

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 <sup>(1)</sup>

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 diséqués 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.

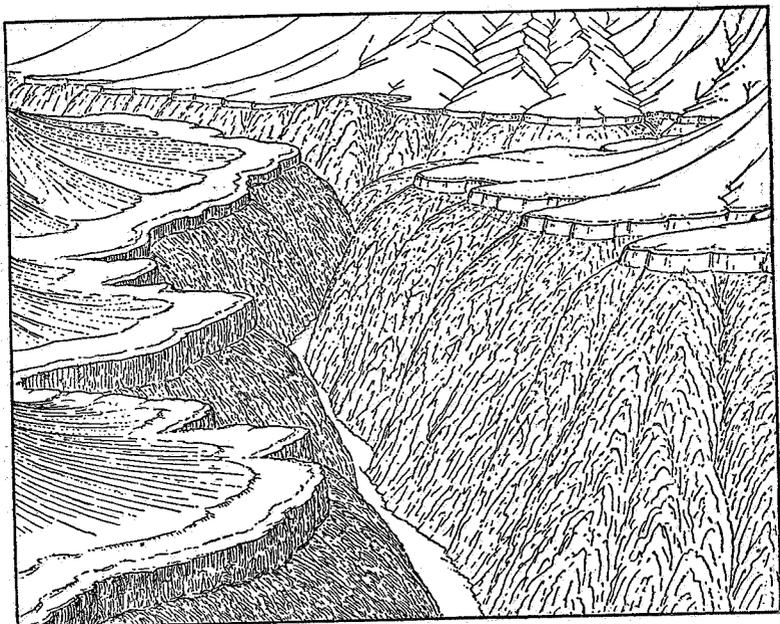


Fig. 1. — ESQUISSE DU CANYON DANS LES ROCHES CRISTALLINES FONDAMENTALES, BORDÉES PAR LA « PLATE-FORME DE GRAY » ÉTABLIE SUR LES GRÈS PALÉOZOÏQUES INFÉRIEURS (SÉRIE DE TONTO), QUI REPOSENT EN DISCORDANCE SUR LE TERRAIN CRISTALLIN. EN ARRIÈRE, UN MONTICULE DE ROCHES CRISTALLINES S'ÉLÈVE UN PEU AU-DESSUS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

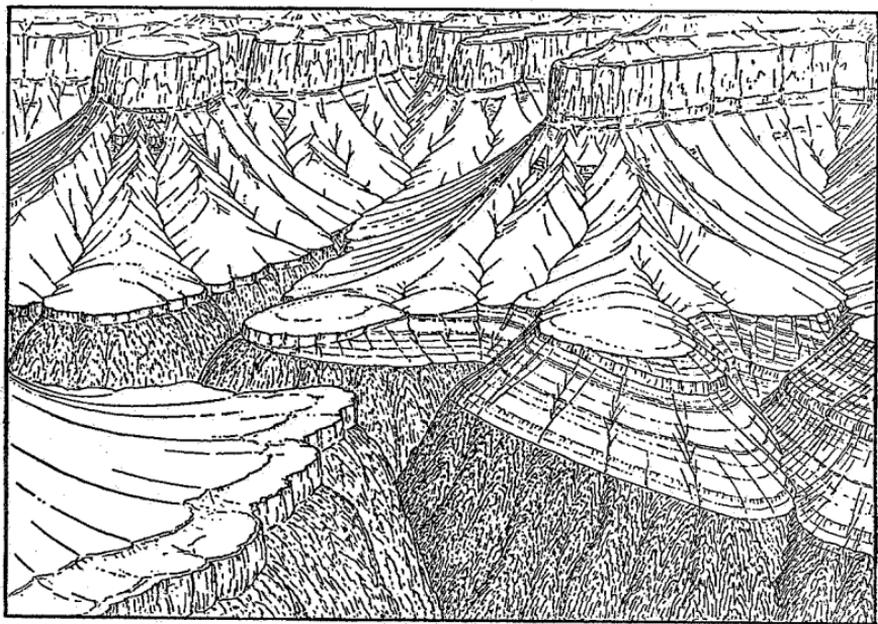


Fig. 2. — ESQUISSE DU « COIN » ALGONKIEN ENTRE LES ROCHES CRISTALLINES FONDAMENTALES ET LA SÉRIE PALÉOZOÏQUE HORIZONTALE. VUE PRISE DU BORD DU PLATEAU, PRÈS DE L'HÔTEL GRAND VIEW.

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<sup>e</sup> stade) consiste dans le dépôt des formations mésozoïques, l'autre (9<sup>e</sup> 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

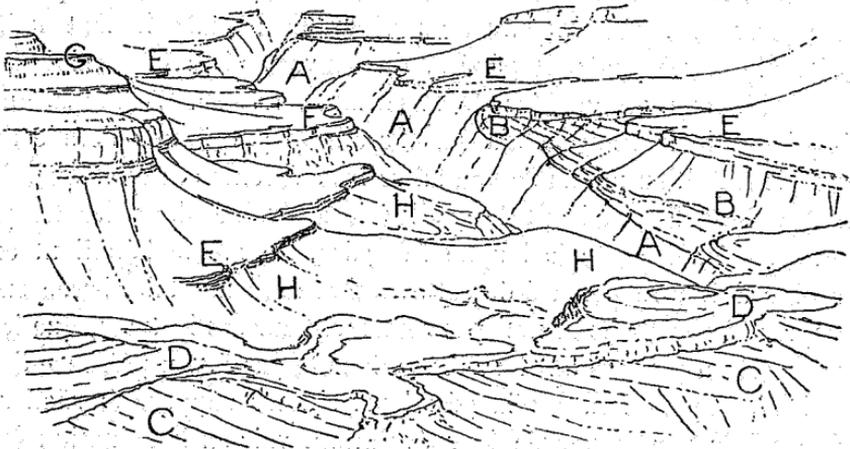


Fig. 3: — DÉTAIL DE LA PARTIE CENTRALE DE LA FIGURE 4. (Hors texte.)

- A. Roches cristallines fondamentales.
- B. « Coin » algonkien sur le flanc éloigné du canyon.
- C. H. Strates du plan monoclin 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  
L E S  
R É C E N T E S   E X P L O R A T I O N S   S O U T E R R A I N E S

E T   L E S  
P R O G R È S   D E   L A   S P É L É O L O G I E   (1)

P A R  
E . - A .   M A R T E L

---

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<sup>e</sup> 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<sup>km</sup>,7 ; Planina (Autriche), 7<sup>km</sup>,5 ; Bramabiau (Gard), 6<sup>km</sup>,5, etc.

Quatre ouvrages récents ont bien mis au point ce que l'on savait des cavernes à la fin du XIX<sup>e</sup> 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<sup>e</sup>, 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

Écheltes (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

cas, il est avéré que la bonde du réservoir souterrain n'a pas encore sauté.

Et il est infiniment probable que derrière les sources siphonnantes (dites vaclusiennes), où l'eau remonte de plus bas que son point d'émergence, la dernière caverne-réservoir n'a pas encore éclaté parce que le mur séparatif final reste trop épais, faute d'approfondissement suffisant du thalweg extérieur voisin.

Quand, au contraire, les approfondissements de thalwegs se sont peu à peu accrus jusqu'à leur niveau actuel, il en est résulté des conséquences sur lesquelles j'ai attiré tout particulièrement l'attention : j'ai constaté que, dans toutes les formations calcaires de l'Europe, les dépressions, plus ou moins accentuées, des plateaux possèdent presque toutes une pente générale vers les vallées environnantes; elles présentent le véritable aspect de thalwegs atrophiés, même de fonds de lacs (bassins fermés) dépouillés de leurs eaux courantes ou stagnantes; or, partout, du Péloponèse à l'Irlande et de la Catalogne aux Carpathes, on rencontre, dans ces *vallées desséchées* (ou même inachevées), des ouvertures de gouffres et de points d'absorption (avens ou bétoires) en si grand nombre qu'elles imposent l'énoncé de la loi géologique et hydrologique suivante : sous l'influence de diverses causes (agrandissement des fissures sous-jacentes du sol, drainage de plus en plus énergique vers les thalwegs principaux s'approfondissant graduellement, etc.), *il s'est produit une fuite progressive des eaux dans le sous-sol des régions calcaires*. On assiste encore à la production du phénomène dans les régions humides de l'Irlande, du Derbyshire et de Belgique (calcaires carbonifères); on l'observe bien moins souvent dans les Causses et le Karst (Jurassique et Crétacé), au climat plus sec et aux roches peut-être moins dures. Cependant la vallée de l'Alzou à Rocamadour (Lot) en offre un remarquable exemple.

Il en résulte de toute évidence que de tels plateaux calcaires, maintenant *vrais pays de la soif*, n'ont pas toujours eu la désolante sécheresse dont ils pâtissent de nos jours, — que jadis des eaux courantes y circulaient en rivières ou s'y accumulaient en lacs, — que le dessèchement a été provoqué plus ou moins rapidement, à la suite des phénomènes dynamiques, d'ordre tectonique, qui ont ouvert aux eaux les diaclases et autres cassures du sol, — qu'il a été, en maints endroits, activé par le creusement plus rapide de certains thalwegs devenant des vallées maîtresses et soutirant par les cavernes-sources étagées sur leurs rives, des eaux enfouies sur les plateaux latéraux, — et que les abîmes et autres points d'absorption, actuellement à sec, doivent bien être considérés comme les points de vidanges d'anciens fleuves, lacs et peut-être même de mers.

Les phénomènes contemporains de lacs à doubles émissaires (superficiel et souterrain) du Jura et du Karst, les *moulins de la mer* d'Argostoli (île de Céphalonie), les *bassins fermés* (Kesselthäler) à ponors et Katavothres de Bosnie-Herzégovine et de Grèce, les rivières souterraines telles que la Recca, la Piuka (Autriche), Padirac (Lot), Bramabiau (Gard), etc., les *captures* souterraines du Danube par le Rhin (source de l'Aach), près Constance, du Doubs par la Loue (Jura), de la Loire par le Loiret, du Bandiat et de la Tardoire par la Touvre (etc.), les profondes cluses desséchées, comme celle si remarquable de la Nesque, qui a dû être l'ancien écoulement aérien de Vaucluse, etc., sont quelques-uns des faits à l'appui des propositions qui précèdent.

Les preuves abondent donc du processus qui, dans les pays calcaires, a substitué à une ancienne circulation superficielle très développée une circulation souterraine actuelle très restreinte. C'est la loi, fort grave pour l'avenir, de l'enfouissement constant des eaux dans l'écorce terrestre et du lent et inévitable desséchement de celle-ci!

Il faut noter que, sous les glaciers, existe aussi toute une circulation d'eaux intérieures. La catastrophe de Saint-Gervais a montré combien elle serait utile à étudier. Malheureusement, cette étude présente des difficultés et dangers tout spéciaux qui n'ont pas empêché MM. J. Vallot et Fontaine d'en aborder l'ingrat problème.

La météorologie des cavernes a fourni à la géologie trois notions nouvelles.

La première, c'est que la température de l'air n'y a pas du tout la constance qu'on lui prêtait jadis et que diverses circonstances, généralement d'ordre topographique, arrivent à la faire varier de plusieurs degrés, non seulement suivant les saisons, mais encore d'un point à l'autre d'une même caverne.

La seconde, c'est qu'il en est de même pour les eaux des cavernes, et que par suite les *résurgences* (sources du calcaire) sont fort loin de présenter toujours une température égale à la moyenne annuelle de celle du lieu où elles émergent. (*Les Gillardes* du Dévoluy, par exemple, sont refroidies de plusieurs degrés, comme alimentées par les *névés* souterrains de profonds *chouruns*.)

La troisième, c'est que la formation des *glacières naturelles*, objet de si longues controverses et de si nombreuses théories, a pour cause principale l'action du froid hivernal, et pour causes accessoires par ordre d'importance, les quatre suivantes : 1° forme de la cavité; 2° libre accès du froid ou de la neige d'hiver; 3° altitude; 4° refroidissement par évaporation due aux courants d'air.

L'origine de l'acide carbonique n'est expliquée que pour les mofettes

des grottes des terrains volcaniques ; dans les cavernes du calcaire, où il s'est d'ailleurs rencontré fort rarement jusqu'à présent, cette origine reste assez mystérieuse ; on sait seulement qu'on a parfois pris pour de l'acide carbonique des gaz méphitiques provenant de la décomposition de matières organiques englouties (Katavothres du Péloponèse, etc.). Des analyses d'air pourraient être intéressantes dans ce cas-là.

La relation des cavités naturelles avec les filons métallifères a déjà occupé nos savants collègues, MM. Lecornu (plomb du Derbyshire) et De Launay (*Annales des mines*, août 1897). Les phosphorites du Quercy se rattachent à cet ordre d'idées.

Dans la Blue-John-Mine (Derbyshire), j'ai pu constater que ce célèbre gisement de galène et de fluorine n'est qu'un extraordinaire labyrinthe naturel de fissures, un réseau d'*avens* superposés et réunis par des couloirs plus ou moins inclinés, et absorbant encore de nos jours un ruisseau extérieur qu'on peut suivre jusqu'à 90 mètres de profondeur, pour le voir se perdre plus bas encore dans un trou absolument impénétrable, sans qu'on ait réussi encore à identifier le lieu de sa *résurgence*.

