

ESSAI D'INTERPRÉTATION CHIMIQUE

DE

L'ALTÉRATION DES SCHISTES ET CALCAIRES

PAR

G. COSYNS (1)

Assistant à l'Université de Bruxelles.

Planches V à X.

La plupart des roches soumises à l'action des agents atmosphériques et à celle de l'eau météorique, qui s'y infiltre, subissent des altérations profondes.

On attribue généralement cette désagrégation aux pouvoirs dissolvant et oxydant de l'eau chargée d'acide carbonique et d'oxygène.

Si nous considérons deux points d'une même formation, nous voyons souvent que les résultats de la corrosion sont sensiblement différents, quoique la composition moyenne de l'eau de pluie, qu'ils reçoivent, soit la même. Cela provient de ce que les phénomènes d'altération sont fort complexes et dépendent à la fois de la constitution physique et chimique de la roche.

Dans la nature, ce n'est qu'à l'état d'exception que l'on observe la dissolution d'une roche; c'est, en réalité, une véritable décomposition qui se produit: le calcaire même ne se dissout pas dans l'eau chargée d'acide carbonique, mais le carbonate passe à l'état de bicarbonate de chaux, en se dissolvant.

Les produits d'altération d'une roche réagissent à nouveau, pour former des composés de plus en plus stables; cette chaîne de réactions, dont chaque anneau, chaque stade, dérive l'un de l'autre, ration-

(1) Mémoire présenté à la séance du 18 juin 1907.

nellement suivant les lois de la mécanique moléculaire, nous montre l'évolution logique des roches qui s'adaptent chimiquement au milieu qui les imprègne.

L'altération d'une roche dépend de trois facteurs principaux :

- 1° De la nature des composés chimiques dissous dans l'eau qui l'attaque;
- 2° De la composition chimique de la roche;
- 3° De l'état physique (compacité, brisures, failles) du massif considéré.

L'eau de pluie, en traversant l'atmosphère, dissout environ par litre : 22 c. c. d'azote, 8 c. c. d'oxygène, 0^{cc}5 d'acide carbonique, des traces d'ozone et de produits nitrés (1). L'eau ne contenant qu'un demi-centimètre cube d'acide carbonique par litre, n'a qu'une action corrosive insignifiante vis-à-vis du calcaire. En effet, un décimètre cube de cette eau ne peut dissoudre que 0^{gr}0022 de carbonate de chaux sous forme de 0^{gr}0051 de bicarbonate (2).

Or, certaines eaux calcaires contiennent, par litre, jusqu'à 0^{gr}545 de carbonate de chaux avec 80 c. c. d'acide carbonique libre, soit 160 fois plus que l'eau de pluie n'en pourrait dissoudre.

L'eau météorique étant impuissante à fournir les 80 à 100 c. c. d'acide carbonique par litre nécessaires à bicarbonater la chaux que certaines eaux tiennent en solution, on doit chercher ailleurs leur origine.

On admet généralement qu'en traversant la terre végétale, l'eau absorbe une certaine quantité d'acide carbonique provenant de la respiration des racines; cette source d'acide carbonique est moins grande qu'on ne le pensait (3). On constate que l'eau des calcaires *des Alpes de Chorges, des Causses et du Karst* [régions rocheuses et stériles (4)] est plus riche en acide carbonique que l'eau de nos calcaires belges recouverts d'une vigoureuse végétation.

L'acide carbonique est surtout fourni :

- 1° Par les matières charbonneuses s'oxydant par l'intermédiaire des sels ferriques;

(1) *Traité de chimie* de MOISSAN, 1896. *Eau*.

(2) Cent grammes de carbonate de chaux nécessitant 44 grammes ou 22 300 c. c. d'acide carbonique pour se transformer en bicarbonate soluble. Il faudrait 1 276 000 litres d'eau météorique pour dissoudre 1 décimètre cube de calcaire.

(3) *Traité de chimie* de MOISSAN, 1906.

(4) MARTEL, *Les abîmes*.

2° Par le calcaire même se décomposant sous l'action des sels dissous dans l'eau, qui le baigne après avoir passé sur d'autres roches en décomposition.

Quand on observe les chantoirs qui abondent dans nos formations calcaires, on voit que les plus caractéristiques se forment au contact du schiste et du calcaire; on constate également que ce dernier est d'autant plus criblé de cavités et la corrosion d'autant plus manifeste, que les roches encaissantes sont plus altérables et leurs produits de décomposition plus corrosifs : telle la région à ampélite alunifère de Liège, tel aussi le massif dolomitique de l'Eifel recouvert de coulées de laves poreuses et altérables.

I. — ACTION DES AGENTS ATMOSPHÉRIQUES SUR LES SCHISTES.

La composition des schistes est aussi variable que complexe. Ils sont principalement formés de séricite, de mica, de silicate d'alumine plus ou moins hydraté, de quartz, de pyrite, de magnétite, de matières charbonneuses, etc.

Analyse d'un schiste dévonien de Tilff non altéré.

Silice SiO_2	62.05
Alumine Al_2O_3	19.15
Sesquioxyde de fer Fe_2O_3	5.01
Magnésie MgO	0 95
Alcalis $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	6 65
Traces de TiO_2 ... MnO_2 ...	

Le fer se trouve *surtout* à l'état de pyrite.

Analyse d'argile de décomposition, trouvée dans les parties altérées du schiste analysé ci-dessus.

Silice SiO_2	69.55
Alumine Al_2O_3	20.48
Sesquioxyde de fer Fe_2O_3	6.89
Magnésie	0.33
Alcalis	4.11

Eau et carbonate de chaux variables,
le fer est à l'état de limonite.

Moyenne d'analyses d'ampélite alunifère peu altérée (1) de Chokier, Amsin, Flémalle. Layable.

Silice SiO ²	54.40
Sesquioxyde de fer Fe ² O ³	2.64
Bisulfure de fer Fe ² S ²	7.75
Chaux CaO	3.05
Alumine Al ² O ³	19.25
Alcalis K ² O + Na ² O	3.95
Matières charbonneuses et divers	9.65
Traces : manganèse et magnésie.	

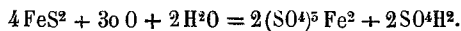
Analyse d'ampélite fortement altérée, ravin des Awirs près d'Engis.

Silice SiO ²	57.65
Sesquioxyde de fer Fe ² O ³	13.78
Chaux CaO	1.04
Alumine Al ² O ³	18.04
Alcalis K ² O + Na ² O	1.96
Charbon	1.58
Eau et divers	5.95

Ces analyses montrent que par altération ces roches perdent surtout leurs alcalis, les matières charbonneuses, le soufre, l'alumine, le fer, etc.

L'une des causes les plus énergiques de l'argilisation du schiste, est la présence plus ou moins grande de sulfure de fer.

La pyrite se transforme en sulfate ferrique et acide sulfurique par l'oxydation naturelle qu'elle subit sous l'action combinée de l'eau, de l'oxygène et des produits oxydants de l'atmosphère (ozone ou composés suroxygénés de l'azote).



