

TRADUCTIONS ET REPRODUCTIONS

DE LA

SOCIÉTÉ BELGE DE GÉOLOGIE

DE PALÉONTOLOGIE ET D'HYDROLOGIE

(BRUXELLES)

Tome XVI

(Deuxième série, tome VI)

ANNÉE 1902

BRUXELLES

HAYEZ, IMPRIMEUR DES ACADEMIES ROYALES DE BELGIQUE

112, rue de Louvain, 112

LES

ENSEIGNEMENTS DU GRAND CANYON

DU

COLORADO ⁽¹⁾

PAR

W. M. DAVIS

Il y a une cinquantaine d'années, le Grand Canyon (2) du Colorado, dans l'Arizona septentrional, n'était connu que par les récits insuffisants de quelques explorateurs. Actuellement, il se trouve dans le voisinage immédiat d'une des lignes transcontinentales de chemin de fer, et il est facile de l'explorer en détail, en élisant domicile dans l'un des hôtels situés sur ses bords. L'attention du monde scientifique fut attirée sur le canyon par Newberry, le géologue de l'expédition Ives (1857), dont le rapport fut publié en 1861. Il établissait clairement que cet immense abîme était l'œuvre du cours d'eau aidé par l'action des agents atmosphériques sur les parois. En 1868, Powell fit sa remar-

(1) Extrait de la *Géographie*, t. IV, n° 1, 1901, 15 nov., pp. 339-352 avec 4 figures dont les clichés nous ont été gracieusement prêtés. Cet article original de l'excellente Revue française résume certains points de vue spéciaux d'une étude d'ensemble de l'auteur publiée sous le titre : *An Excursion to the Grand Canyon of the Colorado*, dans le numéro 4 du volume V de la série géologique du *Bulletin of the Museum of comparative Zoology at Harvard College* (Cambridge, Mass.).

(2) Le texte ci-dessus étant une reproduction littérale, nous avons respecté la manière d'orthographier le mot canyon, adoptée par l'auteur, bien que notre *Bulletin* l'écrive généralement : cañon.

quable expédition en bateau le long du canyon; son récit, paru en 1876, est une des plus belles descriptions de voyage aventureux. Dix ans plus tard, Dutton explorait les plateaux situés au Nord et donnait une monographie de l'histoire du canyon pendant les temps tertiaires; elle est accompagnée d'un atlas renfermant les superbes planches dessinées par Holmes. Beaucoup de géologues ont visité la région dans ces dernières années, mais sans guère ajouter de faits nouveaux aux données publiées précédemment.

J'ai eu la bonne fortune de voir le canyon pendant l'été de 1900, en compagnie du professeur R. E. Dodge, de l'Université Columbia, de New-York, du professeur H. E. Gregory, de l'Université Yale, de New-Haven, et de quelques autres personnes. Nous pénétrâmes dans la région des plateaux par le Sud, à Flagstaff, Arizona; nous employâmes vingt-trois jours à la traverser, en campant en plein air, sur le sol. Nous en sortîmes par le Nord, à Milford (Utah), d'où le chemin de fer nous amena à Salt Lake City. Ce voyage a été très profitable, et, à part quelques heures de chaleur excessive, il se fit sans aucune difficulté. Si les géologues et les géographes européens connaissaient la facilité et l'agrément d'une pareille excursion à travers les plateaux, je suis persuadé que beaucoup d'entre eux l'entreprendraient. Tout au moins les touristes qui traversent le continent *via* Santa-Fé pourraient-ils, sans le moindre inconvénient, faire un léger détour pour aller visiter les rives du canyon.

Les résultats de notre expédition ont été consignés dans un numéro du *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College* (V. 4, 1901). On y trouvera les détails concernant les éboulements immenses tombés des falaises triasiques de Vermilion, les lignes de faille qui traversent le district des plateaux, la structure et la forme du canyon lui-même, enfin une hypothèse nouvelle qui regarde le Colorado comme un cours d'eau conséquent et non plus antécédent. Je n'ai ici pour but que de dégager une leçon qui ressort si bien de l'étude du canyon lui-même : celle de l'importance de l'érosion pour façonner le relief du globe. Les géologues sont familiers avec cette notion. Il me semble que les géographes la négligent trop souvent et ne peuvent par suite apprécier l'un des principaux objets de leur étude, la morphologie des terrains. Il est certain qu'une visite au canyon tendrait à modifier cet état de choses; car, en aucun autre point du monde, les effets de l'érosion ne se montrent avec une pareille simplicité et d'une façon aussi grandiose que dans la gorge que le Colorado s'est creusée à travers le plateau désertique.

Ce plateau est tout à fait typique. Il s'étend dans tous les sens, entaillé çà et là par un canyon, en se maintenant, sur de vastes étendues, à une altitude moyenne de 2,000 mètres. Il est borné au Nord par la muraille déchiquetée des falaises de Vermilion, immense falaise de grès triasiques. La surface du plateau est interrompue çà et là par les escarpements formés le long des lignes de fracture, de direction Nord-Sud, qui le divisent en un certain nombre de blocs; il est un peu courbé au point où le majestueux Kaibab se dresse à environ 700 mètres au-dessus de la région avoisinante. Il est orné de cônes volcaniques, dont les plus grands sont assez anciens pour avoir été dis-séqués par l'érosion et pour former le centre d'un système de vallées rayonnantes, tandis que les plus petits, qui sont plus récents, ont conservé la forme que leur a donnée l'éruption. Cependant ces accidents de terrain sont plutôt exceptionnels, et, dans son ensemble, le plateau constitue une région relativement plane, située à une grande altitude au-dessus du niveau de la mer. Ces traits sont particulièrement bien marqués dans les points où le visiteur entre en contact avec le canyon. On abandonne le chemin de fer principal au village de Williams, dans le voisinage d'un groupe d'anciens volcans. Un embranchement conduit le touriste à 96 kilomètres au Nord de ce point et l'abandonne en plein désert, avec une cabane comme abri (1); une voiture publique l'amène en deux heures jusqu'au bord du canyon; une route conduit à l'hôtel Bright Angel, où le plateau est couvert de cèdres et de pins; une autre à l'hôtel Grand View, à environ 25 kilomètres à l'Est, dans la grande forêt de pins de Coconino. Ces deux hôtels sont situés en face du milieu du puissant Kaibab, près de la partie la plus élevée du plateau bordant le canyon du côté du Sud. La voiture court à travers la forêt de pins souvent interrompue par des clairières. Sous les grands arbres pousse une maigre pâture qui nourrirait un troupeau, si l'eau pouvait être amenée; mais il n'y a ni source ni cours d'eau, et le seul agriculteur heureux de ce district est la « fourmi fermière », dont les petites collines de gravier, entourées d'une aire aplanie, sont abondantes. La surface du plateau est si unie qu'on a peine à s'imaginer que la route se trouve à 2,000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Tout à coup, on aperçoit la profonde déchirure du canyon. On comprend alors la hauteur du plateau; car, tout au fond de la gorge, se trouve le fleuve, qui, de loin, semble immobile, alors qu'il se précipite avec une grande rapidité pour atteindre l'Océan à 600 kilomètres dans

(1) On se propose, cette année, de pousser le chemin de fer jusqu'au bord du canyon.

le Sud-Ouest; et si la rivière, profondément encaissée, est au-dessus du niveau de la mer, les plaines qui bordent son canyon sont sûrement des plateaux.

