

Le travail des eaux courantes : la tactique des tourbillons

Autor(en): **Brunhes, Jean**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mémoires de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles. Géologie et géographie = Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Freiburg. Geologie und Geographie**

Band (Jahr): **2 (1901-1902)**

Heft 4: **Le travail des eaux courantes : la tactique des tourbillons**

PDF erstellt am: **18.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-306717>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

LE TRAVAIL DES EAUX COURANTES :

LA TACTIQUE DES TOURBILLONS.

I. Ilots granitiques de la première cataracte du Nil.

II. Gorges du versant Nord des Alpes suisses.

PAR JEAN BRUNHES ¹⁾



La théorie du creusement des vallées selon la loi de l'érosion régressive est définitivement établie : elle a permis une coordination logique des faits qui dirige et inspire aujourd'hui toute l'histoire, *générale et locale*, de l'origine et de la formation des vallées.

Mais si l'action, longtemps poursuivie, des forces naturelles, qui façonnent et modèlent la surface de notre terre, tend vers des formes-limites déterminées et pour ainsi dire inévitables, cette action n'est pas astreinte à se poursuivre selon une progression régulière, ni constante ni uniformément

¹⁾ Sur la demande qui m'en a été faite je reproduis ici en français, — avec un certain nombre de compléments, — les principaux faits, les documents photographiques et les conclusions générales d'un mémoire que j'ai publié en latin, cette année même, à un petit nombre d'exemplaires, et qui n'a pas été mis en vente : *De vorticum opera, seu quo modo et quatenus aquae currentes per vortices circumlatae ad terram exedendam operam navent*, Friburgi Helvetiorum, typis Conso-ciationis Sancti Pauli, 1902, in-8, 106 p. et 15 fig. — Voici quelques-unes de mes publications antérieures dont celle-ci est la suite : *Sur quelques phénomènes d'érosion et de corrosion fluviales* (*Comptes rendus Acad. Sciences* [Paris], 14 fév. 1898 ; — *Sur les marmites des îlots granitiques de la cataracte d'Assouan (Haute-Egypte)* (*Idem*, 7 août 1899) ; — *Les marmites du Barrage de la Maigrauge*, avec un plan et 6 reproductions stéréoscopiques (*Bul. de la Soc. fribourgeoise des Sciences naturelles*, VII, 1899, p. 169-185) ; — *Sur un principe de classification rationnelle des gorges creusées par les cours d'eau* (*Comptes rendus Acad. Sciences*, 20 mai 1902).

variée : les forces naturelles produisent des actions de détail qui varient à l'infini avec l'espace et avec le temps ; tout en étant assujetties à des lois très simples et très générales, les eaux courantes produisent des effets d'aspect très variable, et les produisent avec des différences d'intensité telles que le temps nécessaire pour leur production peut être, ici, des jours, et là, des siècles. Dans cette marche incessante et inexorable vers cette régularisation du modelé qui aboutit à la « pénéplaine », les eaux courantes varient à l'extrême, selon les conditions géologiques et climatologiques, leurs modes d'action et l'allure de leur activité.

A propos des marmites fluviales, nous avons montré, comment dans un cas précis, où nous avons pu dater avec exactitude un phénomène de corrosion par les eaux courantes, il a suffi d'une période très brève pour la production d'importantes cavités : il a suffi d'une période de moins de 18 ans pour qu'un énorme trou, de plus de 3 mètres de profondeur et de 1 mètre de diamètre, admirablement régulier et poli, fût élaboré par les eaux tourbillonnantes ¹⁾.

¹⁾ Je rappelle brièvement ces observations : Un peu en amont de Fribourg, on a construit un barrage, le barrage de la Maigrange, pour déterminer une chute d'eau, industriellement exploitée ; la construction du barrage, commencée en 1870, a été terminée en 1872. On a creusé à la même époque, à travers le promontoire de molasse qui formait la rive convexe d'un méandre, un *canal de décharge* long de plus de 100 mètres, très légèrement incliné et qui se termine par une chute de 9 mètres. Ce canal, séparé du réservoir d'amont, dit Lac de Pérolles, par une chaussée de 0^m,80 de hauteur, est relativement étroit par rapport à la surface du réservoir : les eaux y atteignent souvent la hauteur de 1 mètre ; lors de la crue exceptionnelle du 3 octobre 1888, les eaux s'y sont élevées au-dessus de 4 mètres. Toutes ces conditions étaient très favorables à la formation de tourbillons. — Au mois de novembre 1897, une sécheresse exceptionnelle m'a permis d'examiner comment les eaux avaient modifié le fond du canal. En vertu de cette considération que la surface du lit artificiel avait été établie en 1872 avec la régularité approximative d'un canal dont la pente était faible, il était facile de conclure que toutes les altérations de ce lit avaient été produites en moins de 25 ans. Or, j'ai reconnu et déblayé de nombreuses marmites dont la plus grande avait même comme diamètres d'ouverture 0^m,535 et 0^m,724, et

