

SUR

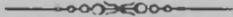
LA NATURE MINÉRALE DES SILEX DE LA CRAIE DE NOUVELLES,

CONTRIBUTION

A L'ÉTUDE DE LEUR FORMATION;

PAR

A.-F. RENARD et C. KLEMENT.



BRUXELLES,

F. HAYEZ, IMPRIMEUR DE L'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE,

rue de Louvain, 408.

—
1887

Extrait des *Bulletins de l'Académie royale de Belgique*,
3^e série, tome XIV, n^o 12; 1887.

SUR

LA NATURE MINÉRALE DES SILEX DE LA CRAIE DE NOUVELLES,

CONTRIBUTION

A L'ÉTUDE DE LEUR FORMATION.

Dans la notice que nous avons l'honneur de présenter à l'Académie, nous nous proposons surtout d'étudier les questions qui se rattachent à la nature minérale du silex de la craie : sous quelle forme la silice existe-t-elle dans ces concrétions ? Quels sont les caractères physiques et chimiques des matières siliceuses qui les constituent ? Nous nous appuyons pour les résoudre sur l'examen microscopique et les analyses que nous avons faites du silex noir de la craie de Nouvelles, troisième assise de la craie blanche du Hainaut, d'après la division de MM. Cornet et Briart.

Dès les débuts de la géologie, les problèmes que présentent ces concrétions siliceuses ont attiré l'attention des savants ; on a formulé des opinions diverses sur leur mode de formation et sur l'état moléculaire de la silice qu'elles renferment. Nous avons voulu donner dans cette notice un aperçu général sur la question d'origine des silex de la craie, et nous avons pensé qu'il serait peut-être utile de voir réunies les diverses hypothèses auxquelles ces concrétions ont donné naissance. Sans nous arrêter aux travaux anciens, nous nous bornons à les résumer avant d'exposer les résultats de nos recherches. A la fin du travail nous indiquons l'interprétation que nous croyons pouvoir accepter pour expliquer l'origine du silex. Nos recherches, basées sur des faits dont on a moins tenu compte, mais qu'il importe de faire entrer en considération, apporteront

quelques données complémentaires pour interpréter la formation de ces concrétions siliceuses.

On considère généralement le silex comme un mélange intime de silice amorphe hydratée et de silice cristalline ; comme un état intermédiaire entre le *hornstein* (silex corné) crypto-cristallin et l'opale amorphe. A cette masse principale viennent s'ajouter de petites quantités de matières accidentelles, telles que l'alumine, le fer, la chaux, les alcalis et des matières organiques. Ces dernières provoquent souvent la coloration des silex. Ils forment des nodules ou des lits continus, orientés suivant les couches, ou bien ils affectent une disposition plus irrégulière, quelquefois ils traversent la craie sous la forme de veines. On les trouve surtout dans la craie, où ils constituent un horizon caractéristique pour certains étages. Leur forme est très variable, elle imite en cela celle des corps concrétionnés. Souvent, ils renferment des restes organiques siliceux ou silicifiés, surtout des foraminifères, des bryozoaires, des diatomées, des spicules de spongiaires, etc ; souvent même on y trouve des éponges entières.

Guettard, de Luc, Faujas St-Fond, Dolomieu, Huot, Parkinson et d'autres, admettaient déjà que ces nodules ne sont autre chose que des spongiaires associés à certains organismes qui auraient extrait, de l'eau de mer, la silice d'où se serait formé le nodule. Plus tard Bowerbank et Ansted, ayant soumis les silex à l'examen microscopique, confirmèrent cette interprétation, en s'appuyant sur le fait que la silice renferme presque toujours des spicules de spongiaires et d'autres organismes microscopiques siliceux.

Dans un travail, publié en 1849, dans le *Quarterly Journal of the Geological Society*, Bowerbank, résumant les idées qu'on avait émises avant lui sur l'origine de ces

nodules, se demande d'où peuvent venir les quantités énormes de silice qui ont été emmagasinées dans les fossiles et qui continuent à se séparer encore de l'océan. On a exprimé bien des opinions sur ce phénomène, dit-il, on a invoqué comme causes l'extrême chaleur, les grandes pressions, les sources thermales, une condition spéciale gélatineuse de la silice. Mais aucune de ces causes ne lui paraît donner une interprétation suffisante pour les vastes dépôts de silice unis aux matières organiques. La pression et la température élevée sont incontestablement des agents actifs pour produire la solution de silice en excès, dont quelques sources minérales sont chargées. Ces agents sont peut-être très énergiques pour former certains produits minéraux à l'intérieur de la terre ; mais, pour ce qui concerne la silice des fossiles et celle sécrétée par les organismes vivants, les causes invoquées lui paraissent avoir été moins en jeu qu'on ne le suppose communément. On a attaché beaucoup de poids à l'hypothèse que les spicules de spongiaires agissent comme centres d'attraction, lorsqu'ils se fossilisent ; mais c'est un fait remarquable que certains spongiaires dans lesquels ces spicules abondent, sont extrêmement rares à l'état fossile.

Mantell décrivait les nodules et les veines de silex si fréquents dans le terrain crétacé supérieur, comme ayant été formés sous l'action d'eau surchauffée tenant en solution de la silice. Il montrait que cette matière siliceuse devait avoir été pâteuse ou dissoute avant sa consolidation, parce que certains nodules présentaient des empreintes bien nettes de coquilles, parce qu'un grand nombre de corps organiques étaient inclus dans ces concrétions et enfin, parce que des spongiaires se rencontraient si fréquemment enveloppés de silice dans les

couches crétacées. Il croyait que l'eau surchauffée, dissolvant la silice des roches, au travers desquelles elle circulait, pouvait réaliser tous les phénomènes présentés par les nodules, les veines, les filons de silex ; que ces concrétions pouvaient dériver, en un mot, du quartz des roches granitiques et d'autres roches plutoniques dissous dans des eaux thermales venant se jeter dans le bassin où se formait la craie.

Mantell ajoute que d'autres sont portés à penser que les silex de la craie, de l'Oolite de Portland et de certaines couches calcaireuses, doivent leur origine aux spongiaires dont on retrouve souvent les traces dans le silex. Bowerbank, dit-il, admet cette origine pour tout le silex que renferment les terrains crétacés (1). Mantell fit remarquer, en outre, que bien souvent des coquilles calcaireuses sont remplacées par la silice. Il se ralliait, pour expliquer ce remplacement de la matière calcaire par l'élément siliceux, à une interprétation déjà donnée par Dana. Il admettait que la silice, dissoute dans l'eau de mer surchauffée, sous pression, en présence d'alcalis, se précipitait dès que la pression et la température diminuaient. L'acide silicique remplaçait alors, atome par atome, le carbonate de chaux qui entrait en solution. Si nous nous sommes arrêtés un instant à cette interprétation, c'est qu'elle a été souvent reprise depuis pour expliquer la formation des silex.

Notons que Mantell signale dans les silex de l'Irlande des micro-organismes siliceux dont les coquilles sont silicifiées et dont les chambres, dans le cas où elles étaient

(1) Cité par WALLICH, *A contribution to the physical history of the cretaceous flints*, Quart. Journ. geol. Soc., 1880, pp. 68 et 69.

vides lors de la silicification, sont de même entièrement remplies par de la silice. Si ces organismes contenaient encore des substances organiques, on voit celles-ci souvent conservées sous la forme d'une matière à laquelle il donne le nom de *molluscite*; dans plusieurs cas, il vit les coquilles remplies d'une substance grenue de couleur ambre, qui est peut-être la matière organique primitive de l'animal, ou de la silice colorée par cette substance. Ces dernières observations, comme nous le montrerons, conservent encore aujourd'hui toute leur valeur.

