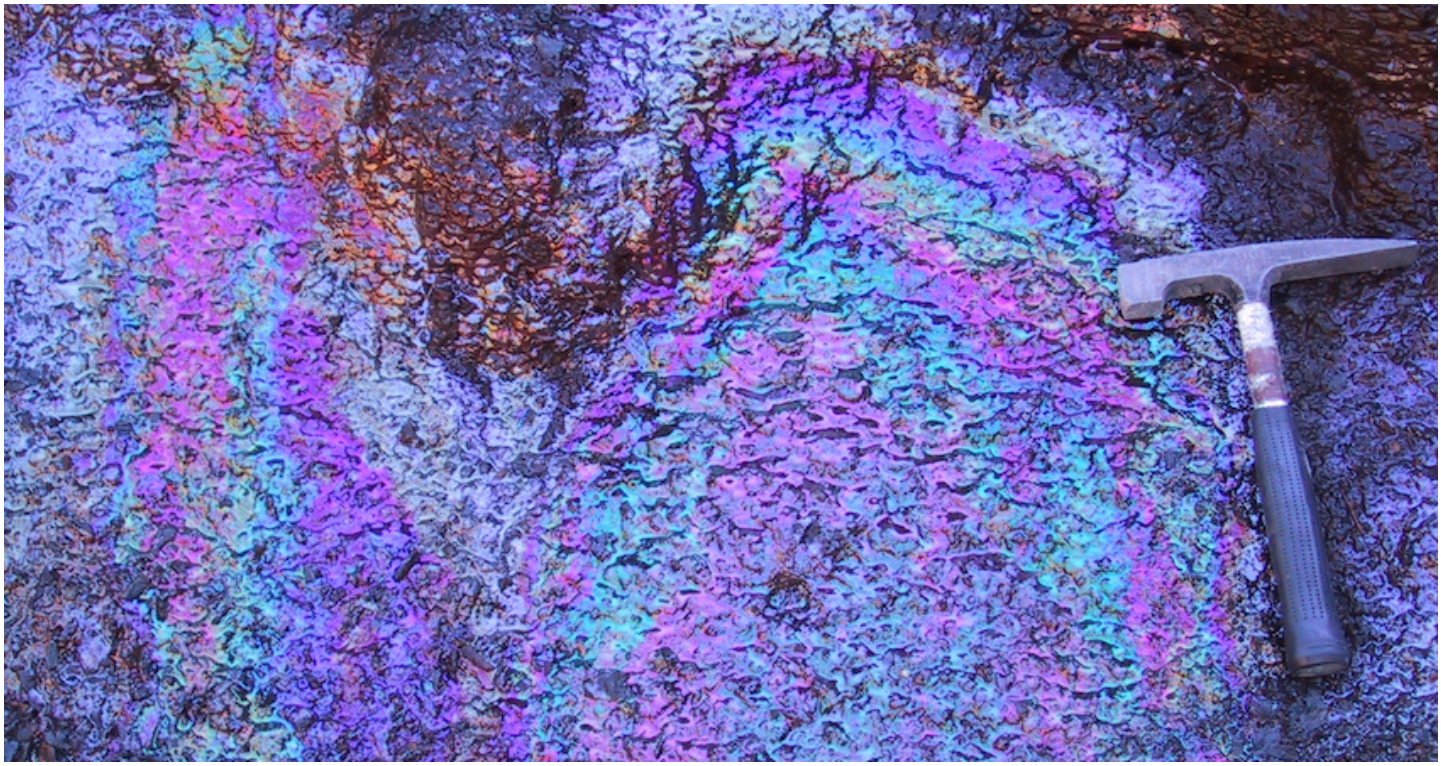
Pétrole : les preuves de son origine biologique

Auteur :
BAUDIN François, Professeur de Géologie, Sorbonne Université, ISTeP (Institut des Sciences de la Terre de Paris)

05-04-2021

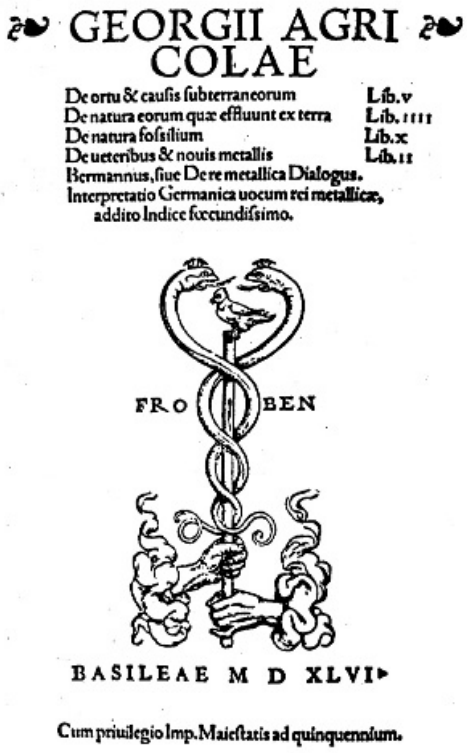


Accusé levez-vous ! Nom, prénom, âge et origines ?

Petra Oleum, Vieux et Biologiques répondraient tous les pétroles du monde s'ils devaient paraître devant un tel tribunal imaginaire. Soumis à la question des scientifiques, le pétrole a été vu par certains comme un fluide d'origine minérale, ayant donc une origine abiotique... Pourtant les indices de son origine biologique, c'est-à-dire de sa filiation avec ce qui a été vivant, même si c'était il y a des millions d'années, sont multiples. Le pétrole lui-même passe aux aveux en laissant partout des empreintes qui le rattachent à la vie. Cet article passe en revue les différentes preuves de l'origine biologique des pétroles en les resituant dans un cadre historique.

