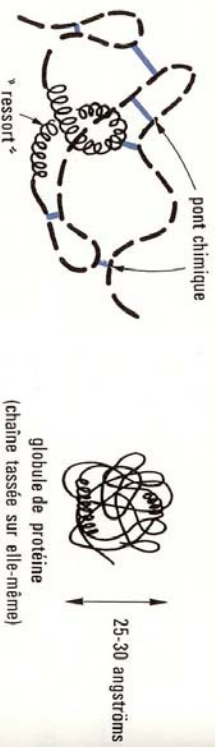
et les « outils chimiques », par les groupements réactifs qui hérissent la chaîne :



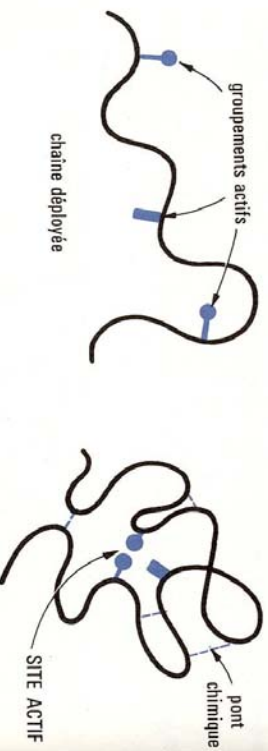
Or cette chaîne moléculaire et les « outils » qu'elle porte ne se disposent pas n'importe comment dans l'espace : dans les conditions normales, compatibles avec son existence, la chaîne s'enroule généralement sur elle-même en formant une sorte de « ressort ». Ce ressort s'appelle hélice α , le pas de cette hélice est de 5,5 angströms. Cette configuration particulière rend la macromolécule plus stable, donc augmente ses chances d'existence.



Le « ressort » est maintenu en position serrée par certains groupements d'atomes qui, se retrouvant périodiquement les uns en face des autres, jouent le rôle de petites agrafes. A son tour ce « ressort » (ou la chaîne déroulée) peut se tasser en un minuscule globe possédant une morphologie propre à chaque type de protéine. Ce tassement est dû à certains acides aminés capables de créer par endroits des *ponts chimiques* entre des circonvolutions de la chaîne.



Mais voici le plus important. Cette pluri de la chaîne force certains « outils » chimiques, qui se trouvaient pourtant fort éloignés les uns des autres sur la chaîne déployée, à se retrouver groupés en un même endroit du globe : il pourra ainsi se créer un *site actif*, où certaines réactions chimiques s'effectuent, comme nous le verrons, à une vitesse prodigieuse.

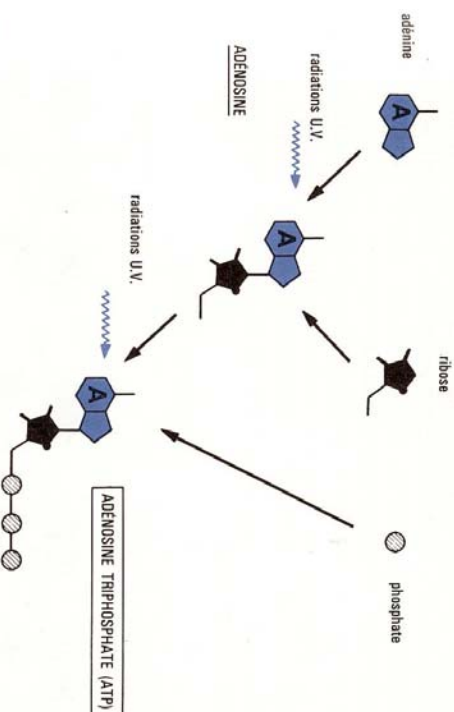


Les « ancêtres » des acides nucléiques

On avait réussi à synthétiser de l'adénine et du ribose (voir pp. 120 et 122) dans des conditions pré-biologiques. Il fallait maintenant démontrer que la formation d'un nucléotide 1 pouvait être obtenue par des méthodes « naturelles ».

En 1963, sur une suggestion du Dr Sagan, le Dr C. Ponnampertuma, essaya d'irradier à l'aide d'ultraviolet, une solution dans l'eau, d'adénine, de ribose et d'acide phosphorique. Il constata que de l'*Adénosine* se formait très rapidement.