En 1892, M. G. Gaupillat a fait la très curieuse découverte d'une ancienne *mine de cuivre*, d'âge inconnu, à 120 mètres de profondeur, dans l'abîme de Bouche-Payrol, près Silvanès (Aveyron).

Dans le Taurus Cilicien (Asie-Mineure), à Bulghar-Dagh, M. Brisse a reconnu que des gisements de plomb, modifiés et déplacés par la circulation de véritables rivières souterraines, ont fait place à des grottes béantes, etc.

Il n'est plus contesté maintenant que la *Terra Rossa* du Karst, *Terre rouge* des cavernes, soit avant tout le résidu de la *décalcification* des roches calcaires.

Sur les dépôts de carbonate de chaux qui forment les stalactites et stalagmites des cavernes et les tufs des *résurgences*, il n'y a guère à ajouter à ce qu'on sait depuis longtemps, si ce n'est sur le mode tout spécial de formation des *gours* ou barrages de stalagmite dressés en travers du cours des rivières souterraines par suite de leurs oscillations de niveau et des intermittences de leurs flux ; et aussi sur le danger que présentent les amas de tufs, beaucoup plus fissurés et moins solides qu'on ne le pensait jusqu'ici (éboulements de Saint-Pierre-Livron, Lot, en 1897, de la Tuffière, Ain, en 1896, etc.).

Le *mode de remplissage des cavernes* doit nous arrêter un instant. Je suis tout à fait d'accord avec M. Boule pour abandonner les idées de cataclysmes et d'inondations diluviennes des anciens, et pour considérer le remplissage comme effectué surtout par l'introduction des terres superficielles à travers les fissures des voûtes de grottes, sous l'influence de

précipitations atmosphériques plus abondantes qu'à présent. Je pense qu'à ces deux principes généraux il faut ajouter les détails suivants :

Le remplissage s'opère différemment suivant la nature des cavités et ne saurait être le même pour les abîmes et autres points d'absorption, que pour les grottes des résurgences, par exemple. Il y a lieu, en réalité, de distinguer et de ranger dans l'ordre d'importance que voici, les différents facteurs du remplissage des cavernes :

1° Apports extérieurs (anciens ou contemporains) par les fissures des voûtes;

2° Éboulement par délitement des roches encaissantes; sous l'action des eaux d'infiltration;

3° Effondrements par grandes masses, dus surtout aux rivières souterraines;

4° Décalcification produisant la terre rouge (entraînement du carbonate de chaux des roches encaissantes par les eaux chargées d'acide carbonique et mise en liberté de leur silicate d'alumine, oxyde de fer, etc.);

5° Obstruction par les stalagmites et stalactites;

6° Entraînement d'alluvions extérieures et de débris organiques dans les abîmes et points d'absorption;

7° Formation de tufs au débouché des résurgences;

8° Amoncellement de neiges et glaces dans les puits à neige et les glaciers naturels;

9° Amoncellement des ossements d'animaux (tombés ou jetés, vifs ou morts) dans les abîmes de peu de largeur.

Pour savoir si ces fonds d'abîmes ne livreraient pas, comme je le suppose, des superpositions de carcasses fossiles plus anciennes que les trouvailles de M. F. Regnault dans les *oubliettes* de Gargas, etc., et remontant jusqu'aux âges tertiaires, les paléontologues attendent que l'on entreprenne des fouilles, qui seraient certes longues et coûteuses, dans toute la hauteur des *talus d'éboulis* des fonds de gouffres, qui (entre 50 et 500 mètres sous terre) peuvent atteindre et dépasser 50 mètres d'épaisseur.

Les travaux pratiques de désobstructions de pertes, dessèchement de marécages, recherches de réservoirs naturels n'ont encore été entrepris utilement qu'en Autriche, Bosnie-Herzégovine et Grèce. Ils seraient bien opportuns dans diverses localités françaises.

Tel est le résumé, très sommaire, de ce qu'il convient de corriger ou d'ajouter pour mettre au point, en ce qui concerne la géologie et l'hydrologie, les notions scientifiques acquises sur les cavernes à la clôture du XIX<sup>e</sup> siècle.

---

SUR

## LA DIRECTION D'AIMANTATION DANS DES COUCHES D'ARGILE

TRANSFORMÉE EN BRIQUE PAR DES COULÉES DE LAVE

PAR

MM. Bernard BRUNHES et Pierre DAVID (1).

---

« On sait que l'argile, en cuisant dans un four à briques, prend une aimantation dirigée dans le sens du champ magnétique terrestre à l'instant de la cuisson, et que cette aimantation, d'intensité variable avec la nature et la composition de l'argile, reste très stable. M. Folgheraiter a fondé sur ces remarques une méthode d'étude de l'inclinaison magnétique terrestre dans l'antiquité : ses études ont porté sur des vases en terre cuite de l'époque étrusque et de l'époque romaine. L'incertitude où l'on est de l'*orientation* des vases placés verticalement dans les fours pendant la cuisson n'a permis aucune conclusion relative à la *déclinaison* magnétique.

» Il serait intéressant de connaître les deux angles qui définissent la direction du champ terrestre, non seulement dans l'antiquité, mais, si c'était possible, aux époques géologiques. Les observations que nous avons faites dans la région volcanique du Puy-de-Dôme nous paraissent mettre sur la voie de la solution du problème.

» En divers points, aux environs de Clermont, notre collègue M. Ph. Glangeaud nous a montré des couches d'argile de la fin du Pliocène supérieur et du commencement du Quaternaire, disposées horizontalement et sur lesquelles est venu couler un fleuve de lave

(1) Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXIII, séance du 13 juillet 1901.

parfaitement régulier : l'argile a gardé, à partir de 2 ou 3 mètres de profondeur au-dessous de la lave, sa couleur et son état d'argile non cuite; mais la couche supérieure, immédiatement en contact avec la lave, a été cuite sur place et s'est trouvée dans les mêmes conditions que les poteries cuites au four dans le champ magnétique terrestre, avec cette circonstance plus favorable qu'on est certain, au moins dans quelques cas bien déterminés, que l'argile cuite sur place n'a pas été déplacée depuis l'époque de l'éruption volcanique.

» Nous avons, dans un grand nombre de ces carrières de brique naturelle, taillé de petits cubes orientés et étudié leur aimantation à l'aide des appareils magnétiques appartenant à l'Observatoire du Puy-de-Dôme. *Nous avons trouvé, en général, une aimantation de direction bien définie et différente de la direction actuelle du champ terrestre.*

» Nous citerons comme exemples trois carrières voisines, nos 5, 6 et 7, situées sur la route nationale n° 89 de Lyon à Bordeaux, au voisinage de la borne 2<sup>km</sup>, 400 à partir de Clermont, près du village de Beaumont. Douze échantillons ont été étudiés et ont donné des résultats très concordants.

» Chaque échantillon est un cube qu'on a taillé sur place, à arêtes respectivement dirigées Nord-Sud, Est-Ouest et verticales. La direction que nous appelons Nord-Sud est celle du méridien magnétique actuel donnée par une petite boussole de déclinaison.

» On obtient la valeur de la composante Nord-Sud en plaçant le cube de telle sorte que son axe Nord-Sud soit dans la première position de Gauss (c'est-à-dire que le prolongement de cet axe passe par le centre du barreau), à quelques centimètres du barreau du déclinomètre Mascart. On retourne le cube de manière à échanger les faces Nord et Sud, et l'on note le déplacement de l'échelle. *On s'assure que ce déplacement reste sensiblement le même pour les quatre positions que l'on peut donner au cube, en laissant toujours les faces Nord et Sud aux mêmes places.* Si cette condition n'était pas réalisée, c'est qu'il y aurait défaut d'homogénéité dans le bloc, et l'on ne pourrait faire entrer les mesures faites sur ce cube en ligne de compte (cela arrive fréquemment, par suite d'interposition de morceaux assez gros de granit ou de quartz à l'intérieur de la brique).

» On opère de même pour la composante Est-Ouest et pour la composante verticale.

EXEMPLES :

*Carrière n° 5, échantillon n° 2.*

*Carrière n° 7, échantillon n° 5.*

NS. . . . . — 3.7  
 EW . . . . . — 0.5  
 Verticale et dirigée vers le bas. + 5.9

NS . . . . . — 14.9  
 EW . . . . . — 1.75  
 Verticale et dirigée vers le bas + 22.7

» Ces morceaux ont les mêmes dimensions (8 centimètres de côté); on voit que l'intensité d'aimantation est très différente de l'un à l'autre, et cependant la direction y est très sensiblement la même. Toutefois, l'aimantation reste toujours assez faible

pour qu'on puisse négliger la force démagnétisante. Cette aimantation a varié, suivant les échantillons, de 0.0018 C. G. S. à 0.00045 C. G. S.

» On a ainsi, pour l'échantillon n° 2 de la carrière n° 5 :

$$\delta = \Delta + 7^{\circ}30' \text{ Est}$$

( $\Delta$  étant la déclinaison actuelle, et  $\delta$  la déclinaison donnée par le cube de brique); cela donnerait une déclinaison occidentale d'environ

$$\delta = 7^{\circ} \text{ et } I = 56^{\circ}30'.$$

» Nous nous sommes assurés directement qu'il n'y a pas, au voisinage des carrières étudiées, d'anomalie magnétique assez forte pour être prise en considération, étant donné le degré de précision que comportent les mesures précédentes.

» Pour l'autre échantillon, on a

$$\delta = \Delta + 7^{\circ} \text{ Est.}$$

$$I = 56^{\circ}30'.$$

» Pour ces trois carrières, les échantillons ont tous donné pour  $\delta - \Delta$  des nombres compris entre  $7^{\circ}$  et  $9^{\circ}30'$ , et pour  $I$ , entre  $56^{\circ}30'$  et  $58^{\circ}30'$ . Il est évident qu'il serait illusoire de chercher une plus grande précision.

» D'autres carrières de briques, dues à des coulées de lave de volcans différents, ont donné des résultats très différents. Bornons-nous à signaler une carrière de Royat, qui a donné une déclinaison différent de la déclinaison actuelle de  $60^{\circ}$  environ et à l'Ouest (par suite, une déclinaison occidentale de  $75^{\circ}$ ), et une inclinaison de  $75^{\circ}$ .

» On aurait là peut-être un moyen de décider, dans un cas douteux, si deux coulées de lave d'une même région proviennent ou non d'éruptions contemporaines.

» Jusqu'ici, nous avons partout trouvé le pôle de même signe que le pôle austral actuel, dirigé vers le bas; par suite, nous n'avons pas rencontré d'inclinaison négative, comme M. Folgheraiter en a signalé. »



# NOTE

SUR

## LA NÉCESSITÉ ET LES MOYENS

de protéger les

# GRANDES SOURCES DES TERRAINS CALCAIRES DE FRANCE

CONTRE UNE CAUSE SPÉCIALE DE CONTAMINATION

capable de susciter des épidémies de fièvre typhoïde, etc.

PAR

E.-A. MARTEL

---

Depuis une quinzaine d'années à peine, des explorations méthodiques d'un genre tout nouveau ont été effectuées par divers géologues et simples touristes dans l'intérieur des sources, cavernes et puits naturels (ou abîmes) très profonds des diverses régions *calcaires* et *crétacées* du sol de la France.

Parmi les heureux résultats, intéressants à divers titres, de ces entreprises difficiles, toujours coûteuses, souvent dangereuses, il faut citer en première ligne une conclusion pratique, singulièrement importante au point de vue de l'hygiène publique. Elle est relative à une cause toute spéciale, et trop longtemps méconnue, de contamination des grandes sources, dites *vaucusiennes*, des terrains calcaires.

Sans aucune exception, toutes les explorations ont démontré que la circulation des eaux souterraines, dans ces terrains, se fait exclusivement aux dépens des fissures préexistantes du sol.

Elles ont établi aussi que, dans les calcaires tout au moins, il n'y a pas de véritables nappes d'eau étendues dans tous les sens, mais, au contraire, des séries de réservoirs beaucoup plus longs que larges, c'est-à-dire développés surtout en hauteur et en longueur.

La pente des couches du terrain en fait de vraies rivières souterraines,

qui tirent généralement leur origine de ruisseaux superficiels, engloutis en des points plus ou moins nombreux, sur la ligne de contact des terrains imperméables (tels que le granit) et des formations perméables par fissuration (le calcaire surtout).

Sous terre, ces ruisseaux enfouis se réunissent de proche en proche par de véritables confluent et finissent par former de puissants et uniques collecteurs, exactement à l'image de l'hydrographie extérieure.

Quand les pertes de ruisseaux sont constituées par des cavernes assez largement ouvertes pour livrer passage à l'homme, on les nomme des goules (de gula). Les pertes impénétrables, véritables cribles, portent des noms locaux infiniment variés (bétoires, emposieux, aiguigeois, sauglœcher, etc.).

Quant aux *puits* naturels ou *abîmes* (avens), ils sont, en principe, les affluents des rivières souterraines, vers lesquelles ils conduisent les eaux des pluies et des orages, mais par des voies plus ou moins détournées et, la plupart du temps, obstruées pour l'homme, à une profondeur variable, par des éboulements ou des accumulations de matériaux détritiques.