1. Les idées et faits à l'origine d'une controverse

1.1. Des philosophes de l'Antiquité aux savants de la Renaissance



GEORGII AGRI COLAE

De ortu & causis subterraneorum Lib. v
De natura eorum quæ effluunt ex terra Lib. IIII
De natura fossilium Lib. x
De ueteribus & nouis metallis Lib. II
Bermannus, siue De re metallica Dialogus.
Interpretatio Germanica uocum rei metallicæ, addito Indice fœcundissimo.

FRO BEN

BASILEAE M D XLVI

Cum priuilegio Imp. Maiestatis ad quinquennium.

Figure 1. Page de garde de l'ouvrage de Georgius Agricola, dans lequel il disserte notamment de l'origine du pétrole. [Source : [Public domain], via Wikimedia Commons.]

Si le pétrole ou ses dérivés ont été utilisés par l'Homme depuis le Néolithique [1], son origine est restée longtemps mystérieuse. Dans son traité *Opus Tertium*, paru en 1268, **Roger Bacon** [2] commente l'absence de discussion sur l'origine des huiles et des bitumes par **Aristote** [3] et les autres philosophes de l'Antiquité. C'est à la **Renaissance** qu'émergent **deux hypothèses contradictoires** sur l'origine du pétrole. En 1546, **Georgius Agricola** [4] publie *De Natura eorum quae Efflunnt ex Terra* (Figure 1), ouvrage dans lequel apparait la **première mention du mot pétrole**, du latin *petra oleum* (huile de pierre). Agricola élargit le concept d'Aristote d'exhalations depuis les profondeurs de la Terre et propose que les bitumes soient la **condensation de vapeurs** soufrées. De son côté, **Andreas Libavius** [5] théorise en 1597 dans son ouvrage *Alchemia* que le bitume se forme **à partir de la résine d'anciens arbres**. Depuis, un **long débat scientifique** s'est poursuivi entre les tenants d'une origine abiotique du pétrole et ceux qui y voient un produit dérivant de la transformation de matières organiques fossilisées.

1.2. La vision opposée des premiers scientifiques

Figure 2. Empreintes de fougères et de prêles fossiles sur un schiste charbonneux provenant de terrains carbonifères (– 300 millions d'années) du Massif Central. La barre d'échelle mesure 1 cm. [Source : © Photo A. Lethiers-F. Baudin]

Il est intéressant de souligner que l'origine biologique des charbons n'a jamais été contestée parce que les restes de plantes fossiles qu'ils contiennent en apportent une preuve indéniable (Figure 2) [6]. Faisant un lien entre ces deux types de combustibles fossiles carbonés, et reprenant l'idée de Libavius, le savant russe Mikhaïl **Lomonossov** [7] formule en 1757 l'hypothèse selon laquelle le **pétrole liquide** et le **bitume** solide tireraient leur origine de **détritus végétaux transformés** dans le sous-sol **sous l'effet** de la **température** et de la **pression**. Cette **hypothèse** est **rejetée** au début du 19e siècle par le géologue et chimiste allemand Alexander **von Humboldt** [8] et le thermodynamicien français Louis Joseph **Gay-Lussac** [9] qui tous deux font du pétrole un composé primordial de la Terre remontant des grandes profondeurs à la faveur d'éruption à froid. Cette hypothèse purement chimique n'est pas sans argument et une **école** de pensée **russe** a largement diffusé cette théorie d'une **origine abiotique du pétrole** à partir du milieu du 20e siècle ; idée qui refait régulièrement surface pour laisser entendre qu'il y aurait beaucoup plus de pétrole que nous le pensons dans les profondeurs de la Terre.

1.3. Les arguments des tenants d'une origine abiotique du pétrole

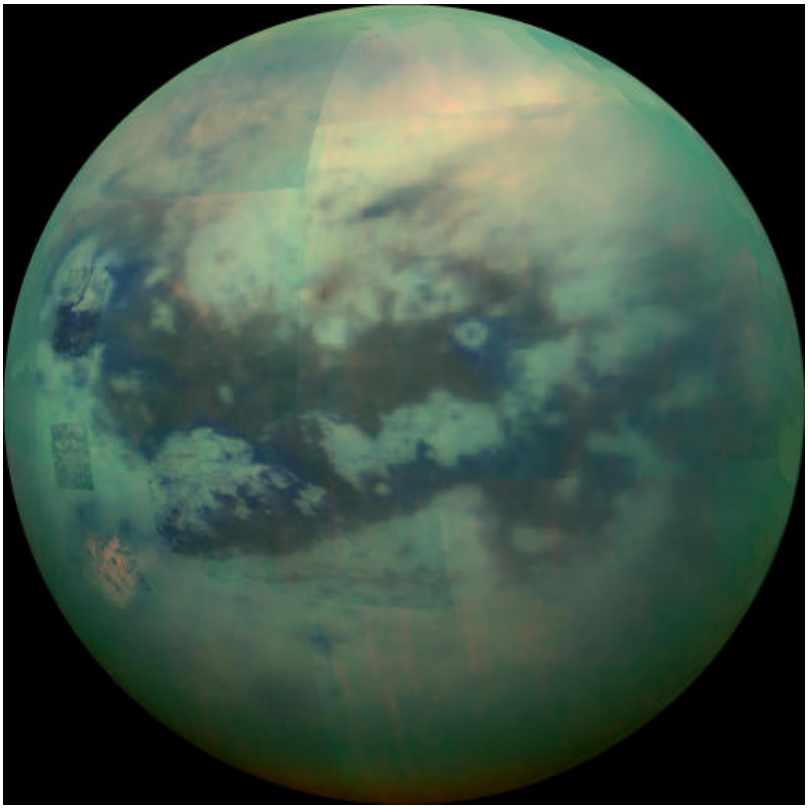


Figure 3. Image composite (mosaïque) de Titan, une des lunes de Saturne, vue par la sonde Cassini. Les zones verdâtres sont des nuages de méthane et d'autres molécules organiques, tandis que la surface abrite des lacs de méthane. [Source : © NASA/JPL/University of Arizona/University of Idaho]