Toujours à propos des marmites fluviales, nous voudrions insister sur ce mode particulier de l'action corrosive des eaux courantes ; la marmite tourbillonnaire constitue une des périétés du creusement des vallées ou de l'effondrement des seuils qui correspond à une de ces actions passagères mais extraordinairement puissantes des eaux courantes. Et peut-être n'a-t-on pas encore attribué à ce « procédé » spécial de l'eau mue en tourbillon toute l'importance qui lui revient dans la genèse des gorges et nous dirons aussi dans la genèse des vallées actuelles.

A l'appui de ces considérations générales, nous voulons étudier et rapprocher des faits, observés les uns dans la Haute-Egypte et les autres en Suisse, et qui représentent deux cas géographiques très différents, pour ainsi dire deux cas extrêmes : le cas d'un lit très vaste encombré par une protubérance rocheuse largement étalée, et le cas de canyons et de sillons très étroits et très profonds. Or, ici comme là, nos observations rendent manifestes, d'une manière exceptionnellement significative, les résultats immédiats de l'action tourbillonnaire ¹⁾.

comme profondeur 1^m,21. — De plus, dans le même site, vers l'extrémité d'aval du canal, sur la rive gauche, on avait construit, en 1879-1880, un petit canal étroit à échelons, appelé « échelle à poissons » ; les gradins étaient non pas horizontaux, mais légèrement creusés vers leur milieu, pour permettre aux poissons de pouvoir s'arrêter à chaque gradin : cette disposition a facilité le travail exécuté par l'eau, et, dans ces conditions, il est vrai, très favorables, d'énormes marmites ont été creusées ; l'une d'elles a les dimensions suivantes à la partie supérieure 0^m,90 et 1 mètre ; et c'est un trou en forme de sac qui a 3^m,27 de profondeur. (Voir, outre les articles précédemment cités : A. DE LAPPARENT, *Marmites torrentielles* dans *La Nature*, 4 juin 1898, p. 3-6, avec 4 fig. d'après mes photographies).

¹⁾ Je tiens à signaler ici un travail récemment publié dans le *Bolletino della Società Geologica Italiana* (XXI, 1902, fasc. I, p. 221-257, et Tav. VIII), par FRANCESCO SALMOJRAGHI sous le titre : *Il pozzo detto glaciale di Tavernola Bergamasca sul Lago d'Iseo*. L'auteur préoccupé de démontrer que la caverne en question n'est pas une marmite glaciaire, ainsi que plusieurs géologues l'ont prétendu, s'est donné la peine de faire une étude minutieuse de toute la littérature des marmites ; et une partie de son mémoire doit être regardée comme le meilleur histo-

I. Les îlots granitiques de la première cataracte du Nil.

Un grand noyau granitique apparaît de part et d'autre de la fosse d'effondrement de la Mer Rouge, — comme s'élève de part et d'autre de la dépression rhénane les Vosges et la Forêt-Noire. Ce noyau, en se soulevant, a gêné et modifié l'ancien cours quasi rectiligne du Nil. Le lit du Nil s'est trouvé rejeté vers l'Ouest, et le Nil décrit aujourd'hui cette grande boucle qui va de Abou-Hammed jusqu'à Assouan. Et du même coup le profil du Nil s'est trouvé altéré : en plus d'un point les ramifications de ce grand noyau granitique ou les accumulations des sédiments de grès qu'il supporte ont constitué comme des barres que le fleuve a dû péniblement entamer et franchir. Ces barres, plus ou moins larges, plus ou moins saillantes qui interrompent la régularité du cours, constituent les rapides qu'on appelle des *cataractes*.

Les cataractes du Nil, en effet, ne sont pas des chutes d'eau comme les cataractes du Niagara, mais de simples rapides ; à la première cataracte du Nil, le fleuve descend seulement de 5 mètres sur un parcours de 5 kil. ; c'est une pente de 1 mètre par kilomètre, une pente de $\frac{1}{1000}$ ¹⁾.