Au point où les terrains imperméables reparaissent, à un niveau inférieur à celui des goules ou autres pertes, les rivières souterraines émergent de nouveau hors des terrains perméables par fissuration, sous la forme de fontaines, généralement très puissantes, mais qui sont en réalité de simples *résurgences*, de fausses sources, à la différence des vraies sources, formées directement par les pluies dans les pores des terrains perméables par imbibition, tels que les sables, graviers, moraines, éboulis, etc.

Très rarement, il y a communication directe (au moins pour l'homme) entre une perte et une fausse source; en France, on cite Bramabiau, la plus longue caverne de France (6,500 mètres de développement total, dont 700 pour le cours direct de l'eau), traversé pour la première fois en 1888, le Mas d'Azil, etc.

La loi presque générale est l'existence, sur le cours des rivières souterraines, de véritables siphons d'aqueducs, qui jouent le rôle de vannes fixes et retiennent les eaux en amont; ce qui permet de formuler ce principe que *dans les terrains fissurés les eaux souterraines sont absorbées par les abîmes, goules et pertes, emmagasinées dans les cavernes, et restituées par les résurgences ou fausses sources.*

Or, les fausses sources ne sont pas toujours sûres au point de vue hygiénique, car les siphons intérieurs ont un pouvoir filtrant insuffisant pour faire disparaître les causes de contamination extérieures qui

ont pu affecter les ruisseaux originaires avant leur disparition dans les goules et pertes.

Les abîmes offrent un danger de pollution des eaux souterraines bien plus considérable encore, reconnu par M. Martel depuis 1891, et presque partout; il provient de la funeste habitude qu'ont les paysans de jeter dans les gouffres, réputés à tort insondables, les cadavres de tous les bestiaux et animaux morts. Il en résulte que les pluies drainées par les puits naturels commencent par rincer toutes ces charognes avant d'atteindre les rivières souterraines, et par se charger de ptomaines et de microbes nocifs avant de se rendre aux fausses sources qu'elles contribuent à alimenter. Comme conséquence directe, la contamination de ces fontaines est de nature à provoquer les plus graves épidémies. Ce fait n'a pas encore suffisamment attiré l'attention des pouvoirs publics ni excité la vigilance des autorités locales. De rigoureuses mesures devraient être prises partout pour empêcher la transformation des abîmes en charniers.

La plus grave constatation dans cet ordre d'idées a été faite en 1897 : une expérience décisive de coloration à la fluorescéine, effectuée entre la source et les puits naturels de Sauve (Gard), a péremptoirement démontré que les habitants de cette petite ville « boivent leur propre égout » !

D'autres exemples pourraient être fournis des dangers que cet état de choses fait courir à la santé publique, car c'est par centaines que l'on compte, pour la France seule, les sources dites vauclusiennes qui servent à l'alimentation, et par milliers que l'on énumérerait les pertes et les abîmes qui risquent de les empoisonner.

Aussi serait-il bien nécessaire que les investigations particulières, forcément très limitées en ces dernières années, reçussent l'extension qu'elles méritent, et que les recherches de ce genre fussent, désormais, organisées et développées officiellement par les soins des pouvoirs publics.

Il faut bien se persuader, en effet, que l'hygiène générale, avant tout, est capitalement intéressée aux progrès de la connaissance des eaux souterraines : ainsi qu'en fait foi l'interpellation de M. le docteur Labbé au Sénat, le 17 novembre 1898, à propos de la récente épidémie de fièvre typhoïde de la garnison de Lure, en 1898, il est dûment établi maintenant que presque toutes les épidémies de fièvre typhoïde, souvent si terribles, ont pour origine principale la mauvaise qualité ou la contamination des eaux potables.

Or, c'est dans l'intérieur même du sol, dans le mode de formation

et de circulation des nappes et des rivières souterraines que l'on peut trouver à la fois la cause et le remède de ce véritable péril public; c'est là que, suivant les propres paroles de M. le Ministre de la Guerre, répondant à M. le docteur Labbé, à la séance du 18 novembre 1898, il importe de chercher à s'éclairer « sur la valeur réelle des sources qui sont à tort réputées comme bonnes et autour desquelles il se produit néanmoins des cas de fièvre typhoïde ».

Pour ne citer, en France, que les fontaines les plus célèbres par l'abondance et l'apparente pureté de leurs eaux, c'est au fond d'immenses cavernes et de dangereux gouffres, pour la plupart ignorés, à l'heure actuelle, qu'il serait nécessaire de rechercher comment s'alimentent exactement Vaucluse (par les *avens* du Ventoux), Fontaine-l'Évêque (par les *ragagès* des plateaux du Var), la Foux de Grasse (par les *embuts* des Alpes maritimes), Sassenage, Goule-Noire, le Cholet, les Gillardes (par les *scialets* et les *chouruns* du Dauphiné), le Lison, la Loue, le Dessoubre, la Seille (par les *emposieux* du Jura), la Douix de Châtillon-sur-Seine (par les *pertes* de la Côte-d'Or), la Tourne de Bourg-Saint-Andéol (par les *avens* de l'Ardèche), la Sorgues de Saint-Affrique, les Foux de la Vis et du Tarn (par les *avens* du Larzac et des Grands Causses), Salles-la-Source (par les *Tindouls* de l'Aveyron), les Chartreux de Cahors et l'Ouysse de Rocamadour (par les *igues* du Quercy), la Touvre de la Charente (par les *fosses* de la Braconne et les *pertes* de la Tardoire), le Lunain (par les *pertes* de Lorrez-le-Bocage), l'Avre, la Rille, etc. (par les *bétoires* de Normandie), etc.

L'investigation méthodique du sous-sol de ces vastes territoires excède maintenant (à cause des conflits qu'elle peut susciter avec les intérêts privés et surtout à cause des dépenses qu'elle entraîne) les moyens d'action et les ressources individuelles des particuliers, dont les efforts isolés n'ont pu que déterminer les résultats à employer désormais, et faire connaître les vrais principes de la formation et de la circulation des eaux souterraines en terrains calcaires. Il importe que le Gouvernement intervienne et favorise désormais, tant de son autorité morale que de son concours pécuniaire, l'enquête à peine commencée.

Il semble que les moyens pratiques de parachever efficacement cette enquête, et d'en consacrer utilement les résultats, pourraient être, entre autres, les suivants :

1° Circulaire du Ministre de l'Intérieur enjoignant aux Préfets de prendre des arrêtés pour interdire le jet des bêtes mortes dans tous les abîmes ou puits naturels du territoire français.

2° Détermination d'un périmètre de protection autour des puits

d'absorption, des goules et pertes et des points d'émergence des fausses sources.

3° Affectation de crédits — par exemple une quinzaine de mille francs par an — pour faire terminer (ce qui demanderait seulement quelques années) l'exploration des cavités souterraines innombrables où l'on n'a pas encore pénétré; ces crédits pourraient être, ou bien attribués sous forme de missions subventionnées aux spécialistes déjà connus pour leurs recherches de ce genre, à charge par eux d'en rapporter et remettre les résultats au Ministère de l'Intérieur, ou bien affectés à un service particulier qui serait créé pour cet objet à ce Ministère. La partie du budget à laquelle ressortiraient ces dépenses est tout naturellement (pour 1899) indiquée au chapitre 58 du Ministère de l'Intérieur : « Matériel et dépenses diverses du service sanitaire. »

Si, pour ces trois premières mesures, les pouvoirs actuels du Ministre de l'Intérieur étaient jugés insuffisants, il conviendrait d'en faire l'objet d'un urgent projet de loi.

4° Au fur et à mesure de l'avancement de cette enquête *sous* le terrain et de la construction de cet « Atlas », en quelque sorte, « des cavités et rivières souterraines de la France », il y aurait lieu de déterminer, avec le concours des Ministères de la Guerre, des Travaux publics et de l'Agriculture, les points spéciaux sur lesquels devraient être effectués, principalement aux frais des communes ou des départements intéressés, les travaux de protection, d'aménagement, d'adaptation, de correction, pour la meilleure utilisation et la sécurité complète des eaux intérieures reconnues et étudiées.

Mais cette quatrième partie n'est qu'une seconde phase des mesures d'ensemble que réclame actuellement l'hydrologie souterraine des régions calcaires de la France. La première et la plus urgente consiste à prendre des dispositions générales et provisoires de défense et à achever la reconnaissance des hypogées encore ignorées.

Les lecteurs du *Bulletin de la Société belge de Géologie* apprendront avec plaisir que comme suite à la Note qui précède et qui, en janvier 1899, a été remise en autographe par M. Martel aux Ministères de l'Intérieur, de la Guerre et aux membres du Parlement français qui ont discuté la question, les efforts incessants de M. E.-A. Martel ont été couronnés d'un complet succès, car la loi nouvelle relative à la protection de la santé publique, promulguée le 15 février dernier et publiée dans le *Journal officiel* de la République française, dans le

n° 49, du 19 février 1902, contient dans le chapitre I du titre I<sup>er</sup> (Des mesures sanitaires générales), l'article 10 suivant :

« ART. 10. — Le décret déclarant d'utilité publique le captage d'une source pour le service d'une commune déterminera, s'il y a lieu, en même temps que les terrains à acquérir en pleine propriété, un périmètre de protection contre la pollution de ladite source. Il est interdit d'épandre sur les terrains compris dans ce périmètre des engrais humains et d'y forer des puits sans l'autorisation du préfet. L'indemnité qui pourra être due au propriétaire de ces terrains sera déterminée suivant les formes de la loi du 5 mai 1844 sur l'expropriation pour cause d'utilité publique, comme pour les héritages acquis en pleine propriété.

» Ces dispositions sont applicables aux puits ou galeries fournissant de l'eau potable empruntée à une nappe souterraine.

» Le droit à l'usage d'une source d'eau potable implique, pour la commune qui la possède, le droit de curer cette source, de la couvrir et de la garantir contre toutes les causes de pollution, mais non celui d'en dévier le cours par des tuyaux ou rigoles. Un règlement d'administration publique déterminera, s'il y a lieu, les conditions dans lesquelles le droit à l'usage pourra s'exercer.

» L'acquisition de tout ou partie d'une source d'eau potable par la commune dans laquelle elle est située peut être déclarée d'utilité publique par arrêté préfectoral, quand le débit à acquérir ne dépasse pas deux litres par seconde.

» Cet arrêté est pris sur la demande du conseil municipal et l'avis du conseil d'hygiène du département. Il doit être précédé de l'enquête prévue par l'ordonnance du 23 août 1855. L'indemnité d'expropriation est réglée dans les formes prescrites par l'article 16 de la loi du 21 mai 1856. »

Dans le titre IV (Pénalités) de la nouvelle loi, on trouvera l'article 28, dont l'application ne serait pas moins utile dans les diverses et importantes régions calcaires de la Belgique qu'en France :

« ART. 28. — Quiconque, par négligence ou incurie, dégradera des ouvrages publics ou communaux destinés à recevoir ou à conduire des eaux d'alimentation; quiconque, par négligence ou incurie, laissera introduire des matières excrémentielles, ou toute autre matière susceptible de nuire à la salubrité, dans l'eau des sources, des fontaines, des puits, citernes, conduites, aqueducs, réservoirs d'eau servant à l'alimentation publique, sera puni des peines portées aux articles 479 et 480 du Code pénal.

» Est interdit, sous les mêmes peines, l'abandon de cadavres d'animaux, de débris de boucherie, fumier, matières fécales et, en général, de résidus animaux putrescibles dans les failles, gouffres, bétoires ou excavations de toute nature autres que les fosses nécessaires au fonctionnement d'établissements classés.

» Tout acte volontaire de même nature sera puni des peines portées à l'article 257 du Code pénal. »



# L'AGRONOMOMÉTRIE

spécialement dans ses rapports

AVEC LA GÉOLOGIE (1)

PAR

ALEXANDRE LONAY

Agronome de l'État, à Mons.

L'agronomométrie est un problème de la plus haute importance pour l'agriculture. Les praticiens se rendent plus ou moins compte de la valeur relative des terres de leur exploitation. Ils savent distinguer ce qu'ils appellent une bonne terre de ce qu'ils dénomment une mauvaise terre, mais sans disposer d'une norme précise servant de base à leur appréciation. Nous, les agronomes, nous voudrions que la puissance de production ou, si vous le voulez, la fertilité des terres pût se mesurer exactement, d'une manière scientifique, et non pas seulement d'une façon empirique et peu précise. En d'autres termes, disposant des moyens de mensuration recherchés, il faudrait que l'agronome, mis en présence d'une terre quelconque, dans un lieu quelconque, sache indiquer la valeur culturale de ce sol et, plus spécialement, puisse dire quels sont les engrais qu'il conviendrait d'employer pour porter le plus économiquement les rendements du champ envisagé au maximum possible. Naturellement, nous ne perdons pas de vue d'autres facteurs, à part le sol, qui interviennent dans la production : le choix de la variété, la qualité de la semence, le climat, l'orientation du terrain, etc.

Remarquez que les engrais ne doivent pas servir, comme on l'a

(1) Extrait des *Mémoires et publications de la Société des sciences, arts et lettres du Hainaut*.

enseigné longtemps, à restituer au sol les éléments que les récoltes lui enlèvent. Si cette restitution devait être complète, la culture serait souvent ruineuse. Leur rôle se borne à fournir simplement aux plantes les éléments nutritifs que les approvisionnements naturels du terrain ne livrent pas en quantités suffisantes.