La **présence d'hydrocarbures sur les planètes gazeuses**, où la vie n'est pas censée avoir prospéré, est une **preuve** que des **processus abiotiques conduisent** à la **formation de molécules hydrocarbonées** simples. C'est par exemple le cas sur Titan (Figure 3), une des lunes de Saturne, dont l'atmosphère et la surface sont riches en méthane et éthane. On trouve aussi des hydrocarbures, et même des macromolécules organiques assez complexes et de poids moléculaire élevé, dans des météorites tombées sur Terre.

Du **méthane** est **formé au cours de l'altération des roches volcaniques** du manteau terrestre où le dihydrogène (H_2) produit lors de l'altération de certains minéraux riches en fer réagit avec du dioxyde de carbone (CO_2) au cours d'une réaction dite de Sabatier. Cette réaction se déroule à des températures et des pressions élevées en présence d'un catalyseur de nickel afin de produire du méthane et de l'eau. D'autres réactions, de type Fischer-Tropsch, qui associent le monoxyde de carbone (CO) et de dihydrogène en vue de les convertir en hydrocarbures, peuvent avoir lieu lors du refroidissement d'un magma et produire des hydrocarbures par assemblage des unités CH_2. Enfin, la **décomposition thermique de carbonate de fer** ($FeCO_3$) en présence d'eau **peut également produire des hydrocarbures simples**.

Si l'on ne peut nier que des processus abiotiques conduisent à la formation d'hydrocarbures, **ces mécanismes peuvent difficilement rendre compte de la quantité, de la diversité et de la localisation des gisements pétroliers sur Terre**. L'idée que le pétrole tire son origine de la matière organique sédimentaire, c'est-à-dire d'organismes qui ont été vivants, est largement démontrée par les observations naturelles, les analyses de laboratoire et les expériences.

2. Les preuves par les observations naturelles

2.1. Les gisements pétroliers au cœur des bassins sédimentaires

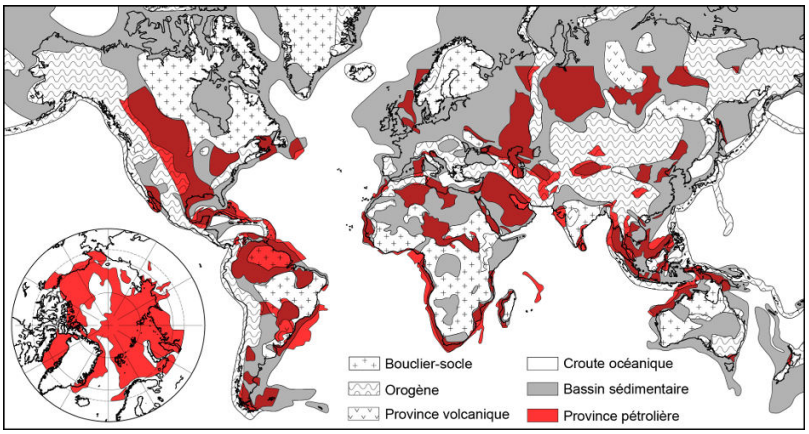


Figure 4. Carte géologique simplifiée du Monde montrant les principaux domaines de socles granitiques ou métamorphiques, d'orogènes (= chaînes de montagne), de provinces volcaniques et les bassins sédimentaires. Les zones rouges en surimpression correspondent aux grandes provinces pétrolières qui sont pratiquement toutes localisées dans des bassins sédimentaires. [Source : © F. Baudin]

Les **roches sédimentaires sont essentielles pour qu'un système pétrolier existe** puisqu'elles constituent dans la très grande majorité des cas la **roche mère**, le réservoir et la couverture de ce système. **Plus de 99% des réserves pétrolières mondiales** sont ainsi localisées **dans des bassins sédimentaires** et rares sont les gisements dans des roches magmatiques ou métamorphiques (Figure 4). Lorsque du pétrole se trouve piégé dans un granite ou une autre roche du socle, il est assez facile de démontrer qu'il a pu migrer depuis le bassin sédimentaire adjacent. Aucun indice d'huile n'a jamais été rencontré le long des failles dans les roches continentales non sédimentaires et extrêmement rares sont les suintements de pétrole dans les dizaines de milliers de mines creusées dans les roches non sédimentaires. L'exploration des roches associées à l'impact d'un cratère météoritique en Suède au début des années 90, si elle a bien mis en évidence des traces d'huile, n'a pas permis de découvrir de gisement d'intérêt commercial. L'origine abiogénique de ces huiles est d'ailleurs réfutée par plusieurs des arguments géochimiques développés ci-dessous.