LA SYNTHÈSE DE L'ATP (DANS DES CONDITIONS PRÉBIOLOGIQUES)



Par la suite, en modifiant la nature du composé phosphoryré et en irradiant l'adénosine, Sagan et Ponnampertuma, réussirent à préparer avec des rendements satisfaisants de l'adénosine triphosphate, l'ATP, cette molécule très importante, à la base de toutes les réactions énergétiques vitales 2.

Il faut signaler que ces chercheurs ont laissé, en quelque sorte, l'ATP se faire « tout seul ». Ils se sont limités à recréer les conditions supposées originelles. L'ATP ainsi obtenu, par « génération spontanée », était en tout point identique à celui qu'on trouve chez les êtres vivants.

Plus récemment encore, C. Ponnampertuma a obtenu tous

1. Rappelons-le : unité de construction à partir de laquelle s'édifient les acides nucléiques (voir page 70).

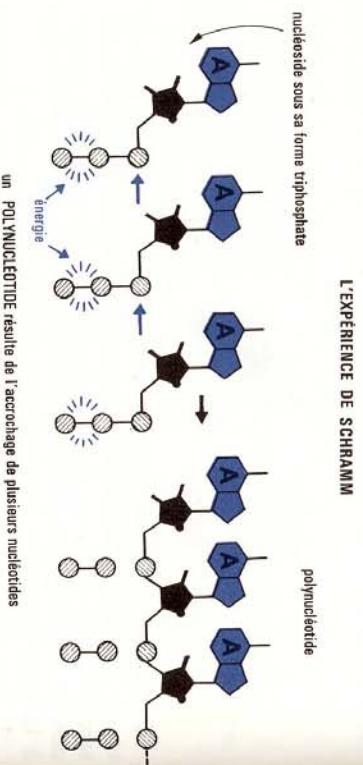
2. En réalité, Sagan et Ponnampertuma ont obtenu en même temps de l'adénosine monophosphate (AMP), diphosphate (ADP) triphosphate (ATP) et tétraphosphate (A4P).

Les nucléotides, généralement rencontrés dans les acides nucléiques. Les pièces détachées de ces immenses molécules – dont nous connaissons l'importance biologique – ont donc été préparées dans des conditions analogues à celles qui ont dû régner sur la Terre primitive.

Il restait encore à démontrer comment ces pièces pouvaient s'assembler pour former un *polynucléotide*, « ancêtre » des acides nucléiques.

Le Professeur G. Schramm, de l'Institut Max Planck à Tubingen, en Allemagne, estimait qu'il devrait exister d'importants gisements de phosphates dans les régions sèches de la Terre primitive. Il chauffa vers 60° des nucléotides avec un dérivé de l'acide métaphosphorique, et obtint des enchaînements moléculaires contenant de trente à deux cents nucléotides attachés les uns aux autres.

En 1971, J. Oro et A. P. Kimball ont réussi la condensation de nucléotides en solution aqueuse en utilisant de la cyanamide comme agent de condensation et de l'argile comme surface catalytique. Les molécules obtenues renfermaient 5 à 10 nucléotides.



Cependant l'ordre des séquences est anarchique. Il ne correspond à aucun « code » biologique. Entre les polynucléotides de Schramm et un ARN biologique, il y a à peu près la même différence qu'entre :

NO GVE NMI HA UESPERRTS ONAEINEEA ETNIEHEUT

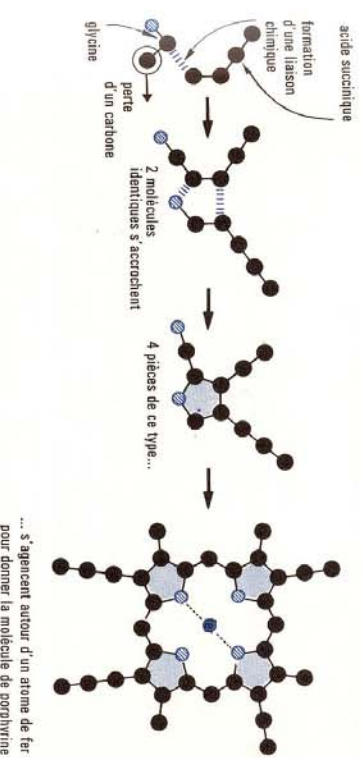
et

LA VIE EST UN PHÉNOMÈNE HAUTEMENT ORGANISÉ
Les lettres de chaque ligne sont pourtant identiques.

Bien sûr, on est encore loin des cinq millions de paires de nucléotides qui constituent l'ADN d'une bactérie. Mais ces expériences très importantes montrent que les « briques » fondamentales de la matière vivante pouvaient se former en grande quantité sous l'effet de la chaleur ou des radiations, au cours des premiers âges de la planète.