Ehrenberg, dont le nom est lié à l'étude de l'action géologique des micro-organismes, défendit aussi l'origine organique des silex; il admet que ce sont surtout les *infusoires siliceux*, comme il les appelle, qui ont donné naissance à ces nodules. Ils ne seraient autre chose qu'une accumulation de carapaces d'organismes microscopiques siliceux dont tous les pores sont pénétrés par de la silice. Il montra la présence de spicules de spongiaires et de radiolaires dans plusieurs nodules de silex. C'est par cette théorie qu'il expliquait pourquoi, dans la craie de l'Europe méridionale, on trouve des couches marneuses remplies d'organismes siliceux, mais où le silex est peu ou point représenté; tandis que dans les couches crayeuses du Nord, riches en silex, ces masses siliceuses font défaut; on peut dire que le silex remplace ici les marnes à organismes siliceux.

Avant d'aller plus loin, notons un détail sur lequel Ehrenberg insiste. Le silex est souvent recouvert à la partie externe d'un enduit plus ou moins compact, quelquefois friable et d'aspect farineux, blanchâtre ou jaunâtre. Parlant de ces zones externes, ce savant constate tout d'abord qu'elles ne sont pas de la craie, mais de la silice; il admet que ces zones ne sont pas produites par

décomposition du nodule, mais qu'on peut les considérer comme une zone où la consolidation n'est pas encore faite, où, en d'autres termes, la substance siliceuse, qui a cimenté les nodules, ne s'est pas déposée entre les éléments encore plus ou moins isolés. Il appuie cette manière de voir par le fait, qu'il rencontre, dans cette patine, un grand nombre d'organismes dont les formes sont bien nettes.

A ces observations on peut opposer les suivantes : d'abord, pour un grand nombre de silex, la zone externe est tellement épaisse que non seulement la concrétion en est constituée à la périphérie, mais qu'elle pénètre, peut-on dire, jusqu'au cœur du nodule. On comprend d'ailleurs, si l'on admet que la zone externe est décomposée, que les organismes doivent y apparaître mieux que dans les parties massives, car l'élément qui cimente étant, comme nous le verrons, la partie la plus soluble, a dû disparaître sous l'influence des agents d'altération. De même qu'il est impossible de voir les organismes microscopiques constitutifs dans des bancs de calcaire massif, de même apparaissent-ils parfaitement dès que le calcaire est altéré et devient terreux à la surface des cassures ou des bancs; fait bien connu d'ailleurs des chercheurs de fossiles.

Nous passerons sous silence un grand nombre de travaux qui n'ont fait que redire avec plus ou moins de détail les interprétations que nous venons de rappeler.

Dès que les premiers sondages en mer profonde eurent révélé l'existence de la *vase à globigérines*, et fait penser aux relations qui existent entre ces dépôts des océans modernes et les formations géologiques de la craie, l'attention fut vivement attirée sur l'origine des silex.

Lyell, dans sa « Géologie élémentaire (1) », rappelant le résultat des sondages en mer profonde par le Dr Wallich, dit : sur certains fonds de mer où les rhizopodes calcaireux ne sont pas représentés, des plantes microscopiques, les diatomées, dont les parties solides sont composées de silice, s'étalent sur le lit de la mer à des profondeurs de 400 brasses. La grande quantité de silice en dissolution, que réclament ces plantes, dérive probablement de la désintégration des roches feldspathiques dont plus de la moitié de la masse est formée de silice; elles peuvent en fournir des quantités inépuisables à tous les grands fleuves. Il serait possible, en outre, qu'après une longue série d'années, des modifications se fissent sentir dans l'allure des courants marins; cette modification des courants aurait déterminé, en un point, le développement des organismes siliceux et, en un autre, celui d'organismes calcaireux. Les éponges peuvent, par leur décomposition, avoir donné naissance à la silice qui, en se séparant de la vase calcaire, se groupait sur des corps organiques, formait des nodules ou remplissait des fissures de retrait. Dans les *Principles of Geology*, Lyell dit : « Le caractère homogène » de la craie blanche ou de la partie supérieure de la » grande formation crétacée, qui s'étend sur une aire » considérable de l'Europe, peut s'expliquer mainteuant » (1872) par le fait qu'elle est formée exclusivement des » restes calcaireux de foraminifères, tandis que la silice » que renferme ces couches doit surtout son origine aux » diatomées (2). »

(1) LYELL. *The Student's Elements of Geology*, 1871, pp. 264 et suivantes.

(2) LYELL, *Principles of Geology*, 41^e édition, 1872, vol. I, p. 216.

En 1869, on souleva la question de la nature de la vase calcaire trouvée dans le fond de l'océan; on la considérait comme étant le représentant de la craie et on avançait même que nous vivions encore dans la période crétacée. Nous n'avons pas à discuter ici cette question, mais citons l'interprétation que donne à ce sujet Sir Wyville Thomson (1) pour expliquer la présence des nodules siliceux des terrains crétacés : « La silice organique, dis-
 » tribuée dans la craie sous la forme de spicules de spon-
 » giaires et d'autres organismes siliceux, doit avoir été
 » dissoute sous l'action d'une cause à déterminer, et lors-
 » qu'elle était à l'état colloïde, elle a dû se mouler dans
 » les vides laissés par des fossiles. »

Wallich (2), dans son Histoire physique des silex de la craie, reprend la question; après avoir envisagé les résultats des sondages en mer profonde, il applique, pour expliquer la formation de ces concrétions, les hypothèses qui avaient cours, à cette époque sur la présence d'une matière protoplasmique étalée sur le lit de la mer (5).

Nous donnons ici quelques-unes des conclusions de cet auteur qui se rapportent à notre sujet :

1° La silice des silex dérive surtout des lits d'éponges

(1) THOMSON, *The Depths of the Sea*, 1872, p. 482.

(2) WALLICH, *On the physical history of the cretaceous flints*, Quarterly Journal of the Geological Society, XXVI, 1880, p. 68.

(5) Wallich n'explique pas seulement de cette façon l'origine, mais la forme du silex; il dit : « Those characteristic amœbiform outlines
 » which, according to my hypothesis, are dependent on the presence
 » of, and the consolidation of the silica with, the accumulation of
 » nearly pure protoplasm still sufficiently recent to have resisted
 » admixture with calcareous or other matter. »

qui s'étalent sur de grandes aires dans les parties du lit de l'océan où se dépose la vase à globigérines;

2° Les éponges des mers profondes, avec la matière protoplasmique qui les environne, constituent les éléments les plus importants dans la formation et de la disposition stratifiée des lits de silex;

3° Tandis que presque tout le calcaire, sécrété par les foraminifères et d'autres organismes du fond et de la surface, forme la vase calcaireuse, presque toute la silice, dérivée des éponges de mer profonde et des protozoaires de la surface, forme les silex;

4° Les éponges du fond des mers sont le facteur essentiel dans la formation du silex;

5° Ces silex sont le résultat de l'action des organismes tout comme la craie elle-même;

6° La stratification des silex est due à ce que les protozoaires sessiles sont confinés à la couche superficielle du dépôt vaseux.

Dans la discussion, qui suivit la lecture de ce travail à la Société géologique de Londres (1), M. Sorby a fait remarquer, avec beaucoup de justesse, que, puisque dans les couches crétacées qui renferment des silex, les organismes siliceux ne se retrouvent plus; tandis que dans les vases des océans modernes les restes siliceux existent et les nodules manquent, on doit en conclure que c'est aux organismes siliceux que les silex doivent leur origine.