Tous les sols, en effet, renferment des doses variées, parfois très considérables, de matériaux nutritifs; une proportion relativement très minime de ceux-ci résulte de la décomposition des végétations antérieures ou des fumures; la majeure partie, presque la totalité souvent, fait partie intégrante de la substance minérale représentée par les particules terreuses qui forment le sol. L'azote seul fait exception, étant d'origine organique.

Il s'agit, pour les éléments minéraux, comme d'ailleurs aussi pour l'azote engagé dans l'humus, de rechercher jusqu'à quel point ils sont absorbables pour les végétaux cultivés.

Nous avons le secours de la chimie analytique. Les chimistes peuvent non seulement nous dire quel est le titre global de chaque élément, mais, pour certains d'entre eux, préciser les formes ou combinaisons dans lesquelles ils se trouvent engagés. Cependant, les indications de l'analyse chimique sont insuffisantes; d'ailleurs, l'assimilabilité des éléments nécessaires aux plantes ne dépend pas exclusivement de leur forme chimique. Au surplus, l'analyse des terres appelle des perfectionnements au sujet desquels je ne crois pas devoir m'étendre ici. C'est là un côté de la question agronomométrique que j'ai eu l'occasion de développer récemment à l'Association belge des Chimistes, aux publications de laquelle je me permets de renvoyer (1).

A côté de la chimie, l'agronome dispose d'un autre moyen d'investigation, d'ordre expérimental, auquel on a donné le nom d'analyse du sol par la plante, ou analyse physiologique du sol. Ce procédé de détermination de la fertilité des terres consiste à répartir un échantillon du terrain, convenablement préparé, entre un certain nombre de pots ou vases de végétation, et à ajouter respectivement, dans le premier, tous les éléments nutritifs, et, dans les autres, les mêmes éléments sauf un, l'élément soustrait variant pour chaque pot. Tous les pots étant ensuite garnis des mêmes graines, la végétation nous dira, par son aspect, sa vigueur, ses rendements, comparés à ceux du premier pot, qui a reçu ce que l'on appelle un engrais complet, quels éléments manquaient à la terre mise en expérience.

(1) *Bulletin de l'Association belge des Chimistes*, t. XV, nos 4-5, avril-mai 1901.

De nombreux essais de ce genre ont été entrepris par un de mes collègues, M. Schreiber, agronome de l'État à Hasselt, en collaboration avec le Dr G. Smets. Diverses publications relatent leurs travaux hautement intéressants, qui portèrent spécialement sur les terrains du Limbourg.

Seulement, il est aisé de comprendre que ce mode d'investigation est long et compliqué, sans compter qu'il réclame des installations spéciales. Il serait peu applicable à toutes les terres d'une exploitation et convient plus particulièrement pour aider à fixer les caractères agronomométriques généraux d'une zone ou région agricole. A ce point de vue, les auteurs sont parvenus à des résultats remarquables.

La botanique, également, aide l'agronome dans la détermination des terres arables. Inutile de m'étendre sur ce point; tout le monde sait que la flore spontanée varie non seulement suivant les climats, mais, pour chaque climat, selon la nature du sol. Les régions calcaireuses, par exemple, présentent un aspect végétatif tout différent de celui des terrains schisteux, quartzeux, etc. Mais le moyen n'est pas d'une précision suffisante; tous les sols limoneux, pour ne citer qu'un cas, sont loin de se valoir au point de vue agricole, et ce sont là des différences que la composition de la flore ne traduit pas toujours. Au surplus, dans nos districts à culture intensive, la végétation adventice est fortement contrariée dans son développement par les façons culturales. Bien des végétaux qui, sur la terre vierge, auraient pu fournir des indices, ont disparu et ne se retrouvent pas sur nos guérets.

Les quelques considérations dans lesquelles je viens d'entrer vous montrent subsidiairement que la science agronomique ne peut pas ou ne peut plus se suffire à elle-même. L'agronome, qui en est le dépositaire attitré, appelle les lumières de divers spécialistes. Le champ des investigations scientifiques en matière agricole est devenu tellement vaste qu'il n'est plus explorable par un seul; ici, comme dans la plupart des autres domaines scientifiques, des subdivisions, la spécialisation s'imposent.

Ceci m'amène à appeler, sur la question qui nous occupe, l'attention d'une autre catégorie de savants : les géologues.

C'est là le but principal de ma communication. Notre Société est en rapport avec un grand nombre de compagnies savantes, et je voudrais vous demander de pouvoir me servir du véhicule de nos *Mémoires et Publications* pour indiquer aux géologues le terrain, c'est le cas de le dire, que l'agronométrie offre à leurs recherches.

Jusqu'à présent, la Géologie s'est particulièrement attachée à l'étude des roches sous-jacentes au manteau de terre meuble que l'agriculture

exploite. La Géologie a rendu aux industries extractives des services que tout le monde apprécie ; nous appelons sa sollicitude sur l'étude du sol arable qui lui permettra de conquérir d'autres lauriers.

Nous disions tantôt que la forme chimique seule des éléments ne détermine pas la mesure dans laquelle ils sont absorbables par nos récoltes. Cette assimilabilité dépend aussi de la nature géologique des particules terreuses.

La nature géologique des terres possède une grande influence sur leur productivité. Il serait de la plus haute importance que leur étude fût faite à ce point de vue. Il s'agirait, en ordre principal, de déterminer en quelles proportions les diverses roches s'y trouvent représentées et le degré d'agrégation des particules minérales.

Il paraît vraisemblable que les déterminations microchimiques, préconisées par MM. C. Klement et A. Renard notamment (1), de même que l'analyse spectrale sont appelées à rendre de grands services en cette matière.

Quelques notions sont déjà acquises.

Les matières azotées existent dans le sol en majeure partie à l'état organique, nous l'avons dit. Dans les conditions normales, il n'y a qu'une faible partie, en général pas plus de 2 à 3 % de l'azote total, qui se présente à l'état nitrique et ammoniacal.

Ces matières organiques azotées ont, dans les terres vierges, pour origine les débris abandonnés par la végétation spontanée. Dans nos terres cultivées de longue date, elles proviennent des fumures et des résidus laissés par les récoltes.

L'azote du sol n'acquiert de valeur réelle, au point de vue de l'alimentation des plantes, qu'à la condition de se nitrifier. Toutes les matières organiques ne se nitrifient pas également vite ; cela dépend, notamment, de leur texture, de leur degré de division et de décomposition. Leur examen, à ce point de vue, est donc à faire.

Il importerait d'étudier, de même, l'influence de la nature géologique des terres sur l'activité de la décomposition et de la nitrification de la matière organique. A quel degré les différents sols, selon leur nature, offrent-ils les conditions d'aération, de fraîcheur, de teneur en calcaire, réclamées par le phénomène ?

Un sol peut manquer d'air par suite de sa compacité ou de son excès d'humidité.

(1) C. KLEMENT et A. RENARD, *Réactions microchimiques à cristaux et leurs applications en analyse qualitative*. Bruxelles-Paris, 1886.

La compacité des terres est en rapport intime avec leur nature géologique. Quelles sont les formations qui se distinguent par une compacité trop grande? Quelles sont celles dont la porosité est convenable?

De même, la nature géologique a des rapports avec l'état d'humidité. La compacité trop grande, nous venons de le dire, rend le sol imperméable, et, dès lors, l'humidité y est fréquemment excessive. Mais, ailleurs, on recherchera si l'excès d'eau n'est pas dû à l'existence, à une certaine profondeur, d'une couche de tuf, d'argile ou d'une autre roche imperméable.

La nitrification réclame un degré de fraîcheur convenable. Les terrains trop secs, conséquence d'une perméabilité excessive, doivent leur défaut à la nature et aux dimensions de leurs particules, résultant des phénomènes géologiques qui leur ont donné naissance.

La nitrification est entravée dans un sol où l'absence de calcaire permet aux matières organiques de s'accumuler en formant des composés acides. La Géologie nous dira quelles sont les terres qui, de par leur origine, doivent manquer de carbonate de chaux, et quelles sont celles qui en seront pourvues. Elle recherchera aussi si, dans certains sols, le calcaire n'a pas disparu à la suite de sa dissolution lente par les eaux chargées d'acide carbonique.

Ajoutons qu'il n'est pas désirable, vu les pertes possibles, que les matières azotées du sol soient d'une décomposition trop facile. Ces pertes, portant surtout sur les nitrates, seront au maximum dans les terres les plus perméables et, à la fois, les moins pourvues d'argile et d'humus.

Les minéraux qui constituent les roches ne sont pas tous atteints avec la même facilité ni de la même façon par les agents de la désagrégation.

La chimie peut nous renseigner sur la teneur du sol en acide phosphorique; mais ce que nous demandons aux géologues, c'est de nous dire, autant que faire se peut, quelle est la nature géologique des phosphates en cause. S'y trouvent-ils à l'état de particules cristallines, de la consistance des apatites, par exemple, ou de concrétions plus ou moins dures, ou de matières amorphes? Au point de vue de leur rôle dans l'alimentation des plantes, cette considération est très importante. On sait, en effet, qu'à finesse égale, les particules phosphatées se laissent d'autant moins facilement entamer par les agents de dissolution, qui doivent les rendre assimilables, qu'elles sont plus dures, que leur cohésion est plus grande, leur texture plus compacte (1).

(1) Voir à ce sujet : ALEX. LONAY, *La fertilisation des terres*. Mons, 1898.

En ce qui concerne la potasse, on peut remarquer que beaucoup de terrains cultivés sont le résultat de la désagrégation de roches feldspathiques, lesquelles, on le sait, ont pour base du silicate d'alumine allié à divers autres silicates, parmi lesquels le silicate de potasse. Ces terrains se distinguent, en général, par leur richesse en potasse. Seulement, l'intervention du silicate de potasse dans l'alimentation des plantes paraît dépendre beaucoup de la ténuité plus ou moins grande des particules terreuses qui le contiennent. C'est sur ce point que nous désirerions être renseignés. C'est ainsi que nous savons déjà que la potasse des terres argileuses, à grains très fins, se montre plus active que celle des terrains sablonneux, de même origine, dont les grains sont beaucoup plus gros. Mais il doit y avoir entre ces deux extrêmes une série de degrés intermédiaires, que des recherches spéciales pourraient probablement déterminer.

Dans l'appréciation de la teneur d'une terre en chaux, il y a lieu de tenir compte de la nature du sol. Certains terrains compacts, qui en renferment même 1 %, supportent néanmoins avec profit l'opération du chaulage, la chaux introduite agissant ici comme amendement et non comme engrais. La Géologie nous renseignera, par l'étude de l'origine des terres, sous quelle forme la chaux s'y présente, à l'état de carbonate, de phosphate, de sulfate, de silicate, etc. Nous nous rappellerons que c'est surtout le carbonate qui intervient dans la nitrification des matières azotées. Il y aura lieu de tenir compte aussi de l'état de division sous lequel se présente le calcaire. Certains terrains, qui en renferment de grandes quantités sous forme de cailloux, peuvent en manquer au point de vue cultural.

La magnésie se rencontre dans les formations géologiques, surtout à l'état de silicate (micas, talcs) et à l'état de carbonate (dolomie). Elle se retrouve aussi principalement sous ces deux formes dans nos terres.

Le carbonate de magnésie est infiniment plus assimilable que le silicate; pour ce dernier, nous pourrions répéter ce que nous avons dit à propos du silicate de potasse.

En ce qui concerne l'acide sulfurique, il nous importe de savoir s'il existe à l'état de sulfate de chaux ou sous d'autres formes, telles que le sulfate de fer, dont la présence peut être une cause d'infécondité.

Le fer, chose intéressante à connaître, peut exister aussi, dans les sols privés d'air, à l'état de sulfure ou de protoxyde, qui sont également des combinaisons nuisibles.

Les quelques considérations qui précèdent montrent l'importance des recherches géologiques.

Laissez-moi vous faire remarquer maintenant, pour terminer, que ces investigations d'ordres divers, dans l'exposé sommaire desquelles vous avez bien voulu consentir à me suivre, constitueront la vraie base pour l'établissement d'un travail considérable, auquel on semble vouloir s'appliquer actuellement. Il s'agit de l'édification de la carte agronomique du pays. Celle-ci, à notre sens, doit être une carte agronomométrique nous renseignant, non pas, comme d'aucuns le voudraient, sur l'économie rurale, les assolements, les rendements de nos diverses régions, mais bien, exclusivement, sur la valeur culturale de nos différents sols. Les praticiens disposeraient ainsi d'un guide sûr pour la fertilisation de leurs terres. Leurs champs pourraient dès lors recevoir les engrais qu'ils réclament réellement, sans omission ni gaspillage. La culture en deviendrait à la fois plus économique et plus productive, partant plus lucrative aussi, but vers lequel nous avons le devoir professionnel de tendre.

---

L'INFLUENCE  
DES  
VENTS SUR LE CLIMAT  
PENDANT  
**L'ÉPOQUE PLEISTOCÈNE**

Résumé d'une étude lue à la séance du 15 mai 1901 du « *Norwich Science Gossip Club* »,

PAR

**F. W. HARMER, F. G. S.**

Membre associé étranger de la Société belge de Géologie.

Traduit de l'anglais par JEAN BERTRAND.