2.2. Les preuves par la déviation de la lumière

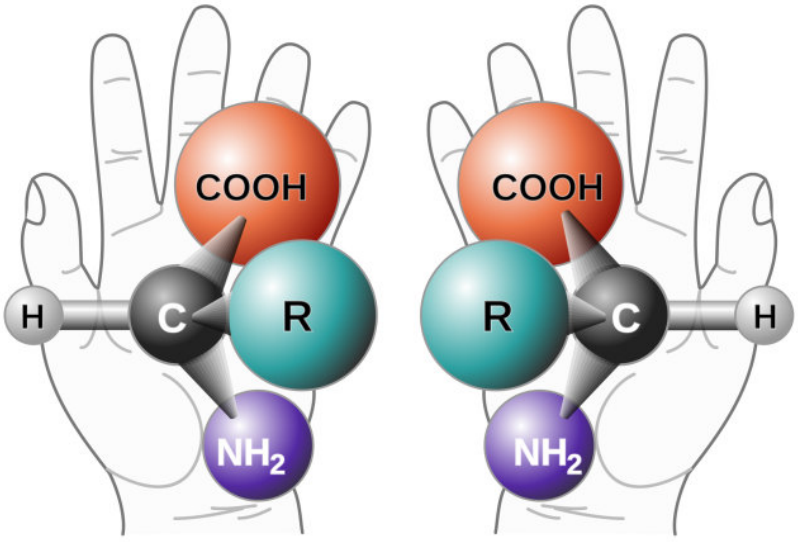


Figure 5. Représentation d'isomères lévogyres et dextrogyres d'un composé chiral, ici un acide aminé. [Source : By Chirality with hands.jpg: Unknownderivative work: -- πεφήλιο ℗ (Chirality with hands.jpg) [Public domain], via Wikimedia Commons.]

De nombreux composés biologiques sont optiquement actifs, c'est-à-dire qu'ils dévient un faisceau lumineux les traversant vers la droite ou vers la gauche quand on fait face à la lumière. On qualifie respectivement ces composés de dextrogyres (ex. saccharose) ou de lévogyres (ex. fructose). Pratiquement tous les acides aminés dans les organismes vivants sont lévogyres. Les composés abiotiques ne présentent pas ce pouvoir rotatoire de la lumière. Ils sont optiquement inactifs car ils possèdent en égale

proportion des isomères lévogyres et dextrogyres d'un composé chiral (Figure 5). La Vie a tendance à sélectionner préférentiellement un isomère plutôt que l'autre, d'où cette propriété optique des composés biologiques. **Or le pétrole est le plus souvent actif optiquement**, suggérant ainsi son origine biologique. Cette propriété a toutefois tendance à disparaître avec le degré de maturation thermique des pétroles mais il peut aussi être amplifié lorsque des microbes dégradent le pétrole.

3. Les preuves géochimiques

3.1. Les isotopes du carbone

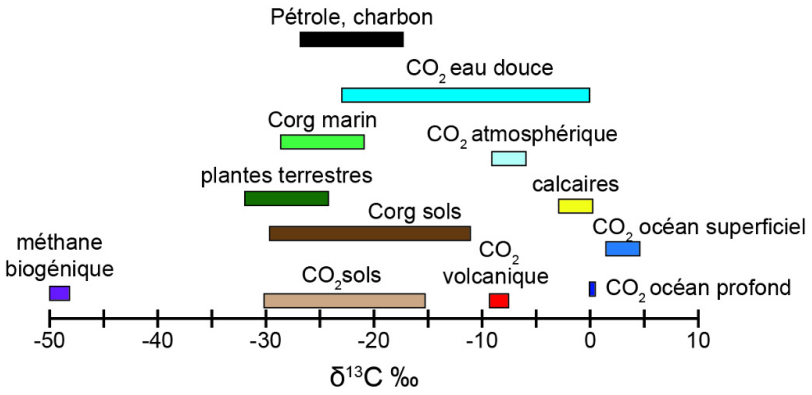


Figure 6. Gamme de variation du rapport isotopique 12C/13C de différents matériaux terrestres. Le CO2 de l'eau de mer est pris comme référence ; les valeurs négatives correspondent à un appauvrissement en 13C qui est ici exprimé en ‰. Corg : Carbone organique. [Source : Adapté de Trumbore et Druffel (ref. 10).]

Le carbone possède deux isotopes [10] stables naturels : ^{12}C et ^{13}C. La **matière organique formée lors de la photosynthèse** à partir du CO_2 atmosphérique ou de HCO_3^- dissous dans l'eau est **très appauvrie en ^{13}C** car les plantes fixent préférentiellement le ^{12}C. Dans la plupart des plantes cet appauvrissement est de l'ordre de 0,02% (ce que l'on note aussi $\delta^{13}C = -20$ ‰) par rapport au carbone inorganique source. Les **pétroles** et la **matière organique fossile présentent le même appauvrissement en ^{13}C que la matière organique des êtres vivants** (Figure 6) [11]. Ce déficit isotopique est systématique, que l'on considère des molécules individuelles ou la matière organique totale. Aucun processus inorganique connu ne conduit à la formation de molécules de haut poids moléculaire avec un tel déficit en ^{13}C. Pour ce qui concerne les gaz, la proportion de ^{12}C diminue depuis le méthane jusqu'au propane et dans les différentes formes de butane ; ce qui est conforme à la cinétique du fractionnement isotopique lors du craquage thermique de la matière organique sédimentaire (aussi appelée kérogène) ou du pétrole. La tendance inverse, c'est-à-dire une augmentation du ^{12}C du méthane vers le butane, caractérise les produits de polymérisation des réactions de type Fischer-Tropsch. Cette signature isotopique singulière ne se rencontre dans aucun champ de gaz de par le monde.

3.2. La découverte de porphyrines dans les pétroles

Le chimiste allemand **Hans Fischer** [12] fut lauréat du prix Nobel de Chimie (1930) pour ses recherches sur les **pigments organiques**, notamment dans le sang (**hémine**) et les plantes (**chlorophylle**).