Les remarques de M. Seeley nous paraissent devoir être surtout notées. Il fit observer que les fissures remplies de silex et les couches tabulaires qui entourent les nodules

(1) *Quart. Journal Geol. Soc.*, loc cit., p. 91.

montrent que la silice s'est déposée *dans les couches* de la craie. Le flint des fissures doit être produit par des infiltrations venant de la craie. Il est porté à penser que les masses siliceuses de la craie ont des analogies marquées avec les *septaria* des argiles, et que les silex s'étaient développés après le dépôt des couches. M. Huddleston fit observer que M. Mortimer, dans son travail sur le *Marsu-pite Chalk* de l'Yorkshire ne renfermant pas de flint, établit que ces couches contiennent deux fois autant de silice que la craie à silex. A North Grimston, dans le Coral Rag, où les couches sont horizontales, il n'y a pas de flint; partout où elles sont inclinées, on en trouve.

Nous devons nous arrêter plus longtemps au travail de M. Sollas sur les nodules de silex de la craie de Trimmingham (1). L'auteur a envisagé les divers aspects de l'histoire bien compliquée du silex; son mémoire mérite à tous égards une analyse détaillée. M. Sollas se rallie à l'opinion défendue autrefois par Ehrenberg, Lyell et plus récemment par W. Thomson, Wallich et Alexis A. Julien. Il démontre que les sédiments qui renferment des nodules de silex doivent avoir contenu autrefois des quantités plus ou moins considérables d'organismes siliceux, qui n'y existent plus aujourd'hui. Ainsi, dans les silex de Trimmingham, on observe des fragments d'hexactinellides et de lithistides et d'autres restes de spongiaires indiquant, d'une manière bien évidente, qu'autrefois ces sédiments devaient renfermer des éponges entières; d'un côté, les spicules qui sont conservés montrent des traces incon-

(1) W. J. SOLLAS, *On the flint nodules of the Trimmingham chalk*, Ann. Mag., nat. hist., nov. 1880.

testables de corrosion. Il a constaté des faits analogues dans un grand nombre de roches de formation ancienne et plus récentes de l'Amérique, de l'Écosse et de l'Angleterre, et il signale aussi que la silice des éponges, dans quelques-uns de ces terrains, est remplacée par la calcite.

M. Sollas, après avoir montré que les spicules de spongiaires ont, selon toute probabilité, donné naissance au silex, recherche la cause de l'accumulation de ces spicules. Proviennent-ils d'éponges qui vivaient aux points où nous rencontrons leurs débris, ou ont-ils été amenés sous l'action de courants ?

L'examen des silex montre qu'ils renferment des spicules de différents genres et de différentes familles d'éponges. Certains spongiaires bien caractéristiques de la craie, comme *Poterion cretaceum*, qui est certainement *in situ*, est rempli de spicules appartenant à d'autres espèces. L'auteur admet que la profondeur à laquelle les dépôts crayeux de Trimmingham se sont formés, est comprise entre 100 et 400 brasses. Ces conditions bathymétriques ne sont pas inconciliables avec l'existence de courants, et nous verrons plus loin que nous avons bien des raisons d'admettre que des actions mécaniques étaient en jeu lors de la formation de la craie. Mais acceptons ici, pour le fait dont il s'agit, l'interprétation que suggère M. Sollas ; elle est suffisante pour expliquer la formation des nodules.

« Nous croyons que l'aire sur laquelle se trouvent aujourd'hui les spicules de Trimmingham était autrefois un lit de spongiaires où ces organismes vivaient en grand nombre, et s'y accumulaient générations après générations... plusieurs avaient une existence parasitique ou épizoïque, d'autres croissaient sur le même support, de même qu'aujourd'hui nous ne voyons pas moins de

» sept espèces d'éponges croissant ensemble sur un petit
 » fragment de *Lophohelia* (1). Après la mort et lors de
 » la dissolution des organismes, les spicules se mêlèrent,
 » des courants peuvent avoir alors contribué à accumuler
 » ces restes organiques.... Les éponges, assez résistantes
 » pour maintenir leur forme, peuvent avoir été recouvertes
 » et remplies de spicules et de vase. Nous aurions ainsi
 » l'interprétation de ces éponges fossiles présentant une
 » forme externe bien préservée et qui renferment un
 » curieux mélange de spicules ».

M. Sollas résume les causes qui peuvent déterminer la solution des spicules. D'après M. A. Julien (2), ce seraient les acides humiques, produits par la décomposition sous-marine des organismes, qui auraient été les agents de la solution. L'auteur croit que l'eau de mer aidée de la pression pourrait suffire (3). Lorsqu'il veut expliquer que la silice, après avoir été tenue en solution, va se déposer dans le même sédiment dont-elle a été éliminée, il se heurte à des objections qui peuvent être levées si l'on admet, comme nous le ferons, que le concrétionnement de ce corps ne s'est pas fait sur le fond même de la mer. Il arrive, en effet, à supposer, pour expliquer la précipitation de la silice, que le fond de la mer aurait pu se soulever et que la silice, tenue

(1) CARTER, *Ann. mag. Nat. Hist.*, sér. 4, vol. XII, pl. 1, fig. s. 1, 2.

(2) A. JULIEN, *Proc. Am. Ass. Adv. Science*, XXVIII, p. 596, 1879.

(3) M. Sollas rapporte (*loc. cit.*, p. 444), pour expliquer la décomposition de certains silex, que la calcite renfermée quelquefois dans les nodules peut les avoir rendus attaquables à l'eau de pluie, plus ou moins chargée d'acide carbonique; quoique, ajoute-t-il, la quantité extrêmement petite de chaux, que montrent les analyses, doit nous faire hésiter à accepter cette interprétation.

en solution sous l'influence de la pression, se serait déposée à chaque exhaussement. Nous verrons que cette hypothèse est au moins aussi peu probable que celle que MM. Hull, Hardman et Renard invoquaient autrefois pour expliquer la silicification du calcaire (1). Hâtons-nous d'ajouter que M. Sollas reconnaît lui-même que cette explication soulève des objections sérieuses, et qu'il n'attache pas une grande valeur à cette interprétation.

Après avoir rappelé que la silice peut remplacer le carbonate de chaux et indiqué les formes qu'affecte le silex de la craie : lits, filonnets, concrétions autour d'éponges, il examine les causes qui ont déterminé cette concentration de silice autour de ces derniers corps. Voici, en résumé, comment il rend compte de ces phénomènes : On sait que Graham a montré que la silice possède la propriété de se combiner avec des substances, telles que l'albumine et la gélatine, pour former des silicates ; il suppose, qu'après la mort des spongiaires, l'acide silicique tenu en solution vient se combiner avec les tissus de ces organismes, et former avec eux un composé chimique qui se décomposera plus tard en carbone, hydrogène, etc., abandonnant la silice, qui se concentrera comme le carbone dans la houille. Il suppose en même temps que le silicate de sodium qui

(1) HULL et HARDMAN, *Scientific transactions of the Royal Dublin Society*, 1878, vol. I, p. 71.

RENARD, *Recherches lithologiques sur les phthanites du calcaire carbonifère*. Bull. de l'Acad. roy. de Belgique, 2^e sér., t. XLVI, 1878.

L'interprétation donnée par ces auteurs, pour expliquer l'origine des phthanites, n'a pas été admise par M. Sollas et plus récemment par M. Hinde. Dans une prochaine notice consacrée à l'étude de cette question, nous reviendrons sur cette controverse.

pourrait être contenu dans l'eau se décomposerait sous l'action de l'acide carbonique, provenant de la matière organique en décomposition, et qu'il se formerait ainsi du carbonate de sodium et de l'acide silicique libre. Il n'admet pas que toute la silice qui remplace les substances organiques, ou les parties dures des organismes, ait toujours été fournie par la décomposition des spicules de spongiaires. Dans le cas des coquilles silicifiées de Blackdown, par exemple, la silice proviendrait de l'altération des sables de cette formation par l'action de l'eau contenant de l'acide carbonique.

