



Qu'y a-t-il de commun entre le pétrole, le roi Nabuchodonosor et l'origine de la vie ?

Vingt-cinq siècles de géochimie organique

Guy Ourisson

Je voudrais rapporter ici l'histoire d'une recherche tout à fait fondamentale mais qui a eu des conséquences tout à fait applicables et appliquées, puis qui a viré de plusieurs façons à nouveau vers le fondamental et le théorique, et se poursuit activement ; l'histoire d'une recherche bien alsacienne, dont les pôles sont actuellement Strasbourg et Mulhouse, reconnus comme des pôles mondiaux ; l'histoire d'une recherche que le Centre national de la recherche scientifique a permise sans le vouloir, l'histoire d'une recherche non planifiée et cependant utile en même temps qu'intéressante.

Tout a commencé par une question que m'a posée vers 1958 Georges Millot, géologue spécialiste des argiles : « *Quesait-on de la nature de la matière organique contenues dans les sédiments ?* » ; et par une première réponse que je lui fis : « *C'est certainement trop compliqué pour que les chimistes puissent faire un travail sérieux sur un problème ainsi formulé* ». Cela crevait les yeux : il ne pouvait rien y avoir de commun entre un grès formé au fond d'un ruisseau, il y a 150 millions d'années dans ce qui allait devenir les Vosges, les boues du fond d'une mer comme la Baltique, le charbon lorrain venant d'un marais du carbonifère, les schistes si merveilleusement riches en fossiles de Bouxwiller ou de Messel, restes de lacs tropicaux

*Reconstitution de la flore bouillère
du bassin de Saint-Etienne par
G. Tissandier, d'après les dessins
de M. Grand'Eury. Extrait de la
Nature, 18 octobre 1873.*

FIGURE 1

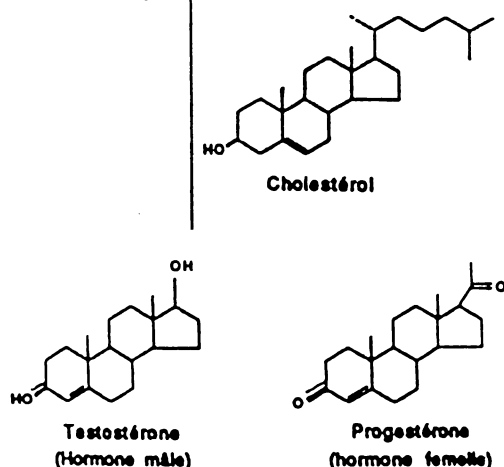


FIGURE 2

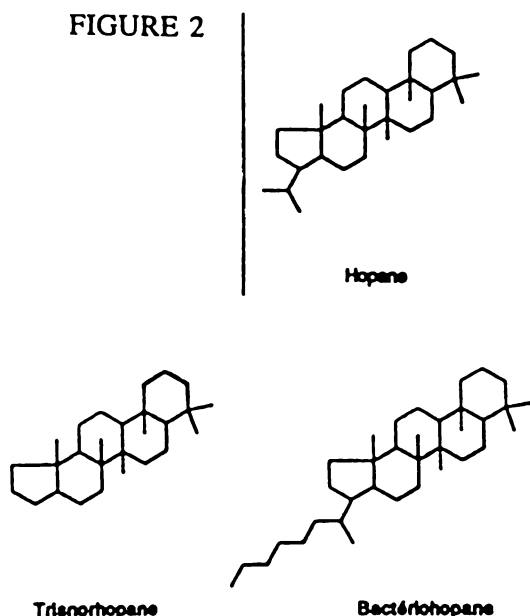
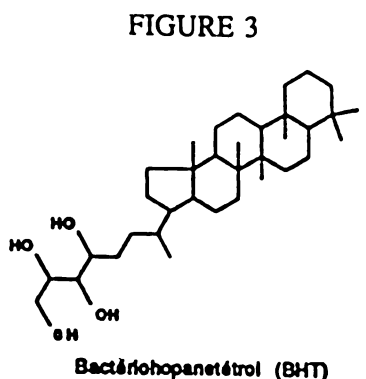


FIGURE 3



datant d'il y a 50 millions d'années. Et puis, cela ne me paraissait pas sérieux d'étudier la composition de traces de produits complexes, à coup sûr chaque fois différents, simplement pour allonger la liste des produits connus dans la nature.