C'est au contact direct avec les agents atmosphériques que l'altération est la plus profonde; certains schistes houillers se transforment sur place en argile plastique (2) (Naninne, Andenne, etc.), mais, comme le démontrent les travaux miniers qui ont recoupé ces forma-

(1) Je dois ces échantillons à l'obligeance de MM. Lohest et Fourmarier : je les en remercie bien vivement.

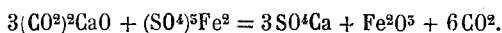
(2) *Annales de la Société géologique de Belgique*, t. I, 1874.

tions, l'altération s'arrête généralement entre 20 et 100 mètres de profondeur.

A l'abri des oxydants spéciaux à l'atmosphère, la sulfatation de la pyrite n'a pas lieu; ainsi les eaux qui baignent les schistes houillers dans les charbonnages, contiennent de l'oxygène dissous et pourtant la pyrite de ces schistes reste inaltérée. Cette oxydation se produira dès que le schiste sera amené à la surface et réuni en terrils où il subit une réelle combustion accompagnée de dégagement et sublimation de nombreux produits de réactions (1).

Le sulfate ferrique ainsi formé est un oxydant énergique; il brûle les matières charbonneuses du schiste houiller avec formation d'acide carbonique qui, en présence d'eau, dissout le calcaire sous forme de bicarbonate de chaux.

A son contact, le sulfate ferrique se décompose en sesquioxyde de fer hydraté, sulfate de chaux et acide carbonique.



Ainsi se forment dans les schistes les pseudomorphoses de pyrite en limonite, avec mise en liberté d'acide sulfurique et carbonique libre; cet acide sulfurique attaque le silicate d'aluminium avec formation d'alunian, d'alunite, d'alun, d'halotrichite, etc.

On a trouvé une grande quantité de ces minéraux sulfatés dans les cavités du calcaire criblant la paroi de contact avec l'ampélite, notamment dans le ravin des Awirs (pl. VI), à Ampsin, Chokier, etc.

C'est grâce à ces réactions spontanées que l'ampélite est si précieuse à l'industrie de l'alun.

Comme on l'a vu plus haut, ces altérations produisent une notable quantité d'acide carbonique, d'autant plus grande que le sel ferrique est mieux aéré; le sulfate ferrique formé sert ici de catalyseur, c'est-à-dire d'intermédiaire entre l'oxygène et les corps oxydables, pyrites et carbone.

Dès qu'une trace de sulfate ferrique est formée, l'action se continue au contact de l'air ou de l'oxygène dissous dans l'eau. Mes expériences de laboratoire m'ont confirmé que la pyrite se dissout dans les sels ferriques en transformant ceux-ci en sel ferreux. Or un sel ferreux absorbe avidement l'oxygène libre pour redevenir ferrique et de nouveau

(1) LOHEST, *Sur les terrils en combustion*. (ANN. SOC. GÉOL. DE BELG., t. XXXI, 1904.)

à même de dissoudre la pyrite. Les matières charbonneuses et la pyrite ne peuvent absorber l'oxygène de l'air, mais elles fixent celui-ci par l'intermédiaire du sulfate ferrique qui se régénère constamment.

Tous les schistes, même ceux qui paraissent peu altérables, abandonnent à l'eau qui les baigne des sels qui la rendent corrosive vis-à-vis du calcaire. Les ardoisières de Vieilsalm donnent une eau chargée de sulfates alcalins.

L'acide carbonique, les carbonates de fer et alcalins sont parfois en quantité telle, dans certaines eaux, qu'il est difficile de les distinguer des eaux minérales proprement dites.

Analyse des eaux soi-disant thermales du ravin d'Aigremont, sourdant de l'ampélite altérée, exprimée en gramme par litre :

Acide carbonique libre	35 c. c.
Sulfate et carbonate de chaux . . .	0gr231
Id. de fer	0gr162
Id. d'alumine	0gr297
Sulfates alcalins	0gr018
Acide sulfurique combiné SO^2 . . .	0gr401

La composition de cette eau incrustante varie avec la quantité d'eau de pluie tombant sur le massif d'ampélite.

Analyse d'une eau incrustante, ferrugineuse, suintant du schiste houiller situé au Nord de Marche-les-Dames (Sclaignaux).

Acide carbonique libre	78 c. c.
Sulfate et carbonate de fer	0gr035
Id. id. de magnésie	0gr018
Id. id. de chaux	0gr156
Chlorures alcalins	0gr035
Sulfates alcalins	0gr014
Sulfate d'alumine	0gr041

Cette source tarit par les temps de sécheresse.

Analyse de l'eau des ardoisières de Vielsalm (1).

Oxydes de fer et de manganèse $FeO + MnO$. . .	0gr007
Alumine Al^2O^3	0gr004
Oxyde de chaux et de magnésie $MgO + CaO$. . .	0gr0487
Alcalis $K^2O + Na^2O$	0gr0575
Traces de silicates.	

(1) DE CONINCK, *Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. VI, 1878.

Ces bases sont combinées à l'état de sulfates, de chlorures et de carbonates.

Les eaux artésiennes bruxelloises montrent une salure progressive avec la proximité des schistes cambriens (1).

Les eaux rencontrées dans les charbonnages sont généralement extrêmement chargées de sels.

Un échantillon d'eau du charbonnage du Flénu, analysé par M. Deghilae (2), a fourni les données suivantes :

Carbonate de chaux CO^2Ca	0 ^{gr} 080
Sulfate de chaux SO^4Ca	0 ^{gr} 053
Chlorure de calcium Cl^2Ca	3 ^{gr} 620
Id. de magnésium Cl^2Mg	3 ^{gr} 770
Id. de sodium ClNa	53 ^{gr} 378
Divers	0 ^{gr} 679

Cette énorme proportion de sels dissous, 61^{gr}50 par litre, est rarement atteinte.

M. Cornet présente, dans son remarquable travail sur les eaux salées des charbonnages (3), le suggestif tableau que voici :

Profondeur.	Teneur en chlore par litre d'eau.	Teneur d'acide sulfurique par litre d'eau.
140 mètres.	3 ^{gr} 187	3 ^{gr} 013
170 »	5 ^{gr} 036	1 ^{gr} 442
250 »	4 ^{gr} 468 à 5 ^{gr} 240	2 ^{gr} 403
330 »	3 ^{gr} 729	0 ^{gr} 379

Comme le montre ce tableau, la teneur en chlorures est indépendante du niveau, tandis que l'acide sulfurique diminue en raison directe de la profondeur. Dans la suite, on verra l'action éminemment corrosive que ces eaux chargées de sels exercent sur le calcaire, et l'on comprendra que l'origine des cavités qui se forment dans ces roches, de préférence au voisinage des schistes, est d'ordre nettement chimique et non mécanique, comme des observations trop superficielles tendraient à le faire croire.

