

ALÉTERATION EN PROFONDEUR DES CALCAIRES

PAUL FÉNELON, Bourg La Reine

Dans les régions karstiques il est assez facile, d'ordinaire, de trouver une explication aux modelés en creux, aux reliefs négatifs: dolines, ouvalas, bogaz, poljés. Ils proviennent soit d'érosion ou de corrosion par les agents météoriques ou biologiques le long des diaclases, soit d'effondrements provoqués par faille ou par soutirage, ou bien de contacts entre roches de nature différente et exploités par le ruissellement ou la gélifraction.

Il est plus délicat de comprendre les modelés en hauteur, les reliefs positifs; lapiés, chicots, pinacles, tours, hums. Pourquoi ces formes tourmentées ont-elles résisté aux divers processus de destruction, tandis qu'autour d'elles avaient disparu par déblaiement des masses parfois considérables de matériaux plus fragiles?

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème ainsi présenté. En voici quelques unes choisies parmi les plus souvent avancées:

1^o) **Les infiltrations d'eaux chargées de bioxyde de carbone** le long des diaclases et des joints de stratification. Le carbonate de calcium est dissous et éliminé, ne laissant qu'un résidu, argile à silex ou sable siderolithique, résidu d'autant plus réduit que le calcaire ou la craie sont plus purs.

Toutefois, au fur et à mesure que s'effectue le départ du CO_2Ca , l'écart entre les parois corrodées s'accroît et l'attaque par corrosion ne peut se poursuivre que si le vide est comblé par des matériaux meubles et perméables, provenant de dépôts superficiels. Ils permettent aux eaux d'infiltration de rester en contact avec la roche en place. Dans ces conditions l'intervalle peut s'agrandir jusqu'au moment où, par la suite de modifications du climat ou du niveau de base, le ruissellement entraîne les apports de remplissage. Seuls restent alors en relief les lapiés, les chicots, ou les pinacles de calcaire inaltéré. Les coupes dans les carrières montrent l'évolution du phénomène depuis la fissure à peine attaquée jusqu'à l'énorme puits comblé d'un matériel exogène et meuble, facile à déblayer par les eaux courantes.

2^o) **La présence d'un carbonate différent** du carbonate de calcium, tel le carbonate de magnésium, CO_2Mg , qui se trouve dans les calcaires dolomitiques et qui agirait, semble-t-il, de deux manières différentes: soit en diminuant la solubilité de la roche, l'ion Mg bloquant l'ion Ca, soit en accroissant la solubilité de la roche, la dolomite rendant le calcaire plus poreux et multipliant ainsi les interfaces eau solvante-roche solutée.

C'est le second processus qui est le plus souvent envisagé. Les zones dolomitisées étant plus solubles que les calcaires purs, ceux-ci résistent mieux à la corrosion et donnent, après départ des strates à dolomie, des reliefs ruini-formes, tels ceux de Montpellier-le-Vieux. Restent à exploier l'origine et la répartition de la dolomite dans les sédiments calcaires; on peut en discuter, mais ce n'est pas notre propos. Remarquons seulement que tous les reliefs ruini-formes ne coïncident pas avec des faciès dolomitiques, notamment dans le Bois de Paolive en Ardèche, où les sédiments carbonatés ne contiennent pas ou très peu de CO_3Mg .

3^o) Les reliefs karstiques d'origine corallienne:

A la suite du Doyen Georges CIRY et du Professeur Pierre RAT, les géologues de la Faculté des Sciences de Dijon, ont attiré l'attention des géomorphologues sur les reliefs karstiques issus des calcaires d'origine corallienne. Leurs recherches se sont déroulées tout particulièrement dans les Monts Cantabriques. Jean HAZERA en a tiré un certain parti dans sa thèse sur la géomorphologie de la région de Bilbao. Nous avons nous-même signalé les hautes collines de Saint-Bertrand-de-Comminges sur la façade nord des Pyrénées centrales, dérivées de récifs à base de coraux. Il s'agit de hums, de petits massifs âpres et d'écharnés et de crêtes découpées le plus souvent dans des calcaires urgoniens, reliefs presque sans rapport avec le modelé qui normalement devrait provenir du réseau hydrographique hiérarchisé qui les traverse.