Il est assez naturel que les anciens observateurs aient considéré les vallées étroites comme des fissures. Il n'y a pas lieu de s'étonner non plus que quelques géographes hésitent encore à croire que cette gorge ait été disséquée par la rivière qui coule au fond. D'après l'activité du courant et l'abondance de ses limons, l'esprit se refuse à concevoir le temps nécessaire à l'érosion graduelle du canyon et cherche instinctivement une théorie plus simple en apparence, pour expliquer son origine. Le canyon n'a pas seulement une profondeur de près de 2,000 mètres; sa largeur au sommet est comprise entre 18 et 24 kilomètres, et ses grandes murailles sont découpées par de nombreux golfes latéraux, séparés par autant de promontoires. Si le canyon est l'œuvre des agents ordinaires de destruction, non seulement le cours d'eau a enlevé toute une tranche du plateau, mais encore l'érosion a sculpté les deux parois de la gorge ainsi formée. Pendant ce travail, un énorme volume de roches a été entraîné vers la mer : les parois se sont progressivement écartées, à mesure que la profondeur devenait plus grande. On peut à peine croire que la terre soit assez ancienne pour qu'une œuvre pareille ait pu s'accomplir à sa surface.

Il ne servirait à rien de chercher à diminuer l'amplitude de cette action destructive, dans le but de la rendre plus facile à concevoir. Il est bien préférable de se représenter toutes les difficultés qu'a présentées l'érosion du canyon, afin de mieux apprécier la grandeur du travail accompli. Il faut envisager les lits rocheux constituant les parois, considérer leur dureté, parfois très forte, se pénétrer de la résistance extraordinaire qu'ils opposent aux agents atmosphériques; il faut se rappeler la sécheresse du climat et la rareté des précipitations qui donnent de l'eau aux petites vallées latérales; il faut sonder les profondeurs du canyon pour apprécier son immensité et pour mesurer l'énorme quantité de roches résistantes que les rares crues de la rivière ont dû entraîner. La croyance à la possibilité de l'érosion du canyon par l'eau et les agents atmosphériques ne doit pas être établie en amoindrissant le travail effectué par ces agents de destruction, mais bien en amplifiant la période pendant laquelle la terre a supporté les pluies et a vu ses limons transportés à la mer. De cette manière seulement, le canyon apparaîtra comme une vallée creusée par une rivière. Il n'y a pas de raison de penser que le travail effectué par la rivière ait jamais été plus actif qu'aujourd'hui; car le courant entraîne encore

dans sa course rapide de grandes quantités de sable et de débris divers. Il se peut que le climat de la région ait été autrefois plus humide que maintenant ; mais le fait n'est pas bien prouvé. La condition essentielle de la formation du canyon n'est pas un travail rapide, mais bien une durée suffisante. Comme l'observateur placé sur les bords du plateau s'efforce d'imaginer l'immense étendue des temps passés qui a été occupée par cette tâche colossale, il est excusable s'il conclut que le canyon a débuté de bonne heure dans l'histoire de la terre, pour être entaillé aujourd'hui aussi profondément et sur une largeur aussi considérable. Il devient logique pour lui de rechercher quelque autre preuve attestant que la terre a duré assez longtemps pour permettre la lente érosion du canyon, avant de se rallier entièrement à une croyance aussi difficile.

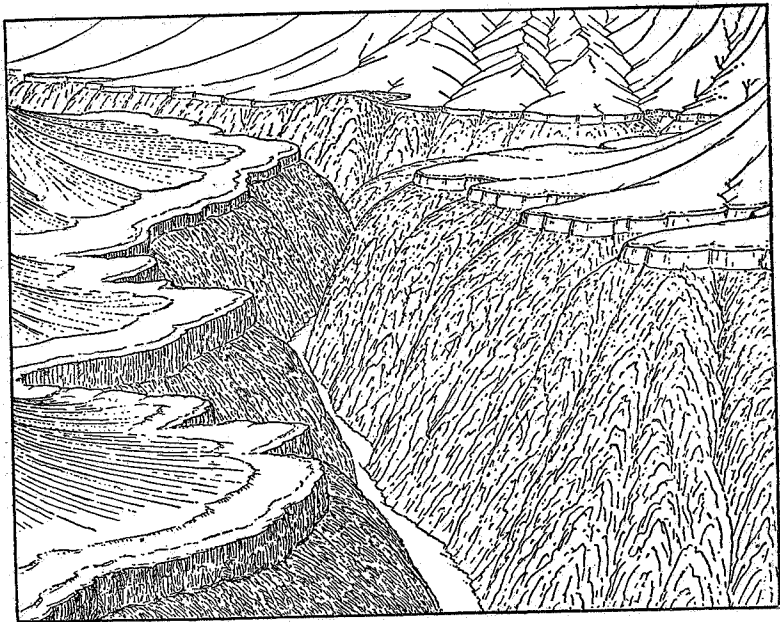


Fig. 1. — ESQUISSE DU CANYON DANS LES ROCHES CRISTALLINES FONDAMENTALES, BORDÉES PAR LA « PLATE-FORME DE GRAY » ÉTABLIE SUR LES GRÈS PALÉOZOÏQUES INFÉRIEURS (SÉRIE DE TONTO), QUI REPOSENT EN DISCORDANCE SUR LE TERRAIN CRISTALLIN. EN ARRIÈRE, UN MONTICULE DE ROCHES CRISTALLINES S'ÉLÈVE UN PEU AU-DESSUS DES GRÈS. VUE PRISE D'UNE ARÊTE DE LA MURAILLE ROUGE CALCAIRE, SUR LE SENTIER DE GRAND VIEW.

(Cliché prêté par la Revue française : *La Géographie*.)

Cette preuve supplémentaire est sous la main. Elle est fournie par la vue des parois du canyon ; et c'est sur l'évidence du travail énorme

de l'érosion et sur l'immensité du temps géologique que je désire attirer l'attention. Ces faits ne sont pas des découvertes récentes. Ils ont été clairement signalés par Powell et Dutton, mais les touristes, même instruits, ne les soupçonnent pas et les géographes méconnaissent trop souvent leur rôle dans la création des formes du terrain par dénudation et déformation. Loin d'occuper une longue période de l'histoire de la terre, l'érosion du canyon n'en est qu'un épisode récent. Il a succédé à de nombreux chapitres de cette histoire, dont chacun a eu une durée plus longue que lui; quelques-uns même ont eu une durée incomparablement plus grande.

Les couches composant le plateau sont essentiellement horizontales. Elles consistent en une puissante série de grès, de schistes et de calcaires paléozoïques, d'environ 1,500 mètres d'épaisseur, là où le canyon est entaillé à travers le Kaibab. Les roches les plus résistantes forment des corniches en saillie sur les parois du canyon; les plus tendres ont été émiettées par les intempéries et constituent des talus plus ou moins marqués. On constate très facilement cette disposition, en se plaçant sur le bord du plateau, ou mieux encore le long des sentiers qui conduisent au fond du canyon. Pas n'est besoin d'être géologue : cette histoire est écrite en traits si marqués et si clairs que le premier venu peut la lire. Vers le fond, en apparence près du fleuve, mais en réalité à 500 mètres au-dessus de lui, on constate une modification dans la structure des parois. Le grès qui sert de base à la série paléozoïque est supporté par des roches plus massives; ce sont des schistes cristallins très feuilletés et plissés, qui appartiennent, selon toute apparence, au groupe archéen, c'est-à-dire au terrain le plus ancien qu'on ait rencontré jusqu'à ce jour. Le contact du grès avec les schistes est un magnifique exemple de stratification discordante, sur lequel il importe d'appeler l'attention. Ces schistes cristallins plissés constituent les racines d'un massif montagneux disparu. On le reconnaît à leur déformation, à leur structure finement feuilletée et à leur texture cristalline. La déformation exige qu'au moment où elle s'est produite, toute la surface de la région ait été aussi plissée, de façon à former des montagnes abruptes et de grande altitude; actuellement, les schistes sont tronqués sur un même plan au-dessous du grès paléozoïque. Le plissement de leurs feuilletés prouve qu'à l'époque de leur déformation, ils étaient recouverts par un poids énorme de roches superposées; leur texture cristalline conduit à la même conclusion, car elle ne peut s'être produite qu'à une grande profondeur au-dessous de la surface du globe. Les terrains sédimentaires du plateau ne peuvent pas avoir pesé sur