(1) TOUBEAU, *Revue de l'Université de Bruxelles*, 1897-1898.

(2) CORNET, *Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. XXX, 1903, p. 58.

(3) CORNET, *Idem*, p. 60.

II. — ALTÉRATION DES CALCAIRES.

J'ai entrepris l'étude de l'altération chimique des calcaires à la suite d'une excursion faite dans la grotte de Rosée (1), à Engihoul, où M. le professeur Prinz m'a fait remarquer l'importance que présentent les phénomènes de dissolution qui y sont développés d'une façon si remarquable.

Grâce à l'obligeance de M. le baron de Rosée et à l'intervention du laboratoire de géologie de l'Université de Bruxelles, j'ai pu explorer cette intéressante région souterraine et y recueillir un grand nombre de documents dont l'étude m'a montré le mécanisme de l'altération qui a creusé cette caverne.

Je tiens à remercier MM. Doudou et Vandenbosch, qui m'ont guidé et aidé au cours de mes diverses excursions dans la province de Liège, où les phénomènes spéléologiques sont si étendus.

Les différentes cavernes que j'ai visitées sont formées principalement par la dissolution du calcaire; ce sont de véritables altérations localisées aux joints et fêlures de la roche, accompagnées d'une dissolution partielle des produits altérés.

Une grotte comprend deux parties bien distinctes :

1^o Celle que, généralement, on se borne à visiter et qui se compose d'une ou de plusieurs galeries reliant les chantoirs aux résurgences; ces couloirs servent ou ont servi de lit aux cours d'eau souterrains et ne montrent que rarement, et alors d'une façon peu importante, des traces d'érosion mécanique; le lit de ces cours d'eau n'est point formé par la roche vive, ni jalonné de marmites de géants comme en forment les rivières torrentueuses.

Au contraire, il y a souvent plutôt apport qu'entraînement. L'eau venant des chantoirs abandonne le long de son trajet souterrain l'argile et les silex roulés des hautes terrasses. Mais ce qui prouve surtout que ces eaux, dans beaucoup de cas, n'ont jamais eu une force d'affouillement bien grande, c'est que l'argile et les silex des plateaux se sont déposés sur le limon de grotte, résidu de dissolution du

(1) Récemment découverte par MM. Van den Bosch et Doudou, et décrite dans la *Revue de l'Université de Bruxelles*, 1907, p. 504.

calcaire qui possède une composition particulière ne permettant pas de le confondre avec l'argile des plateaux. (Voir fig. 1.)

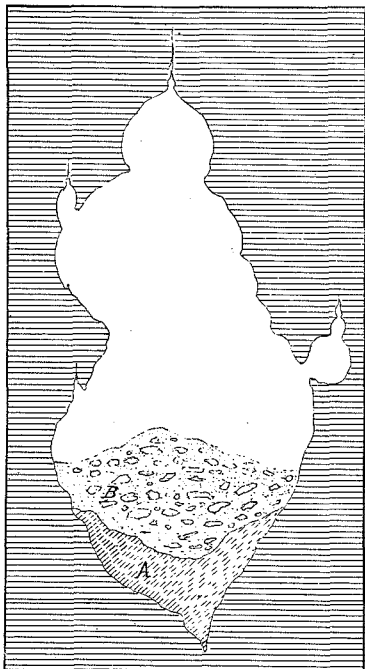


Fig. 1. — DIACLASE AGRANDIE PAR DISSOLUTION (GROTTE D'ENGIHOUL).

A. Argile résiduelle. — B. Argile du plateau entraînée par l'eau des chantoirs.

2° La seconde partie, moins praticable, est formée par les nombreux conduits qui se ramifient à l'infini, pour former un grand nombre de couloirs plus petits se terminant en cul-de-sac.

Ces longues et tortueuses impasses n'ont jamais pu livrer passage à aucun torrent; elles contiennent l'argile non souillée qui représente le résidu de la dissolution du calcaire. On observe un fait analogue dans beaucoup de carrières où les travaux mettent à jour des cavités sans issue, à moitié remplies de résidus de dissolution; ces poches ne communiquent avec l'extérieur que par des fissures qui amènent le dissolvant (1).

(1) M. COLLOT, *Phénomènes de dissolution*. (BULL. DE LA SOC. GÉOL. DE FRANCE, t. XVI.)

Ce phénomène se rencontre à diverses échelles dans tous les massifs calcaires, où souvent les joints de stratification fortement corrodés représentent de belles figures de dissolution. (Pl. V.)

Si les bancs sont fortement inclinés, les galeries parallèles qui se forment ainsi peuvent, par l'effondrement des parois séparatives, constituer de grandes salles. (Voir fig. 2 et 3.)

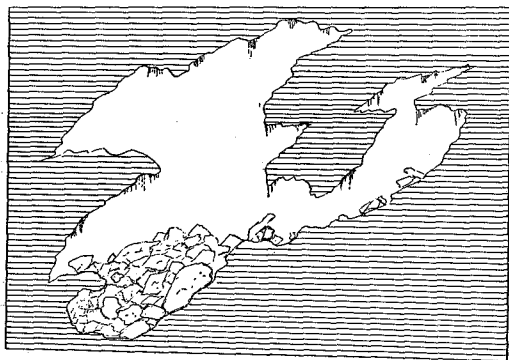
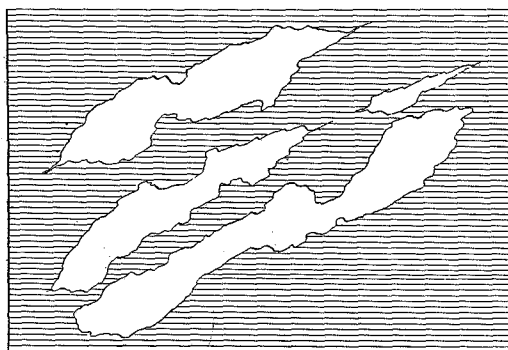


Fig. 2 et 3. — TROU MANTO.

Schémas montrant deux stades de la formation d'une salle par agrandissement des joints et effondrement des parois inclinées.

L'eau pénètre dans les grottes de trois façons différentes :

1° Elle s'engouffre dans les chantoirs, parcourt en quelques heures le lit de la rivière souterraine sur l'argile qu'elle a déposée et va atteindre la résurgence; aussi la composition de cette eau ne se modifie-t-elle que par l'apport des eaux de suintement.

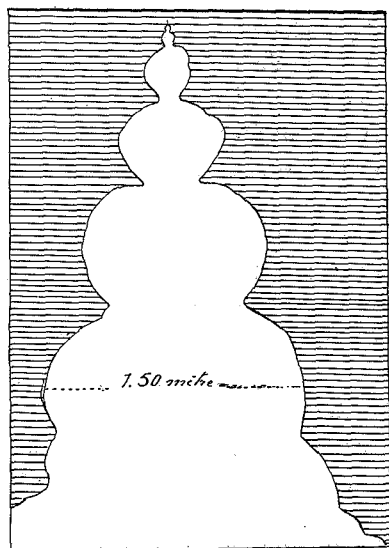


Fig. 4. — GROTTÉ DE MONCEAU, A TILFF.