● Des molécules qui prolifèrent

Nous avons vu qu'une réaction chimique pouvait être accélérée par des catalyseurs provenant de l'environnement. Mais il existe aussi des réactions qui s'accélérent d'elles-mêmes : *les produits de ces réactions catalysent leur propre transformation* ! Ce phénomène qui commence lentement et se termine parfois par une brutale explosion est bien connu des chimistes : c'est l'*auto-catalyse*.



Prenons comme exemple-type, une réaction qui a pu se produire dans des conditions pré-biologiques. Celle de la synthèse des *porphyrines* ¹.

Cette grosse molécule résulte de l'assemblage, par étapes successives, de petites unités très simples, (sans doute apparues au cours des premières synthèses organiques) : un acide aminé, la *glycine* (●—●—●) et l'*acide succinique* (●—●—●—●) (voir figure ci-dessus).

¹. La chlorophylle (voir page 54), l'hème de l'hémoglobine, (voir page 74), les transporteurs d'électrons de la mitochondrie font partie de cette importante famille des porphyrines.

Des milliers de synthèses de ce type ont pu se faire simultanément dans le milieu originel ¹. Il existait donc à la fois des éléments de départ et des « pièces détachées » intermédiaires, résultats d'étapes encore inachevées.

Certaines étapes pouvaient cependant être accélérées par des catalyseurs extérieurs comme du fer, présent dans le milieu. Mais, les rencontres entre molécules se faisant au hasard, les synthèses restent malgré tout extrêmement lentes. Imaginons cependant qu'au bout d'une très longue durée, une première molécule de porphyrine – comportant en son centre un atome de fer – soit achevée. *Etant elle-même un catalyseur d'une prodigieuse efficacité*, elle va immédiatement accélérer la formation d'une deuxième molécule identique. Ces deux porphyrines vont ensuite catalyser la formation de deux autres, qui à leur tour... etc. Il se forme ainsi rapidement 4, puis 8, 16, 32 porphyrines à partir des « pièces détachées » présentes dans le milieu. Le nombre de molécules de cette espèce augmente très rapidement.

On peut dire que ce type de molécules se met brusquement à « proliférer ». Comme l'a fait remarquer Melvin Calvin, la notion d'auto-catalyse, aussi banale soit-elle, est dans son essence le *concept biologique de reproduction* ². Aussi paradoxal que cela puisse paraître, la nature a ainsi « inventé » la reproduction *avant* les organismes vivants.

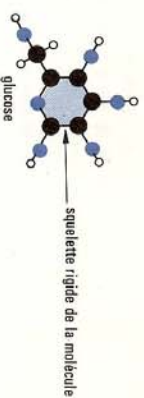
● Des molécules qui conduisent de l'énergie à distance

On a sans doute remarqué, sur les figures représentant des molécules, (page 123) que certains atomes étaient reliés par deux et même trois traits, tandis que d'autres ne l'étaient que par un seul. Cela signifie que les atomes peuvent s'attacher par l'intermédiaire d'une, deux ou trois *paires d'électrons*, mises en commun. Ces différents types de liaisons se nomment : liaison simple —, double =, ou triple ≡. Parmi les quatre-vingt-dix éléments naturels, quelques-uns seulement sont capables de donner des liaisons doubles ou triples *stables*. Ces éléments sont justement ceux qui jouent un si grand rôle dans la matière et les réactions de la vie : le *carbone*, l'*azote*, l'*oxygène*, et dans une certaine mesure, le *phosphore* et le *soufre*.

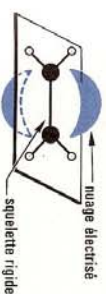
1. Nous verrons plus tard que de telles synthèses après s'être produites dans la « soupe primitive » ont pu s'effectuer à plus grande vitesse à l'intérieur de systèmes limités par une membrane.

2. Se refaire plus vite que l'original. De nombreux types de molécules originelles possèdent de telles propriétés auto-catalytiques.