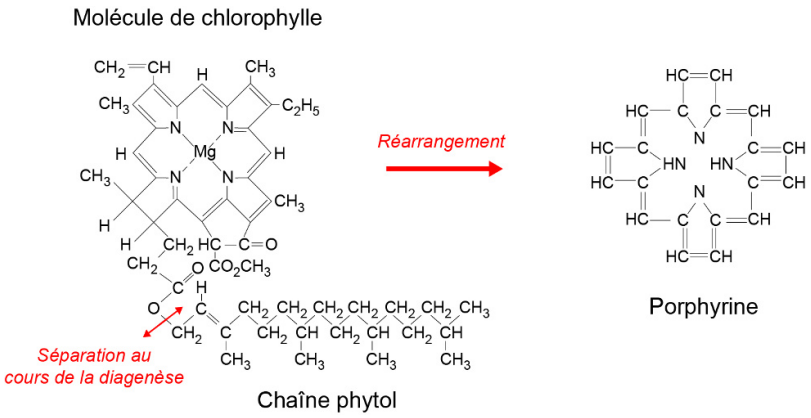


Figure 7. Structure chimique de la chlorophylle constituée d'un noyau tétrapyrrolique et d'une chaine latérale phytol. Après la mort de la plante, la molécule de chlorophylle se scinde en deux et chaque partie évolue différemment selon les conditions du milieu de sédimentation. Le noyau tétrapyrrolique se ré-organise partiellement pour donner une molécule appelée porphyrine. Il existe des dizaines de types de porphyrines et tous les pétroles en contiennent, ce qui est une preuve indubitable de leur origine biologique. [Source : © F. Baudin]

La chlorophylle, en effet, est le pigment majoritaire des **plantes vertes** dans lesquelles elle assure l'absorption d'une partie de l'énergie solaire rendant possible la **photosynthèse**. Au niveau moléculaire, elle comprend deux parties (Figure 7) : une "tête" polaire (c'est-à-dire soluble dans l'eau) formée de quatre noyaux pyrrole, entourant symétriquement un atome de magnésium, et une "queue" de phytol ; longue chaîne alcool comprenant 20 atomes de carbone qui est apolaire (c'est-à-dire soluble dans les lipides). Il existe cinq formes de chlorophylle (a, b, c, d, e), chacune possédant son spectre d'absorption propre.

Après la mort des végétaux, le **noyau tétrapyrrolique** et la **chaîne latérale phytol** se séparent et évoluent différemment. Le noyau tétrapyrrolique se réorganise très légèrement – en particulier le magnésium est remplacé par du nickel ou de l'oxyde de vanadium – donnant ainsi naissance à une famille de biomarqueurs : les **porphyrines**.

Alfred Treibs [13], élève de Hans Fischer, mit en évidence en 1936 l'**ubiquité des porphyrines dans les pétroles** et les argiles riches en kérogène et les voies de leur transformation à partir de la chlorophylle, apportant ainsi une **preuve** manifeste de leur **origine végétale**. Alfred Treibs est de ce fait considéré comme le père de la géochimie organique.

3.3. Des biomarqueurs de plus en plus nombreux

Depuis cette découverte, on ne compte plus le nombre de molécules mises en évidence dans les pétroles et qui dérivent voire sont strictement identiques à une molécule connue dans les organismes vivants (Figure 8). Ces molécules, appelées **biomarqueurs**, constituent de véritables **fossiles géochimiques** car elles ont une structure très proche de biomolécules du vivant.

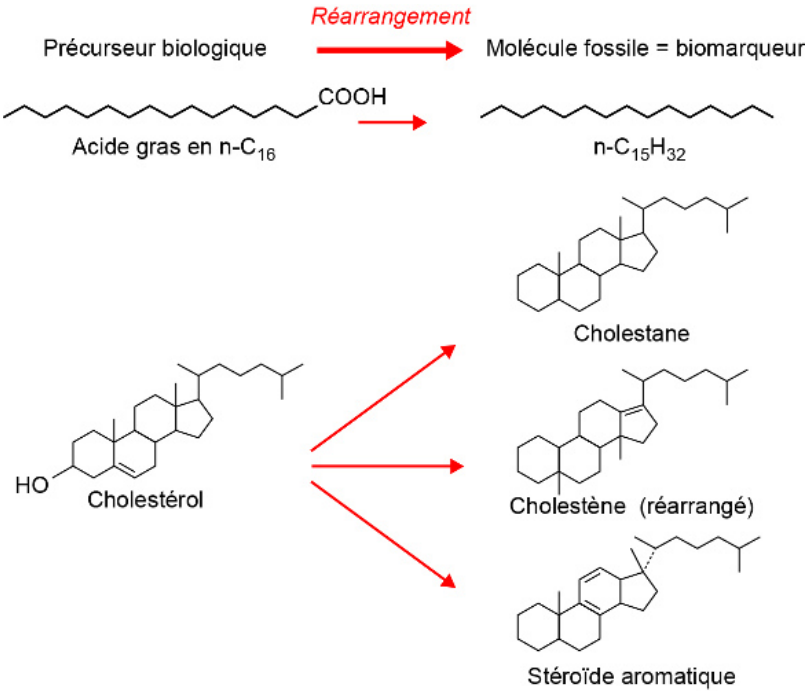


Figure 8. Exemple de biomarqueurs (= fossiles géochimiques) et de leurs précurseurs biologiques. [Source : © F. Baudin]

En effet, un grand nombre de membranes cellulaires des procaryotes et eucaryotes, mais aussi les cuticules des feuilles, les pigments ou les résines, sont constituées de **biomolécules résistantes** qui **se préservent dans les sédiments** où elles s'altèrent peu et **restent identifiables**. En général seuls les groupements fonctionnels (-OH ou -COOH par exemple) et les doubles liaisons disparaissent sous une dizaine à une centaine de mètres d'enfouissement. Mais au-delà, le squelette hydrocarboné -qui est finalement préservé- permet bien souvent d'identifier ses précurseurs biomoléculaires (Figure 8). Ces molécules caractéristiques récupérables dans la fraction extractible de la matière organique sédimentaire ou dans le kérogène, répondent parfaitement à la définition d'un fossile comme le sont des empreintes de feuilles ou des restes minéralisés d'organismes.