Chapelets de cuves de dissolution creusant la voûte à l'intersection du joint directeur de la galerie avec une diaclase.

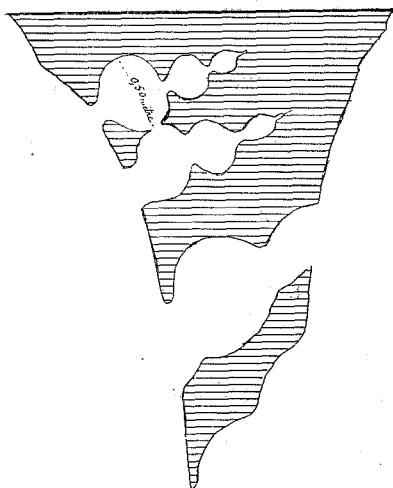


Fig. 5. — GROTTÉ D'ENGHOUL.

Chapelets de cuves de dissolution creusant les parois latérales et finissant par relier des galeries parallèles.

Si le débit est faible, l'eau peut se modifier considérablement, comme dans la grotte de Remouchamps; mais si son volume est considérable, l'augmentation en sels s'atténue en proportion, comme dans certaines rivières du Karst et comme la Lesse à Han (1);

2° L'eau de la rivière, avant son engouffrement dans les chantoirs, filtre, ainsi que l'eau météorique, au travers du sol et pénètre par les mille joints du massif.

Peu à peu les fissures situées sous le lit du ruisseau s'agrandissent et constituent de nouveaux chantoirs; aussi les voyons-nous jalonner un cours d'eau souterrain, et s'augmenter en nombre d'aval en amont;

3° Au contact du schiste, qui est souvent en stratification discordante, l'eau drainée par le massif schisteux vient presser la surface calcaire avec une intensité proportionnelle à la profondeur. Elle corrode fortement cette paroi, en agrandissant les joints par où elle pénètre dans le massif, comme on peut l'observer aux Awirs, à Chockier, etc.

Pour expliquer la dissolution du calcaire, on se borne généralement, ai-je dit, à faire intervenir l'eau chargée d'acide carbonique qui possède en effet une forte action corrosive; mais dans la nature, il est rare de trouver de l'eau qui, ayant ruisselé sur différents terrains, soit formée uniquement de H^2O et CO^2 . Au contraire, l'eau qui a circulé ainsi librement constitue une dissolution fort complexe, dont l'action variera avec la nature des sels qu'elle contient.

Aussi, avant d'étudier une formation calcaire, doit-on tenir compte de la stratigraphie et de la nature des terrains de tout le réseau hydrologique d'amont.

Comme nous l'avons vu plus haut, l'eau peut contenir en solution :

1° De l'acide carbonique, des carbonates de fer, de magnésie, des bicarbonates alcalins, etc.

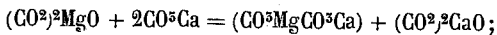
a) L'eau chargée d'acide carbonique dissout une quantité de carbonate de chaux d'autant plus notable que la pression est plus élevée.

En présence de calcaire magnésien, le carbonate de chaux est surtout dissous, tandis que le carbonate de magnésie reste pour former de la dolomie (carbonate double);

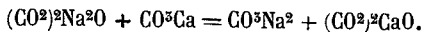
1) RAHIR et DU FIEF, *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.*, t. XV, 1901.

b) Le carbonate de fer se décompose au contact du carbonate de chaux, l'hydrate de fer se précipite et l'acide carbonique libéré dissout le carbonate de chaux ;

c) Le bicarbonate de magnésie, au contact de deux molécules de carbonate de chaux, dissout une molécule de CO^3Ca et forme avec l'autre molécule de carbonate de chaux une molécule de dolomie :



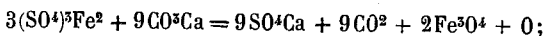
d) Les bicarbonates alcalins se transforment en carbonate au contact du carbonate de chaux qui se solubilise :



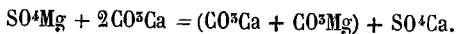
Le carbonate de soude ainsi formé peut dissoudre la silice hydratée (opale).

2° Des sulfates de fer, de magnésie, de chaux, d'alumine; des sulfates alcalins, etc. :

a) Le sulfate ferrique en présence d'oxygène brûlera les matières charbonneuses du calcaire avec formation d'acide carbonique, d'où une première attaque du carbonate de chaux; d'autre part, le sulfate de fer se décomposera en présence du calcaire en donnant de l'hydrate de fer, du sulfate de chaux soluble et de l'acide carbonique :

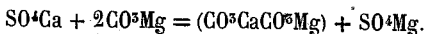


b) Le sulfate de magnésie peut dolomitiser le calcaire avec formation de sulfate de chaux :



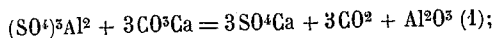
Cette réaction explique la présence de la dolomie dans beaucoup de formations au contact du schiste houiller;

c) Le sulfate de chaux forme avec le carbonate de magnésie non dolomitique du sulfate de magnésie soluble et de la dolomie :



Le sulfate de magnésie ainsi formé peut dolomitiser encore une nouvelle partie de calcaire;

d) Le sulfate d'alumine attaque vivement le calcaire en se décomposant :

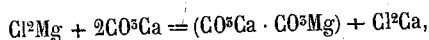


il se forme, comme le montre la formule, de l'acide carbonique, du sulfate de chaux et un précipité d'alumine hydratée; l'acide carbonique ainsi formé peut dissoudre une nouvelle quantité de calcaire;

e) Les sulfates alcalins, en solution très étendue, dissolvent également le calcaire en formant du sulfate de chaux et des carbonates alcalins;

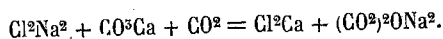
3° Des chlorures alcalins, de magnésie et divers :

a) Le chlorure de magnésie que l'on rencontre en quantité notable dans les eaux du terrain houiller peut aussi dolomitiser le calcaire



en dissolvant une partie sous forme de chlorure;

b) Les chlorures alcalins attaquent le calcaire en formant du chlorure de calcium, du carbonate alcalin qui dissout la silice hydratée. Cette réaction est surtout sensible en présence de CO_2 .



La plupart de ces réactions, dont certaines sont réversibles, ne se produisent quantitativement qu'en solution très étendue, comme le sont généralement les eaux considérées.

Ces réactions chimiques abandonnent sur place un résidu solide, important, d'hydrate ferrique, d'alumine, de silicate de chaux, de cendres dolomitiques, des matières insolubles, du calcaire, etc., qui constituent le dépôt d'aspect argileux comblant les poches d'altération.

Les eaux, ou plutôt ces solutions, s'infiltrant dans les massifs calcaires, en agrandissent peu à peu les fissures.