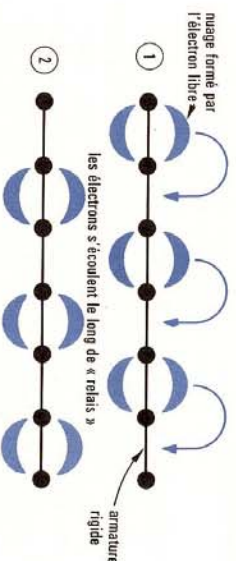
Voyons rapidement l'importance de ces liaisons multiples : la forme spatiale d'une molécule est déterminée par un *squelette rigide* formé de liaisons simples. Les électrons sont prisonniers de ces liaisons et ne peuvent se lâcher sans modifier aussitôt la forme de toute la molécule. ▶



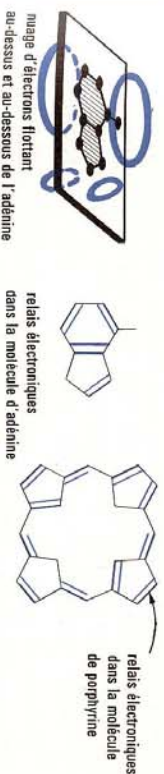
Par contre, dans une liaison double¹, deux électrons continuent à assurer le lien rigide entre les atomes. Mais les deux autres flottent, libérés, au-dessus et au-dessous de la liaison en constituant une sorte de *petite nuage électrisé* dont les propriétés sont tout à fait particulières.



En effet, plusieurs liaisons doubles peuvent se suivre dans une chaîne d'atomes. Si elles sont séparées les unes des autres par un intervalle régulier (correspondant à une liaison simple) et si elles se trouvent dans un même plan, les électrons de chaque nuage peuvent s'écouler *tout le long de la chaîne* par une *série de « relais »*. C'est ce que montrent les flèches colorées :



Si la chaîne se ferme sur elle-même en un cycle (adénine, porphyrine...), les électrons se propagent en *circuit fermé*. Il en résulte un nuage unique, fluide et très mobile qui flotte de chaque côté du plan formé par la molécule plate.



Des molécules qui possèdent un tel système de relais électroniques basé sur des liaisons multiples sont appelées *molécules conjuguées*. Ces molécules jouent aujourd'hui un rôle immense dans les réactions de la vie.

1. Nous ne considérerons pas la liaison triple pour éviter de compliquer l'exemple.

Nous savons qu'un déplacement d'électrons peut être assimilé à un faible courant électrique. Ces molécules conjuguées sont donc capables de conduire à distance de l'énergie ou de l'information, sans que leur structure en soit modifiée : une réaction entre deux groupements fonctionnels, éloignés dans l'espace, pourra se déclencher par leur intermédiaire.

Le Professeur B. Pullman, de l'Institut de Biologie Physico-Chimique à Paris, a remarqué que la quasi-totalité des molécules biochimiques essentielles sont constituées (totalement – ou en partie) de systèmes conjugués. Les acides nucléiques, les protéines, les phosphates riches en énergie possèdent tous – sous une certaine forme – un système de conduction électronique. Beaucoup de pigments et de vitamines sont également des molécules conjuguées. Comme le remarque le Professeur Pullman : « La fluidité essentielle de la vie s'accorde avec la fluidité de la structure électronique de ces composés ». Seuls les sucres et les graisses, qui sont les réserves en combustible, ne sont pas conjugués.

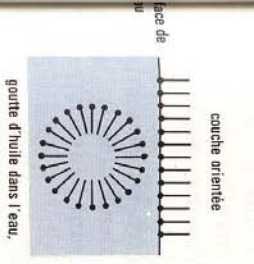
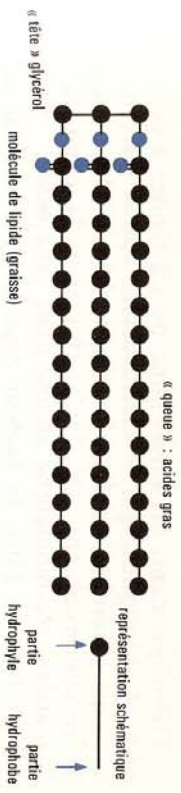
On peut dire que ces molécules conjuguées préfigurent, à l'échelle moléculaire, la conduction d'énergie et d'information qui se produira à des niveaux plus élevés de complexité, par l'intermédiaire de microtubules ou de fibrilles nerveuses dans les cellules et de vaisseaux et de nerfs dans les organismes supérieurs.

Des molécules qui s'isolent de l'eau

Chacun s'en est aperçu : certains corps se laissent facilement mouiller ; d'autres non. Lorsqu'on veut, par exemple, mélanger de l'huile et de l'eau, on obtient des petites gouttelettes qui se fragmentent, mais ne se mélangent jamais intimement. Comme l'huile ou les graisses, de nombreux corps organiques possèdent des groupements chimiques – généralement porteurs de charges électriques – capables d'attirer les molécules d'eau (groupements hydrophiles) ou, au contraire, de les repousser (groupements hydrophobes).