Selon l'école dijonnaise, au départ il y a eu formation de récifs coralliens vivants, des «biohermes» entre lesquels s'accumulaient des sédiments terrigènes. Par la suite les récifs sont morts. Détruits par les vagues leurs débris se sont étalés de part et d'autre, en «biostromes» faiblement stratifiés et cimentés par des précipités de calcite. Exondées, ces masses calcaires ont été dégégées, par le ruissellement, des «passées» argileuses qui les enveloppaient. Plus ou moins modelées en surface par la météorisation, elles forment soit de petits chicots, soit d'énormes massifs comme le Candina, près de Castro Urdiales, soit des hums d'une centaine de mètres d'altitude relative, comme ceux d'Arudy sur le Gave d'Ossau et de Saint-Bertrand-de-Comminges sur la Garonne.

A ces diverses interprétations nous souhaiterions en ajouter une nouvelle sur le génèse des reliefs karstiques positifs. Nous l'avons émise dès 1945 sous forme d'hypothèse à propos des «pechs» du Sarladais, dans le Périgord méridional. Nous supposons alors qu'une altération en profondeur avait atteint des calcaires d'âge coniacien, altération partielle avec perte de CO_3Ca et apports de silicates d'alumine plus ou moins hydratés (SiO_2 , Al_2O_3 , NH_2O). Après soulèvement de la masse sédimentaire, ou abaissement du niveau de base, sous climat humide, l'érosion aurait déblayé les éléments altérés, meubles et fragiles, laissant en relief les blocs de roche saine et dure.

La même explication a été avancée par le Professeur Jean HAZERA. Dans ses études sur les karsts de la région de Laredo, au coeur des Monts Cantabriques, il admet la formation préalable d'un karst profond par altération souterraine du calcaire. Les carrières ouvertes autour de Bilbao montrent en effet le passage progressif de la zone saine à la zone altérée. Notre collègue de Pau, aboutit à la conclusion suivante (page 184 de sa thèse):

«il y a eu, en plus de la dissolution du calcaire, substitution de celui-ci par apport de silice venant de l'extérieur. Les zones silicifiées, plus tendres sont enlevées par le ruissellement, le calcaire intact forme des pitons».

Il est vrai que cette interprétation se rapproche de celle du Professeur Pierre RAT en ce qui concerne les calcaires urgoniens de la région de Bilbao où le passage du calcaire récifal au sédiment terrigène s'effectue progressivement.

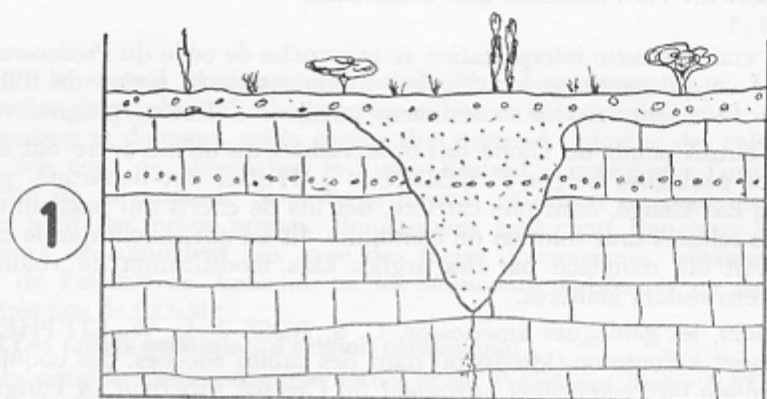
En d'autres points du Globe des observations du même ordre ont été signalées. Les géologues belges F. CORIN et J. HUGE ont remarqué, près de Lukala, en Bas Congo, dans une carrière, des lits de cherts qui passent du calcaire à des schistes sans solution de continuité. Ils en ont conclu que le calcaire dissout avait été remplacé par des argiles sans modification de volume, les cherts siliceux restant inaltérés.