Les cataractes du Nil, vues d'un point élevé, aperçues au plan, sont tout à fait comparables, comme dessin d'ensemble, au dessin de certains rapides des torrents des Alpes que l'on peut observer sur les versants raides des grandes vallées ; par exemple, j'ai été frappé de cette ressemblance frappante en me trouvant sur la rive gauche de l'Aar, dans la haute vallée, en face du torrent qui vide le Gelmer See et qui vient se jeter dans l'Aar, sur la rive droite : les eaux blanches d'écume, qui descendent le long du versant se divisent en une multitude de

rique que nous ayons actuellement de la question de ces formes d'érosion tourbillonnaire ; une abondante biographie infrapaginale confirme la valeur de cet historique (voir p. 224-243).

¹⁾ Voir A. CHÉLU, *Le Nil, le Soudan, l'Égypte*, Planche N° 31, face à la p. 66.

petites lignes blanches formant comme un réseau enchevêtré, et que séparent les îlots irréguliers des blocs noirs : c'était comme la reproduction très réduite, la reproduction en miniature, du réseau enchevêtré des chenaux blancs d'écume et de la multitude des îlots noirs éparpillés qui constituent en particulier la seconde cataracte du Nil, celle dite de Wadi-Halfa, telle qu'elle est aperçue du haut du rocher d'Abousir.

Le fleuve travaille sans cesse à démanteler ces obstacles et la multitude de petits îlots noirs qui parsèment, aux basses eaux, les cataractes révèlent ce travail d'usure. Si l'on approche de ces îlots, si on les observe de près, il apparaît encore plus nettement que ce ne sont que des ruines condamnées à une ruine complète. Leur surface — quoique toujours polie par les eaux, et en général recouverte d'une sorte de vernis noir qui les fait luire au soleil comme des masses de métal poli ¹⁾ — est en réalité très irrégulière ; elle présente tantôt de grosses protubérances arrondies comme des genoux, tantôt des cavités également arrondies, profondes et nombreuses. Ce sont ces cavités qui doivent ici nous occuper.

Quelques voyageurs ont signalé ces formes caractéristiques ; voici comment les décrit E. de Gottberg, qui visita le Nil nubien en l'année 1857, année où les eaux du Nil furent particulièrement basses, ce qui facilita ses observations ; quoiqu'il ne désigne pas ces phénomènes par leur nom, il les explique assez exactement : « Le Nil, pendant sa crue, charrie auprès et au milieu des cataractes des cailloux qui sont parfois arrêtés par les rochers. Si le courant est assez fort dans cet endroit, bien qu'il trouve dans le rocher un empêchement au transport de ces cailloux, il ne cesse de les remuer, les fait tourner sur eux-mêmes et décrire à la fin un cercle, qui, par la force du frottement, fait un petit creux dans le rocher. D'autres cailloux viennent remplacer ceux qui, tout en perforant le roc, ont fini par s'user eux-mêmes, de sorte que d'année

¹⁾ VOIR JOHANNES WALTHER, *Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung* (Leipzig, Hirzel, 1891), p. 109 et sqq. Die braune Schutzrinde ; et IDEM, *Das Gesetz der Wüstenbildung* (Berlin, Reimer, 1900), p. 21-24.

en année cette excavation est agrandie. Elle prend peu à peu la forme d'un cylindre creux, quelquefois d'une régularité parfaite, de 2 à 3 mètres de profondeur sur 1 de diamètre.... Les Nubiens qui habitent près des cataractes se servent des débris de ces cylindres comme d'ustensiles de ménage pour broyer leurs grains dans ces creux, ou bien en guise de plats. » ¹⁾

Et dans les *Notes* remarquables que Charles Grad a publiées dans l'*Annuaire du Club alpin français* en 1887 ²⁾, et qui valent toutes les descriptions des cataractes données depuis lors, il établit un très heureux rapprochement entre ces curieuses « marmites » des îlots du Nil et les marmites glaciaires : « A première vue, ces cavités rappellent la formation des marmites sous les glaciers, quoique les glaciers ne se soient jamais avancés sur ce point de la vallée du Nil. » (P. 291.)

Il faut d'abord se rappeler que le Nil présente des conditions hydrologiques exceptionnelles, et possède une arme terrible pour détruire les obstacles qui lui résistent, le volume énorme de ses eaux. A Assouan, à la première cataracte, le volume des basses eaux varie entre 210 et 1300 mètres cubes par seconde, avec une moyenne de 410 mètres cubes par seconde ; le volume des hautes eaux varie de 6500 mètres cubes à 13200 avec une moyenne de 10000 mètres cubes par seconde. Qu'on songe que ce maximum de 13200 mètres cubes par seconde représente un flot supérieur à 1 milliard de mètres cubes par jour (exactement mc. 1,140,480,000).