les schistes à l'époque de leur cristallisation et de leur plissement, car la déformation de ceux-ci n'a pas eu de répercussion sur le grès superposé. Les schistes ont donc acquis leur structure définitive avant le dépôt des grès. La masse supérieure existant alors devait être formée, en majeure partie, par la continuation des schistes eux-mêmes. Ceci confirme les résultats tirés de l'étude de leur déformation générale. Il est donc hors de doute qu'ils devaient autrefois s'élever sous forme de montagnes au-dessus de la surface tronquée et aplanie, actuellement visible sur les parois du canyon. Avant le dépôt des grès inférieurs, ces montagnes ont non seulement été comprimées lentement et soulevées, mais plus lentement encore, elles ont été disséquées par des vallées et ont vu leur altitude diminuer, jusqu'à ce qu'enfin elles fussent transformées en une plaine basse produite par la dénudation. Ces phénomènes ont exigé une durée incomparablement plus longue que l'érosion du canyon actuel. Sur les parois escarpées de celui-ci, la dénudation est rapide par rapport aux périodes géologiques, quelque lente qu'elle puisse nous paraître. Au contraire, pendant les derniers stades de la dénudation, l'érosion n'a pu agir qu'avec une extrême lenteur sur les anciennes montagnes schisteuses, à contours beaucoup plus adoucis. On ne saurait, d'ailleurs, déterminer si elles ont été détruites par les flots de la mer ou par les agents atmosphériques. Mais il est hors de doute que cette abrasion s'est exercée sur des centaines de kilomètres carrés. Cette œuvre immense s'est accomplie avant que les terrains des plateaux ne fussent déposés, par suite bien longtemps avant que le canyon pût commencer à se creuser.

Mais ce n'est pas tout.

Lorsqu'on se dirige vers l'Est, en suivant le bord du plateau, de Bright Angel à l'hôtel de Grand View, on découvre de nouveaux détails intéressants dans la structure des parties profondes du canyon. Entre les schistes cristallins et le grès paléozoïque se trouve intercalée, en forme de coin, une épaisse série de roches stratifiées, qu'on attribue à l'Algonkien, et qui consiste en schistes argileux, en grès et en matériaux volcaniques formant des couches inclinées, comme on le voit sur la figure 2. Le terme le plus profond de cette série de roches stratifiées, constitué par un conglomérat grossier de fragments cristallins, repose, comme les grès paléozoïques inférieurs, sur une surface, tronquée et nivelée, de schistes qui, eux aussi, ont été autrefois une plaine basse de dénudation. Les terrains paléozoïques, qui reposent ailleurs sur les schistes cristallins, recouvrent ici la surface aplanie de l'Algonkien. Une nouvelle complication s'introduit ainsi dans l'histoire de la

région. Les anciennes montagnes schisteuses ont dû être, d'abord, abrasées avant le dépôt de la formation algonkienne. Celle-ci s'est déposée en couches horizontales de près de 3,000 mètres d'épaisseur; puis la masse complexe formée par les schistes et l'Algonkien superposé s'est inclinée vers le Nord-Est d'environ 25° (voir la figure). Enfin la partie supérieure de la masse a été emportée, de façon à former la surface à peu près plane où le grès qui commence la série paléozoïque s'est déposé.

L'ordre chronologique des phénomènes est donc le suivant : 1° formation des roches archéennes; 2° leur transformation en massif montagneux plissé, en même temps que leur texture devenait schisteuse; 3° érosion graduelle de ces montagnes et production de la

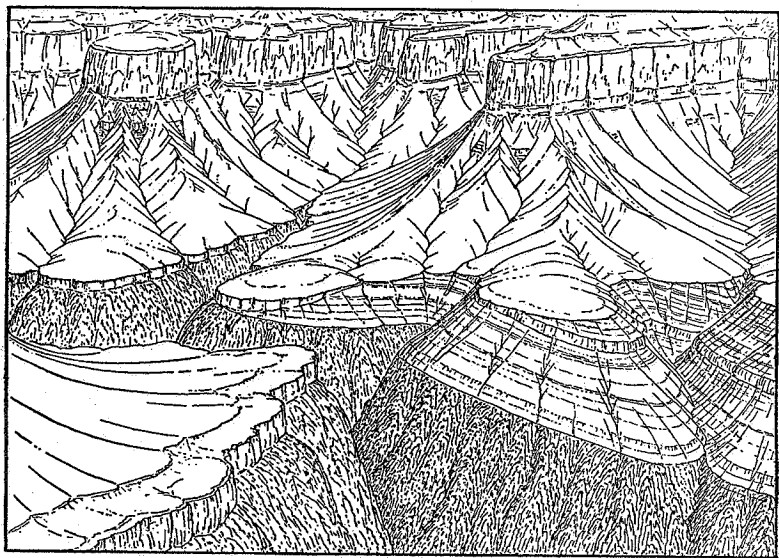


Fig. 2. — ESQUISSE DU « COIN » ALGONKIEN ENTRE LES ROCHES CRISTALLINES FONDAMENTALES ET LA SÉRIE PALÉOZOÏQUE HORIZONTALE. VUE PRISE DU BORD DU PLATEAU, PRÈS DE L'HÔTEL GRAND VIEW.

Une petite faille est visible près du sommet du « coin ».

(Cliché prêté par la Revue française : *La Géographie*.)

plaine sous-algonkienne; 4° dépôt, sur une épaisseur de près de 3 kilomètres, de la série algonkienne pendant un lent affaissement de la région; 5° inclinaison lente de tous ces terrains, puis soulèvement d'une portion de cette masse jusqu'à former tout au moins des collines; 6° lente dénudation de ces masses inclinées et constitution d'une plaine par abrasion des schistes profonds aussi bien que des couches

algonkiennes; 7° pendant une période d'affaissement, dépôt de la série paléozoïque, dont l'épaisseur atteint 1,500 mètres. Voilà donc sept chapitres de l'histoire de cette région, dont chacun a exigé une durée bien plus longue que le creusement du canyon. On ne peut rien affirmer de précis sur la durée nécessaire à la formation des schistes et aux divers mouvements de déformation et de plissement que toutes ces roches ont subis; cependant, on peut penser que ces phénomènes ont exigé un long intervalle de temps. Mais nous pouvons mieux apprécier l'immensité de la durée des deux dénudations qui ont donné naissance aux plaines inférieures à l'Algonkien et au Paléozoïque, et la durée de deux autres dénudations qui, produites en quelque autre point du globe, ont fourni les matériaux dont sont formées les couches algonkiennes et paléozoïques. On peut se convaincre que chacun de ces chapitres a exigé un temps beaucoup plus long que celui nécessité par le creusement de l'étroit canyon actuel. Lorsqu'on tient compte de ces faits, on voit que l'érosion du canyon, loin d'occuper une grande période dans l'histoire de la Terre, n'est guère mieux qu'un hors-d'œuvre qui a suivi l'accomplissement d'œuvres infiniment plus grandioses et plus longues. Mais ce n'est pas tout encore.