En 1939, les géologues américains, C. S. ROSS et L. W. STEPHENSON ont découvert à Pontotoc (Mississippi) dans des sables éocènes, des coquilles du genre *Cardium* ou *Pectenulus* provenant du Crétacé supérieur. A l'origine ces fossiles étaient composés de calcite ou d'aragonite. Or l'analyse révèle qu'ils ne contenaient plus que des silicates d'alumine, notamment de la beidellite ($5 \text{ SiO}_2, \text{ Al}_2\text{O}_3, 5 \text{ H}_2\text{O}$). Tandis que les coquilles fraîches sont dures, les coquilles recueillies à Pontotoc, quoiqu'ayant conservé leur structure très fine, s'effritaient quand on les exposait à l'air libre. ROSS et STEPHENSON en concluaient que dans la masse sédimentaire l'aragonite du fossile avait été remplacée, molécule par molécule, par de la beidellite et autres silicates d'alumine. Il s'en était suivi une fragilisation de la coquille.

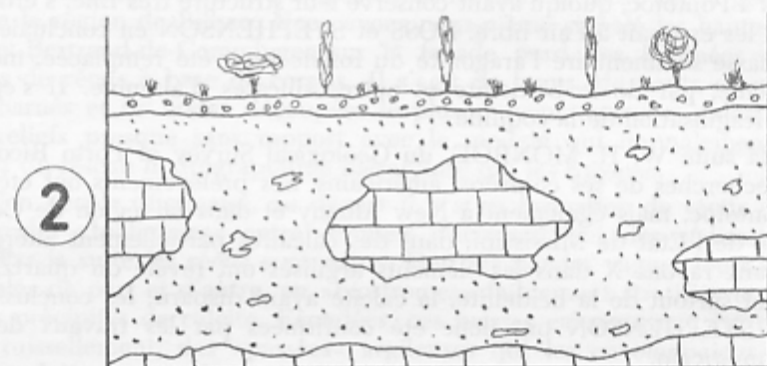
Par la suite W. H. MONROE, du Geological Survey of Porto Rico, a repris les recherches de ses confrères américains. Ses prélèvements ont été effectués à Pontotoc, mais également à New Albany et dans la région de Country, au sud-est de l'Etat de Mississippi, dans des calcaires partiellement altérés. Les analyses aux rayons X dans les éléments argilisés ont révélé du quartz, de la goethite et surtout de la beidellite, la calcite ayant disparu; les conclusions de ROSS et STEPHENSON ont donc été confirmées par les travaux de notre collègue américain.

Il a paru souhaitable de confronter ces résultats à des recherches de même nature effectuées dans les régions karstiques de France. Déjà, des observations sur le terrain nous avaient paru correspondre aux points de vue des géologues belges et américains. Notamment, nous avions remarqué dans un escarpement du Sarladais, près de Domme, des lits de silex se prolongeant horizontalement des strates calcaires dans les dépôts argileux des poches de dissolution (fig. 1). Les coupes réalisées par les tranchées le long des routes récentes montrent parfois des blocs calcaires enrobés d'argile (fig. 2 et photo 1). Ils sont comme « digérés » par le milieu siliceux et argileux, meuble et perméable, qui les enveloppe.