Et les conditions hydrologiques du Nil sont également bien faites pour favoriser l'observation des effets produits par l'eau ; tous les ans le flot énorme de la crue passe et travaille, puis se retire ; et en particulier à l'endroit des cataractes on voit réapparaître à la surface quelques-uns de ces récifs com-

¹⁾ E. DE GOTTBURG, *Des cataractes du Nil et spécialement de celles de Hannek et de Kaybar*, Paris, imp. Simon Raçon, 1867, in-4°, 60 pages et Planches I-V (cartes), p. 13.

²⁾ *Descente des cataractes du Nil, notes de voyage*, février 1886, dans *Annuaire du Club alpin français*, 14^e année, 1887, p. 282-341.

plètement recouverts par l'eau de la crue. Il convient d'indiquer aussi combien grande est la différence de niveau entre les hautes et les basses eaux. Prenons encore l'exemple d'Assouan ; on observe une différence de niveau qui est au moins de 6^m,50 et qui peut atteindre jusqu'à 9 mètres ¹⁾. W. Willcocks, sur la planche 7 de son livre, a figuré par des courbes le tracé des variations du niveau du Nil à Assouan durant des années où les eaux ont été très hautes, comme 1874 et 1878, et durant des années où elles ont été basses, comme 1877 ; durant l'année 1878, la différence entre le minimum du mois de juin et le maximum de la fin de septembre dépasse 9^m,50 ²⁾. De plus, W. Willcocks a tracé une courbe représentant pour chaque mois de l'année la hauteur moyenne de dix années de 1874 à 1883 ; cette courbe moyenne nous donnera un utile enseignement ; or, entre le niveau le plus bas et le niveau le plus élevé, il y a une différence de 7^m,75. Retenons bien les évaluations moyennes : 10,000 mètres cubes par seconde s'écoulent ainsi pendant 20 jours environ durant le mois de septembre ; puis, sept ou huit mois plus tard, on peut observer le travail qui a été opéré par l'eau à 7 mètres au-dessous du plus haut niveau ; où trouverons-nous un pareil théâtre nous permettant de voir aussi facilement comment les grandes masses d'eau peuvent modifier les roches sur lesquelles elles passent ? On doit donc supposer avec raison que le Nil peut fournir à l'observateur des cas exceptionnels.

On comprendra également pourquoi l'on devra choisir sur le cours du Nil l'une des cataractes ; car c'est là d'abord que les îlots subsistant s'élèveront assez au-dessus du fond du lit pour dominer les eaux quand celles-ci sont basses ; et en second lieu la multiplicité des écueils brise le courant, crée des courants contraires et multiplie le nombre des tourbillons ; cette même cause en augmente du même coup l'intensité et la puissance. En un même lieu, les tourbillons d'une masse d'eau extraordinairement considérable acquièrent une force

¹⁾ W. WILLCOCKS, *Egyptian Irrigation*, 2. edit., p. 39.

²⁾ Voir la planche indiquée face à la p. 31.

extraordinaire ; et tout se trouve disposé pour nous permettre de constater tous les ans les effets qui ont été produits durant la précédente saison de crue. Il convient donc d'examiner ces saillies rocheuses d'Assouan qui, pendant une période de l'année, constituent le fond d'un courant d'eau très profond, et qui, pendant une autre période, reparaissent ainsi à la surface des eaux : ce seront là des lieux d'élection pour l'étude des formes tourbillonnaires.

Nous avons la bonne fortune de posséder maintenant une excellente carte en 6 feuilles de la cataracte d'Assouan à 1:10.000, carte qui a été dressée par les soins du Département des Travaux publics d'Égypte (Survey Department Public Works Ministry) et qui a été publiée au Caire en 1900 ¹⁾. C'est en contrôlant nos croquis personnels par les données rigoureuses de cette carte que nous avons pu dresser le carton qui est joint au présent exposé (p. 161).