(1) Le sulfate de chaux formé est décomposé par certaines bactéries qui le réduisent en sulfures. Ceux-ci, au contact des hydrates ferriques, donnent du sulfure de fer, pyrite ou marcassite qui, au contact de l'oxygène, donnera la série de réactions oxydantes exposées plus haut.

Ces réactions montrent comment une faible quantité de sulfure peut, en se régénérant, souvent jouer un rôle aussi important.

Si le calcaire était pur et si ces réactions ne donnaient pas lieu à des précipitations d'hydrates divers, le joint corrodé s'agrandirait en offrant une surface nette, sur laquelle le dissolvant continuerait à agir; mais ce cas exceptionnel ne se rencontre pas dans nos calcaires. Ceux-ci abandonnent toujours un résidu insoluble formant un enduit gélatineux recouvrant la roche d'une paroi semi-perméable qui constitue une cellule osmotique. Dès lors, les phénomènes de dissolution seront soumis aux lois de l'osmose et ils se modifieront avec les progrès de l'attaque.

Les formes tourmentées que présentent les cavités qui s'étendent entre les bancs de stratification, sont le résultat de la constitution du calcaire et sont comparables à de gigantesques figures de corrosion mettant en évidence la composition de la roche. (Voir pl. VI.)

Dans la grotte de Rosée, ces exemples de dissolution sont fort fréquents. On les rencontre à tous les stades de développement et à toutes les échelles, depuis les petites cupules de dissolution de quelques millimètres de diamètre, soulignant déjà par leur alignement les fêlures microscopiques du calcaire, jusqu'aux cavités hémisphériques ou ellipsoïdales de toutes dimensions qui rongent la roche. (Fig. 4.)

Parfois ces cuves renversées ont une section elliptique. Alors leur plus grand axe est souligné, soit par un joint de stratification, soit par une diaclase ou une fêlure presque microscopique. (Voir pl. VI.)

Aux endroits où les joints se coupent, il se forme, à leur intersection, une cavité sphérique ou polyédrique, suivant la disposition des fissures qui drainent le dissolvant.

M. E. Dupont signale, dans son savant mémoire sur les phénomènes généraux des cavernes en terrains calcaireux (1), de fort beaux exemples de parois cupulées et hérissées de fossiles ou veines de calcite moins solubles.

L'eau dissolvante pénètre dans les moindres fissures de la roche; des blocs sont ainsi circonscrits tant à la voûte que le long des parois; peu à peu ces fissures s'agrandissent et les masses de calcaire ainsi isolées, n'adhérant plus à la roche que par la pâte liante de l'argile résiduelle, finissent par se détacher et vont se réunir au limon pour former la terre dite à blocs qui obstrue la plupart des galeries secondaires des cavernes.

Au sein de l'argile, ces blocs de toutes dimensions continuent à se

(1) *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrolog.*, t. VII, 1893.

corroder et se couvrent de cupules dont les parois sont elles-mêmes tapissées d'un grand nombre d'autres plus petites. Les joints et les brisures sont également mis en évidence par l'alignement de ces petites cavités de dissolution comme on peut le voir sur les planches VIII et IX.

Les coupes minces faites au travers des blocs cupulés montrent la marche de la dissolution de la roche tant le long des parois libres que suivant les fissures du calcaire.

La masse saine du calcaire, relativement foncée, est bordée d'une couche plus pâle, argileuse. Cette bordure de calcaire altéré n'est pas uniforme, mais on voit que l'altération pénètre par des joints plus vulnérables, sous forme d'un trait blanchâtre qui se bifurque. Des rameaux latéraux se forment qui vont rejoindre ceux produits par l'altération voisine. Des grains de calcaire s'isolent et forment avec l'argile résiduelle une boue calcaire recouvrant la roche qui subit un véritable délitement.

L'argile que l'on trouve dans ces galeries sans issue est bien le résidu représentant les matières insolubles du calcaire et les produits de réaction enrobant des débris de roche décollés à la voûte et aux parois latérales.

Ce résidu possède une composition chimique bien caractéristique, en rapport, comme on va le voir, avec la nature de la roche dissoute; et il est impossible de le confondre avec l'argile proprement dite que l'eau entraîne dans les grandes galeries.

Dans le but d'obtenir des résultats caractéristiques, j'ai donc effectué l'analyse du calcaire d'Engihoul, en opérant sur 1 kilogramme de substance.

Analyse du calcaire carbonifère d'Engihoul.

	%
Carbonate de chaux CO_3Ca	96.90
Id. de magnésie CO_3Mg	0.85
Silice quartz SiO_2 cristaux bipyramidés	0.48
Id. SiO_2 opale	0.39
Alumine Al_2O_3	0.75
Oxyde de fer Fe_2O_3	0.68

Matières charbonneuses et graphite.

Traces de fluor, chlore, baryum, manganèse.

Le quartz se présente en cristaux bipyramidés bien nets, de quelques dixièmes de millimètres de long; le graphite se présente en petites lamelles de 1 à 2 millimètres de diamètre.

Le manganèse se trouve à l'état d'oxyde insoluble,

Quant à l'argile résiduelle, elle comprend tous les éléments insolubles du calcaire, augmentés des sels et hydrates divers contenus dans l'eau dissolvante, précipités par l'action du carbonate de chaux entrant en solution.

Son analyse chimique et microscopique montre qu'elle est constituée de deux parties :

L'une est une pâte liante composée d'hydrate d'alumine, d'hydrate ferrique et de silicate hydraté d'alumine, etc.

L'autre se compose de grains de quartz analogues à ceux que le calcaire abandonne par dissolution dans les acides, de particules de calcaire, de cendres dolomitiques, de petites sphérules d'oxyde de fer et de manganèse, de divers minéraux calcaires recristallisés.

L'analyse globale a fourni le résultat suivant :

	°/o
Silice libre SiO^2	5 75
Id. combinée SiO^2	28 29
Carbonate de chaux CO^2Ca	29 77
Id. de magnésie	1 92
Alumine Al^2O^3	9 65
Sesquioxyde de fer Fe^2O^3	23 16
Traces très sensibles de manganèse.	
Id. de fluorure de Ca.	

Tandis que l'argile du plateau d'Engihoul ne contient pas de cristaux de quartz bipyramidés et ne présente aucune trace de manganèse, sa composition chimique, comme le montre le résultat de l'analyse suivante, ne rappelle en rien celle du limon de la grotte.

	°/o
Silice SiO^2 libre sable	5.22
Id. SiO^2 combinée	64.40
Carbonate de chaux CO^2Ca	1.05
Alumine Al^2O^3	20.65
Sesquioxyde de fer Fe^2O^3	6.14
Matière végétale et divers.	