En résumé, il admet : 1^o que la silice se combine avec les matières organiques, — c'est un fait, dit-il, admis en chimie; 2^o que le silicate ainsi formé se décompose et que la silice se concentre. Il ajoute que ceci n'est qu'une hypothèse, mais qu'elle se concilie très bien avec d'autres faits chimiques. Avant d'aller plus loin, insistons sur les difficultés que présente la discussion des idées hypothétiques que suggère M. Sollas. On sait, en effet, quels doutes soulèvent encore les questions relatives aux combinaisons qui peuvent se réaliser entre plusieurs corps en présence, et, d'un autre côté, on devrait pouvoir apprécier si les conditions, où ces nodules se sont formés, sont comparables à celles des expériences du laboratoire. Ainsi, dans les expériences de Graham, auxquelles il vient d'être fait allusion, on a expérimenté avec de la silice en solution concentrée, et rien ne prouve, à notre avis, que des solutions de cette nature aient existé lors de la formation des nodules. Nous ne voulons pas dire que, lorsqu'on le peut, on ne doit pas aller plus loin que les faits, mais encore importe-t-il de détacher nettement les spéculations de l'observation directe. Ceci ne s'adresse pas à M. Sollas, qui fait preuve

dans le travail, que nous analysons, d'une grande circonspection à cet égard.

M. Julien modifie la théorie de M. Sollas en ce sens qu'il admet que, *durant la décomposition* des parties molles des végétaux et des animaux, il se forme des substances gélatineuses ou colloïdes ressemblant à la *glairine*, qui sont solubles dans l'eau de mer et se combinent avec la silice. Elles concentrent cette matière et dissolvent les particules siliceuses qui sont disséminées dans les sédiments. Cette opinion se rapproche de celle déjà exprimée par Bischof et d'après laquelle la silicification ne serait autre chose que la combinaison des acides créniques (*Quellsäuren*), produits par la décomposition de substances organiques (par exemple des mollusques) et de la silice qui est en solution dans les eaux. M. Julien attribue la forme des silex non à la matière organique, mais il admet que la silice s'est déposée autour d'organismes et de particules siliceuses non dissous, qui deviennent les centres des nodules.

M. Sollas étudie ensuite le rôle qu'ont joué, dans la précipitation de la silice, les squelettes des éponges qu'on retrouve revêtus de silex, et il passe enfin aux nodules irréguliers de flint. Il conclut, contrairement aux idées de Wallich, que cette forme n'est pas due à l'action directe des matières organiques; il l'attribue à la distribution irrégulière de solutions siliceuses dans un lit irrégulier lui-même de spicules de spongiaires, à l'époque où ces solutions remplissaient la craie et déposaient de la silice entre les interstices de ces masses calcaireuses.

Il ressort donc de ce travail, où abondent les vues et où bien des points sont traités par un habile spécialiste, que l'histoire du silex commence à s'éclaircir. Nous résumons

les résultats principaux en disant que la silice du silex est dérivée des spicules de spongiaires; qu'elle a été déposée d'abord comme remplacement de la craie, et qu'une déposition subséquente de silice a transformé la craie siliceuse en nodules de silex. Quant à la forme externe de ces nodules, elle a été déterminée par la distribution des spicules qui leur ont donné naissance et, en partie, par les fissures et les cavités de la roche. Un fait dominant ressort aussi des recherches, c'est qu'une quantité prodigieuse de spicules, qui doivent avoir existé dans presque toutes les formations stratifiées, ont disparu, et que leur décomposition nous donne la clef de dépôts de silice que renferment un grand nombre de roches sédimentaires.

Signalons enfin le récent travail de M. Hinde (1) sur les lits de spongiaires du grès vert du sud de l'Angleterre. Ce mémoire, écrit par un savant auquel ses connaissances spéciales donnent une compétence particulière, montre que dans les couches du Greensand du Wealden, de l'île de Wight et des comtés de sud-ouest de l'Angleterre, il existe des dépôts de matières siliceuses dont l'accumulation est due à des éponges. Ces lits sont quelquefois formés d'une roche massive dans lequel on peut distinguer des restes d'éponges siliceuses. La masse de la roche est constituée par de la silice amorphe ou cristalline. L'auteur a décrit avec beaucoup de soin les spicules de spongiaires qui forment ces dépôts; il y trouve représentés les quatre ordres d'éponges siliceuses : les monactinellides et les hexactinellides sont peu nombreux, tandis que les tetractinellides et les lithistides y sont très abondants.

(1) HINDE, *On beds of Sponge-remains, etc.* Phil. Transact. of the Royal soc., Part II, 1885.

Nous venons d'indiquer les notions que l'on a émises sur l'origine des nodules de silex. Voyons maintenant — et c'est surtout le but de notre travail — quelle est la constitution intime de ces nodules composés, comme les analyses chimiques le démontrèrent, presque exclusivement de silice. On sait que ce corps se présente dans la nature surtout sous deux formes : l'une cristalline, représentée par les diverses variétés du quartz, et l'autre amorphe, représentée par l'opale. Il résulte des recherches de H. Rose que ces deux manières d'être de la silice sont caractérisées par le poids spécifique; celui-ci s'élève, pour la variété cristalline, à peu près à 2,6; pour la variété amorphe, il varie entre 2,2 et 2,3. Ce savant range le silex parmi la variété cristalline compacte.

Souvent on a avancé qu'on peut distinguer ces deux formes de silice par la solubilité dans la potasse caustique. La silice amorphe, en effet, est remarquablement plus soluble dans ce réactif que la variété cristalline. Mais quant à vouloir trouver dans ce caractère un moyen de différencier nettement les deux modalités de l'acide silicique libre, les travaux de Rammelsberg et nos propres recherches démontrent qu'on ne peut pas l'appliquer d'une manière absolue.

Ce savant a trouvé, en effet, que l'attaque par la potasse caustique ne se borne pas seulement à la silice amorphe, mais que le quartz lui-même peut se dissoudre sous l'influence de cet agent. C'est ainsi qu'en traitant du quartz, finement pulvérisé, par de la potasse (une partie de potasse sur trois d'eau), il s'est dissous jusqu'à 7,75 % de la poudre cristalline. M. Rammelsberg arrive à la conclusion que la quantité de silice amorphe est toujours inférieure

à celle qu'on déduirait de la somme de la silice dissoute. Il résulte encore de ses expériences que la solubilité de cette substance augmente avec sa densité (1).

Voici les résultats obtenus sur trois échantillons de silex de la craie de Nouvelles, dont on a traité la poudre fine par une solution de potasse caustique à 20 % (KHO), au bain-marie pendant trois heures. La masse compacte d'un silex noir s'est dissoute dans ce réactif jusqu'à 51 %. Ce chiffre concorde avec les résultats de quelques-unes des expériences de Rammelsberg. Mais il est bien évident que la solubilité croît ou décroît suivant les conditions spéciales de l'expérience : élévation de la température, degré de concentration, durée du traitement, finesse de la poudre, etc. On ne doit donc attacher qu'une valeur relative aux indications fournies par ces expériences.

C'est ce que montrent d'ailleurs les faits que nous avons constatés nous-mêmes. Ainsi, dans le cas du silex noir qui, après trois heures, s'était dissous jusqu'à 51 %, l'expérience ayant été prolongée ensuite pendant neuf heures, la solubilité s'est accrue jusqu'à 86 %.