Lorsque le kérogène subit un craquage thermique naturel pour former du pétrole sous l'effet de l'augmentation de la température en profondeur et sur la durée des temps géologiques, certains de ces biomarqueurs s'y retrouvent inchangés et forment même une partie de ce pétrole. Il est donc difficile d'imaginer autant de molécules complexes présentes dans tous les pétroles qui seraient uniquement produites par des processus abiotiques.

3.4. Une signature chimique des pétroles marins qui co-évolue avec la diversification du phytoplancton

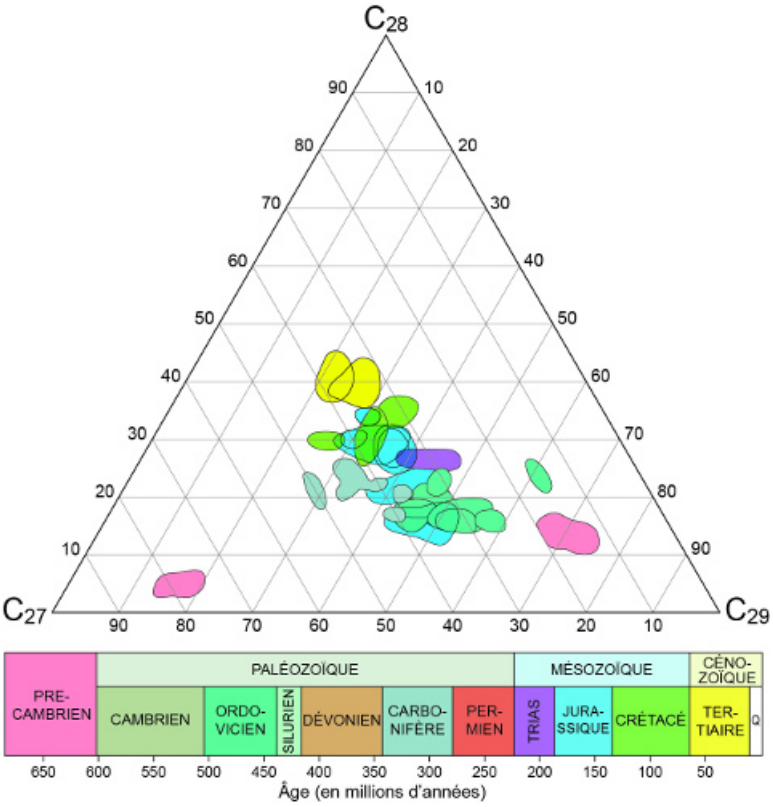


Figure 9. Diagramme ternaire de la proportion relative des stéranes dans 414 pétroles bruts en fonction de leur âge. A l'exception d'une huile très ancienne (600 millions d'années), on constate une augmentation de la proportion du stérane en C28 au dépend du C29 au cours des temps géologiques. [Source : Adapté de Grantham & Wakefield (réf. 13).]

Parmi les biomarqueurs, les **stéranes** sont une classe importante. Ces molécules **dérivent** des **stérols** qui jouent, chez les plantes et les animaux, un rôle dans le maintien de l'intégrité structurale et fonctionnelle des membranes cellulaires. De très nombreux stéranes à 27, 28, 29, voire 30 atomes de carbone sont ainsi **identifiés** dans les **pétroles bruts**.

A la fin des années 80, des géochimistes de la société Shell ont analysé plus de 400 pétroles bruts générés par des roches marines âgées de 650 à 45 millions d'années et ils en ont extrait et identifié les différents types de stéranes puis les ont regroupés par nombre croissant d'atome de carbone. Il s'avère que la **proportion de stéranes à 28 atomes de carbone augmente au cours des temps géologiques** alors que diminue la proportion des stéranes à 29 atomes de carbone ; celle des stéranes à 27 atomes de carbone restant quasiment stable (Figure 9)[14].

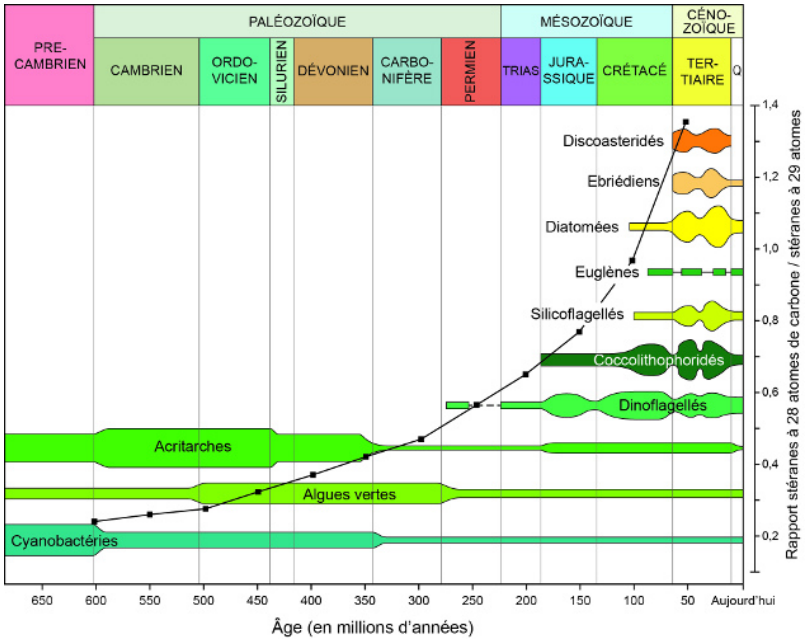


Figure 10. Comparaison de la distribution des plus importants groupes du phytoplancton au cours des derniers 600 millions d'années et du rapport entre les stéranes à 28 et 29 atomes de carbone trouvés dans des pétroles issus de roches mères marines [Source : d'après Grantham & Wakefield, réf. 13].