Georges Millot fit ce que l'on ne doit jamais faire : il demanda pour son compte des crédits importants et nous les offrit pour nous engager à entreprendre quand même ce programme auquel il croyait. Et je fis ce que l'on ne doit jamais faire : j'acceptai de travailler pour de l'argent, ou plutôt bien sûr pour de l'argent nous permettant d'acheter un magnifique appareil de laboratoire, un spectromètre de masse.

En 1964, Pierre Albrecht, jeune chercheur, se voyait engagé dans ce programme. Où en est-il plus de vingt-cinq ans plus tard ? Il est toujours actif dans le même programme (qui a beaucoup évolué, mais reste de la « géochimie organique »). Un total de peut-être 500 années/chercheur a été investi dans le domaine à Strasbourg, plusieurs milliers d'années/chercheur dans les laboratoires des plus puissantes sociétés pétrolières du monde.

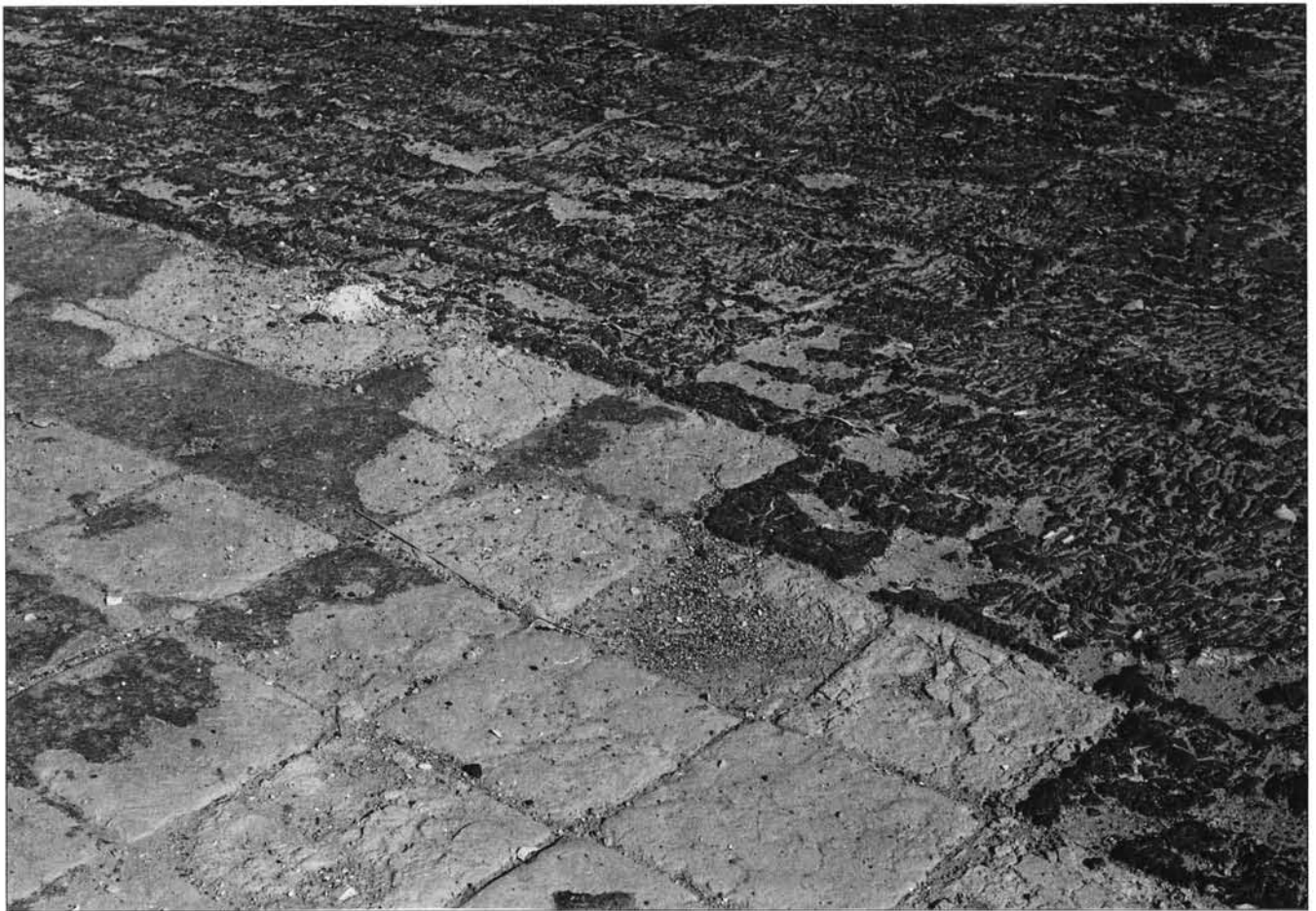
Quelques centaines de publications scientifiques, quelques dizaines de thèses, des douzaines de conférences ont décrit les résultats accumulés, qui ont coûté des dizaines de millions. En outre, à Mulhouse, Michel Rohmer a, de son côté, accumulé résultats sur résultats et d'anciens Strasbourgeois, chez Elf ou à l'École polytechnique, à Hambourg ou à Barcelone, en Indonésie ou au Brésil, en ont fait autant. Le quatorzième symposium international de géochimie organique vient d'avoir lieu. Bref, une science s'est développée.