M. Rammelsberg a déjà fait observer que certains silex sont attaqués assez facilement par la potasse caustique, tandis que leur poids spécifique montre que la quantité de silice amorphe doit être beaucoup moins forte que celle qui est dissoute par la potasse. C'est ce qu'il a constaté en particulier pour une calcédoine de Hongrie et pour un silex, qui, l'un et l'autre, se sont dissous jusqu'à environ 94 % de leur masse. Pour éliminer les incertitudes

(1) RAMMELSBURG, *Ueber das Verhalten der aus Kieselsäure bestehenden Mineralien gegen Kalilauge*. Pogg. Ann., tome CXII, 1861.

que laissent, comme on vient de le voir, le procédé précédent, beaucoup employé autrefois, on a généralement recours, aujourd'hui, au poids spécifique. On sait, comme nous l'avons rappelé, que, pour les variétés cristallines de l'acide silicique, le poids spécifique est approximativement de 2,6, celui de la silice amorphe étant de 2,2 à 2,5.

Nous avons pris le poids spécifique des échantillons que nous décrivons, et les résultats obtenus montrent qu'il faut rapporter ces silex à la variété cristalline compacte à laquelle s'ajoute de la silice amorphe. C'est ce que démontrent l'examen optique et les caractères chimiques des nodules de la craie que nous allons décrire.

Nous avons examiné d'abord un échantillon de silex de la craie de Nouvelles dont le centre était absolument inaltéré, de teinte noire, à cassure conchoïdale, à arêtes tranchantes dans ses éclats, très transparent sur les bords, homogène et compact. Il était entouré, à l'extérieur, par une couche de décomposition de 3 ou 4 millimètres, blanc-jaunâtre, happant à la langue, se laissant entamer par l'acier et se désagréant en matière farineuse. Au microscope, cette roche se montre composée, pour la majeure partie, de formes allongées présentant des ramifications, et, dans certains cas, on voit le canal central caractéristique des spicules de spongiaires. On peut dire que les $\frac{2}{3}$ de la masse totale sont formés par l'accumulation de ces formes organiques, auxquelles viennent s'ajouter plus rarement des corps sphériques hérissés de spicules microscopiques et qui pourraient bien se rapporter à des rhizopodes. Les spicules de spongiaires présentent souvent des sections transverses circulaires dont le bord plus foncé se détache de la masse entourante. Généralement,

les bords des spicules sont en quelque sorte soulignés par une matière organique transformée aujourd'hui en matière charbonneuse empâtée dans la silice. Souvent, le spicule tout entier se détache de la masse fondamentale par une teinte noirâtre ou grisâtre répandue uniformément sur sa section. Dans d'autres cas, cette teinte est jaune clair. On voit en outre des fragments irréguliers noirâtres, des petits flocons informes de matière charbonneuse. Plus rarement ces substances, unies probablement à du fer, remplissent des moules qui ressemblent, à s'y méprendre, à des chambres de foraminifères. Ces faits rappellent le remplissage de ces organismes par la glauconie. Tel est l'aspect, à la lumière ordinaire, des éléments d'origine organique empâtés dans la masse fondamentale. Celle-ci est formée d'une masse grisâtre, presque incolore, qui se présente partout homogène et sans structure lorsqu'on la voit sans appareil de nicol. Certaines plages, où l'on découvre plus de spicules accumulés, sont d'une teinte plus brunâtre. A la lumière polarisée, cette pâte donne la polarisation d'agrégats et se montre en même temps formée de grains excessivement fins, dont quelques-uns réagissent entre nicols croisés, et d'autres se présentent comme sensiblement isotropes. En employant la teinte sensible, on voit que ces derniers maintiennent la couleur violette pour une rotation complète. Mais il est difficile de définir exactement les contours respectifs des plages isotropes et cristallines, à cause de la petitesse des grains et de l'enchevêtrement des éléments constitutifs de cette pâte. On dirait que la silice amorphe est intercalée en particules infinitésimales entre tous les grains cristallins. Parmi ces derniers, il en est de plus grands qui se détachent de la masse fondamentale et qui présentent tous les caractères

tères de la calcédoine. Ils sont isolés, de forme irrégulière ou circulaire ; dans ce cas, ce sont souvent des sections et des spicules. Dans ces sections, on observe alors fréquemment la structure fibro-radiée de la calcédoine et quelquefois même la croix caractéristique de ses agrégats. Les sections de spicules parallèles à l'allongement, lorsqu'elles ne sont pas trop chargées de matière noires, grisâtres, opaques, se détachent vivement aussi, par leur teinte brillante, de la masse fondamentale. On voit dans ces sections allongées, les mêmes caractères de silice calcédonieuse que dans les sections circulaires. Les détails micrographiques que nous venons de donner conviennent, peut-on dire, au grand nombre des silex crétacés. Dans quelques-uns, nous voyons moins de traces d'organismes, dans d'autres ils sont plus fréquents ; mais les caractères physiques restent à peu près toujours les mêmes, ainsi que les caractères chimiques dont nous allons parler.

Voici les résultats de l'analyse du nodule noir dont on vient de lire la description lithologique :

Analyse I.

0,8296 gramme de substance séchée à 100° donna 0,0108 gramme de perte au feu, et, attaquée ensuite par les carbonates alcalins, 0,8089 gramme de silice.

0,6740 gramme de substance traitée au bain-marie pendant trois heures par une solution de potasse caustique (à 20 % de KHO environ) laissa 0,5139 gramme de résidu insoluble dans le réactif.

0,9998 gramme de substance, traitée de la même manière pendant douze heures, donna 0,8575 gramme de silice soluble dans la potasse caustique

Silice totale	97,50 %
Silice soluble dans KHO (traitement pendant trois heures)	51,— »
Silice soluble dans KHO (traitement pendant douze heures)	86,— »
Perte au feu	1,30 »
Poids spécifique	2,606

Si l'on tient compte de la solubilité dans la potasse, de la perte au feu et surtout du poids spécifique 2.606 (celui du quartz étant 2.65); on voit que la silice doit se rapporter, pour la presque totalité, à la variété cristalline de ce corps, comme l'indique d'ailleurs l'examen optique.

Afin de se rendre compte de la nature de la zone blanchâtre de décomposition qui entoure souvent le silex, nous avons analysé et examiné au microscope un fragment de cette matière. Ce fragment de patine, environnant un silex noir, est blanchâtre, à cassure subconchoïde, mat, légèrement granulé, happant à la langue, opaque sur les bords, il ressemble à la craie, et se laisse aisément entamer par l'acier. Les préparations microscopiques montrent, en lumière naturelle, une masse incolore, transparente, formée, on dirait, d'une infinité de granules microscopiques à contours extrêmement vagues, juxtaposés les uns contre les autres et dont l'ensemble reproduit une apparence chagrinée. Il serait difficile de dire s'il existe une substance intercalée entre chacune de ces sections plus ou moins circulaires; il se pourrait fort bien que cette apparence ne fût due qu'aux contours des sections accolées. Çà et là on observe comme des éclaircies. Dans cette masse formée de plages irrégulières, il s'en détache qui présentent la même structure, mais dont la couleur est sensiblement moins foncée. En lumière polarisée, on voit de nouveau la polarisation d'agrégats, mais vaguement indiquée cette fois; les

grains sont si petits qu'ils réagissent à peine. Entre nicols croisés, la silice isotrope y paraît un peu mieux représentée que dans la matière centrale inaltérée du nodule. Les traces d'organismes, beaucoup plus rares, sont indiquées encore par des plages calcédonieuses, mais elles tendent à s'effacer.

Les résultats de l'analyse concordent, comme nous allons le voir, avec ceux de l'examen microscopique.

Analyse II.

1,1447 gramme de substance séchée à 100° donna 0,0188 gramme de perte au feu, et fusionnée ensuite par les carbonates alcalins, 1,1171 gramme de silice, 0,0059 gramme de sesquioxides de fer et d'aluminium, 0,0111 gramme de chaux et des traces de magnésie.

1,0757 gramme de substance attaquée par l'acide fluorhydrique donna 0,0045 gramme de chlorures de sodium et de potassium.