La surface du plateau dans lequel est entaillé le canyon est si plane qu'on pourrait penser qu'elle représente une plaine primitive formée par les couches superficielles de la série paléozoïque. Mais il est loin d'en être ainsi. Le plateau s'étend vers le Nord et l'Est jusqu'aux escarpements triasiques des falaises Vermilion et Écho. Celles-ci constituent les termes inférieurs d'une série de marches gigantesques ou de terrasses, formées par l'érosion rétrograde de strates mésozoïques et parfois tertiaires, de consistance très variable et d'une épaisseur moyenne de près de 2 kilomètres. Il y a tout lieu de croire que les terrains mésozoïques se continuaient autrefois très loin vers le Sud et recouvraient le plateau; Dutton a fourni les arguments géologiques qui démontrent cette conclusion. La surface du plateau n'est donc pas une plaine primitive, mais bien une plaine produite par la disparition d'une énorme série de roches superposées sur une étendue « aussi vaste qu'un empire », une vraie plaine d'érosion d'un cycle complet de dénudation et de dissection. Les premiers stades de cette dénudation ont été caractérisés par la formation de canyons profonds et étroits, à peine inférieurs à ceux du Colorado actuel. Ils se sont transformés progressivement, à la période de maturité, en un réseau de vallées séparées par des collines. Dans les derniers stades longtemps continués, ces vallées se sont élargies, en même temps que les collines

diminuaient de hauteur, jusqu'à ce que de la dégradation générale du sol résultât enfin une vaste plaine. Si haut que soit aujourd'hui le plateau, sa surface devait être, à l'origine, peu élevée au-dessus du niveau de la mer. Ce n'est que plus tard que le terrain a été soulevé à son altitude actuelle, et c'est seulement après le soulèvement de cette dernière des trois plaines de dénudation que l'érosion du canyon s'est accomplie.

Il y a donc deux nouveaux chapitres à ajouter à l'histoire de la région. L'un (8^e stade) consiste dans le dépôt des formations mésozoïques, l'autre (9^e stade) dans leur disparition. Chacun d'eux a été beaucoup plus long que l'épisode du creusement du canyon. Des bords de celui-ci, on ne peut constater l'existence de ces deux nouvelles phases. Cependant, on voit, à l'Est de Grand View Hôtel, dans le lointain, quelques parties des escarpements triasiques et jurassiques. On se convaincra de la réalité de ces dépôts suivis d'érosion, si l'on fait une promenade autour des parties septentrionale et orientale du plateau. On verra alors les escarpements déchiquetés des terrains mésozoïques en retrait sur ses bords.

Ainsi est révélée, par les bords du canyon, l'histoire réelle de toute cette région du globe. Les vastes perspectives des temps géologiques s'ouvrent devant l'œil de l'observateur, et le développement des traits géographiques actuels se trouve expliqué par l'évolution de la Terre dans le passé. On voit toute la série des époques se succéder. Les roches cristallines du fond du canyon, dérangées de leur état initial, représentent le terrain archéen, c'est-à-dire la base des formations géologiques. Elles ont aussi leur histoire que nous ne connaissons pas encore, mais qui a certainement été de très longue durée, et qui, sous l'action d'une profonde dénudation, s'est terminée par leur aplanissement. Au-dessus vient la formation algonkienne, qui correspond à une période des terrains stratifiés semblant antérieure à la naissance des êtres vivants. Cette grande série de couches arides, dépourvues de fossiles, est, dans cette région, séparée des formations paléozoïques par un grand soulèvement suivi d'une vaste dénudation. Les couches horizontales des parois du canyon représentent les principaux termes de la série paléozoïque, c'est-à-dire une division excessivement longue de l'histoire de la Terre. Les dépôts mésozoïques qui les recouvrent correspondent à une période de temps à peine plus courte. L'époque tertiaire a été employée surtout à la dénudation de la formation mésozoïque et à l'aplanissement de la surface du plateau actuel. Ainsi, ce sont seulement les époques tertiaire récente et quaternaire qui restent pour le creusement du canyon. Loin d'envahir toutes les galeries du

temps, l'histoire du canyon occupe seulement le portail le plus rapproché, à travers lequel nous pouvons évoquer les anciennes perspectives. Le canyon est une jeune vallée, précoce, merveilleuse, magnifique, mais non vénérable.

Mais, pourrait dire le géographe, que nous importe cette histoire géologique? L'objet de notre étude est le présent; abandonnons ces spéculations au géologue, et occupons-nous de nos propres affaires. Ce point de vue est faux : il est de la plus haute importance pour le géographe, tout en s'occupant des choses d'aujourd'hui, de les placer dans leur propre milieu, c'est-à-dire de les éclairer à la lumière de leur histoire, de leur évolution. Il est inutile d'approfondir les spéculations géologiques; l'exemple cité ici est des plus simples. Il n'est pas nécessaire de se perdre dans un flot de détails; les minéraux contenus dans les schistes archéens, les fossiles caractéristiques des séries paléozoïques peuvent rester inconnus au géographe; mais il faut qu'il connaisse le développement général du canyon, ainsi que celui des autres accidents remarquables de la surface terrestre. C'est ainsi que celui qui étudie le français n'a pas besoin d'approfondir l'étude du latin, mais il doit au moins en connaître les éléments et savoir que, de l'une des branches suivant lesquelles il a évolué dans les temps modernes, s'est dégagée la langue française. De même l'étudiant en géographie doit être pénétré de cette notion fondamentale, basée sur ses propres observations et non pas seulement sur ses lectures, que les traits actuels du paysage ont leur cause dans le passé. En présence des Alpes, il n'en appréciera pas la grandeur, s'il les suppose éternelles. Il doit rétablir par la pensée leur évolution, voir en imagination les couches dont elles sont formées se déposant lentement au sein des mers, se plissant, ensuite, de façon à former ces puissantes chaînes de montagnes, enfin se représenter la plaine qui leur succédera, lorsque la dénudation aura, plus lentement encore, achevé son œuvre. Dès lors, l'état actuel de vigoureuse maturité de ces montagnes ne paraîtra qu'un stade transitoire entre la simplicité de formes de leurs débuts et la simplicité, plus grande encore, de leur extrême décrépitude. Cependant, en voyant les Alpes se dresser devant lui, il pourrait hésiter à croire qu'elles puissent jamais être détruites par l'érosion; qu'il se rappelle alors les traces de montagnes disparues que nous offrent les parois du canyon du Colorado, et qui semblent avoir été conservées tout exprès pour étayer sa croyance dans l'évolution des formes géographiques.

S'il est vrai que les accidents du sol ont une histoire, la succession des formes produites durant ce qu'on a nommé un cycle géographique

mérite une étude spéciale. On désigne ainsi le temps nécessaire pour détruire une masse de terrain soulevé, et en faire une plaine, sans caractères distincts, dont le niveau est à peu près celui de la mer. Il sera plus long s'il s'agit de roches résistantes placées dans un climat sec; relativement court, lorsque des roches friables se trouveront exposées à un climat humide. En tous cas, la durée de ces cycles ne saurait être mesurée en années; elle peut correspondre à une ou deux de nos périodes géologiques. Le stade initial consiste dans l'établissement de jeunes cours d'eau conséquents sur les flancs des surfaces soulevées par déformation. Au cours des stades suivants, l'œuvre de destruction continue; mais bien des caractères nouveaux se développent, à mesure que les rivières conséquentes entament plus profondément le niveau de base et que les cours d'eau subséquents s'allongent, en attaquant

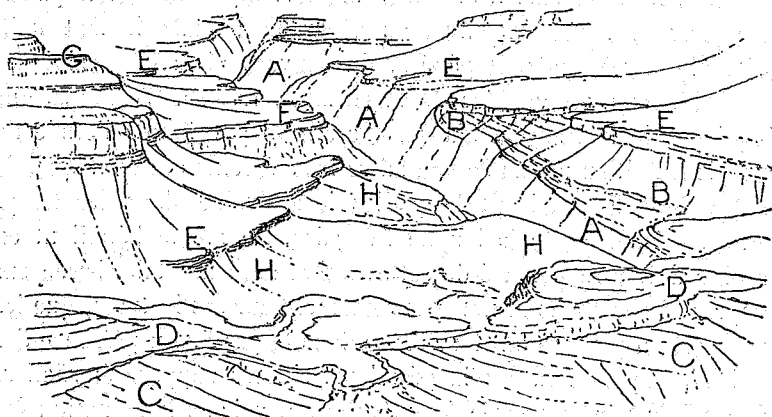


Fig. 3: — DÉTAIL DE LA PARTIE CENTRALE DE LA FIGURE 4. (Hors texte.)