La géochimie organique n'est pas née à Strasbourg. Avant la guerre, Alfred Treibs avait montré qu'on pouvait trouver, dans divers pétroles, des molécules dont la structure semblait indiquer qu'elles provenaient de la chlorophylle des plantes vertes : c'étaient des « fossiles moléculaires »¹.

La géochimie organique n'est pas née à Strasbourg, mais la géochimie organique moderne y a trouvé sa méthodologie, ses dogmes, ses résultats majeurs. Jugez-en !

Tout d'abord (et ce n'est là ni un résultat strasbourgeois, ni un résultat certain, mais tout au plus une évaluation), la matière organique présente *sur* terre est essentiellement présente *sous* terre. Je m'explique. Autour de nous, nous voyons des plantes, des animaux, nous savons que nous sommes entourés de microbes, que la mer est peuplée de petits poissons et de quelques grosses baleines. Tous ces êtres vivants contiennent des composés du carbone, des « composés organiques ». Ce carbone provient du gaz carbonique de l'air, qui est assimilé par photosynthèse (moyennant la présence de chlorophylle) par les plantes et bactéries vertes, et ceci depuis peut-être trois milliards d'années. On peut évaluer la masse totale de

Les gisements de la région de Hit sont abondamment cités par les auteurs grecs et latins (Ptolémée, Xénophon, Plutarque, Ctesias, Diodore de Sicile, Dioscoride, Hérodote) qui ont tous noté l'emploi massif de bitume dans les constructions de Babylone comme mortier dans les murs des édifices ainsi que sur la voie processionnelle que nous voyons ci-contre. Le document du bas montre le revêtement de bitume sur la voie. Doc. J. Connan.





ce carbone « vivant » à environ un billion de tonnes.

Mais tout être vivant meurt, et retourne en « poussière » : ses constituants organiques sont alors décomposés par les bactéries, et redonnent du gaz carbonique ; c'est le cycle du carbone. Cycle parfait ? Presque : presque tout le carbone vivant redonne ainsi du carbone minéral, atmosphérique ou fixé dans les calcaires. Mais cycle seulement presque parfait : une part infime de ce carbone n'est pas décomposé assez vite pour être transformé en gaz carbonique avant d'être protégé par des sédiments, vases, sables ou dépôts divers, et de se retrouver, toujours organique, prêt à suivre le sort des sédiments dans lesquels il est maintenant dispersé : enfouissement, chauffage, lavage à l'eau, attaques bactériennes ultérieures, etc.

C'est cette matière organique piégée et transformée qui, parfois, peut être centrée par migration, et nous donne alors nos énormes gisements de gaz, de houille, ou, plus rarement, de pétrole. Mais, si la concentration est exceptionnelle, la dispersion dans les milliers de kilomètres cubes de roches sédimentaires, qui en contiennent 2% en moyenne, conduit à des masses prodigieuses, depuis le temps que les êtres vivants ne cessent de mourir : environ dix à cent mille billions de tonnes ont ainsi été accumulées, au moins dix mille fois plus qu'il n'y a de carbone fixé dans les êtres vivants actuellement.

Le sous-sol contient d'énormes réserves de matière organique fossile, dont seule une petite partie (peut-être un billion de tonnes) est exploitable comme réserve d'énergie, parce qu'elle est concentrée. Du coup, la question de Georges Millet change de nature, même si

subsistent les objections présentées plus haut : on ne peut pas négliger l'étude de cent mille millions de mégatonnes de matière organique...

Et les remarques faites plus haut nous permettent évidemment de sauter à pieds joints par-dessus les hésitations, les accumulations de petits résultats, le pointillisme des thèses, et d'en arriver tout de suite à la conclusion la plus générale de la géochimie strasbourgeoise : la matière organique sédimentaire, qu'elle soit dispersée ou concentrée, est essentiellement constituée des fossiles moléculaires des bactéries qui se sont engagées, pratiquement toujours, dans la destruction primaire de la matière organique, à sa mort.