---

A une séance du *Norwich Science Gossip Club*, le 15 mai 1901, Mr F. W. Harmer, F. G. S., donna de vive voix un compte rendu d'une récente étude communiquée par lui à la *Geological Society* de Londres et publiée dans le *Quarterly Journal* de cette Société (vol. LVII, pp. 405-476). Les pages suivantes sont un court résumé de cette étude.

L'INFLUENCE DES VENTS SUR LE CLIMAT PENDANT L'ÉPOQUE PLEISTOCÈNE;  
UNE EXPLICATION PALÉO-MÉTÉOROLOGIQUE A QUELQUES PROBLÈMES  
GÉOLOGIQUES.

Les progrès de la science météorologique nous ont fourni beaucoup de lumière quant aux causes des constants changements — apparemment capricieux pour l'observateur superficiel — du temps qui règne sur certaines parties de la surface de la terre. Nous comprenons maintenant pourquoi en Grande-Bretagne, par exemple, un jour est sec ou froid, le suivant pluvieux ou chaud. Nous comprenons aussi pourquoi le caractère général des saisons s'écarte souvent si fort de la

normalité, le climat de printemps étant parfois éprouvé en janvier et les conditions hivernales subies en mai ou juin. Quoique le météorologiste nous montre que la direction du vent est due à la position relative et à la forme en même temps qu'à l'alignement des surfaces de haute et basse pression barométrique, cependant le météorologiste scientifique, de même que le paysan illettré, regarde toujours vers la girouette de la tour de l'église pour donner une première explication à une anomalie dans l'état du temps. Les vents doivent nécessairement souffler, comme on le sait bien, dans une direction plus ou moins parallèle aux lignes isobares. Sur l'hémisphère Nord et dans un anticyclone, les vents sont animés d'un mouvement circulaire centrifuge, de même direction que celle des aiguilles d'une montre; dans un cyclone, au contraire, leur mouvement est circulaire centripète et de direction opposée. Pour employer la vieille formule : « Si vous tournez le dos au vent, vous aurez la plus haute pression barométrique à votre droite. »

Le climat d'hiver comparativement doux de la Grande-Bretagne est attribué, et avec bonne raison, au *Gulf stream*; mais l'action de celui-ci est plutôt indirecte. Quand le vent souffle du N.-E., l'influence qu'il exerce sur nos thermomètres est pratiquement nulle. Lorsque le temps se refroidit soudainement, on ne se demande jamais si le *Gulf stream* coule en moindre volume, mais si le vent n'a pas changé. Si les vents du Nord ou de l'Est étaient aussi prédominants pendant l'hiver sur les Iles Britanniques qu'ils le sont au printemps, leur température moyenne annuelle serait considérablement plus basse qu'elle ne l'est à présent.

Chose étrange : dans leurs conjectures sur les causes des climats anormaux du passé et spécialement de ceux de l'époque pleistocène, des géologues, tout en reconnaissant pleinement la part importante jouée par les courants marins aussi bien que l'influence des vents sur ceux-ci, ont rarement recherché dans quelle mesure les perturbations climatiques ont pu être dues en tout ou en partie aux variations des vents eux-mêmes. Des courants aériens, pourtant, peuvent, en l'espace de quelques heures, totalement changer le climat momentané de quelque district en y apportant de vastes masses d'air de régions du Nord ou du Sud, selon que le cas se présente. Des saisons anormalement chaudes ou froides, pluvieuses ou sèches, peuvent être causées de la même manière, quoique le cours de la circulation océanique reste pratiquement le même. Des altérations permanentes seraient également le résultat de changements permanents dans la direction des vents dominants.

Il serait utile, pour cela, de rechercher si quelques-uns des cas de climat anomal qui se produisirent pendant l'époque pleistocène peuvent avoir été amenés ou au moins intensifiés par des causes météorologiques. Il ne serait certainement pas difficile de montrer que les conditions météorologiques de cette période doivent avoir grandement différé de celles de notre temps.

Cependant, avant d'essayer de reconstituer ces conditions météorologiques, il semble désirable d'attirer l'attention, aussi brièvement que possible, sur les points saillants de celles de nos jours.

Grâce à la courtoisie de M<sup>r</sup> W. N. Shaw, F. R. S., de l'Office météorologique anglais, j'ai été autorisé à consulter les *Tägliche Synoptische Wetterkarten* du Nord-Atlantique et des continents adjacents, publiées sous la direction commune des Offices météorologiques danois et de Hambourg. J'ai aussi profité des cartes du temps du D<sup>r</sup> Buchan dans les rapports de l'Expédition du *Challenger* et dans l'*Atlas of Meteorology* récemment publié.

Ces cartes montrent que, dans une certaine portion de la surface terrestre, les conditions atmosphériques sont plus ou moins permanentes, spécialement dans l'hémisphère austral. (Voir fig. 1 et 2, reproduites d'après le *Quarterly Journal of the Geological Society*, avec l'aimable permission du Conseil) (1).

Au Sud du 40° latitude Sud, il existe, à toutes les époques de l'année, un creux de basse pression barométrique avec, immédiatement au Nord, une ceinture complémentaire de haute pression. Cette dernière n'est pas continue durant les mois d'été, mais tend alors à se scinder et à quitter les continents. Pendant l'hiver austral, elle couvre non seulement une région plus étendue, mais s'étend plus loin vers le Nord; elle empiète sur la surface de basse pression équatoriale et la presse dans la direction du Nord. Dans l'hémisphère Nord, l'état des choses, quoique conforme au même principe général, diffère dans les détails. Les conditions météorologiques y sont moins permanentes. Des ceintures de haute et basse pression correspondent à celles de l'hémisphère austral; elles peuvent être tracées, mais, à cause de la grande masse des terres du Nord de l'équateur, elles ne sont pas continues et leur position relative varie aux différentes saisons.

(1) Nous devons les quatre figures ici reproduites à l'obligeance de M. Harmer, qui a bien voulu en mettre les clichés à la disposition de notre Société. Dans le texte anglais, ces figures portent les nos 4, 5, 11 et 12, c'est-à-dire ceux des figures accompagnant l'étude complète de M. Harmer dans le *Quarterly Journal of the Geological Society*. Pour faciliter la lecture, les cartes ont été ici numérotées régulièrement de 1 à 4. (N. d. T.)

Les masses terrestres sont, durant l'été, plus chaudes que les océans et pour cette raison sont en général cycloniques. En hiver, elles sont plus froides et anticycloniques. Cependant, de même que dans l'hémisphère austral, les anticyclones tendent à quitter les terres pour les océans lorsque le printemps s'avance. Ils y retournent en automne. Les systèmes de haute pression se meuvent vers le Nord et vers le Sud avec le soleil. Certains phénomènes météorologiques sont cependant plus ou moins permanents dans l'hémisphère septentrional. Des anticyclones existent toujours près du tropique du Cancer, dans le Nord-Atlantique et dans le Pacifique Nord; toutefois, leur forme et leur position varient non seulement de jour en jour, mais aussi de saison à saison. C'est ainsi qu'en hiver, ils se raccordent souvent aux anticyclones des masses terrestres adjacentes. Des surfaces bien marquées de basse pression sont, d'ailleurs, prédominantes sur les océans pendant une grande partie de l'année. Il y en a une, que l'on voit sur la carte de janvier (fig. 1), qui s'étend sur le Pacifique Nord, au Sud du détroit de Behring. Elle tend à se rétrécir aux approches de l'été; en juillet (fig. 2), elle disparaît presque et n'existe alors que comme un lobe étroit projeté par le grand cyclone asiatique.

Des conditions générales de basse pression règnent également en hiver sur la partie septentrionale de l'Atlantique, bien que des changements constants se produisent dans la position et la forme de cette aire cyclonique sur laquelle, en été, l'anticyclone du Sud empiète.

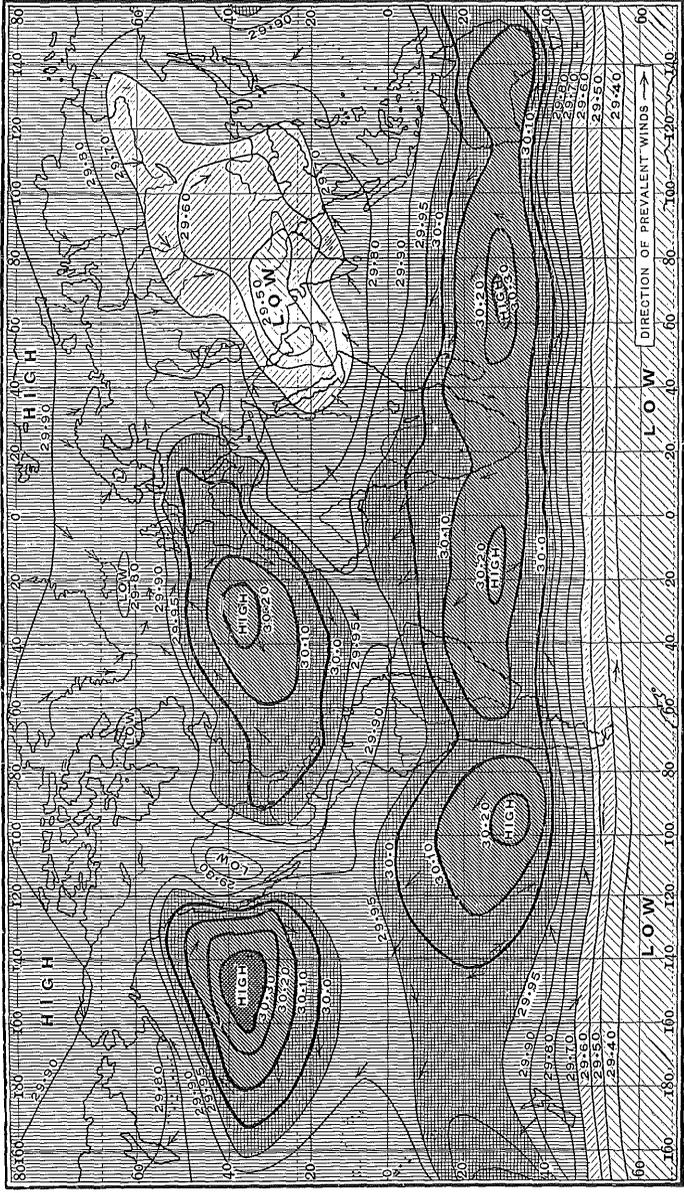
La région glacée du Groenland est toujours plus ou moins une surface de pression plus haute que le système cyclonique du Nord-Atlantique. Jamais le Groenland n'est traversé par les perturbations cycloniques qui sont prédominantes sur cette partie de l'Océan. Ces troubles atmosphériques buttent, pour ainsi dire, contre cette région de plus haute pression et passent vers le Sud. Les cartes météorologiques sont, d'après la règle, statistiques; elles ne représentent pas l'état véritable des choses en un moment du temps, puisqu'elles sont basées sur les moyennes mensuelles d'un certain nombre d'années. Néanmoins, elles indiquent généralement les changements saisonaux dans les conditions atmosphériques et la direction dominante des vents dont dépendent pour une si grande part les climats inconstants de l'hémisphère septentrional. Par de telles cartes (fig. 1 par exemple), on peut voir que c'est à la position et à la forme de la dépression d'Islande en même temps qu'à la prédominance des vents S.-W. sur les Iles Britanniques et la côte de Norvège que le climat d'hiver comparativement doux de ces contrées est largement dû. Sur ces mêmes cartes, on voit aussi qu'un effet

FIG. 1. — ARTE ISOBARE POUR JANVIER (STATISTIQUE). Extraite de l'Atlas of Meteorology, pl. XII.



30.50 & OVER ■ 30.50-30.30 ■ 30.30-30.10 ■ 30.10-29.95 ■ 29.95-29.70 ■ 29.70-29.50 ■ 29.50-29.30 ■ 29.20 & UNDER ■  
 Les flèches indiquent la direction des vents dominants.  
 (HIGH: haute pression; LOW: basse pression. — Les hauteurs barométriques sont exprimées en inches 4 inch = 25mm 4; 760 millim. = 29 inches 92. — N. d. T.)

FIG. 2. — CARTE ISOBARE POUR JUILLET (STATISTIQUE). Extrait de l'Atlas of Meteorology, pl. XII.



contraire est produit par les vents froids qui règnent sur les régions du Labrador et la partie septentrionale de l'Amérique du Nord située de l'autre côté du centre cyclonique.

L'influence des aires de haute et basse pression sur le climat n'est pas due tant à leur position relative qu'à leur forme et à leur alignement. L'air mis en mouvement par un cyclone de forme circulaire et de petit diamètre ne se déplace pas loin. Au contraire, un cyclone de plus grande dimension ou de forme elliptique et situé de façon que son grand axe s'étende sur une distance N.-S. considérable, produit du côté Est de son centre le transport rapide de masses d'air chaud venant de régions lointaines du Sud. Par contre, du côté Ouest de son centre, ce cyclone occasionne le passage rapide de volumes considérables d'air froid ou glacé venant du Nord. Les cartes météorologiques montrent, en conséquence, que des changements du temps tels que ceux qui caractérisent le climat anglais sont non seulement causés par le balancement ou l'oscillation journalière ou saisonale des surfaces de haute et basse pression, mais aussi par les changements constants dans leur forme. Dans les régions de perturbation, comme celle de l'Atlantique du Nord, des cyclones et anticyclones sont en mouvement constant pendant plusieurs parties de l'année; ils se pressent et se déplacent en se repoussant mutuellement. Et ainsi ils changent de forme comme les ondulations d'une mer tourmentée (*a choppy sea*). Une perturbation comparativement légère peut ainsi altérer leur forme et leur alignement, et modifier la direction du vent en tout endroit. Toute perturbation atmosphérique importante en un point, amenée de quelque manière que ce soit, peut en conséquence faire sentir son influence à une grande distance du foyer de son origine.