- A. Roches cristallines fondamentales.
- B. « Coin » algonkien sur le flanc éloigné du canyon.
- C. H. Strates du plan monoclinial algonkien sur le flanc rapproché du canyon.
- D. Éperon de schistes argileux horizontaux de Tonto.
- E. Plate-forme de Gray dans les schistes argileux de Tonto au-dessus des escarpements de grès de Tonto.
- F. Éperon de la série de Tonto d'où l'on voit le mieux le « coin » algonkien.
- G. Éperon du Calcaire de la muraille rouge sur le sentier de Grand View, d'où la vue de la figure 1 a été prise.

(Cliché: prêté par la Revue française : *La Géographie*.)

les parois des vallées subséquentes. A l'approche du stade ultime, l'activité de la jeunesse, la vigueur de la maturité s'éteignent, et une longue période de tranquillité et de repos s'établit. Le développement normal du cycle peut être interrompu par de nouveaux mouvements du



Fig. 4. — LE GRAND CANYON DU COLORADO DANS L'ARIZONA SEPTENTRIONAL, A L'OUEST DE BISSEL'S POINT.
Photographié par *The Detroit Photographic Company*, Détroit, Michigan.
(Voir l'explication de la fig. 3.)

sol, qui élèvent l'altitude du terrain par rapport au niveau de base. Mais les mêmes phénomènes reprennent ensuite et finissent toujours par produire des formes très simples du sol.

L'étude du canyon du Colorado, et c'est là un de ses grands avantages, montre que le cycle géographique n'est pas une simple vue de l'esprit, car on y saisit clairement les stades ultimes de la dénudation atteints dans trois cycles anciens. Dans chacun d'eux, malgré les troubles et les interruptions, la dénudation a été complète, et la réalité de la terminaison du cycle prouve l'existence de tous les stades intermédiaires. La vue du canyon est bien près d'être inutile pour l'observateur s'il n'en retient pas cette inestimable leçon. Ce ne sont pas les gorges étroites et les canyons encaissés, mais bien les plaines produites par l'érosion qu'il convient de prendre pour preuves de la puissance destructive des agents qui façonnent la surface terrestre. Ce ne sont pas les profondes vallées et les hauts sommets des vigoureuses montagnes des Alpes, mais bien les plaines qui ont succédé aux anciennes montagnes de la Bretagne, qui nous montrent la plus impressionnante leçon de sculpture terrestre. Et si l'on hésite à accepter cet enseignement, qu'on aille visiter le Grand Canyon, où il se présente d'une manière aussi élémentaire que convaincante.

On se rend le mieux compte des deux discordances du Canyon, de Bissel's Point, promontoire situé à 12 kilomètres à l'Est de Grand View Hôtel. Pour l'étudier avec plus de détails, il convient de descendre le sentier du Grand View et de suivre la « Gray Platform », établie par l'érosion dans le grès de la base du Paléozoïque (grès de Tonto) jusqu'à une arête (fig. 3, en F) qui fait saillie sur la paroi méridionale du canyon dans les couches cristallines, juste en face du sommet du coin algonkien sur la muraille septentrionale. On voit alors que les couches cristallines contiennent des dykes irréguliers de granite rougeâtre, qui sont, de même que les schistes, aplanis de façon à former une surface remarquablement unie sur laquelle reposent les conglomérats inférieurs de l'Algonkien. Près de la base de ceux-ci, on remarque une intrusion de diabase. Enfin, on constate que le versant Nord-Est du pli monoclinale de la série algonkienne est interrompu par plusieurs petites failles. Mais l'intrusion de la diabase et la formation des failles doivent être antérieures au dépôt des roches paléozoïques, car la surface plane par laquelle se termine l'Algonkien se continue sans interruption en passant sur la diabase et les failles. L'Archéen n'a pas été abrasé d'une façon aussi parfaite que l'Algonkien. En effet, on voit dans le canyon une éminence de roches cristallines qui s'élève assez haut pour inter-

rompre la continuité du grès de Tonto. De même, un certain nombre de strates de quartzites de l'Algonkien inférieur ont conservé un relief suffisant pour interrompre les grès de la base. Mais ces inégalités perdent toute importance lorsque l'on considère combien les reliefs qui ont été enlevés étaient plus puissants. Aux endroits où le canyon a été découpé dans les roches cristallines, il est étroit et ses parois sont abruptes. Mais en face de Bissel's Point, où l'on rencontre quelques-unes des couches algonkiennes les plus friables, le canyon est relativement large, présentant ainsi une section que l'on ne voit nulle part ailleurs dans la traversée du Kaibab, ce qui montre bien que sa forme dépend de la consistance de ses parois.

De Grand View Point, à 2 kilomètres de l'hôtel, on peut voir quelques affleurements du « coin » algonkien, dans des canyons latéraux situés au Nord du fleuve, en aval de l'arête de grès de Tonto. Dans le canyon de Bright Angel Hôtel, on peut en voir une autre portion située à 10 kilomètres au Nord de la rivière. Ainsi la continuité du pli monoclin algonkien sous le Kaibab est hors de doute. A l'embouchure du canyon de Bright Angel, on peut voir un autre « coin » du même terrain plus petit et séparé du pli principal; mais il est beaucoup moins intéressant que la coupe de la série algonkienne située en amont de la rivière. Le géographe aussi bien que le géologue ne devraient pas manquer de suivre le bord du plateau à l'Est de la terminaison du chemin de fer, au moins jusqu'à Bissel's Point, pour avoir la vue la plus impressionnante de la section si éloquente des parois du canyon.

W. M. DAVIS.

Harvard University.
Cambridge, Mass.



S U R
LES
RÉCENTES EXPLORATIONS SOUTERRAINES

ET LES
PROGRÈS DE LA SPÉLÉOLOGIE (1)

PAR
E.-A. MARTEL

L'étude scientifique de *cavités naturelles du sol* (grottes, abîmes, sources) n'a commencé qu'en 1774, lorsque Esper eut établi que les ossements des cavernes de Franconie (Gaylenreuth) appartenaient à des espèces animales éteintes et non pas à des géants humains. Mais longtemps après et jusqu'à ces dernières années subsistèrent, au sujet des grottes, une foule d'erreurs et de préjugés. Successivement la paléontologie, l'anthropologie, la zoologie s'aperçurent que les cavernes leur fourniraient de vastes champs d'observations nouvelles. L'Autrichien Schmidl, en 1850, fut le premier à se risquer en barque dans les rivières souterraines du Karst (Recca, Adelsberg, Planina, etc.) et à en dresser, avec l'ingénieur Rudolph, de bons plans topographiques.

Il n'y a guère que vingt ans que ses aventureuses investigations ont été reprises sur un plan d'ensemble en Autriche par MM. Hanke, Marinitsch, Müller, Putick, Hrasky, Ballif, Kraus, Riedel, Kriz, Fugger, Siegmeth, etc. Plus récemment encore (1888), j'ai appliqué avec M. Gaupillat, pour la première fois, l'usage du téléphone portatif et des bateaux démontables aux explorations souterraines, et inauguré en France la visite méthodique des grands abîmes ou puits naturels des régions calcaires, particulièrement des Causses. Les découvertes ainsi effectuées et étendues jusqu'en 1900 sans interruption, dans les diffé-

(1) Extrait du *Compte rendu* du VIII^e Congrès géologique international, 1900.

rents pays d'Europe, ont, pour ainsi dire, renouvelé de fond en comble la *science des cavernes*, la *Höhlenkunde* des Allemands, qui, sous le nom français de *spéléologie*, tend de plus en plus à devenir une petite branche spéciale des sciences naturelles, grâce aux résultats inattendus que ses adeptes, de plus en plus nombreux, obtiennent chaque année, particulièrement dans le domaine de la géologie et de l'hydrologie.