0,7525 gramme de substance traitée au bain-marie pendant trois heures par la potasse caustique laissa 0,1758 gramme de résidu insoluble.

0,998 gramme de substance traitée de la même manière pendant douze heures donna 0,7950 gramme de silice soluble dans la potasse caustique.

Silice totale	97,59	%
Silice soluble dans KHO (traitement pendant trois heures)	74,—	»
Silice soluble dans KHO (traitement pendant douze heures)	88,—	»
Alumine et fer	0,52	»
Chaux	0,97	»
Alcalis	0,25	»
Perte au feu	1,64	»
Poids spécifique	2,606	

Dans ce cas, comme dans le précédent, on voit que la silice appartient à la variété cristalline; elle atteint le poids spécifique de 2,606, mais elle est plus attaquable à la potasse caustique que dans le cas précédent, et enfin sa perte au feu, 1,64, indique, comme les faits que nous venons de citer, un mélange de silice amorphe en petite quantité et de quartz cryptocristallin.

Enfin, nous avons soumis à l'analyse la patine plus compacte, ressemblant à la porcelaine et recouvrant d'une épaisseur de 2 à 3 millimètres un silex noir type. Cette patine représente les silex dans un état moins altéré que pour le cas précédent; elle est blanche, légèrement luisante dans la cassure, translucide sur les bords, sans grains apparents à l'œil nu, ne happe pas à la langue, ne se laisse pas entamer par l'acier et raie le verre.

L'examen des lames minces prouve que cette zone est encore presque entièrement composée de silice cristalline qui se dévoile par la polarisation d'agrégat. A la lumière transmise, on voit que cette zone d'altération se décompose en deux bandes juxtaposées. Celle superposée sur le nodule est opaque; on dirait qu'une matière pigmentaire carbonneuse s'y est accumulée; la bande externe, au contraire, est composée de silice incolore où n'apparaissent que de petites ramifications dendritiques de la même substance qui remplit la bande opaque inférieure. L'analyse sommaire de cet enduit confirme les observations précédentes. On trouve, en effet :

Analyse III.

0,7820 gramme de substance séchée à 100° donna 0,0108 gramme de perte au feu, et fusionnée ensuite par les carbonates alcalins, 0,7675 gramme de silice.

0,7730 gramme de substance traitée au bain-marie pendant trois heures par la potasse caustique donna 0,4120 gramme de silice soluble dans ce réactif.

Silice totale	98,12	%
Silice soluble dans KHO (traitement pendant trois heures)	55,30	»
Perte au feu	1,34	»
Poids spécifique	2,597	(1)

Une conclusion découle de ce que nous venons de dire sur les propriétés physique et chimique de ces nodules de la craie : c'est qu'ils ne renferment qu'une quantité relativement faible de silice amorphe. Ce fait, établi par l'analyse microscopique et les expériences relatives au poids spécifique et à la composition chimique, nous permet de ranger le silex parmi les variétés cristallines de la silice se rapprochant surtout de la calcédoine.

Il résulte de l'ensemble des observations précédentes que les nodules de silex de la craie doivent avoir été produits par le concrétionnement de la silice, provenant d'organismes siliceux, surtout de spongiaires, tenue en solution par l'eau. On peut ajouter que le concrétionnement s'est opéré autour des restes ou des débris organiques dans des masses déjà accumulées de sédiments crayeux, et que la silice a pris généralement la forme cristalline; une petite partie de la masse restant à l'état amorphe. Sans admettre que les conditions de sédimentation et la nature

(1) Le poids spécifique de la masse interne noire du même échantillon est 2,591.

lithologique aient été les mêmes pour la craie que celles des sédiments pélagiques de la période actuelle, nous pouvons trouver, dans la vase à globigérines des océans modernes, quelques points de rapprochement qui permettent d'éclaircir les problèmes que présente la formation des silex. Nous savons que, dans les profondeurs moyennes de l'océan, qui ne dépassent pas 1,500 brasses et à des distances assez grandes des côtes pour que les matières terrigènes n'y soient pas entraînées, il se forme aujourd'hui de vastes dépôts, composés essentiellement de foraminifères calcareux, dont les dépouilles viennent s'accumuler sur le lit de la mer après la mort de ces organismes. Pendant que ces débris de rhizopodes tombent sur le fond de la mer, celui-ci se tapisse d'organismes qui habitent des grands fonds, et parmi lesquels les spongiaires jouent un rôle important. Ces spongiaires y sont tellement nombreux qu'un seul dragage en ramène quelquefois plus de 40 espèces, et que la vase est comme cimentée par des spicules ou filaments siliceux. Ils jouent dans les sédiments calcareux, comme le disait W. Thomson, le même rôle que le poil dans le mortier (1).

Les vases à globigérines, même les plus pures, ont toujours donné à l'analyse un excès de silice non combinée qui doit se rapporter à ces spicules de spongiaires enchâssés dans ce qu'on appelle la craie moderne (2). Il n'est pas hors de propos de citer ici l'appréciation que formulaient

(1) W. THOMSON, *Ann. mag. nat. hist.*, 1869, pp. 119-121.

(2) MURRAY et RENARD, *Classification et nomenclature des sédiments pélagiques*, p. 45.

deux pionniers des explorations sous-marines, le D^r Carpenter et Sir Wyville Thomson. Ils étaient portés à admettre comme hautement probable qu'à toutes les périodes de l'histoire de la terre les rhizopodes et les spongiaires, ou les deux à la fois, prédominaient en nombre sur toutes les autres formes organiques. Thomson écrivait en 1877 (1) : « Des éponges vivent à toutes les profondeurs, quoique cette classe n'atteigne son maximum de développement qu'entre 500 et 1000 brasses; cependant tous les ordres se retrouvent dans la zone abyssale, sauf l'ordre des *Calcarea*; à de grandes profondeurs les hexactinellides dominant... »

On sait la part qui revient aux foraminifères dans la constitution de la craie et combien y sont abondants les débris siliceux de spongiaires. On voit donc, d'un coup d'œil, les analogies qui unissent les sédiments crayeux et les dépôts à globigérines; dans les deux cas, c'est l'énergie vitale qui est la source d'où dérivent les matériaux qui constituent ces roches.

Si nous tenons compte de la grande quantité de spicules de spongiaires qu'on retrouve dans certaines couches de la craie, spicules mélangés et appartenant à des espèces différentes, si l'on se rappelle en même temps les nombreux exemplaires d'éponges plus ou moins complètes qu'on découvre dans ces couches, on peut en déduire que ces organismes étaient aussi bien représentés dans les mers crétacées que dans les océans modernes. Les éponges siliceuses actuelles sont formées de silice amorphe, de

(1) THOMSON, *The Atlantic*, vol. II, p. 540.

même aussi l'étaient celles de la craie. Les expériences qu'on a faites sur cette variété de silice, montrent qu'elle est la plus facilement attaquable, et les recherches entreprises par M. Thoulet (1) sur les spongiaires dragués par l'expédition du *Talisman*, apportent une nouvelle preuve en faveur de la solubilité de ces restes organiques. M. Thoulet, en effet, a démontré que la silice de ces spongiaires se prêtait facilement à l'attaque des substances qui agissent sur ce corps.

La silice en solution dans l'eau des mers doit avoir été primitivement dissoute par les agents physico-chimiques qui déterminent la décomposition des roches où ce corps existe à l'état libre ou à l'état combiné. Les fleuves en apportent à la mer et celle-ci, par son action dissolvante sur son lit et surtout sur ses côtes, en ajoute sans cesse de nouvelles quantités à celles qui lui viennent de l'intérieur des terres. Les organismes, dont l'enveloppe ou les parties dures sont formées par la silice, puisent dans l'eau de mer cette substance qu'ils fixent à l'état amorphe. Lorsque l'action vitale a cessé de s'exercer, l'acide silicique, isolé et accumulé par ces êtres, est rendu, peut-on dire, au monde inorganique. La silice se redissout en partie et enfin se fixe en se concrétionnant. Demandons-nous maintenant quelles peuvent être les causes en jeu pour redissoudre ces restes d'organismes siliceux ?