Le massif calcaireux situé entre Engis et le ravin d'Aigremont montre au voisinage du schiste alunifère une série de poches de dissolution fort remarquables tant au point de vue de leurs formes que de la composition chimique de l'argile résiduelle qu'elles contiennent. Dans une des grottes de la carrière de la commune à Aigremont, que M. Van den Bosch a eu l'obligeance de me signaler, j'ai trouvé trois variétés de limon superposées, nettement stratifiées et sans aucun mélange :

1° Une couche jaune d'hydrate ferrique presque pur, passant peu à peu à l'état d'argile brune ;

2° Une couche blanche de 20 à 30 centimètres d'épaisseur surmontée d'un peu d'argile du plateau ;

3° Une couche noire d'une trentaine de centimètres également recouverte d'argile et de sable du plateau.

Analyse de l'argile brune.

	%
Silice SiO_2	42.75
Carbonate de chaux CO_3Ca	7.41
Alumine Al_2O_3	29.42
Sesquioxyde Fe_2O_3	18.16
Bioxyde de manganèse	1.45

Analyse de l'argile blanche.

	%
Silice SiO_2	19.21
Alumine Al_2O_3	47.48
Oxyde de fer Fe_2O_3	1.94
Carbonate de chaux CO_3Ca	14.81
Eau, alcalis, magnésie et divers.	

Analyse du limon noir Wad terreux.

	%
Silice libre sable SiO_2	8.41
Id. combinée SiO_2	10.05
Alumine Al_2O_3	7.48
Oxyde de fer Fe_2O_3	17.15
Carbonate de chaux CO_3Ca	4.22
Id. de magnésie	0.27
Bioxyde de manganèse MnO_2	52.10

Dans une grotte voisine, l'analyse du limon m'a donné le résultat suivant :

	%
Silice SiO_2	56.01
Alumine Al_2O_3	17.61
Oxyde de fer Fe_2O_3	22.85
Carbonate de chaux CO_3Ca	3.61
Id. de magnésie CO_3Mg	0.95

Analyse de l'argile du plateau.

	%
Silice libre sable SiO_2	7.30
Id. combinée SiO_2	61.45
Carbonate de chaux CO_3Ca	0.45
Alumine Al_2O_3	19.14
Oxyde de fer Fe_2O_3	9.17

Le fait de trouver ces variétés de limon contenant des oxydes de manganèse, de fer et d'alumine, doit être rapproché de la composition chimique de l'ampélite et de l'eau qui en provient.

Dans la grotte de Tilff, où M. Doudou a bien voulu me guider, j'ai constaté des parois tellement délitées que l'on pouvait en racler une dizaine de centimètres d'épaisseur. Ce n'était point du limon adhérent à la paroi, car toute la structure de la roche, stratifications, fossiles, était conservée.

De plus, on peut reproduire expérimentalement ces aspects cupulés et tourmentés que présentent les parois des cavernes. En effet, si l'on place un cube de calcaire de 5 à 10 centimètres de côté dans 5 litres d'eau acidulée de 3 à 4 % d'acide chlorhydrique, il s'y dissoudra en se décomposant, mais, l'attaque étant très variable avec la constitution chimique et physique, elle provoque la formation de godets ou cupules.

Ces cupules sont le résultat de la marche de la dissolution qui se fait autour d'un point plus vulnérable en se communiquant de proche en proche par couches concentriques généralement hémisphériques.

Le calcaire du massif d'Engihoul m'a donné, par ce traitement, des formes très tourmentées, mettant en évidence, par des alignements de cupules, les joints et brisures de la roche qui paraissait saine, même au microscope; de plus, l'acide étendu, en pénétrant dans les brisures ou fêlures de la masse, en a décollé des fragments qui se sont corrodés à leur tour. (Voir pl. IX.)

En résumé, les blocs de calcaire que j'ai fait dissoudre lentement dans l'acide étendu ont présenté tous les phénomènes que l'on rencontre dans les grottes les plus tourmentées : cupulations, formation de cuves, creusement en galeries des joints et brisures, décollements, etc., et cela sans avoir recours ni à l'eau torrentielle, ni à la corrosion mécanique, ni même au clapotis de l'eau.

Les autres figures des planches VIII et IX feront juger de l'analogie entre les solides de dissolution naturelle et expérimentale (1).

Certains calcaires homogènes donnent, par dissolution partielle dans les acides étendus, des nodules plus ou moins sphériques, analogues à ceux que l'on trouve dans les cuves de dissolution et qu'à première vue on serait tenté de prendre pour des galets roulés.

L'altération remarquable que présente le calcaire gréseux des

(1) M. le professeur Prinz a observé des phénomènes comparables en étudiant l'altération d'un ancien verre égyptien. (*Soc. belge de Microsc.*, 1882, p. CXLVII.)

carrières de Feluy que M. le professeur Kaisin a signalé au cours d'une excursion faite sous les auspices de la Société belge de Géologie, montre un fait des plus importants : ici le principe corrosif du dissolvant se forme au sein même du calcaire.

La roche d'un bleu clair contient de la pyrite et des matières charbonneuses; la pyrite en s'oxydant brûle le charbon en formant de l'acide carbonique qui attaque la roche.

Le calcaire se décolore, devient poreux par suite de la formation de poches microscopiques de dissolution et prend l'aspect crayeux; les fossiles, qui sont formés de calcite relativement pure, ne sont pas soumis à cette action désagrégante et résistent à l'altération. Cette roche n'étant pas homogène, les parties les plus pyriteuses s'altèrent davantage et l'on peut suivre les progrès de cette oxydation à plus d'un mètre de profondeur dans la roche.

A Amsin, M. Doudou m'a signalé un abîme, ou « crain », qui rappelle, mais en plus grand, l'Oucane de Chabrière (1). C'est un vaste klamm s'ouvrant à proximité de l'ampélite alunifère et au fond duquel on voit des galeries de grotte obstruées par l'éboulis (voir pl. X).

Les avens des Causses (2), souvent formés de puits alignés dans la direction Nord-Sud, sont des fractures agrandies par dissolution qui contiennent encore le dépôt résiduel d'argile rouge insoluble.

M. E. R. Cumings, dans les *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, 1905, présente dans son travail sur l'altération du calcaire par les eaux superficielles, de très beaux exemples de dissolution du calcaire carbonifère, dont certains montrent la formation de cañons, si fréquents dans ces régions.

MM. Barnes et Holroyd présentent, dans les *Mémoires de la Société de Spéléologie*, juillet 1900, un travail des plus intéressants sur la Blue John-Mine, caverne qui est à rapprocher de celles de nos régions liégeoises tant par sa situation géologique que par la curiosité de ses formations de stalactites, de minéraux (fluorine), de cuves de dissolution.

MM. Rutot et Simoens ont observé que les belles parois de 50 mètres de hauteur coupées au fil dans les carrières de Soignies

(1) L'Oucane de Chabrière, qui présente de si beaux phénomènes de dissolution, a été décrit par A. MARTEL dans le *Club alpin français*, décembre 1906.