Certaines molécules peuvent même posséder à la fois (en deux endroits différents ou sur des surfaces opposées) des parties hydrophiles et hydrophobes. En contact avec l'eau, de telles molécules ont des propriétés très particulières.

Prenons les cas des corps gras ou des huiles (les lipides). Ces longues molécules possèdent une « tête » hydrophile, constituée par du glycérol. A cette « tête », s'attachent de longues chaînes formées de nombreux atomes de carbone (les acides gras) et constituant la « queue » hydrophobe de la molécule.



En présence d'eau, ces longues molécules s'orientent de manière à ce que leur « tête » reste en contact avec les molécules d'eau, tandis que leur « queue » s'en éloigne le plus possible. En se servant les unes contre les autres, ces molécules de lipides forment des couches minces, orientées, séparant le liquide en plusieurs phases¹.

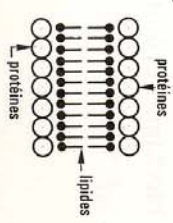
Certaines macromolécules comme les protéines, peuvent aussi se grouper en formant des « membranes » en lamelles ou en globules, et s'isoler de l'eau. Nous verrons très bientôt, l'immense importance de ces structures organisées. Signaux des maintenant, que la structure de la membrane qui sépare toute cellule vivante du milieu extérieur, est identique chez tous les êtres vivants². C'est pourquoi son origine doit remonter très loin dans le temps.

L'ARBRE « GÉNÉALOGIQUE » DES MOLÉCULES DE LA VIE

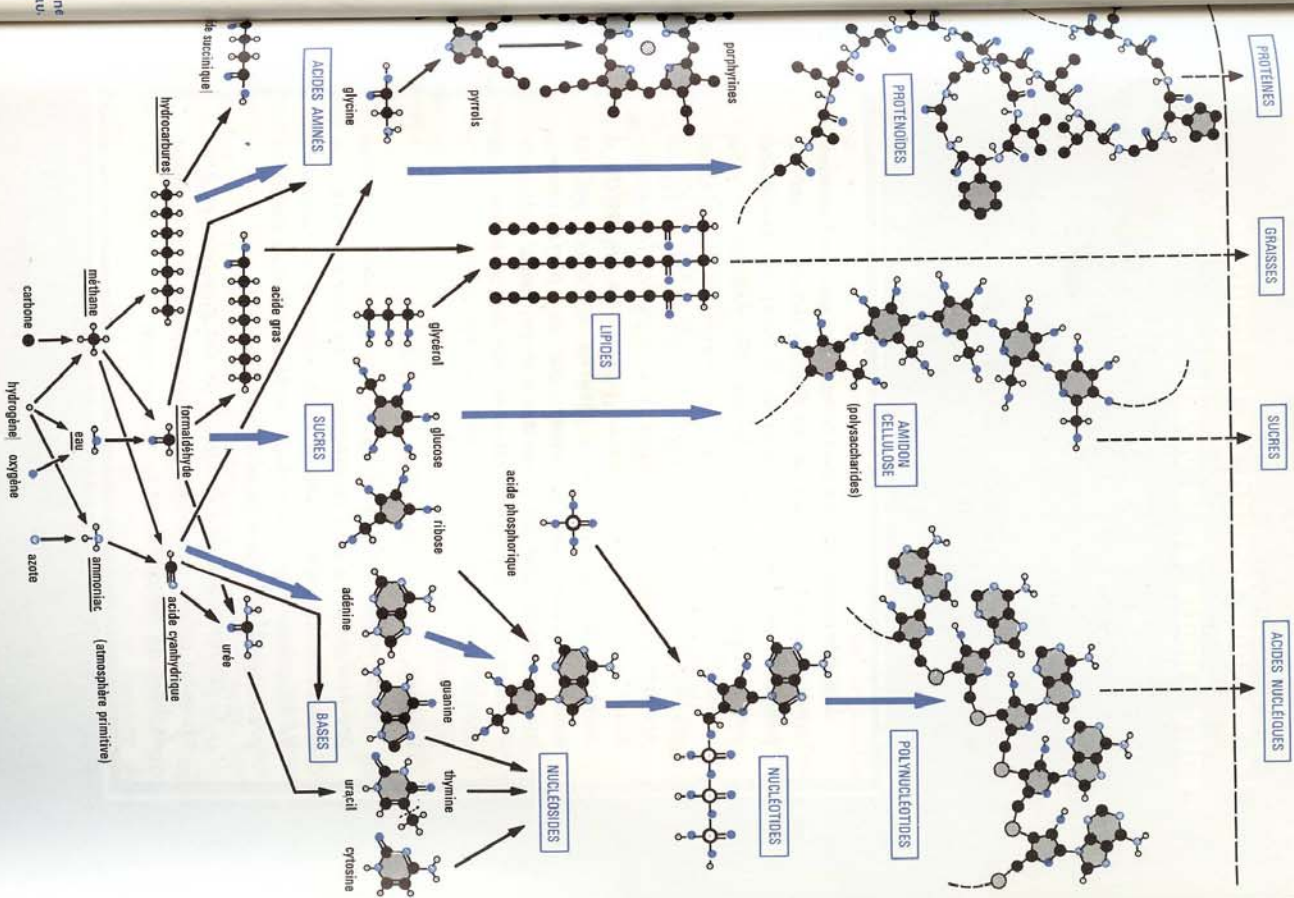
L'avantage évolutif de certaines molécules