Nous n'hésitons pas à avouer qu'il est difficile de les spécifier; toutefois on peut avancer, comme hypothèse très probable, en nous basant sur des faits bien connus,

(1) THOULET, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1884, p. 1000.

que l'eau de mer chargée de ses sels, aidée de la pression, dans d'autres cas, chargée d'acide carbonique ou d'acides organiques plus ou moins analogues aux acides crénique et ulmique, peut être envisagée comme dissolvant. On doit dire la même chose à peu près de l'eau circulant dans les couches. On sait aussi combien l'élévation de la température peut aider l'eau à se charger de silice; mais nous ne pensons pas qu'on doive tenir compte de ce facteur pour le cas dont il s'agit.

Nous verrons plus loin qu'il n'est pas nécessaire d'admettre que cette redissolution se fasse sur l'aire qui est actuellement le fond de la mer; cependant il résulterait de certaines observations de Carter (1), que des spicules, dragués sur le lit de la mer, montrent comme un commencement de décomposition: leur surface est pointillée de petites excavations et le canal axial est élargi.

Tout porte à croire que, parmi les organismes à enveloppe siliceuse, ce sont les spongiaires qui doivent avoir fourni, pour la plus grande partie, la silice des nodules que nous avons décrits. Non seulement on a la preuve, par l'examen microscopique, que ces nodules sont comme pétris de spicules, mais, suivant une observation déjà ancienne d'Ehrenberg, que nous avons rappelée plus haut et qui se trouve confirmée par de nombreuses recherches, les couches crayeuses où la silice s'est concrétionnée ne renferment pas de spicules, et, d'un autre côté, celles, où les spicules sont disséminés en grand nombre dans la masse de la craie, ne présentent pas le développement

(1) CARTER, in *Sollas*, loc. cit., p. 444.

de concrétions siliceuses que nous remarquions tout à l'heure (1).

Bornons-nous à citer ici les faits signalés par Petzold et qui confirment ce qu'on vient de dire. Ce savant a montré que, dans une roche dolomitique, les parties les plus voisines des concrétions siliceuses ne contenaient que 2,31 % de silice, tandis que celles plus éloignées de la concrétion en renfermaient près de 4,73 %. Nous avons donc la preuve bien évidente que c'est à la silice des spongiaires qu'est due la matière des nodules siliceux. Ces derniers se seront formés, comme il arrive si souvent pour les concrétions, par concentration sur un point de particules de la même substance, disséminées dans les couches et auxquelles les eaux servent de véhicule. Ces faits prouvent, en outre, que la concrétion s'est formée lorsque

(1) La craie de Nouvelles a été analysée dans le but de s'assurer de la teneur en silice. Voici les résultats de cette recherche.

0,2853 gramme de substance séchée à 110° donna 0,1594 gramme de chaux et 0,0022 gramme de pyrophosphate de magnésium.

0,7682 gramme de substance traitée dans l'appareil de Ludwig par l'acide chlorhydrique donna une perte de 0,3055 gramme d'acide carbonique.

3,0977 grammes de substance traité par l'acide acétique laissaient un résidu contenant 0,0214 gramme de silice et 0,0183 gramme de sesquioxydes de fer et d'aluminium.

CO ₂	43,14
Si O ₂	0,69
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,59
CaO	55,87
Mg O	0,28
	100,57

Ces résultats montrent que la craie renfermant les nodules est pure et contient des quantités très petites de silice.

les séliments s'étaient déjà accumulés. Nous fournirons plus tard d'autres arguments en faveur de cette interprétation; admettons-la pour le moment et supposons que des masses crayeuses, remplies de spicules de spongiaires, soient venues recouvrir un lit d'éponges qui s'étalaient au fond de la mer crétacée. Voyons quels sont les phénomènes qui se passent et dont le résultat se traduit par la formation du silex.

Un dissolvant de la silice, l'eau plus ou moins chargée de sels ou d'acides, s'infiltré au travers de la masse crayeuse; cette eau peut être déjà saturée de bicarbonate de chaux, qu'elle possédera cependant encore le pouvoir de dissoudre la silice; elle trouve dans le sédiment crayeux des spicules microscopiques disséminés et des radiolaires ou des diatomées constitués par de l'acide silicique à l'état amorphe. Ceux-ci, grâce à leurs petites dimensions, à la résistance relativement faible qu'ils opposent comme silice amorphe à l'action des dissolvants, grâce, en outre, aux grandes surfaces d'attaque qu'ils présentent, cèdent une partie de leur substance. Le dissolvant se sature peu à peu d'acide silicique; la capillarité aidant, la solution siliceuse arrive au contact des amas de spicules et d'éponges qui constituent le lit sur lequel ces organismes vivaient avant le dépôt des matières crayeuses surincombantes. C'est en ce point que le concrétionnement va se faire; c'est sur ce lit que vont se former les nodules que nous trouvons aujourd'hui alignés à certains niveaux des terrains de la craie.

Rappelons la propriété, que possèdent d'une manière tout à fait spéciale certaines formes de silice, de se concrétionner en passant de l'état colloïde à l'état solide cristallin ou amorphe; rappelons, en même temps, que c'est pré-

cisément à l'intérieur des couches que les formes concrétionnées prennent surtout naissance. Nous ne sommes pas dans le domaine de l'hypothèse, si nous affirmons que, d'une solution saturée, la précipitation se fera généralement sur un corps solide et qu'elle se fera de préférence sur un corps de même nature chimique. Nous pouvons ajouter que le dépôt de la substance dissoute s'effectuera même en raison de la masse qui lui sert de centre. Les eaux infiltrées, chargées de silice, se trouvant au contact de ces lits de spongiaires, vont donc déposer sur ces restes organiques la silice dont elles sont saturées et, d'après ce que nous venons de dire, les spongiaires ou les accumulations de leurs débris, étalés en lit plus ou moins continu, serviront de centres d'attraction et de *nuclei* pour les concrétions.

Il importe de faire entrer ici en ligne de compte la présence de substances organiques, qui doivent se trouver associées aux éponges et à leurs débris, réunis sur l'ancien fond de mer où se forment les concrétions. Si la formation de ces nodules trouve déjà sa raison d'être dans les conditions que nous indiquions tout à l'heure, à plus forte raison serons-nous portés à admettre l'interprétation d'un concrétionnement de la silice autour d'un centre siliceux; lorsque le centre dont il s'agit est pénétré de matière organique en décomposition. Ces matières, avons-nous dit, peuvent posséder la propriété de se combiner avec l'acide silicique; d'un autre côté, le carbonate d'ammoniaque qui se forme, lors de la décomposition, peut précipiter la silice. Ce sont autant de particularités qui corroborent l'interprétation que nous sommes portés à admettre; mais si nous voulions entrer ici dans le détail des réactions, nous serions dans le domaine de l'hypothèse. Nous ne citons ces vues générales que pour montrer qu'aucun des

faits n'est en opposition avec l'idée que nous nous faisons de la formation des silex.