C'est pourquoi il m'a paru opportun de présenter ici un très sommaire tableau des principaux de ces résultats, les uns réfutant des hypothèses fausses jusqu'alors acceptées comme vraies, les autres confirmant matériellement des théories justes seulement esquissées, beaucoup surtout apportant des notions absolument neuves.

Topographiquement d'abord, on a réduit bien des exagérations : la grotte de Saint-Marcel (Ardèche) n'a que 2 kilomètres au lieu de 7 d'étendue, — celle de Mammoth-Cave (Kentucky, États-Unis), 50 ou 60 au lieu de 241, — les plus creux abîmes connus (Trebic : 521 mètres et Kacna-Jama : 305 mètres, dans le Karst ; Chourun-Martin : 510 mètres en Dévoluy, etc.) ne dépassent guère 500 mètres de profondeur, au lieu des kilomètres qu'on leur attribuait, — les plus vastes cavernes d'Europe sont Adelsberg (10 kilomètres) en Autriche, Agtelek (Hongrie), 8^{km},7 ; Planina (Autriche), 7^{km},5 ; Bramabiau (Gard), 6^{km},5, etc.

Quatre ouvrages récents ont bien mis au point ce que l'on savait des cavernes à la fin du XIX^e siècle :

CVIJIC, *Das Karst-Phänomen*, in-8°. Vienne, 1895.

MARTEL, *Les abîmes*, in-4°. Paris, 1894.

KRAUS, *Höhlenkunde*, in-8°. Vienne, 1894.

MARTEL, *La Spéléologie*, in-12. Paris, 1900.

Voici le résumé des notions corrigées, confirmées ou nouvelles que l'on y trouvera sur les cavernes.

Conformément aux idées de Schmerling, Virlet d'Aoust, Desnoyers, Daubrée, etc., *les cavités naturelles du sol ne se rencontrent en principe que dans les formations géologiques compactes mais fissurées*, — et les principales causes de leur formation doivent être réduites à deux : la *préexistence des fissures de roches* (failles, diaclases, joints de stratification, etc.) et le *travail des eaux d'infiltration*.

Ce travail des eaux s'exerce par le triple effet de la *corrosion* (action chimique), de l'*érosion* (action mécanique) et de la *pression hydrostatique* (mise en charge sous plusieurs atmosphères de pression, dans les puits naturels ou les hautes diaclases formant réservoirs naturels).

Il faut retenir avant tout que *les fissures du sol ont été, à l'origine, les directrices générales des cavernes*.

Par exception, il y a des grottes d'*entraînement* dans les parties sableuses des *grès* de Fontainebleau ou des *dolomies* des Causses, etc., — de *dissolution* dans les gypses et les *sels gemmes*, — d'*explosion* et de *refroidissement* dans les terrains et coulées volcaniques, — etc.

Les tremblements de terre, les anciennes eaux thermales, les expansions de gaz, les décompositions organiques, etc., n'ont pas du tout l'importance qu'on leur a parfois attribuée dans la genèse des grottes.

La controverse sur la prépondérance de l'*érosion* ou de la *corrosion* des eaux est absolument oiseuse : la plupart du temps, ces deux modes d'action s'exercent concurremment ; la corrosion l'emporte dans le gypse et le sel gemme, et l'érosion parmi les grottes des roches volcaniques (silicatées) et des rivages marins. Pour les calcaires, il est impossible de déterminer la part précise de chacun de ces deux modes. En tous cas, *on ne peut plus admettre l'opinion qui voulait que l'action mécanique de l'eau fût écartée comme phénomène générateur des cavernes* (Éd. Dupont).

Les eaux d'infiltration pénètrent dans les sols fissurés propres à la formation des cavernes de deux manières : par *suintement* goutte à goutte dans les fentes menues, même imperceptibles, — par *absorption* en filets ou courants dans les *entonnoirs* (pertes, bétoires, etc.) bouchés et impénétrables, les *cavernes* à pente douce ou rapide, que l'on peut suivre plus ou moins loin, et les *abîmes* ou *puits naturels verticaux*, dernière conquête des spéléologues.

La confusion des nomenclatures des différents pays ou même des diverses provinces d'une seule nation est absolument inextricable en ce qui touche les points d'absorption, cependant aisés à classer dans l'une des trois catégories ci-dessus.

A l'intérieur des sols fissurés, les eaux s'écoulent en vraies *rivières* absolument analogues à celles de la surface du sol, par un réseau de canaux convergeant des petits aux grands, avec tous les accidents connus des confluent, cascades, rapides, deltas, îlots, et même petits lacs, le tout sous les voûtes de cavernes tantôt basses jusqu'à être immergées dans l'eau, tantôt élevées jusqu'à 90 mètres (Padirac dans le Lot, la Recca dans le Karst) au-dessus du courant souterrain.

Dès 1833, Arago niait l'existence dans les terrains fissurés (calcaires surtout) de véritables *nappes d'eau*, c'est-à-dire de surfaces d'eau continues et étendues dans tous les sens, comme dans les terrains sablonneux (nappes phréatiques, artésiennes, Grundwasser, etc.). M. Daubrée a insisté aussi pour demander la proscription du terme *nappes d'eau* dans le calcaire. J'ai matériellement démontré, par mes explorations, combien était juste cette idée des deux grands savants, et je ne cesse de demander, comme eux, qu'on n'applique l'expression *nappes d'eau*

qu'aux terrains meubles, fragmentaires, incohérents, détritiques, où il y a réellement *imbibition* de toute la masse, grâce à son peu de cohésion et au rapprochement extrême des interstices. Il est fâcheux de voir que des ingénieurs distingués et même encore quelques géologues s'obstinent à qualifier de *nappes d'eau* les réserves liquides accumulées et circulant dans les poches, les couloirs, les galeries, les cheminées qui séparent les unes des autres, à des distances souvent kilométriques, les parties par elles-mêmes *compactes* (sauf en ce qui concerne l'eau de carrière) des polyèdres que les mouvements de l'écorce terrestre ont découpés dans les calcaires, les craies, etc. Quelques auteurs ont proposé, pour faire l'accord, le terme de *nappes discontinues* : il est inutile d'expliquer comment ces deux mots en bon français sont inconciliables. Et il faudra que, tôt ou tard, nos opposants se résignent à remplacer, pour les terrains fissurés, leurs malencontreuses *nappes d'eau* par les *poches* et *courants* qui sont la vérité empiriquement établie maintenant. C'est ainsi que Vaucluse, l'illustre fontaine provençale, est le débouché d'un *fleuve souterrain* et non pas l'*affleurement* d'une *nappe*, quoi qu'en puisse dire la légende de la feuille *Forcalquier* de la Carte géologique de France au 80000^e, etc. Les plus grands *lacs* souterrains connus n'atteignent pas 100 mètres de largeur, et, dans la forme des réservoirs *naturels du calcaire*, ce sont toujours *longueur, hauteur et étroitesse* qui l'emportent de beaucoup.

Les fameux *puits de diamant* creusés depuis 1894 par le professeur Nordenskjöld dans les formations *granitiques* de la Suède, où la fissuration avait créé des citernes naturelles inespérées, achèvent de battre en brèche l'extension exagérée de la théorie des nappes d'eau, qui doit se limiter, répétons-le encore, aux terrains meubles ou poreux.