Gardant à l'esprit ces faits bien connus, nous pouvons maintenant rechercher jusqu'à quel point les conditions météorologiques qui doivent s'être produites pendant l'existence des feuilles glaciaires d'Amérique et d'Eurasie peuvent être montrées en harmonie avec les données géologiques ou explicatives à ces données.

Ces conditions doivent avoir eu un caractère plus permanent que celles existant actuellement, puisqu'elles n'auraient pas présenté alors la différence qui existe maintenant entre la température d'hiver et d'été et la pression barométrique des régions couvertes de glace. Ces dernières avec les régions y attenantes ou sous leur influence doivent avoir été plus ou moins anticycloniques en toutes saisons de l'année, pendant que sur le pays au Sud de la feuille de glace et sur les océans, — régions de chaleur relative, — des conditions de basse pression ont dû, en général, prédominer.

Le contraste très accentué entre les systèmes cyclonique et anticyclonique doit en outre avoir causé beaucoup de perturbations atmosphériques, à tel point que les tempêtes auraient été plus fréquentes et plus violentes, provoquant par conséquent localement des pluies beaucoup plus abondantes.

Mon attention fut attirée accidentellement sur ce sujet lors d'un essai pour résoudre un problème géologique, à savoir : celui des conditions dans lesquelles les dépôts du crag supérieur de l'Est de l'Angleterre s'étaient accumulés. D'énormes masses de coquilles mortes furent à cette époque jetées sur les côtes anglaises de la mer du Nord comme elles le sont actuellement sur les rivages de la Hollande. De tels débris sont d'ailleurs extrêmement rares à présent sur les plages de Suffolk et de Norfolk, qui font face à l'Est. Dans mon étude, j'ai donné les raisons qui me portent à croire qu'aux derniers temps du Pliocène, les tempêtes d'Est doivent avoir été prédominantes dans la partie méridionale de la Mer du Nord plutôt que les tempêtes d'Ouest dont aujourd'hui le régime domine.

J'ai montré que cela était dû au fait que la période glaciaire avait déjà commencé dans les régions du Nord de la Grande-Bretagne, que dès lors des conditions de haute pression y étaient en hiver plus prédominantes qu'actuellement. Des tempêtes cycloniques s'approchant de la Grande-Bretagne par l'Atlantique auraient eu, en conséquence, une course plus méridionale.

Lorsque le cas se présente aujourd'hui, des coups de vent d'Est sont causés et des coquilles mortes sont rejetées sur les plages de l'Est de l'Angleterre.

Voyant que l'établissement de feuilles de glace permanente en Europe et en Amérique du Nord doit avoir profondément altéré la distribution de la pression barométrique et la direction des vents dominants dans l'hémisphère Nord, il m'apparaît que les changements dans la distribution de température ainsi produite peuvent fournir une explication à quelques-unes des questions des climats anomaux connus des géologues.

Dans la première question, j'applique la méthode paléo-météorologique au cas du désert du Grand Sahara, qui, aujourd'hui absolument aride, jouissait auparavant, comme c'est bien connu, d'un climat relativement humide. A présent, aucune pluie ne tombe dans cette région parce que les vents y prédominant soufflent avec persistance en toute saison du continent ou du Nord par suite de la direction des lignes isobares. Aucune humidité n'a pu atteindre le Sahara, excepté celle venant de l'Océan.

Or, c'est seulement par suite d'un arrangement différent de celui d'aujourd'hui dans les positions relatives des surfaces de haute et basse pression barométrique que des vents océaniques ont pu arriver dans les régions sahariennes. Le sauvagement pleistocène, s'abritant des pluies tropicales derrière une roche ou une colline de sable, avec le dos à l'Ouest, devait nécessairement avoir la plus haute pression barométrique à sa droite et la plus basse pression à sa gauche. Un tel état des choses ne peut se présenter maintenant, car, comparativement aux régions plus méridionales, la région méditerranéenne constitue nettement une aire de plus haute pression.

Cyclones et anticyclones sont nécessairement complémentaires les uns aux autres, comme le sont les entre-deux et les crêtes des vagues de la mer. L'existence d'un anticyclone duquel des courants d'air descendent constamment et coulent extérieurement dans toutes les directions, implique par conséquent la coexistence, dans les régions voisines, de cyclones d'importance correspondante : réservoirs, en fait, dans lesquels l'air peut s'engouffrer et desquels, en outre, l'air peut monter comme par un tuyau de cheminée aérienne pour accomplir la circulation atmosphérique verticale. Lors de l'extension maximum de la glace en Europe, un grand anticyclone doit, je pense, s'être étendu plus ou moins fortement sur le Nord de ce continent. Dans ce cas, les régions au Sud de la feuille de glace auraient, par contre, été en général cycloniques. A présent, lorsque l'Europe centrale est pour un petit temps anticyclonique, des conditions de basse pression existent souvent sur la Méditerranée. Les tourmentes cycloniques venant de l'Atlantique évitent, comme elles doivent nécessairement le faire en de telles circonstances, la surface anticyclonique et suivent, pendant l'hiver, cette voie méditerranéenne vers la mer Noire, sans jamais cependant gagner assez loin vers le Sud pour apporter les vents d'Ouest sur le Sahara. Elles peuvent néanmoins — elles doivent même souvent — avoir fait ainsi pendant l'existence du grand anticyclone sur la feuille de glace européenne.

Passant maintenant au nouveau monde, des géologues américains ont montré que d'énormes lacs, auxquels les noms de Labontan et Bonneville ont été donnés, existaient jadis dans le grand bassin qui s'étend entre les montagnes Rocheuses et la Sierra-Nevada, région aujourd'hui sans issue et d'une extrême aridité.

La succession des événements dans cette région, aux temps glaciaires, semble avoir eu lieu comme suit : une période, antérieure à l'inondation des plaines, avec un climat aussi pauvre en pluie que celui

d'aujourd'hui; ensuite une période humide, pendant laquelle le lac Lahontan atteignit une profondeur de 500 pieds (1), puis un temps de dessèchement suivi d'un retour aux conditions d'humidité; et finalement une évaporation de l'eau à son niveau actuel.

Durant les périodes pré-lahontanienne et inter-lahontanienne, avec leur climat aride, la météorologie peut avoir été, plus ou moins, similaire à ce qu'elle est aujourd'hui. Si, toutefois, les anticyclones du Nord-Pacifique et du continent Nord-américain avaient été changés de leurs positions actuelles, un système de basses pressions, similaire à celui qui a pu exister sur la surface méditerranéenne pendant l'époque pluvieuse du Sahara, se serait produit au large de la côte du Mexique, et des conditions d'humidité plus grande auraient régné sur les parties méridionale et occidentale des États-Unis par suite des vents chauds et humides Sud ou Sud-Est soufflant du golfe de Californie (2).

Supposant que l'origine de ces changements ait été météorologique, ceux-ci peuvent, je pense, avoir été dus à la présence, pendant les phases pluvieuses de la période en question, d'une feuille de glace en Amérique du Nord. La pression de l'anticyclone glaciaire dérangeait les conditions atmosphériques du grand bassin qui avaient existé à la période pré-lahontanienne en altérant la direction dominante des vents. Les conditions antérieures peuvent avoir été rétablies lorsque, par suite de la disparition ou le retrait de la glace, cette pression cessa.

La météorologie peut donc ainsi jeter quelque lumière sur la question de l'abondance primitive de la vie mammifère dans l'extrême Nord de l'Asie.

On sait qu'aux temps pleistocènes, l'aire de répartition du Mammouth fut étendue, mais, nulle part, les restes de cet animal ne sont plus communs que le long des côtes de la mer Polaire. Ils se trouvent dans toutes les parties de la Sibérie du Nord, depuis les monts Oural jusqu'au détroit de Behring, et à l'Est de celui-ci, en Alaska aussi bien que dans l'archipel Liakof jusqu'au 75° latitude Nord. Certains géologues russes prétendent que le Mammouth et ses contemporains — parmi lesquels l'Élan d'Amérique, forme forestière, peut être spécialement mentionné — vécurent là où leurs squelettes ont été trouvés. Quoique l'*Elephas primigenius* fût indubitablement une espèce boréale, il n'a pu prospérer que dans une région où sa nourriture naturelle était plus ou moins abondante. Actuellement, la limite septentrionale extrême de l'extension des forêts se trouve considérablement au Sud de la région en question.

(1) 500 pieds anglais = 152<sup>m</sup>,40. (N. d. T.)

(2) *Loc. cit.*, fig. 20, p. 436.

Aujourd'hui, la température estivale de la Sibérie n'est point froide, mais aussi chaude que celle de la Norvège : l'isotherme de juillet de 50° Fahrenheit (1) coupe à la fois le cap Nord et la ligne côtière de la province de Iakoutsk. Par contre, le climat hivernal sibérien est extrêmement rigoureux : pour janvier, la température moyenne est de — 45° Fahrenheit (2). Ce sont donc seulement les conditions d'hiver de cette région qui empêchent l'extension vers le Nord de la zone des forêts.

Les isothermes de janvier de l'hémisphère septentrional sont très irrégulières. C'est ainsi que l'isotherme 0° Fahrenheit (3) de ce mois atteint vers le Sud en Mongolie la latitude Nord 45°, qui est celle de Turin, et vers le Nord, elle est proche du Spitzberg. Ce n'est pas là une raison pour supposer que durant l'époque pleistocène les lignes isothermes concordaient mieux que maintenant avec les parallèles de latitude et, partant, que le climat du continent euro-asiatique était plus doux et plus uniforme. Il est encore moins probable que la distribution de la pression atmosphérique était similaire à celle d'aujourd'hui, mais avec un accroissement général de la température. L'hypothèse la plus plausible semble être qu'une chaleur et un froid relatifs étaient, à cette époque, locaux comme à présent, mais que le climat du Nord de la Sibérie était alors en hiver anormalement doux comme il est actuellement anormalement froid.

Il n'est pas probable que le détroit de Behring ait été plus ouvert durant la période en question qu'il ne l'est maintenant. Au contraire, les restes du Mammouth se retrouvent non seulement sur les deux côtés de ce détroit, mais encore dans les archipels Aléoutiens et Pribilof aussi bien que dans celui des Liakof. Or, une élévation du pays qui aurait joint ces îles au continent aurait aussi uni l'Asie et l'Amérique et entièrement fermé le détroit.

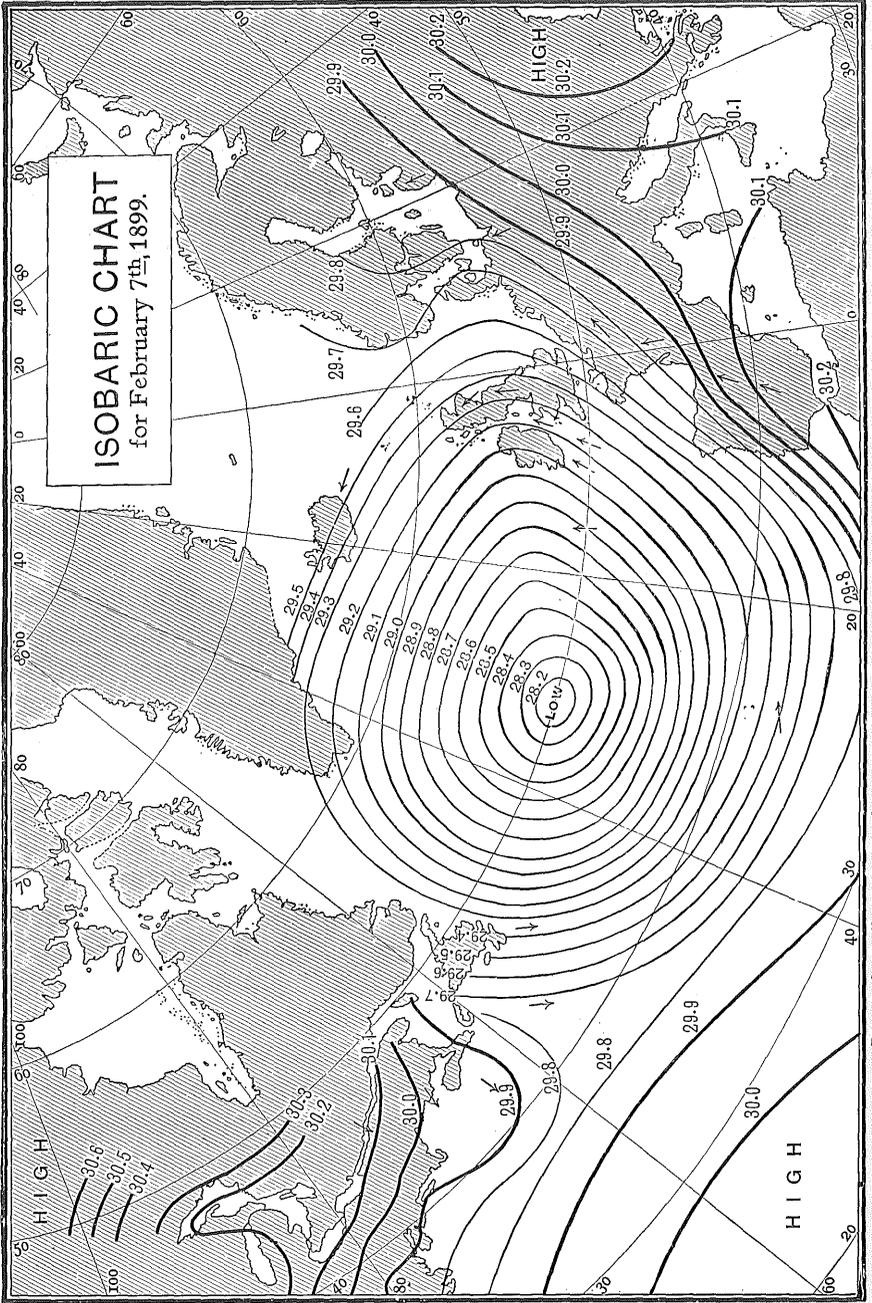
Le climat relativement doux de ces régions pendant l'époque pleistocène ne pouvait donc être dû à la pénétration dans le bassin polaire de courants d'eau chaude venant du Pacifique. Nous devons en revenir à l'explication qui a déjà été discutée dans les cas précédents et qui semble présenter les moindres difficultés, c'est-à-dire que la disposition des aires de haute et de basse pression et la direction résultante des vents prédominants étaient alors différentes de celles que l'on observe maintenant.