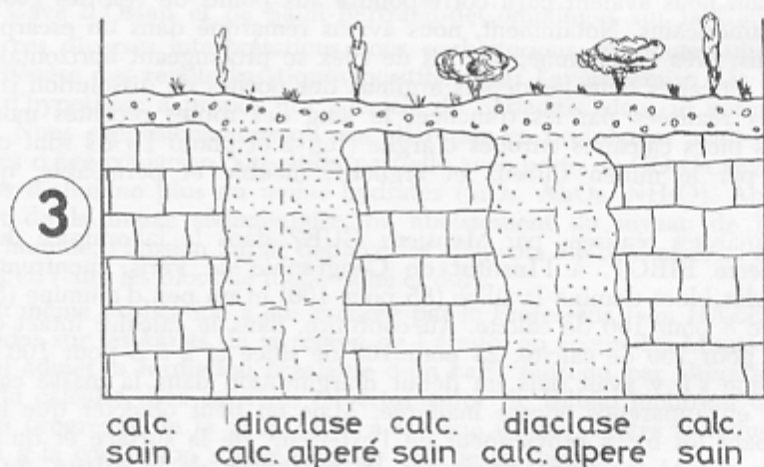
Des analyses réalisées par Monsieur GUEZ dans le laboratoire du Professeur Pierre BIROT, à l'Institut de Géographie de Paris, montrent bien qu'autour des blocs domine la silice (85 pour 100) et un peu d'alumine (5 pour 100) contre 8 pour 100 de calcite. Au contraire, dans le calcaire intact on découvre 57 pour 100 de calcite, 25 pour 100 de silice et 2 à 3 pour 100 d'alumine, comme s'il y avait déjà un début d'argilisation dans la masse calcaire, cependant en apparence encore inaltérée. Mais on peut objecter que les dépôts enrobant les blocs proviennent de l'extérieur, de la surface et qu'ils ont rempli par gravité les vides causés par la dissolution de la calcite, qu'ils ne « digèrent » pas le calcaire enveloppé, celui-ci disparaissant simplement par dissolution, sous l'action des eaux d'infiltration.



Sl. 1. Akumulacija kvarenog šljunka i pijeska u obliku »džepa«
 Fig. 1. Lit de silex se prolongeant dans une poche de décalcification



Sl. 2. Vapnenački blokovi u procesu oglinjavanja
 Fig. 2. Blocs calcaires en cours de dissolution (digestion) d'après photo



Sl. 3. Vapnenci u procesu oglinjavanja prema fotografiji
 Fig. 3. Calcaire en cours d'argilisation, d'après photo

Pour réfuter cette objection nous avons photographié sur la route de Beynac à Sarlat, des coupes de sédiments calcaires où les lits de stratification



Slika 1. Vapnenački blokovi izloženi morfotransformaciji i otapanju

Photo 1. Blocs calcaires en cours d'altération- et de dissolution

se prolongent de la roche saine dans la zone en voie de décomposition; puis nous avons procédé à des prélèvements d'échantillons de calcaire sain et de calcaire altéré (fig. 3 et photo 2). Les analyses effectuées par Monsieur GUEZ ont donné, après traitement au citrate de soude et à l'acide chlorhydrique dilué au 1/10^e, les résultats suivants:

1. échantillon de calcaire sain; calcite forte (58 pour 100 environ), quartz faible (5 pour 100), pas de silicate d'alumine;
2. échantillon de calcaire altéré: calcite faible, quartz moyen, illite et montmorillonite moyennes, kaolinite faible.

Sans doute faudrait-il poursuivre les analyses, interrompues faute de matériel approprié, pour obtenir des pourcentages plus précis. Néanmoins, on peut déjà constater, en admettant, ce qui est probable, qu'à l'origine la masse sédimentaire était homogène, qu'il s'est produit dans la zone altérée, par suite des infiltrations des eaux superficielles, un départ de calcite par dissolution et un apport de divers silicates d'alumine, montmorillonite ou beidellite; ces éléments ont remplacé par précipitation la calcite sans qu'il y ait eu variation de volume dans le matériel rocheux.

Pour confirmer ce processus nous avons eu recours à des analyses d'eau effectuées le long d'un versant calcaire, à Béruges, près de Poitiers, par une équipe que dirigeait le Professeur Gabriel ROUGERIE de la Sorbonne. Au sommet du versant les eaux de pluie, après avoir traversée des sols riches en silice et humus, contenaient 4,5 mmg de silice et 1,2 mmg de calcite par litre. Au bas de la pente, dans les sourcins, le rapport était inversé: 1,5 mmg de



Slika 2. Vapnenci u procesu oglinjavanja: 1 i 3 »zdravi« vapnenci, 2 i 4 izmjenjeni vapnenci (stratifikacija »zdravog« vapnenca se produzuje i kod izmijenjenog)

Photo 2. Calcaire en cours d'argilisation: en 1 et 3 calcaire sain en 2 et 4 calcaire altéré (Les lits de stratification se prolongent du calcaire sain dans le calcaire altéré, notamment en 2)

silice et 4,9 mmg de calcite par litre. Afin de préciser ces résultats nous avons fait analyser les dépôts superficiels à travers lesquels percolent les précipitations. Nos échantillons contenaient 37,9 pour 100 de SiO_2 , 24,4 pour 100 d' Al_2O_3 et très peu de CaO , 3 à 4 pour 100.