Ces concrétions, comme toutes les autres formes inorganiques de cette nature, se sont développées par des apports successifs de la matière qui les constitue. L'action dissolvante et continue des eaux dans les couches environnantes, s'exerçait sur les particules infinitésimales de silice, et dès que celles-ci avaient livré une partie de leur substance, elle venait s'ajouter aux nodules en voie de formation. La silice ainsi agrégée se fixe tout d'abord comme un enduit autour des formes organiques préexistantes. Celles-ci, grâce au bain de silice qui les enveloppe et à l'eau saturée qui les entoure, conservent leurs contours primitifs. C'est ce que nous montrent les préparations microscopiques où les sections de spicules abondent. Ces derniers ont leurs contours bien souvent mis en relief par une matière brunâtre, qui est, suivant toute probabilité, le reste de la matière organique adhérente aux spongiaires. Dans les creux, la silice se dépose sous la forme de grains ou d'agréats fibreux cristallins qu'on rapporte à la calcédoine; elle se trouve surtout le long du canal axial des spongiaires. Autour des débris organiques, la silice cristallise en grains microcristallins, et enfin certaines plages, peu nombreuses et très petites, s'observent où la silice colloïde en se solidifiant reste à l'état amorphe. Nous pouvons rapprocher ces faits, relatifs au mélange de silice à différents états moléculaires, de ce que nous montrent certaines concrétions siliceuses où la calcédoine et l'opale se sont développées simultanément. La silice, en se concrétionnant, devait non seulement englober des restes d'organismes siliceux, mais aussi des fragments ou des coquilles de mollusques ou de rhizopodes à enveloppes calcaires, qui

étaient emprisonnées dans les éponges ou les accumulations de spicules. Dans ce cas, l'élément calcaireux est entièrement remplacé par l'acide silicique, les cavités de l'organisme sont remplies de calcédoine, et l'on a un de ces nombreux exemples du phénomène bien connu de substitution de la silice au calcaire.

Nous avons supposé jusqu'ici que ces nodules se sont formés dans les couches de sédiments crayeux et non sur le fond même de la mer; il nous reste à établir cette interprétation. Ceci nous fournira l'occasion de montrer les différences que doivent présenter la sédimentation des masses de la craie et celle des vases calcaireuses pélagiques modernes. Nous avons rappelé plus haut les conditions dans lesquelles s'opère le dépôt de la *Globigerina ooze*; nous avons vu les dépouilles des organismes calcaireux de la surface venir s'accumuler lentement sur le fond de la mer et se réunir aux spongiaires qui vivent sur son lit. L'action mécanique de l'eau, comme agent de sédimentation, ne se fait pas sentir dans les profondeurs loin des terres émergées. Tout nous porte à croire que ces caractères de dépôt pélagique proprement dit manquent à la craie. Les sédiments, compris sous ce nom, ne sont pas ce qu'on a appelé des sédiments de haute mer. Si l'on admettait que la craie et la vase à globigérines ont un mode de dépôt identique, on aurait tout d'abord à lutter avec les difficultés que présente l'interprétation des couches de silex intercalées régulièrement dans les masses crayeuses.

Représentons-nous un instant ce qui se passe sur le fond des mers modernes, aux points où se dépose lentement la vase calcaire. Des spongiaires, pour ne parler que de ces organismes, s'étalent sur le lit, des foraminifères

vivant à la surface tombent au fond, après leur mort, et viennent recouvrir lentement cette végétation de protozoaires qui croît à mesure que les dépouilles de foraminifères se déposent. Supposons un instant qu'on fasse une coupe au travers des couches ainsi formées. Comme les conditions des fonds de mer sont absolument stables, on verra, en admettant même que la silice des spongiaires se soit concrétionnée, que ces concrétions sont réparties d'une manière irrégulière dans les masses de calcaire qui les enveloppent. Il est évident, en effet, que les organismes siliceux vivant sur le fond doivent continuer à se développer *pari passu* avec l'accumulation des dépouilles de rhizopodes qui viennent, en quelque sorte, enterrer les premiers. Nous n'avons pas, en effet, dans les mers actuelles, de raisons pour admettre que les sédiments pélagiques doivent alterner, et l'interprétation donnée par Lyell, et d'après laquelle il se formerait en un point de l'océan, sous l'influence des courants, tantôt un dépôt siliceux, tantôt un dépôt calcaireux, n'est pas fondée et ne sera partagée aujourd'hui par personne.

Ainsi donc, les phénomènes actuels que nous connaissons par les explorations sous-marines, ne montrent pas dans les vases à globigérines des faits analogues à ceux que présentent les lits de silex de la craie. La formation du silex, aligné suivant les couches de stratification, ne peut s'interpréter en admettant le mode de sédimentation qu'on observe dans les océans modernes aux grandes profondeurs loin des côtes.

Hâtons-nous d'ajouter qu'aucun fait ne vient prouver non plus que ces nodules ou ces concrétions siliceuses se forment à la surface du lit actuel de la mer. Parmi tant de sondages effectués partout dans les aires à globigérines

de l'Atlantique, dans les fonds à diatomées de l'Antarctique, dans les sédiments à radiolaires du Pacifique, dans l'argile rouge des plus grandes profondeurs, jamais la drague n'a rapporté un fragment de silice de formation récente, rappelant les silex de la craie.

Il est inutile d'objecter que nous ne connaissons rien ou presque rien du fond des grandes mers actuelles, que les appareils ne rapportent qu'une quantité infinitésimale des matières qui constituent le fond : cet argument perd toute sa valeur dès qu'on réfléchit à l'uniformité de la composition minéralogique que les explorations sous-marines établissent d'une manière incontestable pour chacune des régions du lit de la mer.

Ainsi donc, ni les conditions théoriques dans lesquelles devrait s'effectuer la sédimentation des vases à globigérines, ni les faits directement observés, en viennent appuyer l'opinion que les nodules siliceux se forment sur le lit des mers modernes. Rien de ce que nous connaissons des dépôts pélagiques ne s'oppose à admettre que ces concrétions siliceuses stratifiées se sont formées dans les couches elles-mêmes, après le dépôt des matières crayeuses. Entre un grand nombre de faits, qui plaident d'une façon incontestable en faveur de cette interprétation, bornons-nous à rappeler les suivants : 1° la formation du silex en veines, qui présuppose nécessairement l'existence de fentes dans un sédiment déjà accumulé; 2° l'élimination de la silice dans les couches qui renferment les nodules. Cette élimination ne peut se comprendre que dans le cas d'une dissolution de particules enchâssées dans les couches calcareuses, et d'une concentration autour d'amas de matières siliceuses étalées sur un ancien fond de mer.

Nous sommes donc amenés à admettre, pour expliquer d'une manière adéquate, la formation des nodules siliceux de la craie, que les sédiments de cette formation ont été accumulés d'une manière bien différente de celle des dépôts pélagiques proprement dits. Bien des preuves ont été données d'ailleurs pour montrer que la formation crétacée n'est pas un dépôt de mer profonde. Nous ne voulons rappeler ici qu'un fait, qui nous paraît décisif en faveur de cette interprétation. L'examen des fossiles, spécialement des échinodermes, nous prouve à l'évidence qu'ils ont été soumis à des remaniements mécaniques. Or, ceux-ci sont inexplicables si la craie s'est déposée comme les vases océaniques. Non seulement, les oursins de la craie ne se retrouvent presque jamais avec leurs piquants, mais souvent ils sont recouverts de serpules. Ces observations nous forcent à admettre deux interprétations qui sont en opposition directe avec ce que nous savons des conditions dans lesquelles se forment les dépôts des mers profondes. Pour expliquer ces faits, il faut recourir à des émerSIONS successives, qui n'ont rien de vraisemblable, ou bien à l'invasion sur le lit des mers assez profondes et tranquilles de matières sédimentaires calcaireuses. Celles-ci, apportées par des agents mécaniques, les courants marins ou atmosphériques, viennent recouvrir le fond où vivait une faune de profondeur moyenne et où dominaient les éponges. Nous arrivons donc, pour rendre compte de la formation des nodules de silex, au même résultat où nous amènent des considérations d'un autre ordre, et la concordance, qui existe dans cet ensemble de faits, nous donne la preuve de la probabilité de l'interprétation que nous avons formulée.