Cette conclusion évidente ne l'était pas avant les premiers travaux de Pierre Albrecht et de ses collaborateurs. Et elle n'a pas été déduite par raisonnement, mais découle de l'expérience et d'une observation tout à fait insolite : l'existence ubiquitaire des géohopanoïdes. Enfin, une phrase savante. Les géohopanoïdes sont une famille de substances de structures moléculaires voisines, un peu comme sont voisines les structures du cholestérol, dont nous reparlerons, et des hormones sexuelles naturelles ou artificielles, celles de la « pilule ».

Au cœur du village de Hit en Irak, le pétrole, véhiculé par l'eau salée d'une source, forme une pellicule de 3mm environ qui flotte sur une eau limpide. Les enfants, en façonnant des boules de bitume, refont un geste millénaire, puisque des boules identiques ont été retrouvées sur des sites archéologiques datant du III^e millénaire avant notre ère. Doc. J. Connan.

La figure 1 vous montre trois dessins ; le chimiste y reconnaît des structures moléculaires ; même si vous n'êtes pas chimiste, reconnaissez que l'on y retrouve une certaine ressemblance : les structures des hormones stéroïdes semblent découpées dans celles du cholestérol, et d'ailleurs des procédés de préparation transforment effectivement le cholestérol (bon marché) en hormones stéroïdes (chères). La figure 2 vous montre trois autres dessins, qui sont eux aussi, de toute évidence, à la fois proches des premiers mais différents, et différents entre eux quoique apparentés. Le premier symbolise la formule d'une substance que nous appelons le hopane ; les deux autres en sont des dérivés, l'un simplifié, l'autre plus complexe, tous deux isolés de sédiments : ce sont des géohopanoïdes.

Eh bien, si avant Pierre Albrecht on ne connaissait que moins d'une demi-douzaine d'hopanoïdes dans la nature superficielle, dans des arbres asiatiques, des fougères ou quelques bactéries, c'est plus de deux cents géohopanoïdes parfaitement bien caractérisés qui ont été jusqu'ici trouvés, à une ou deux exceptions près, par le groupe strasbourgeois. Trouvés dans tous les pétroles, dans tous les charbons, trouvés dans les vases de Benfeld ou dans les schistes de Messel, trouvés dans le charbon lorrain, dans le lignite australien, dans les argiles gabonaises, dans les roches de l'Antarctique, dans celle du Groenland ou dans les bitumes d'Irak, dans les sols des forêts ou dans des roches de 1,5 milliards d'années. En un mot : partout (sauf là où ce n'est pas possible, évidemment : dans les roches éruptives ou dans celles qui ont été tellement chauffées, métamorphosées, qu'elles ont perdu tout leur carbone). Variés, ubiquitaires, les géohopanoïdes sont aussi abondants. Dans chaque échantillon, ils ne sont que rarement dominants, mais comme ils sont présents partout, leur masse totale finit par devenir dominante. Nous évaluons la masse totale des géohopanoïdes à environ un million de millions de tonnes de carbone : il y a peut-être autant de géohopanoïdes sur terre, ou plutôt sous terre, que la masse totale des êtres actuellement vivants ! Ce sont apparemment les dérivés organiques les plus abondants sur la Terre. Et ceci, qui n'est quand même pas négligeable, a été le premier résultat extraordinaire obtenu en réponse à Georges Millot.

Tout de suite, une précision : l'établissement de la structure de l'un de ces géohopanoïdes n'est pas quelque chose que le dieu des chimistes leur octroie par une révélation soudaine. Parfois, il s'agit d'un mois de travail, une des thèses soutenues ici a « rapporté » moins d'une douzaine de structures nouvelles en quatre ans d'efforts. Chacun de vous, contribuables (chacun de nous), a payé quelques francs pour ce travail. N'avons-nous fait que vous apporter des connaissances nouvelles, dont vous vous passiez fort bien ? Non, parce que cette découverte de la variété et de l'abondance des géohopanoïdes conduit immédiatement à des applications d'une variété surprenante. J'en citerai trois.