(2) Voir MARTEL et GAUPELLOT, *Formation des avens des Causses*. (ACAD. DES SCIENCES DE PARIS, 1889.)

montraient de vastes poches d'altération qui n'étaient reliées à l'extérieur et entre elles que par de minces diaclases à peine perceptibles.

Résumé

L'altération du calcaire est un phénomène fort complexe résultant de sa dissolution :

1° Par l'acide carbonique qui se trouve en minime quantité dans les eaux météoriques, mais qui se forme en notable quantité par l'oxydation des matières charbonneuses des roches sous l'influence catalytique des composés de fer, ainsi que par l'action des sulfates d'alumine et de fer sur les carbonates ;

2° Par les eaux minéralisées sourdant des roches pyriteuses ou altérables.

Cette dissolution se fait avec dépôt d'une argile résiduelle, dont la composition, tant chimique que microscopique, est nettement différente de celle de l'argile des plateaux.

En présence de carbonate de chaux et de sels alcalins, l'opale et la calcédoine sont attaquées en formant des silicates alcalins solubles, des silicates de chaux presque insolubles.

C'est par ce processus que les silex des formations calcaires s'altèrent en se transformant d'abord en silicate de chaux qui conserve par moulage la forme du silex disparu. Une altération ultérieure enlève la chaux du silicate et il ne reste plus qu'un squelette très léger de silice.

L'altération des schistes pyriteux donne des produits solubles à réactions acides qui viennent se neutraliser au contact du calcaire, en donnant naissance à divers minéraux secondaires, tels que gypse, dolomie, sulfate de baryte, silicate de chaux, etc.

Conclusion.

Cette note ne fait qu'effleurer le sujet, étant donné le cadre restreint de mes recherches.

Les observations que j'ai faites et les matériaux d'étude dont je disposais, montrent néanmoins le rôle important que les phénomènes

purement chimiques jouent dans la formation, l'évolution ou l'altération des roches.

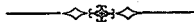
Plusieurs des résultats discutés ici avaient d'ailleurs déjà été entrevus par Bischof et Roth dans leur importante *Géologie chimique*.

Dès 1863, Bischof mit en relief le rôle de l'acide carbonique dans les phénomènes d'altération des roches superficielles; en 1881, M. E. van den Broeck appliqua ce principe à l'étude de nos terrains.

Mais la chimie est une science dont les moyens d'investigation s'étendent et se perfectionnent chaque jour. Aussi les méthodes modernes devaient-elles montrer la complexité des phénomènes qui amènent l'altération et les modifications des roches, et il est certain que des études plus approfondies feront voir dans toute son étendue la chaîne de réactions qui en relie les différentes phases.

Ces recherches rendront inutiles les nombreuses hypothèses auxquelles on a trop souvent recours actuellement pour en expliquer le mécanisme.

Laboratoire de géologie de l'Université.
Bruxelles, juin 1907.





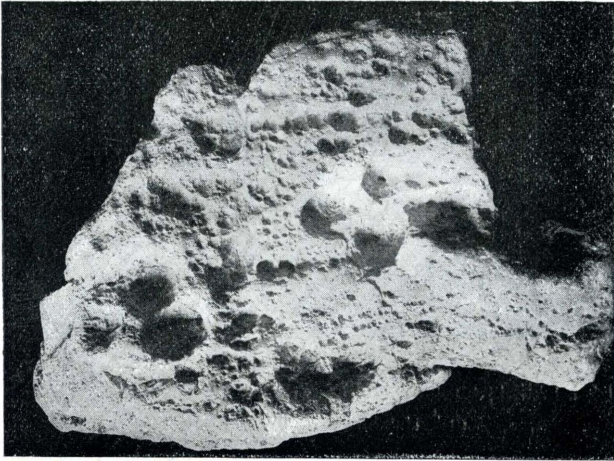
VALLÉE DU SAMSON.

Lithoclastes agrandies par dissolution avec formation de grotte mise en évidence par des travaux de carrière.



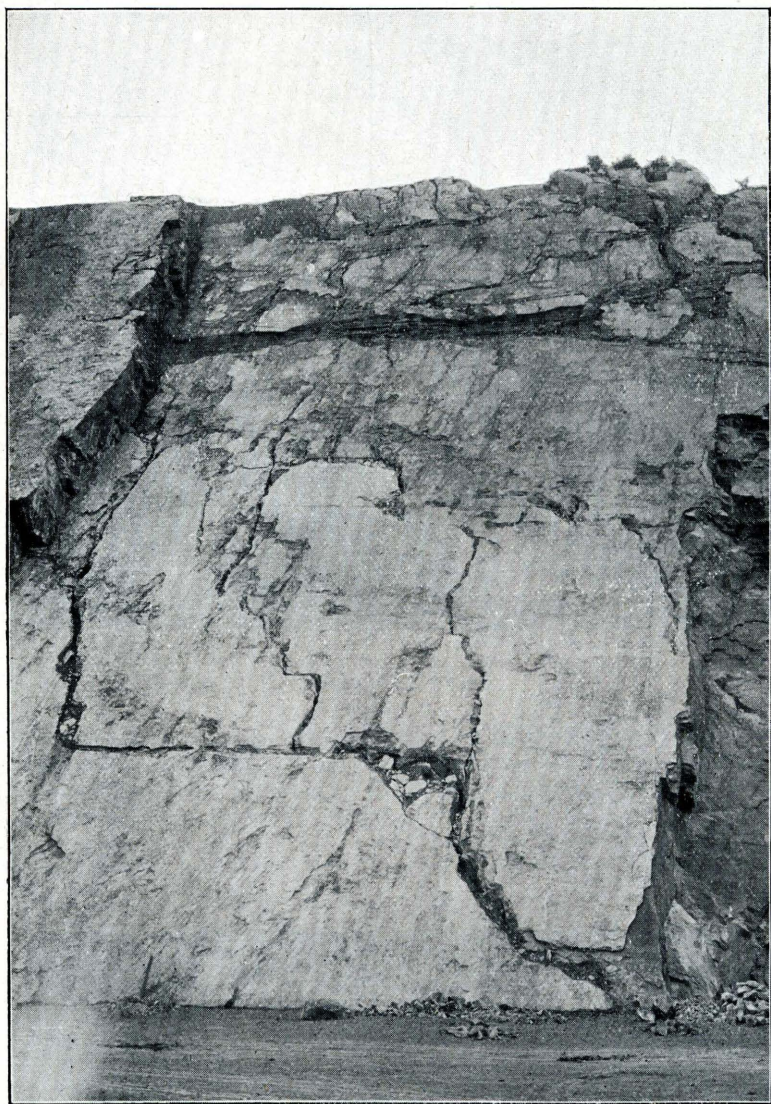
RAVIN DES AWIRS. A AIGREMONT.

Parois de contact entre le calcaire et le schiste alunifère. L'altération de la roche s'étend ici à une vingtaine de mètres en profondeur, en formant de nombreuses cavernes ou poches de dissolution, toutes hérissées des fossiles de la roche, formés de calcite moins soluble. L'argile résiduelle dans ces cavités contient divers minéraux sulfatés.