A l'extérieur des sols fissurés, les eaux souterraines effectuent leur sortie en des *points d'émergence* toujours situés, bien entendu, à un niveau inférieur à celui des *points d'absorption*.

Ces points d'émergence sont tantôt impénétrables à l'homme, tantôt, au contraire, ouverts en vastes cavernes, où l'on a pu plus ou moins loin remonter le fil de l'eau à l'intérieur du sol (pendant 7 kilomètres à la grotte de Planina, Autriche, d'où jaillit la rivière souterraine de la Piuka, absorbée par la caverne d'Adelsberg). Nous verrons plus loin comment et pourquoi il importe de ne pas considérer ces points d'émergence comme de vraies sources, mais comme des *résurgences*.

Résumons d'abord l'hydrologie souterraine des terrains fissurés par la formule suivante :

Les eaux d'infiltration y sont absorbées par les pertes, abîmes et menues fissures du sol, emmagasinées dans les cavernes et rendues ou débitées par les résurgences.

Et complétons ensuite cette loi générale par certaines autres données plus détaillées, mais non moins essentielles.

L'*origine des abîmes* ou puits naturels, caractérisés avant tout par leur verticalité souvent absolue, a donné lieu aux plus vives controverses.

Les recherches spéciales dont ils ont été l'objet depuis 1888 ont conduit à cette conclusion, — que tous les géologues seront tôt ou tard contraints d'adopter, — qu'il faut les considérer *en principe* comme de colossales *marmîtes de géant formées de haut en bas par l'action chimique et mécanique d'eaux violemment engouffrées dans de grandes diaclases verticales*. Mes explorations, notamment en Irlande et en Angleterre, où les swallow-holes absorbent encore des ruisseaux permanents (à la différence de ceux, à sec, des Causses et du Karst), ne permettent plus aucun doute à cet égard.

Dans les régions montagneuses, les moulins des anciens glaciers peuvent, d'après MM. Viglino et Plunkett, avoir concouru à la formation des abîmes (Alpes-Maritimes et Irlande, par exemple).

La théorie des *orgues géologiques* qui fait des puits naturels des entonnoirs de *décalcification*, uniquement dus à la corrosion chimique, est, sous cette forme absolue, inexacte; il faut, pour être applicable, qu'elle laisse (comme dans toutes les cavernes) à l'érosion mécanique la part considérable due à cette dernière. Dans la craie cependant elle trouve de justes applications.

Quant à la théorie *geysérienne*, dans laquelle d'Omalius d'Halloy, puis MM. Sc. Gras, Bouvier, Lenthéric, etc., considèrent les abîmes comme des *cheminées* d'éruptions geysériennes, d'éjaculations argilo-sidérolithiques, il faut l'abandonner complètement.

Celle des *effondrements*, qui voit dans les puits naturels des affaissements de voûtes de cavernes au-dessus du cours de rivières souterraines, conserve encore beaucoup de partisans: elle se justifie, en partie, par l'existence de certains immenses gouffres, comme à Saint-Canzian (Karst), à Padirac (Lot), aux cenotés du Yucatan (Mexique) et aux hoyos de Colombie, qui sont manifestement des dômes crevés de grottes; mais les récentes explorations ont établi le caractère *exceptionnel* de ce mode de formation, qui s'applique certainement à moins de 10 % des puits naturels actuellement visités!

Il en résulte que la fameuse théorie du *jalonement*, d'après laquelle l'abbé Paramelle voyait « sous chaque rangée de bétouilles (ou gouffres) » un cours d'eau permanent ou temporaire, qui les a *nécessairement* produites », est inexacte. L'expérience l'a formellement prouvé.

Environ les trois quarts des abîmes visités n'ont révélé aucune rivière. Très rares sont ceux situés comme Padirac, la Coquillière (Ardèche),

Saint-Canzian ou la Mazocha (Moravie) dans l'axe même du cours d'eau souterrain; beaucoup, au contraire, de ceux qui ont mené à de tels courants y aboutissent latéralement, à angles plus ou moins aigus, par des diaclases *greffées* sur l'aqueduc naturel intérieur et indépendant de celui-ci (les Combettes, Lot; Rabanel, Hérault; Bétharram, Basses-Pyrénées). Et si, en dernière analyse, c'est toujours vers ces aqueducs de drainage que les abîmes conduisent les eaux infiltrées, à travers les bouchons de débris divers ou d'argile qui ferment leurs fonds aux tentatives de pénétration humaine, la communication n'a réellement lieu que par des *tuyautages* étroits, profonds, contournés et divergeant loin de l'orifice même du gouffre; caractères restés exclusifs du véritable *jalonnement*.

Comme corollaire de ce qui précède, il faut admettre aussi que les dépressions des plateaux calcaires, classifiées, par les Autrichiens, sous le nom de *dolines* du Karst (*cloups* du Quercy, *sotchs* des Causses, etc.), sans qu'on ait pu s'entendre encore sur la définition exacte de ce terme, sont fort loin d'être toujours des *témoins* de cavernes sous-jacentes, obstruées par l'effondrement de leurs voûtes (Kraus, Schmid, Tietze, etc.); beaucoup, au contraire, représentent de simples *points d'absorption*, voire d'ex-lacs ou étangs à ancien écoulement souterrain comblé, colmatés actuellement par les apports extérieurs.

A cette question se rattache celle, toujours si controversée, de la formation des cañons par écroulement de cavernes, et des vallées inachevées qui doivent leur origine tant à des causes d'ordre tectonique qu'aux effets d'une infiltration subitement arrêtée ou considérablement diminuée.

L'aspect intérieur des rivières souterraines fournit d'ailleurs toutes les preuves de cette déchéance de l'infiltration. Il montre aussi que les eaux ont, par l'effet de la pesanteur, une invincible tendance à s'enfoncer de plus en plus bas au sein des roches fissurées, jusqu'à ce qu'elles soient arrêtées par les formations imperméables qui constituent leur *niveau de base* ou *hydrostatique*, et qui provoquent leur résurgence (grottes à étages superposés; faiblesse du ruisseau actuel par rapport au vide produit; plus grande dimension des étages supérieurs représentant les anciens lits).

Dans certaines régions, cet enfouissement a déjà produit des disparitions de sources qui ne laissent pas que d'être inquiétantes pour un avenir plus ou moins lointain.

Ressemblant d'une manière générale au cours des rivières aériennes, celui des ruisseaux souterrains en diffère cependant par la nature des trois obstacles spéciaux qui les sèment : 1° les rétrécissements de galeries

parfois réduites à quelques centimètres de largeur; 2° les éboulements intérieurs formant complets barrages que les eaux doivent traverser ou contourner; 3° et surtout les abaissements de plafonds, où la roche encaissante est de toutes parts immergée, en *voûtes mouillantes* ou *siphons d'aqueducs*.