Pour ces géochimistes, ces changements ne reflètent pas l'évolution chimique des stérols d'une variété particulière d'un organisme marin qui deviendrait plus abondant au cours du temps, mais est à mettre **en relation avec la diversification des organismes phytoplanctoniques**, reconnue par les paléontologues à partir de leurs restes minéralisés. Cette diversification du phytoplancton s'est nettement accélérée au cours du Jurassique et du Crétacé, soit entre 180 et 65 millions d'années. Les sources des stéranes à 28 atomes de carbone seraient ainsi à mettre en relation avec l'apparition et la diversification dans les océans de ces époques de micro-algues comme les dinoflagellés, les coccolithophoridés (à l'origine de la craie) et les diatomées (Figure 10).

Cette évolution de la signature chimique des pétroles marins en parallèle de celle du phytoplancton suggère évidemment une relation de cause à effet et apporte un élément en faveur de l'origine biologique des pétroles.

4. Les preuves par l'expérimentation

A la fin du 18e siècle, et en parallèle de l'essor de l'industrie charbonnière, des **produits pétroliers** étaient **fabriqués en chauffant** des **roches sédimentaires riches en kérogène**. La similitude des produits obtenus avec des pétroles naturels suintant en surface, ou ceux trouvés plus tard dans des gisements en profondeur, apportait des arguments en faveur de l'hypothèse de Lomonossov (voir partie 1.2).

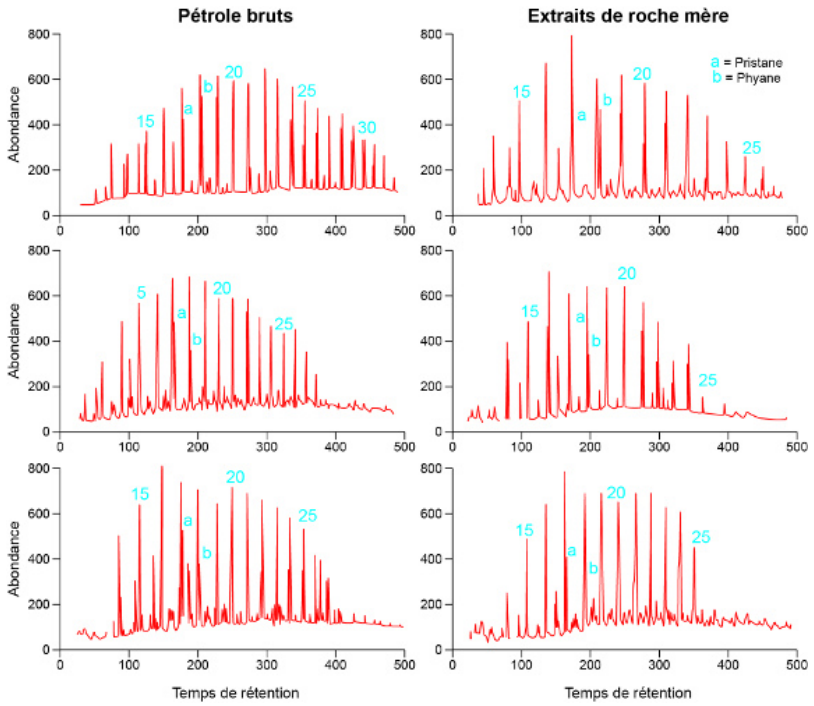


Figure 11. Comparaison de la signature moléculaire, c'est-à-dire la distribution et l'abondance de différentes molécules, dans des pétroles bruts (à gauche) comparés à celle extraite de roches (à droite). Chaque pic correspond à une molécule précise et sa hauteur est proportionnelle à sa concentration dans le mélange. Ici les pics numérotés 15, 20, 25 correspondent à des alcanes linéaires contenant respectivement 15, 20 et 25 atomes de carbone. Les pics a et b correspondent à des alcanes ramifiés dérivant de la chaine phytol de la chlorophylle. On peut donc voir chaque distribution comme une empreinte moléculaire, à l'image d'une empreinte digitale caractéristique à chaque individu. La similitude entre l'empreinte moléculaire des pétroles et des extraits de roches mères est une preuve de leur filiation. [Source : © F. Baudin.]

Avec le développement des techniques analytiques dans la seconde moitié du 20e siècle, il fut possible de reconstituer en laboratoire les conditions de température et de pression existant en profondeur dans les bassins sédimentaires. Il est même possible de réaliser ces expériences en présence d'eau, molécule si abondante dans les roches terrestres. Les **produits obtenus** lors de ces expériences sont **physiquement** et **chimiquement** très **comparables aux pétroles naturels**. Lorsqu'ils sont analysés du point de vue de leur composition moléculaire, la similitude est frappante entre les molécules présentes dans le pétrole naturel et celles issus du chauffage du kérogène, aussi bien en termes de nature que d'abondance des molécules (Figure 11). Elles sont **si ressemblantes** que les géochimistes considèrent ces distributions moléculaires un peu **comme une empreinte digitale** ou de l'ADN et s'en servent pour relier génétiquement un pétrole naturel à sa roche mère.