(1) 50° F. = 10° C. (N. d. T.)

(2) — 45° F. = — 42°, 77 C.

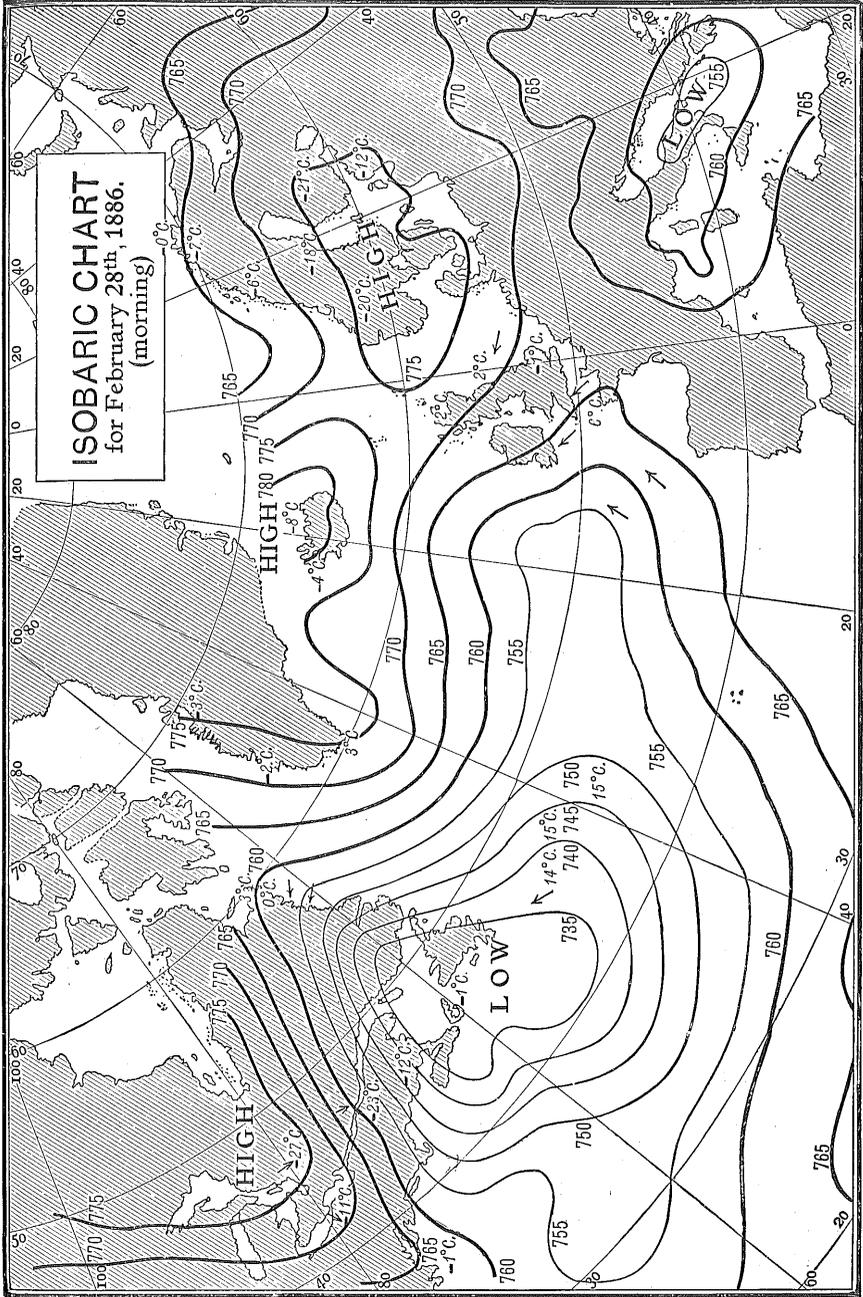
(3) 0° F. = — 17°, 77 C. (N. d. T.)

FIG. 3. — CARTE ISOBARE POUR LE 7 FÉVRIER 1899.



DANS LE Bulletin de N. d. S. empruntés au QUARTERLY JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY. (LONG : haute pression : 1008. ; basse pression : 1014. ; échelle : 1 millimètre = 100 mètres.)

FIG. 4. — CARTE ISOBARE POUR LE 26 FEVRIER 1886 (matin).



(D'après les *Tägliche Synoptische Wetterkarten*; empruntée au QUARTERLY JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY.)  
Trois jours auparavant, le vent étant N.-N.-W., la température de la côte du Labrador s'éleva de — 35° C. à 0° C.

La rigueur du climat hivernal des îles Liakof et de la côte sibérienne septentrionale est en grande partie due aux vents Sud-Ouest qui, venant des déserts glacés de l'Asie centrale, soufflent pendant cette saison.

Les plateaux de Mongolie et de Mandchourie doivent, je pense, avoir été aussi froids, sinon plus froids, en hiver, pendant l'époque pleistocène qu'ils ne le sont maintenant, de sorte que les arbres n'ont jamais pu fleurir dans la Sibérie du Nord aussi longtemps que les vents de cette saison ont soufflé en prédominance du quart Sud-Ouest. Pour que ces régions fussent, l'hiver, favorisées d'un climat plus doux, les vents Sud-Est, venant du Nord-Pacifique, eussent été nécessaires. Ce fait ne peut s'être produit que lorsque les lignes isobares couraient Sud-Est-Nord-Ouest.

Actuellement, les conditions météorologiques hivernales de cette région sont statistiquement représentées par un cyclone elliptique dont le grand axe pointe Est et Ouest et qui se trouve en cette saison au Sud du détroit de Behring, enclavé (*wedged in*) entre les systèmes de haute pression qui règnent alors sur la Sibérie et l'Amérique septentrionale, ce dernier se rattachant à l'anticyclone du Nord-Pacifique (v. fig. 4). Un tel état de choses a pu cependant difficilement se produire durant l'existence de la feuille de glace de l'Amérique du Nord. Le centre de l'anticyclone Nord-américain a dû alors être localisé plus loin vers le Nord pendant que la surface océanique occupée aujourd'hui par l'anticyclone pacifique, jouissant d'une température plus chaude que celle qui régnait au-dessus de la feuille de glace, aurait été cyclonique.

Nous avons vu plus haut que pour occasionner des vents W. ou S.-W. sur le Sahara, l'anticyclone, qui actuellement se trouve sur la côte Nord-africaine, a dû disparaître ou avoir été déplacé au loin, probablement vers le Sud. J'ai essayé de montrer, hypothétiquement, dans une des cartes de mon étude, comment une telle disposition a pu également se produire sur le Pacifique Nord pendant l'époque pleistocène. Si une surface linguiforme de basse pression, semblable à celle qui, statistiquement, s'étend au mois de janvier de notre époque du Labrador à la Nouvelle-Zemble, mais orientée dans une direction différente, c'est-à-dire S.E.-N.W., s'était trouvée en hiver, durant l'époque pleistocène, avec son centre au Sud-Ouest du détroit de Behring, des vents doux venant du Pacifique auraient alors été prédominants en cette saison le long de la côte septentrionale de Sibérie. Dans de telles circonstances, les arbres auraient été capables de résister au climat hivernal sibérien, comme aujourd'hui, par la même latitude, ils résistent à l'hiver du cap Nord.

En essayant, pourtant, de reconstituer la disposition des aires de haute et basse pression pendant l'époque pleistocène, j'ai trouvé qu'il était difficile d'arriver à ce résultat de manière à retrouver ce qui me semble être les conditions météorologiques nécessaires, dans l'hypothèse que les glaciations maxima de l'Amérique du Nord et d'Europe eurent lieu en même temps.

Si les continents ont été en général anticycloniques pendant l'existence des feuilles de glace, les régions attenantes du Nord-Atlantique et du Nord-Pacifique, en toutes saisons relativement chaudes et humides, doivent avoir été cycloniques. Mais nous devons aussi bien tenir compte du mouvement horizontal que de la circulation verticale de l'atmosphère. L'air se meut autour du centre d'une aire de basse pression et les vents Sud qui soufflent à l'Est de ce centre doivent plus ou moins étroitement correspondre aux vents Nord qui soufflent à l'Ouest de cette même dépression. Les hivers doux de la Grande-Bretagne, au côté Sud-Est du centre cyclonique islandais actuel, sont nécessairement les équivalents des conditions arctiques de la même saison au Labrador, situé à l'Ouest du même cyclone (voir fig. 1). Quand l'Atlantique est occupé par un grand système de dépression, des hivers exceptionnellement froids en Amérique peuvent coïncider avec un temps anormalement doux en Europe. Un exemple semblable, de caractère instructif, se produisit pendant la première partie de 1899. C'est à Mr W. N. Shaw, F. R. S., du *Meteorological Office*, que je dois ce renseignement (fig. 3).

A cette époque, on enregistra communément dans plusieurs parties de l'Amérique du Nord des températures de  $-40^{\circ}$  à  $-60^{\circ}$  Fahrenheit (1). Des tempêtes violentes étaient fréquentes. Dans le Maine et le Massachusetts, on observa une vitesse de vent de 72 milles (2) à l'heure. A l'embouchure du Mississipi, le thermomètre descendit à  $10^{\circ}$  Fahrenheit (3) et des glaces furent poussées de l'extérieur à l'intérieur du Golfe du Mexique.

Dans le port de New-York, un des grands navires transatlantiques s'enfonça (*sank*) sous le poids de la glace qui couvrait son pont et son gréement. A la même époque, l'Europe occidentale et la Grande-Bretagne éprouvaient des températures anormalement élevées. En février, on observa des maxima de  $70^{\circ}$  F. à Liège,  $69^{\circ}$  F. à Paris,

(1)  $-40^{\circ}$  F. =  $-40^{\circ}$  C. ;  $-60$  F. =  $-61^{\circ},11$  C.

(2) 1 mille anglais =  $1^{\text{km}},6093$ ; 72 milles anglais =  $115^{\text{km}},9$  (en forçant).

(3)  $10$  F. =  $-12^{\circ},22$  C.

66° F. à Londres et 62° F. (1) à Davos à 5.000 pieds (2) au-dessus du niveau marin. Depuis nombre d'années, la plus haute température de février enregistrée à Davos avait été de 52° F. (3) et la moyenne maximum de 58° F. (4). L'explication météorologique de ces faits n'est point longue à chercher. La rigueur de l'hiver en Amérique était due aux vents accourant des régions glacées du Nord, tandis que, grâce à des vents du Sud, rigoureusement complémentaires aux premiers, l'Europe occidentale était à la même saison inondée de vastes volumes d'air venant de la zone sub-tropicale.

Il paraît dès lors possible que des conditions arctiques en Amérique du Nord aient coïncidé avec des conditions interglaciaires en Europe. En effet, le cas précisément exposé montre qu'un état du temps extraordinairement doux en Europe peut constituer l'accompagnement nécessaire et même la mesure d'un froid extrême en Amérique du Nord.

Il n'est ainsi point difficile de proposer une disposition des isobares telle que l'Amérique serait soumise à un climat tempéré, alors que l'Europe Nord-Occidentale serait recouverte de glace. A présent, lorsque la Scandinavie et le Groenland sont simultanément anticycloniques, le système de dépression du Nord-Atlantique est refoulé vers la côte américaine, donnant ainsi naissance sur le Labrador à des vents Sud-Est. Cela eut lieu, par exemple, au printemps de 1886 (fig. 4). Alors, la température du Labrador monta de — 55° à 0° C. dans l'espace de quelques jours, grâce au changement du vent qui du Nord-Est tourna au Sud-Est. Le climat du Labrador s'altère, de jour à autre, d'une manière très remarquable. Lorsque le vent souffle du Groenland, il fait très froid, mais lorsqu'il tourne au Sud ou au Sud-Est, le thermomètre monte rapidement. Sous des conditions convenables, je pense, des changements semblables, mais d'un caractère permanent, peuvent s'être accomplis dans cette région.