Nous pouvons, semble-t-il, déduire de ces données que c'est dans un tel milieu, soit directement, soit par l'intermédiaire du tapis végétal, vivant ou mort, et le plus souvent par les deux influences à la fois, que les eaux météoriques, acidifiées par les matières végétales en décomposition, s'enrichissent en solution moléculaire de silicates d'alumine; puis elles les transfèrent par infiltration dans la masse calcaire plus ou moins perméable. L'enrichissement est d'autant plus élevé et l'infiltration d'autant plus facile que la température est plus élevée, ce qui justifierait une karstification plus rapide sous climat tropical humide que sous climat froid. Quoiqu'il en soit, dans les strates rocheu-

ses le carbonate de calcium est dissous et entraîné vers l'extérieur, vers les sources et les ruisselets; les silicates précipités le remplacent molécule par molécule.

On peut pousser plus loin les investigations sur la répartition des reliefs karstiques en prenant en considération l'origine plus ou moins lointaine des silicates d'alumine. Ils sont prélevés dans les dépôts superficiels provenant, tout au moins en Rouergue, Quercy et Périgord, des roches acides du Massif Central. Les granites, les gneiss ou les micaschistes décomposés sont transportés vers l'aval; de sorte que leurs dépôts étant d'ordinaire plus abondants à proximité du socle hercynien, les phénomènes karstiques sont d'autant plus développés que les zones calcaires affectées sont plus proches d'un massif cristallin.

On peut enfin se poser une ultime question; comment et pourquoi les molécules des silicates remplacent-elles à égalité de volume celles de la calcite? Plusieurs facteurs doivent entrer en jeu. Peut-être faut-il faire intervenir un catalyseur qui favoriserait l'échange, tels les sels ferrugineux (Fe_2O_3) qui sont abondants dans les calcaires coniaciens du Sarladais. Par ailleurs le milieu alcalin, où s'infiltrent les eaux de surface entraînerait la précipitation des silicates; tandis que le bioxyde de carbone transformé en acide carbonique par adjonction de molécules d'eau ($CO_2 + H_2O$), dissoudrait la calcite qui serait évacuée vers l'extérieur; les deux phénomènes chimiques, précipitation et dissolution, se produiraient donc en même temps.

Faut-il aller plus loin dans l'analyse de ces phénomènes? ne se produisent-ils pas au niveau ionique? Par adjonction d'eaux de roche, les molécules d' Al_2O_3 seraient dissociées en ions Al et O. Par polarisation les ions Al seraient attirés vers l'oxyhydre OH de l'acide carbonique provenant du CO_2 des eaux d'infiltration. Il y aurait départ de l'ion Ca libéré et capture et maintien de l'ion Al par les ions Fe dans une solution encore légèrement alcaline. Finalement le phénomène de substitution se produirait au niveau des électrons entre des ions de charge différente, problème de chimie ionique ou de physique nucléaire qui mériterait des recherches de laboratoire plus poussées.

Quoiqu'il en soit, l'argilisation du calcaire dans les coupes observées ne modifie pas le volume de la roche; il n'y a ni retrait, ni dilatation. Mais la zone altérée, comme la coquille de Pontotoc, devient très fragile, de sorte que le ruissellement qui se produit, soit sous l'influence d'un climat devenu plus humide, soit par suite d'un abaissement du niveau de base, soit par disparition du tapis végétal, détermine dans les zones altérées un déblaiement des éléments argileux, tandis que les calcaires sains restent en relief avec des parois plus ou moins ruiniformes selon les attaques de la corrosion et les processus ultérieurs d'érosion.