La variété des géohopanoïdes conduit à ce que leur distribution dans un terrain donné soit l'équivalent d'empreintes digitales, dont en outre on connaîtrait les règles d'évolution avec diverses circonstances. Il est ainsi devenu

possible, par l'étude des « hopanogrammes » obtenus avec des appareils lourds et chers (des spectromètres de masse qui coûtent de 1 à 10 millions de francs l'unité), dans toutes les sociétés pétrolières du monde, de reconnaître le degré de maturation d'un terrain (donc son « potentiel en huile » ou en gaz), de reconnaître les filiations entre un pétrole et diverses roches-mères potentielles, de savoir si un pétrole est visqueux parce qu'il n'a pas été assez chauffé ou parce qu'il a été biodégradé par des bactéries, etc.

Si les pétroliers se servent de ces hopanogrammes, si l'argot des « oilmen » américains les a adoptés en « hops », c'est que cela rapporte : les données géochimiques servent maintenant, chez Elf, chez Chevron ou ailleurs, à choisir de forer ici ou là, en augmentant les chances de succès de forages dont un seul coûte autant que tout ce que nous avons dépensé dans ce domaine.

Autre application, ou plutôt la même, dans un domaine non lucratif. Un ancien de Strasbourg, J. Connan, maintenant chez Elf, a obtenu de ses patrons l'autorisation d'appliquer la même méthode pour rechercher l'origine du bitume utilisé pour sceller les dalles de la voie processionnelle du roi Nabuchodonosor : si la composition globale des bitumes naturels de Mésopotamie est à peu près la même, ils diffèrent suffisamment par leurs hopanogrammes pour qu'il ait été possible d'assurer que ce bitume venait de Hit, et pas d'ailleurs. Ceci a également été utilisé en Allemagne, et par J. Connan, pour définir l'origine de bitumes utilisés pour embaumer les momies égyptiennes (dans ce cas, il s'agissait de bitume récolté à la surface de la Mer Morte). Et c'est ainsi que les travaux de Strasbourg permettront à la société Elf non seulement de trouver du pétrole, mais aussi de présenter au musée du Louvre une vitrine des hopanogrammes mésopotamiens ou égyptiens.

Une troisième application : on sait reconnaître sur un hopanogramme la présence de pétrole dans un sédiment récent. On sait donc reconnaître dans une vase superficielle la présence d'un pétrole contaminant. Et on peut même préciser s'il s'agit du pétrole rejeté illégalement en mer par tel pétrolier venant du Moyen-Orient, ou par tel autre venant du Vénézuéla. Cette application policière n'a pas encore été largement développée.

J'espère vous avoir convaincu que les géohopanoïdes sont une belle découverte. Mais je vous ai caché le pire : leur structure, celle que symbolisent les trois dessins de la figure 2, posait un problème lancinant. Des substances aussi complexes doivent bien avoir eu un précurseur. Ce précurseur, enfoui dans un sédiment, a pu se dégrader mais il n'a pas pu s'améliorer : « Vieillir, quelle déchéance ! » (Ch. De Gaulle). Or, aucun précurseur potentiel n'était connu parmi les milliers de structures de substances isolées de plantes, d'animaux, de microbes, qui puisse avoir conduit à la troisième des structures présentées, la plus complexe. Les rares hopanoïdes connus dans les plantes (des biohopanoïdes) étaient tout au plus aussi complexes que la seconde des formules présentées, et auraient donc à la rigueur pu servir de précurseurs, eussent-ils été plus abondamment répandus sur terre, à des substances de structure moléculaire plus simple, comme celle de gauche, mais en aucun cas à des structures

plus élaborées, comme la troisième. Les géohopanoïdes, les substances complexes les plus abondantes sur terre, avaient donc cette particularité scandaleuse d'être sans parents connus.

Grâce à un premier travail, sans aucun rapport avec le nôtre puisqu'il s'agissait de chercher à produire une cellulose d'origine bactérienne, fait par des Canadiens et des Américains, un parent putatif se présentait alors : le « bactériohopanététrol », dont la formule (précisée à Strasbourg et à Mulhouse) est présentée sur la figure 3. On voit, là encore sans être chimiste, que cette fois il « suffit » de perdre quelques lettres (en fait quelques atomes) pour passer à la formule de droite de la figure 2. Le BHT peut être la substance parente de tous les géohopanoïdes ; ou plutôt, il aurait pu l'être si l'organisme bien particulier dans lequel il avait été trouvé avait lui-même été ubiquitaire, s'il avait présidé à la destruction de tous les êtres vivants, sur les cinq continents et dans les océans, depuis 1,5 milliard d'années au moins. Hypothèse ridicule.