Plusieurs géologues ont critiqué l'emploi, à ce propos, du terme de *siphon*, voulant, comme les physiciens, en réserver l'application au véritable *siphon de laboratoire*, où le tube en U se trouve à la partie supérieure. Théoriquement, ils ont raison, mais pratiquement personne ne méconnaît que les hydrauliciens nomment également *siphons* les parties d'aqueducs établies en *vases communicants* pour la traversée des vallées ou de dépressions à franchir entre deux points élevés. Comme c'est exactement le mécanisme du *vase communicant*, la loi de l'équilibre des liquides, qui conduit les eaux des rivières souterraines d'amont en aval des voûtes mouillantes par dessous des masses de rochers immergées parfois jusqu'à 25 et même 30 mètres de profondeur (tels sont les chiffres considérables donnés par la sonde aux siphons de Vaucluse; Sauve, Gard; Creux-Billard, Jura, etc.), on ne saurait guère vraiment exiger la proscription du terme de siphon pour les *siphons d'aqueducs* ou *siphons renversés* des canaux naturels du calcaire, alors qu'il est d'un usage consacré, dans des conditions physiques identiques, pour les amenées d'eau telles que la Vanne (siphons de la vallée de l'Yonne, de Fontainebleau, etc.), de l'Avre (siphon de Saint-Cloud), etc., et pour certains collecteurs d'égouts. Pour mettre fin à cette petite dispute, je proposerais bien d'appliquer aux voûtes mouillantes des cavernes, le mot spécial d'*hypochète* (passage de l'eau par en dessous, de *ὑπο*, sous, et *ἄχτος*, conduit d'eau); mais le maintien du terme critiqué me paraît encore préférable à la création d'un bizarre néologisme de plus. D'ailleurs, il s'est trouvé sous terre de vrais *siphons de laboratoire*, dans des sources *temporaires* visitées en temps de sécheresse (l'Écluse, Ardèche; Aluech, Aveyron; Guiers, Vif, Isère, etc.).

Quoi qu'il en soit, les eaux arrêtées dans les cavernes par ces trois sortes d'obstacles et surtout par les voûtes mouillantes (qui en restreignent le débit, parce qu'elles comportent toujours une diminution dans la section de la galerie), s'accablent en amont lors des crues et y forment ainsi les réserves des sources ou plutôt des fontaines du calcaire.

On connaît cependant certains exemples de rivières souterraines où l'eau absorbée peut être suivie d'un bout à l'autre, sans solution de continuité, sans siphons interrupteurs : Nam-Hin-Boune (Laos, sur 4 kilomètres), Poug (Tonkin), grotte de Douboca (Serbie), grotte des

Échelles (Savoie), Mas d'Azil (Ariège), Bramabiau (Gard), etc. Mais ce sont là des faits exceptionnels assez rares.

On a souvent rencontré sous terre des *siphons désamorçés*, en des moments de sécheresse, où leurs voûtes n'étaient plus immergées par suite de la baisse des eaux (Martel, à Marble-Arch, Irlande; Han-sur-Lesse, Belgique; à Pisino, Autriche, etc.); d'autres ont pu être tournés, généralement par des *trop-pleins* latéraux, parfois à l'aide de travaux artificiels (MM. Gérard, à Couvin, Belgique; Hrasky, à Vrsnica, Carniole, en 1887, etc.); M. A. Janet a même eu l'audace de plonger sous un tel obstacle et d'émerger, de l'autre côté, dans le vaste prolongement de la galerie souterraine (à l'embut de Saint-Lambert, Alpes-Maritimes, 1895).

C'est en amont de leurs siphons que les rivières souterraines, après les pluies, peuvent se mettre en *pression hydrostatique*, sur des hauteurs parfois considérables (70 mètres ou plus de sept atmosphères, à la Foiba de Pisino, Istrie, le 15 octobre 1896; et même plus de 100 mètres dans certains abîmes du Karst, celui de Trebic sur la Recca, par exemple); ainsi s'expliquent, en partie, les oscillations de niveau des émergences telles que Vaucluse, la Touvre, la Brème (Doubs), etc. Ces sources dites *vauclusiennes* (à tort, parce que Vaucluse a certains caractères spéciaux qu'on ne rencontre pas ailleurs) devraient être nommées, d'après moi, sources *siphonnantes* (*abîmes verticaux émissifs* de Fournet).

Ces siphons peuvent avoir une origine tectonique, quand ils sont dus à des plissements locaux de couches ou à de longues inflexions de strates en *fond de bateau*; dans ces cas, l'eau, suivant le pendage général, remonte forcément par un vase communicant, si les strates qui l'enferment sont (comme pour les nappes artésiennes) tout à fait imperméables ou compactes au point de ne lui offrir aucune fissure d'échappement vers des points plus bas. Il en résulte que, comme à Vaucluse, au Creux-Billard (Jura), à l'Ouyse et au Limon (Lot), à Bournillonne (Isère), à Sauve (Gard), etc., *les sources du calcaire peuvent ramener les eaux d'un niveau inférieur à celui même où elles sourdent*. Enfin, c'est de cette manière générale que naissent, souvent à de grandes profondeurs, des sources sous-fluviales, sous-lacustres (Boubioz d'Annecy) et sous-marines (Méditerranée, etc.), qui sont parfois de puissantes rivières.

On voit combien tous ces détails contribuent à infirmer la fausse théorie des *nappes continues*.

Les hygiénistes ont reconnu et les récentes explorations, ainsi que les expériences de coloration à la fluorescéine, ont achevé de prouver que les sources du calcaire ne sont pas de vraies sources, comme celles filtrées dans des terrains perméables par imbibition; il est avéré maintenant que, par les fissures du calcaire et de la craie, les eaux

d'infiltration peuvent véhiculer d'amont en aval les germes des plus graves maladies épidémiques, notamment la fièvre typhoïde. C'est pourquoi j'ai proposé de retirer aux grosses fontaines du calcaire la privilégiée qualification de source et de les nommer des *résurgences* (réapparitions d'eau), terme qui implique l'idée d'un retour à la surface du sol, après une première circulation extérieure et une seconde intérieure.

J'ai établi aussi que les sources *temporaires* ou *rémittentes*, qui ne jaillissent qu'après les grosses pluies, sont à peu près toutes des *trop-pleins* de sources pérennes, situées plus bas et dans le voisinage.

De même, le lac intermittent de Zirknitz (Autriche) est le trop-plein des rivières souterraines qui coulent sous son lit, plus ou moins abondamment selon la précipitation atmosphérique.

Les pluies, en effet, ont une action directe et très rapide sur les eaux souterraines des cavités naturelles de toutes sortes, où l'on a matériellement observé depuis peu d'années l'existence, la fréquence et la brusquerie de véritables crues, parfois formidables (Chevrot à Baume-les-Messieurs, 1885; Putick à Planina, 1887; Gaupillat à la Coquillière, 1892; accidents du Lur-Loch, Styrie, en 1894, et de Jeurre, Jura, en 1899; Martel à Padirac, 1896, etc.).

Les variations du régime météorologique se font donc sentir très rapidement, contrairement à ce que l'on a longtemps enseigné, sur les réservoirs de résurgences : cela achève d'expliquer leurs oscillations *modérées dans une forte mesure par l'action retardatrice des siphons* (voir *suprà*), — et aussi les troubles (argiles boueuses) constatés parfois dans leurs eaux (Vaucluse, janvier 1895; Saint-Chély-du-Tarn, septembre 1900, lors de l'excursion du Congrès géologique international).

Diverses raisons permettent d'énoncer que les grottes aujourd'hui largement ouvertes, d'où sortent encore des ruisseaux accessibles à l'homme (la Balme, Isère; Bournillon, Isère; le Brudoux, Drôme; la grotte Sarrasine, le Lison, la Loue, etc., Jura; Sarre, Basses-Pyrénées; Han-sur-Lesse, Belgique; le Peak, Angleterre; Planina, Carniole; Rjéka, Monténégro, etc.), ont été pendant un temps la dernière chambre-réservoir, fermée vers l'extérieur, d'un courant souterrain jadis beaucoup plus puissant; et que, par l'effet de la pression hydrostatique surtout, la cloison rocheuse qui la séparait jadis du dehors a fini par être emportée dans une sorte d'explosion hydraulique qui a laissé béante la grande cavité actuelle.

On a pu pénétrer, en effet, soit par des trop-pleins à sec, soit par l'étroit canal même de sortie des eaux, dans des grottes à orifice extrêmement resserré, en arrière duquel on a presque toujours trouvé un vaste dôme que les eaux de crue remplissent plus ou moins; dans ces