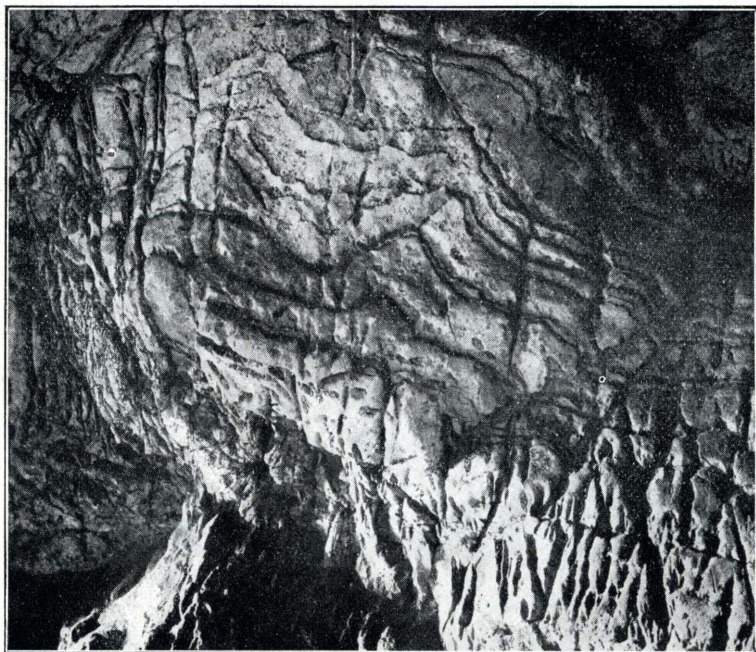
CALCAIRE CORRODÉ DE LA GROTTÉ DE ROSÉE.

Le grand axe des cupules est nettement souligné par le joint qui provoqua l'altération.



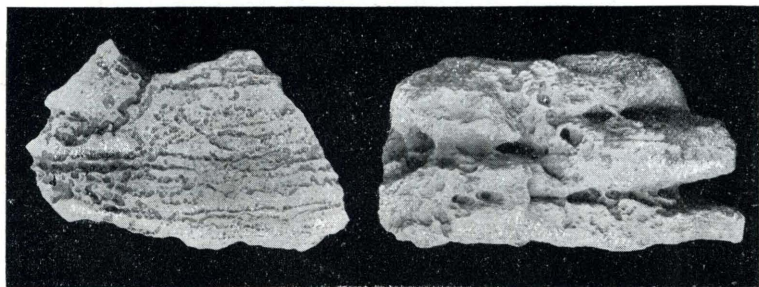
RAVIN D'AIGREMONT.

Parois de carrière d'une quarantaine de mètres de haut, montrant en coupe un réseau de galeries constituant un parfait schéma de grotte. Les chantoirs, les galeries horizontales, les puits verticaux y sont représentés. — On peut suivre tous les progrès de la formation de cette grotte qui se creuse par dissolution dans un joint presque vertical.



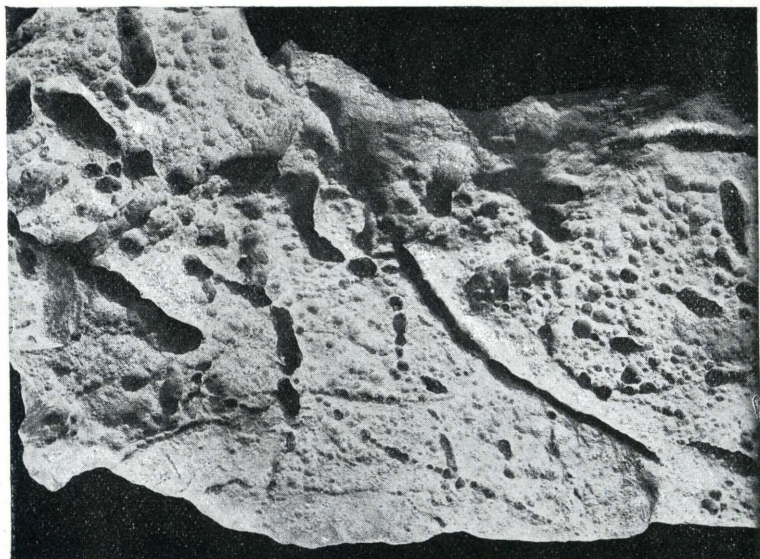
GROTTE DU GOYET.

Paroi corrodée de la grotte mettant la structure de la roche en évidence. — Les diaclases verticales recoupant les joints ondulés forment par leur intersection des poches de dissolution pénétrant de 40 à 50 centimètres dans le calcaire et dont le diamètre augmente souvent en profondeur.



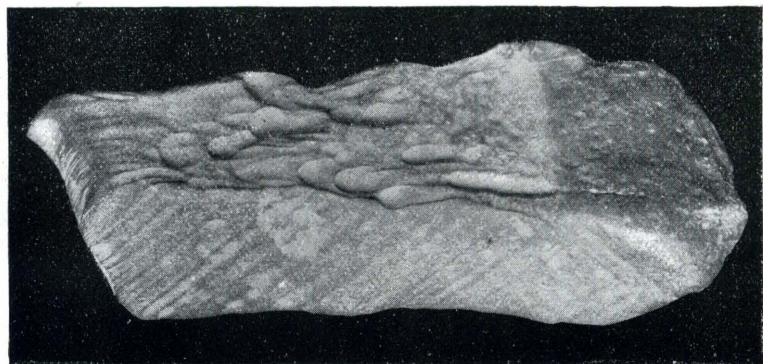
CALCAIRE CORRODÉ DE LA GROTTE DU GOYET.

Blocs arrachés à la paroi montrant des alignements parallèles des cupules, dont certaines les perforent complètement.



CALCAIRE CORRODÉ DE LA GROTTE DE ROSÉE.

Le grand alignement de cupules s'étend sur une longueur de 120 millimètres sur 4 millimètres de large et 33 millimètres de profondeur. — Les grandes cupules qui perforent le calcaire sont reliées entre elles par de petites galeries.



CALCAIRE CORRODÉ PAR DISSOLUTION dans les acides étendus, avec formation de cupules mettant en évidence par leur alignement les joints de la roche plus altérable. — C'est l'attaque d'un solide prismatique de calcaire carbonifère d'Engihoul d'aspect homogène dont les cupules profondes, surtout accentuées à la partie supérieure de l'échantillon, montrent que des différences, inappréciables dans la composition de la roche, provoquent néanmoins des figures de corrosion des plus importantes.



CRAIN D'AMPSIN.

Véritable klamm formé dans le calcaire au contact du schiste alunifère, mettant en évidence les mouvements et effondrements qui se produisent dans les massifs calcaires, résultant des poches de dissolution qui se forment en profondeur, par l'action de l'eau séléniteuse de l'ampélite, et de celle provenant des filons métallifères si nombreux dans cette région minière.