La température hivernale actuelle du Labrador — un des centres de dispersion de glace de l'Amérique du Nord, suivant le professeur Chamberlin, — est aussi rigoureuse et les précipitations atmosphériques aussi considérables qu'au Groenland. Toutefois, pendant l'été, le Labrador est par intermittence sujet à l'influence de vents chauds dont l'action empêche l'accumulation persistante de neige. Il semble donc que la quantité totale de précipitations nécessaire à produire une calotte de

(1) 70° F. = 21°,11 C. ; 69° F. = 20°,55 C. ; 66° F. = 18°,88 C. ; 62° F. = 16°,66 C.

(2) 5 000 pieds anglais = 1 524 mètres.

(3) 52° F. = 11°,11 C. (N. d. T.)

(4) 38° F. = 3°,33 C.

glace ne doit pas être exceptionnellement grande. Si la neige tombe plus rapidement qu'elle ne fond ou ne s'évapore, elle peut, au bout d'un temps, s'accumuler jusqu'à un certain degré. C'est l'absence de vents chauds en été qui me paraît spécialement nécessaire pour l'accroissement d'une feuille de glace. Si les vents chauds d'été pouvaient être détournés du Labrador, ses conditions glaciales d'autrefois pourraient, même maintenant, se trouver rétablies.

Comme pendant les temps pleistocènes, le climat de l'hémisphère Nord est devenu plus froid, la surface de glaciation permanente s'est graduellement agrandie vers le Sud. Les régions couvertes de glace étant anticycloniques, l'air devait s'écouler autour d'elles dans toutes les directions par un mouvement circulaire centrifuge, comme, d'après Nansen, cela se passe actuellement au Groenland. De plus, la route des tempêtes cycloniques qui prédominent maintenant entre les grands lacs et Terre-Neuve, et auxquelles le climat extrêmement variable du Labrador doit en grande partie ses causes, a dû être refoulée vers le Sud. Dans ces conditions, comme dans d'autres, sur lesquelles ont insisté des autorités telles que Croll, Wallace et Chamberlin, l'accroissement d'une feuille de glace tendrait à sa propre accélération.

Quel qu'ait pu être le cas à des époques plus éloignées, je ne pense pas que le climat de l'hémisphère septentrional ait pu être totalement froid pendant les phases glaciaires, ni totalement doux pendant les interruptions interglaciaires de l'époque pleistocène. Il semble probable, en effet, que les isothermes saisonales et annuelles peuvent les unes et les autres s'être alors éloignées des cercles parallèles plus que maintenant. Des régions de chaleur relative doivent toujours avoir été, pendant la période glaciaire, le complément nécessaire de celles qui étaient sous l'étreinte d'un hiver perpétuel.

Tandis qu'une période glaciaire en Amérique du Nord et une période interglaciaire en Europe peuvent avoir été simultanées dans des conditions analogues à celles de notre temps, — à part cela que, dans l'ensemble, le climat de l'hémisphère Nord était plus froid, — un état de choses tout différent a dû exister pendant l'ère de glaciation de l'Europe.

Il me paraît presque impossible qu'une feuille de glace permanente ait pu exister sur les Iles Britanniques, alors que le canal entre le Groenland et l'Europe, large de 500 milles (1), était resté ouvert. Aussi longtemps que cette communication existait, un échange entre les eaux équatoriales et polaires devait se faire et causer, comme aujourd'hui,

(1) 500 milles anglais = 804<sup>km</sup>,650. (N. d. T.)

une prédominance des conditions cycloniques, particulièrement en hiver, avec des vents chauds Sud et Sud-Ouest soufflant sur la partie Nord-orientale du bassin atlantique.

Si, cependant, par suite du soulèvement de la croupe sous-marine qui relie le Groenland à la Scandinavie ou par suite d'un amoncellement de glace sur cette croupe, le canal s'était fermé, une feuille de glace eût pu prendre naissance sur les hauteurs scandinaves.

Actuellement, une lutte constante semble être engagée pendant l'hiver entre les grands anticyclones des continents Est et Ouest et les cyclones de l'Atlantique; dans leurs mouvements, leur position relative et leur disposition, ils sont en dépendance réciproque les uns des autres.

Lorsque la partie Nord-Est du bassin atlantique est cyclonique comme sur les figures 1 et 3, des vents chauds règnent sur les Iles Britanniques et l'hiver y est doux. Lorsque, par contre, un système cyclonique s'étend sur la côte de la Nouvelle-Angleterre, comme dans la figure 4, des vents Sud-Est soufflent sur le Labrador et la température y monte. Une lutte analogue à celle d'aujourd'hui, mais affectée d'un caractère plus permanent, a pu être engagée pendant la période glaciaire et des changements séculaires ont pu en résulter dans l'alignement des isobares, la direction des vents, et la distribution locale des zones climatiques.

Il est toutefois plus aisé de montrer qu'il y a de graves difficultés contre la théorie de la simultanéité des maxima de glaciation d'Amérique et d'Europe, que d'apporter une explication satisfaisante des causes du transfert de la glace d'un continent à l'autre.

Il est cependant possible que dans les grandes perturbations épeirogéniques qui caractérisèrent — ceci est admis partout — l'époque pleistocène, nous pouvons avoir une *causa vera* ou peut-être une des *causae* du changement des zones climatiques. C'est là un point vers lequel la paléo-météorologie me semble se tourner. On a quelquefois supposé que de grands mouvements de soulèvement ou de dépression pouvaient avoir affecté simultanément et de la même manière différentes régions. Il me paraît cependant au moins probable que l'élévation d'une surface peut avoir coïncidé avec l'affaissement d'une autre. De tels mouvements terrestres amèneraient indubitablement des perturbations météorologiques et produiraient des changements d'un caractère très étendu. J'ai traité plus complètement cette partie du sujet dans le *Quarterly Journal of the Geological Society*.

Les vues exposées dans cette publication offrent, je pense, une

explication de la grande période glaciaire plus simple que celles généralement adoptées. Au lieu de supposer que de grands changements de climat, se représentant plus d'une fois à des intervalles de quelques milliers d'années seulement, sont dus à des causes astronomiques ou physiques affectant l'hémisphère septentrional tout entier, il est ici supposé que les dépôts glaciaires et interglaciaires des différentes régions représentent une période seulement de froid excessif avec des changements locaux dans la distribution des zones climatiques.

Ceux qui désirent des renseignements plus complets au sujet des vues de M. Harmer sont priés de s'en rapporter aux études déjà citées, publiées dans le *Quarterly Journal of the Geological Society*. Des exemplaires en ont été déposés par l'auteur aux bibliothèques de la Société belge de Géologie et de la Société géologique de France. L'auteur renvoie spécialement aux multiples cartes publiées avec ces travaux, sans l'aide desquelles le sujet est difficile à poursuivre.



## CARACTÈRES BIZARRES

DE

# L'ÉRUPTION DU MONT PELÉE A LA MARTINIQUE

LE 8 MAI 1902

PAR

A.-E. VERRILL

---

TRADUIT DE L'ANGLAIS PAR M. F. HALET (1)

---

L'auteur, dans une communication faite à l'Académie des sciences du Connecticut, le 14 mai dernier, peu de jours après la première grande éruption du Mont Pelée, soutint que la destruction de la ville de Saint-Pierre est due à l'explosion d'un grand volume de gaz oxyhydrique.

La décomposition de l'eau au contact de la lave surchauffée dans l'intérieur du volcan aurait amené cette explosion.

Les recherches subséquentes sur le mode de destruction ayant agi en ce point et le caractère des éruptions suivantes ont complètement confirmé cette manière de voir.

A 2500° C., 50 % de la vapeur d'eau sont transformés en gaz explosifs aux pressions ordinaires ; toutefois, il faut une température plus élevée, sous les fortes pressions intérieures, pour produire cette même transformation. Il n'y a pas de doute que dans la plupart des volcans la température soit supérieure à 3000°.

Il suffit donc, pour expliquer la formation instantanée de ces gaz explosifs, de supposer que la lave surchauffée, en faisant éruption par les fissures des roches, se trouve en contact soudain avec une nappe d'eau souterraine ou même avec des roches poreuses imprégnées d'eau.

Dans le cas où les eaux souterraines ainsi transformées en gaz et en vapeurs sont de l'eau de mer, le chlore contenu dans le sel se sépare

(1) *The American Journal of Sciences*, vol. XIV, July 1902, n° 79, pp. 72-74.

du sodium à cette température et même à une température plus basse, et ce gaz mêlé à une partie d'hydrogène forme un mélange explosif.

Le composé ainsi formé est l'acide chlorhydrique gazeux, élément constituant un poison des plus subtils, provoquant l'asphyxie foudroyante. En petite quantité même, il anéantit la vie animale et végétale; le fait s'est produit plusieurs fois pendant les éruptions du Vésuve et d'autres volcans situés dans le voisinage de la mer.

Il est probable, cependant, que dans le cas spécial de Saint-Pierre, toute la population fut exterminée par la projection de flammes à très haute température, provenant d'explosions de gaz oxyhydrique, qui, pénétrant dans les bâtiments, ont brûlé et carbonisé tout ce qui se trouvait sur leur passage. En même temps, de formidables explosions, comparables seulement à celles de la dynamite, renversaient les constructions les plus solides, arrachaient les branches des arbres, fendaient les troncs, démontaient et transportaient à certaine distance de lourds canons (1). Les photographies faites depuis sur les lieux du désastre représentent des scènes indescriptibles de mort et de destruction.

Il est probable qu'il y eut plusieurs explosions successives, quoiqu'une seule eût suffi pour anéantir toute vie dans Saint-Pierre.

Il résulte des derniers rapports de M. Georges Kennau et du professeur Heilprin, qui furent les premiers explorateurs du nouveau cratère qui détruisit Saint-Pierre, que ce cratère formait un trou oblique sur le flanc de la montagne faisant face à Saint-Pierre. Il était constitué par plusieurs ouvertures ayant l'apparence de tunnels.

Par suite de cette disposition, lors de l'éruption principale, de grands jets de gaz explosifs furent dirigés horizontalement vers Saint-Pierre et la ville fut comme balayée par un tornado de feu et brûlée comme si elle se trouvait au foyer d'une flamme à chalumeau.

Les gaz incandescents et les vapeurs à haute température résultant de l'explosion se répandirent instantanément en tous sens, bien au delà du foyer de l'explosion, couvrant une large zone, la brûlant, sans causer cependant autant de destruction que dans la ville même de Saint-Pierre.

Ces gaz à haute température provoquèrent l'incendie immédiat des parties supérieures des navires et exterminèrent un grand nombre de malheureux bien au delà des limites du centre où s'étaient produites les explosions.

(1) Ceci a été reconnu inexact depuis. Les canons dont il s'agit étaient démontés d'avance. (Note du traducteur.)

Les gaz explosifs et les flammes atteignirent la ville bien plus rapidement que les cendres et les pierres entraînées par ce torrent gazeux ; par suite de la direction oblique du cratère, il se produisit un vrai bombardement de projectiles brûlants, qui contribuèrent à la destruction des bâtiments et augmentèrent les débris dans les rues.

Il fut constaté que les soliveaux de certains bâtiments et que beaucoup de morceaux de bois et de branches d'arbres ayant échappé à l'incendie gisaient dans les rues. Le fait doit être attribué à la forte pluie qui suivit immédiatement l'éruption, pluie causée par la condensation rapide de la vapeur d'eau dans les hautes régions de l'atmosphère.

Le professeur R. T. Hill, qui atteignit le Morne Rouge le 26 mai, fut témoin d'une des dernières éruptions. Il aperçut de là des éclats lumineux horizontaux dans le milieu de la grande colonne de vapeur et de cendres.

Ces éclats horizontaux de lumière ressemblaient à des coups de foudre ; il les attribuait, sans doute à juste titre, à des gaz explosifs. Ils étaient dus évidemment à des gaz oxyhydriques, déjà à cette époque fortement dilués avec de la vapeur d'eau. Ils montaient avec la colonne de cendres.

Si les issues du nouveau cratère avaient été dirigées vers le zénith, comme c'est le cas généralement, les accidents mortels et les pertes matérielles auraient été infiniment moindres, parce que toute l'énergie destructive se serait perdue dans les hautes régions de l'atmosphère.

Cette éruption, quoique très peu importante au point de vue des déjections volcaniques, offre un grand intérêt scientifique. Elle est, en effet, l'un des rares exemples de ce *type explosif* qui se soient produits, pendant l'époque moderne, dans des circonstances qui ont permis un examen scientifique d'après le témoignage d'observateurs intelligents.

Ce genre d'éruption pourrait être désigné comme étant du *type oxyhydrique*, la manifestation principale étant l'explosion de grands volumes de ces gaz, tandis que, dans le type ordinaire des éruptions, les explosions sont causées en grande partie par l'échappement de la vapeur d'eau sous de hautes pressions. Les éruptions explosives de forme intermédiaire, dues à des mélanges divers de vapeur et de gaz explosifs, se produisirent aussi à la Martinique.

Les éruptions postérieures, comme celle du 26 mai, étaient évidemment du genre intermédiaire, éruptions dans lesquelles la vapeur d'eau prédomine.

---