5. Messages à retenir

Il existe de nombreuses preuves de l'origine biologique des pétroles, parmi lesquelles la présence de molécules qui dérivent en droite ligne de molécules synthétisées par les organismes vivants, qu'ils soient procaryotes ou eucaryotes.

Ainsi, les porphyrines, molécules ubiquistes dans les pétroles, dérivent des différents types de chlorophylle.

De même on trouve dans les pétroles des molécules fossiles que l'on peut aisément rattacher à d'autres pigments (caroténoïdes par exemple) ou des molécules constitutives des parois cellulaires des procaryotes ou eucaryotes.

La plus grande proportion de ^{12}C par rapport au ^{13}C dans les molécules pétrolières, ce que l'on appelle la signature isotopique, est également en faveur de leur origine biologique puisque la vie sélectionne l'isotope léger dans les mêmes proportions.

Enfin, plus de 99% des gisements sont localisés dans les bassins sédimentaires, c'est-à-dire dans les sédiments déposés au fond d'anciennes mers ou anciens lacs où la vie était présente comme en témoignent les fossiles minéralisés.

D'une manière générale, les roches mères pétrolières contiennent majoritairement une matière organique qui dérive de biomasses phytoplanctoniques marine ou lacustres, plus ou moins modifiées par des bactéries.

Références et notes

Image de couverture. Suintement naturel de pétrole [Source : © F. Bergerat]

[1] On connait d'ailleurs une hache en pierre du Néolithique qui était emmanchée avec un bitume comme 'colle'. https://www.franceculture.fr/emissions/lessai-et-la-revue-du-jour-14-15/le-bitume-dans-lantiquite-revue-archeopages

[2] Roger Bacon (1214 - 1294), philosophe, savant et alchimiste anglais, est considéré comme l'un des pères de la méthode scientifique.

[3] Aristote (384 av. J.-C. - 322 av. J.-C.), philosophe grec de l'Antiquité. Il est l'un des rares à avoir abordé presque tous les domaines de connaissance de son temps : biologie, physique, métaphysique, logique, poétique, politique, rhétorique et de façon ponctuelle l'économie.

[4] Georgius Agricola, dit Agricola, de son vrai nom Georg Pawer (1494 - 1555), savant allemand du XVIe siècle, considéré comme le père de la minéralogie et de la métallurgie.

[5] Andreas Libavius (1555 - 1616), de son vrai nom Andreas Libau, chimiste et médecin allemand. *Alchemia*, publié en 1597, est le premier livre de chimie systématique.

[6] La formation des gisements de charbon a commencé au Carbonifère avec l'accumulation de très grandes quantités de débris végétaux dits supérieurs (arbres, fougères…) dans des couches d'eau peu profondes pauvres en dioxygène (environnement de type tourbière). Ces conditions ont permis à une partie de la matière organique d'échapper à l'action des décomposeurs. Pendant plusieurs millions d'années, l'accumulation et la sédimentation de ces débris végétaux provoquent une modification graduelle des conditions de température, de pression et d'oxydoréduction dans la couche de charbon qui conduit à la formation de composés de plus en plus riche en carbone : la tourbe (50 à 55 %), le lignite (55 à 75 %), la houille (75 à 90 %) et l'anthracite (> 90 %). La plupart des charbons ont un faible potentiel pétrolier huileux. En revanche, ils produisent du gaz lors de leur maturation, notamment du méthane qui est à l'origine des coups de grisou dans les mines de charbon.

[7] Mikhaïl Vassilievitch Lomonossov (1711 – 1765) est un chimiste, physicien, astronome, historien, philosophe, poète, dramaturge, linguiste, slaviste, pédagogue et mosaïste russe.

[8] Alexander von Humboldt (1769 - 1859), est un naturaliste, géographe et explorateur allemand. Membre associé de l'Académie des Sciences française et président de la Société de Géographie de Paris. Par la qualité des relevés effectués lors de ses expéditions, il a fondé les bases des explorations scientifiques.

[9] Louis Joseph Gay-Lussac (1778 – 1850), est un chimiste et physicien français, connu pour ses études sur les propriétés des gaz.

[10] Le carbone radioactif ^{14}C était initialement présent dans les composés à l'origine du pétrole (formés à partir de la photosynthèse) et dans les mêmes proportions que dans les organismes photosynthétiques vivant à l'époque. Cependant, la période de cet élément étant relativement courte à l'échelle géologique (5700 ans), le pétrole actuel ne renferme plus de ^{14}C et ne peut donc être daté par cette technique. Cette propriété est actuellement utilisée pour distinguer au sein des particules responsables de la pollution atmosphérique celles qui proviennent des produits dérivés du pétrole (essence, diésel) de celles qui proviennent de la combustion du bois, par exemple.

[11] Trumbore S.E. & Druffel E.R.M. (1995) *Carbon isotopes for characterizing sources and turnover of nonliving organic matter.* In R. G. Zepp & C. Sonntag (Eds.), *Role of Nonliving Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle* (pp. 7-22). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

[12] Hans Fischer (1881 - 1945), chimiste allemand spécialisé en chimie organique.

[13] Alfred E. Treibs (1899 - 1983), chimiste organicien allemand pionnier de la géochimie organique.

[14] Grantham P.J. & Wakefield L.L. (1988) *Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time.* Organic Geochemistry, 12-1, 61-73.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** BAUDIN François (2021), Pétrole : les preuves de son origine biologique, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=5685

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.