En outre, l'altération ne se produit pas seulement à proximité de la surface, mais également en profondeur, comme nous le supposions naguère pour expliquer les «pechs» du Sarladais. Partout où les eaux d'infiltration, chargées de silicates d'alumine, pénètrent par gravité et par pression hydrostatique, parfois jusqu'à plusieurs milliers de mètres à la faveur des diaclases, des failles et de la porosité, elles décomposent progressivement le long de leur trajet, les roches calcaires et préparent les futurs karsts souterrains. Comme l'envisage W. H. MONROE, elles sont sans doute à l'origine de galeries que l'érosion mécanique ne saurait justifier, notamment lorsque ces galeries sont garnies de dépôts argileux à grains fins et homogènes qui ne portent pas trace de tran-

sport par les eaux courantes. Ces dépôts proviendraient de précipités de silicates après dissolution et départ de la calcite. D'ultérieurs processus d'érosion par les eaux courantes dégageraient ces galeries, aux parois souvent courbes, de leurs argiles encore meubles.

Ainsi des reliefs ruiniformes comme ceux de Mourèze près de Narbone, de Paolive en Vivarais, des hums comme ceux de Saint-Bertrand-de-Comminges au pied des Pyrénées, aussi bien que des cavernes et des galeries, tels le Couffre Berger du Vercors, ou la Salle La Verna à la Pierre-Saint-Martin dont la genèse peut paraître partiellement mystérieuse, s'expliqueraient par l'argilisation, en surface et en profondeur, des sédiments qui furent composés à l'origine presque uniquement de carbonate de calcium.

BIBLIOGRAPHIE

1. P. BIROT: Contribution à l'étude de la désagrégation des roches. Les cours de la Sorbonne. C. D. U. Paris 1962.
2. P. BIROT: Problèmes de morphologie karstique. Ann. de Géographie, 1954, pp. 161—192.
3. P. BIROT: Reliefs calcaires. Cours de Sorbonne; C. D. U. 1966.
4. F. CORIN et J. HUGE. Note sur la transformation des calcaires dans le Bas Congo. Bull. Serv. Géol. Congo belge, Ruanda-Urundi, N°4, 1948, pp. 63—72.
5. P. FÉNELON: Sur l'origine des argiles de décalcification, Mém. et Doc. du C. N. R. S. 1967, Nelle série, vol. 4, pp. 143—148.
6. J. HAZERA. La région de Bilbao et son arrière-pays, étude géomorphologique, thèse, Saint-Sébastien, 1968.
7. W. H. MONROE: Replacement of limestone by clay. Mém. et Doc. du CNRS 1975.
8. P. RAT: Les pays crétacés basco-cantabriques (Espagne) thèse, Dijon 1959.
9. C. S. ROSS et L. W. STEPHENSON: Calcareous shells replaced by beidellite. American Mineralogist, 24, 1939.
10. R. WOODTLI: Kaolonisation d'un calcaire à Collenia. C. R. sommaire des séances de la Soc. Géol. de France. N° 5, 7 mars 1955, p. 66.

IZMJENE VAPNENACA ISPOD POVRŠINE TLA

Paul Fenelon

Objašnjenje evolucije negativnih »šupljih« formi u kršu u pravilu je lakše od spoznaje procesa oblikovanja pozitivnih reljefnih oblika. Zašto su različite pozitivne reljefne forme u kršu mogle nastati s obzirom na intenzitet procesa destrukcije oko njih, svakako je najznačajniji problem krške morfologije. Od brojnih solucija toga problema, autor ističe nekoliko karakterističnih primjera. Infiltracija vode zasićene karbonatskim bioksidom, različita otpornost vapnenačkih sedimenata i naročito transformacije koraljnih sedimenata zaslužuju najveću pažnju. Autor je konfrontirao rezultate istraživanja belgijskih i američkih istraživača, krškog reljefa u Karibima, oko donjeg Mississipi-ja i u Španjolskoj, s onim u Francuskoj.

Preveo V. Rogić