Avant d'essquisser cet arbre de l'évolution pré-biologique, il faut se poser une question primordiale : comment se fait-il que des molécules aussi complexes que celles que nous venons de voir ne soient pas décomposées au fur et à mesure de leur formation ? On sait en effet que les réactions qui conduisent à la construction de macromolécules complexes sont toujours réversibles : elles peuvent se faire dans le sens de la synthèse comme dans celui de la désagrégation du produit formé.

1. Bien que cela n'ait pas encore été démontré, il est possible que des molécules de lipides se soient formées dans des conditions prébiologiques.
2. Cette structure universelle qui est sans doute une des plus anciennes de la vie, les biochimistes l'appellent le « sandwich », car elle serait constituée, comme le montre le schéma, par une double couche interne de lipides enfermée entre deux « tranches » de protéines. Ce modèle proposé par Danielli en 1930 a récemment été remis partiellement en cause par D. Robertson de la Duke University (1972).



L'ARBRE « GÉNÉALOGIQUE » DES MOLÉCULES DE LA VIE



Théoriquement, on aurait donc pu s'attendre à ce que les édifices chimiques, qui se construisaient sur la terre ou dans la soupe primitive, se détruisent à la vitesse même à laquelle ils se construisaient. Or il n'en fut rien, la complexité de la matière pré-biologique augmentant sans cesse.

Une fois de plus, le facteur essentiel va être la *stabilité dynamique* de ces édifices. Cette stabilité est due à l'apparition de propriétés nouvelles qui ne se manifestent qu'à partir d'un certain niveau de complexité. Voyons quelques-unes de ces propriétés :

1. Les liaisons inter-moléculaires, ou intra-moléculaires, qui forcent, par exemple, les protéines à s'enrouler en un « ressort » (ou à se plier en un globe) stabilisent l'édifice tout entier.

2. Si une molécule complexe est capable de catalyser la synthèse d'une autre molécule de forme identique, le nombre des individus de cette espèce moléculaire particulière peut augmenter à un taux plus rapide que celui qui correspond à leur vitesse de destruction.

3. La conjugaison stabilise les molécules et les rend à la fois plus solides et plus réactives. Comme nous l'avons vu pour les premiers composés organiques, la stabilité dynamique confère aux molécules une *plus grande probabilité d'existence*, et donc un *plus grand avantage évolutif*. Les macromolécules, ou les molécules conjuguées, s'imposent, par auto-sélection, à toute la suite de l'évolution. A la fin de 1971 de telles propriétés ont pu être quantifiées et mises en équation par Manfred Eigen, du Max Planck Institute en Allemagne, ouvrant ainsi la voie à l'étude mathématique de l'évolution au niveau moléculaire.

L'arbre « génalogique » des molécules de la vie

Pour résumer les diverses réactions décrites dans ce chapitre, et pour mieux suivre la complexification des molécules organiques formées dans l'atmosphère et dans l'hydrosphère primitives, essayons de reconstituer l'arbre évolutif de cette première période de l'histoire de la vie.

Cet arbre a été établi grâce aux filiations pré-biologiques récemment démontrées en laboratoire. Il ne prétend pas rendre compte rigoureusement, et dans l'ordre chronologique, de ce qui s'est effectivement passé aux premiers âges de la terre. Il donne cependant un aperçu de la tâche que la biochimie évolutive aura à accomplir.