D'où un nouveau dérapage, imprévisible, de notre travail : la recherche systématique par Michel Rohmer, d'abord à Strasbourg puis à l'École de chimie de Mulhouse, de dérivés de BHT dans les bactéries, et la découverte totalement inattendue, dans un très grand nombre d'entre elles, d'une grande variété de biohopanoïdes ; la figure 3 présente, à côté du BHT, la formule de l'un d'entre eux, l'un des plus beaux et des plus inattendus puisqu'il comprend un élément de structure commun, croyez-moi sur parole, aux acides nucléiques, dont l'ADN qui nous procure, outre de jolis dessins en hélice dans les revues, tout le contrôle de l'hérédité. Bilan : plusieurs douzaines de molécules nouvelles, inconnues auparavant, très répandues dans de très nombreux groupes de bactéries ou d'autres micro-organismes, et qui peuvent maintenant, vraiment, être considérées comme les précurseurs des géohopanoïdes, depuis l'aube des temps.

Vous devez commencer à vous lasser de ces rebondissements moléculaires. En fait, ce n'est pas fini, simplement parce que nous avons alors été contraints, par ces résultats, à nous poser une autre question : si ces hopanoïdes sont si abondants dans les bactéries, jouent-ils pour la vie de ces organismes un rôle général ? Lequel ? Et, si oui, que se passe-t-il dans les bactéries où nous n'avons pas trouvé de biohopanoïdes ? Et par quoi sont-ils remplacés dans les organismes supérieurs, plantes ou animaux, où ils semblent vraiment ne pas être présents ?

La réponse à ces questions a, elle aussi, été apportée. Avec Yoichi Nakatani, nous avons montré que ces biohopanoïdes jouaient dans les bactéries le même rôle que le cholestérol dans nos cellules : un rôle essentiel de renforcement des membranes cellulaires². Nous avons montré que certaines bactéries utilisent, à la place de cholestérol ou de biohopanoïdes, des dérivés d'autres familles de produits naturels, dont on ne soupçonnait pas jusqu'alors qu'elles pouvaient jouer un rôle dans les membranes. Nous avons montré qu'il était enfin possible de proposer un schéma cohérent pour l'évolution des membranes de tous les êtres vivants, de proposer l'existence d'étapes prébiotiques, antérieures à la vie, de proposer un rôle général (stabilisation de membranes)

pour une famille très riche de substances existant dans tous les êtres vivants, mais jusqu'alors considérées essentiellement comme des produits accessoires, responsables de la couleur blanche de l'écorce de bouleaux, orange de la carotte ou rouge de la tomate, de l'odeur du vétiver ou de la rose, ou de l'élasticité du caoutchouc, les terpènes.

L'histoire n'est pas terminée, mais je l'arrêterai là, ayant apporté une réponse à mon titre. Mais, ne faut-il pas lui proposer une conclusion ? Je vous propose simplement de réfléchir à ceci : comment ces travaux, dont aucun n'a de conséquence négligeable quantitativement, qualitativement, intellectuellement ou économiquement, comment ces travaux auraient-ils pu être entrepris et menés à bien si nous avions dû les planifier, en prévoir le développement, annoncer les résultats escomptés, et si nous avions dû établir des budgets prévisionnels ? Et comment auraient-ils pu être réalisés si nous n'avions pas eu, chance des chances, toutes sortes de concours : ceux des géologues G. Millot, J. Lucas et de leurs collaborateurs, ceux d'industriels, ceux de microbiologistes comme R. Stanier à l'Institut Pasteur, ceux de botanistes, dont P. Benvéniste au premier chef, de physiciens comme G. Weil ? Et comment, sans être à Strasbourg, dans un milieu scientifique exceptionnel, et comment, sans cet organisme sans pareil, le CNRS, cinquantenaire fringant ?³

Notes

1. Ce travail a été repris à Strasbourg par Henri Callot, qui a montré, lui, qu'en réalité l'origine de ces produits était plutôt de la chlorophylle de certaines bactéries vertes. Nuance ; erreur : tout chercheur doit revendiquer le droit de faire erreur. Elle était minime.

2. Si l'excès de cholestérol dans nos artères pose des problèmes, le cholestérol lui-même est absolument nécessaire à notre vie. Nous le fabriquons à partir de notre nourriture et l'utilisons dans toutes nos cellules pour améliorer les propriétés des membranes qui les délimitent.

3. Ce texte a été écrit en 1989, année du cinquantenaire du CNRS.