Parmi les îlots de la cataracte, quelques-uns indiquent d'une manière plus claire que tous les autres la tactique générale des mouvements tourbillonnaires. Entre tous, un petit îlot, situé vers l'aval de la cataracte un peu en amont de l'île

¹⁾ *First or Assuan Cataract*, Sheet A.-F. On doit seulement regretter que le figuré du relief ne repose pas également sur un levé rigoureux, et soit indiqué par des courbes approximatives. Sur cette carte sont indiquées en vert les parties des rives du Nil ou les îles de la cataracte qui sont mises en culture. — W. WILLCOCKS, dans *Government of Egypt, Ministry of Public Works, Perennial Irrigation and Flood Protection for Egypt, Plans, Atlas*, 1 vol. in-fol., 1894, avait publié un plan à 1:10000 de la partie méridionale de la cataracte (Plate N° 8, *Plan of the Assuan Cataract*), repris en réduction dans *Egyptian Irrigation*, 2. edit. *Sketch showing the Position of the Assuan Dam* (p. 439) ; mais il ne s'agissait là que d'une partie de la cataracte. — Auparavant A. CHÉLU (*Le Nil, le Soudan, l'Égypte*, Paris, Chaix et Garnier, 1891) avait donné une carte de la première cataracte à 1:80000 planche N° 31, p. 66) ; BÉDEKER dans son guide *Égypte* une carte à 1:100,000 (voir édition française, 1898, p. 333) ; et JOANNE dans son guide *Égypte* (Paris, Hachette 1900, 3 vol.) une petite carte (III, p. 564) qui paraissait plus correcte : mais les indications de ces diverses cartes n'étaient pas concordantes, et elles ne reposaient pas sur des levés rigoureux.



PARTIE AVAL DE LA CATARACTE D'ASSOUAN, A 1:20.000

M = Ilot des Marmites. — A = extrémité du village d'Assouan.
— E = Ile d'Eléphantine. — I = Ilot appelé « Isenarté. »

d'Eléphantine représente avec une singulière netteté le mode d'opérer des eaux. C'est pourquoi j'ai pris la liberté de donner à cet îlot une importance qu'il n'avait jamais eue en l'appelant *l'Ilot des Marmites*. Qu'on veuille bien se reporter aux figures 1, 2, 3 et 4, et l'on constatera que cet îlot mérite en vérité de devenir classique, tant il manifeste d'une manière saisissante le travail de la corrosion !

La figure 1 représente l'ensemble de l'îlot vu du sud ; cet îlot mesure 30 mètres de l'est à l'ouest, et 18 mètres du nord au sud ; le point le plus élevé est à environ 13 mètres au-dessus du niveau du Nil, tel qu'il était lorsque la photographie a été prise (premiers jours du mois de mars 1899). La figure 2 représente l'îlot toujours vu du sud mais de plus près ; on commence à y discerner clairement la complication des formes entrecoupées et des lignes entrecroisées ; mais c'est en s'approchant encore davantage, en faisant le tour de l'île que l'on constate l'étrange bizarrerie de ces rochers nus et lisses ; les figures 3 et 4 montrent certaines portions de l'îlot, telles qu'on peut les voir si l'on fait le tour de l'île sur une petite barque.

J'ai abordé enfin sur l'îlot, et je l'ai gravi jusqu'à son petit sommet ; on peut voir sur la figure 5 comment se termine ce petit sommet ; la partie qui est représentée sur la figure a 2 mètres de hauteur. Sur tout l'îlot d'ailleurs les marmites ou lambeaux de marmites sont à la lettre innombrables ; l'îlot semble avoir été perforé en tous sens comme à l'emporte-pièce : c'est un spectacle vraiment admirable que ce bloc de granit si dur ainsi percé de part en part, et en tous points, par le travail de l'eau.

Il est aisé d'expliquer pourquoi les cavités, sur l'îlot des Marmites, sont d'abord aussi nombreuses, en second lieu de dimensions si variées, et en troisième lieu formées en des sens relativement si différents. Cela vient des conditions hydrologiques que nous avons exposées plus haut : Les tourbillons sont produits par un flot qui ne reste pour ainsi dire jamais constant ; tantôt le flot monte allant vers la crue, tantôt il décroît ; et dans un cas comme dans l'autre les tourbillons produits par un flot sans cesse modifié sont eux-mêmes sans cesse modifiés ; ils durent peu ; ils restent peu à la même place ; et pendant le temps qu'ils durent en restant à la même place, ils changent encore d'intensité ; les tourbillons sont donc éphémères, très variables, et ils succèdent rapidement les uns aux autres.

De plus, les tourbillons sont si variables et si éphémères que beaucoup des marmites d'Assouan devront être interrompues avant d'être complètement achevées. Or, par la forme du fond de la marmite, il est aisé de reconnaître, on le sait, qu'une marmite est inachevée. Depuis longtemps on avait constaté que les fonds des marmites affectent deux formes principales. G.-K. Gilbert, dans ses très belles études sur le grand canyon du Colorado, a insisté sur cette différence. Les marmites, dit-il en substance, sont innombrables non seulement dans le lit même du cours d'eau, mais sur les parois verticales de la vallée ; et comme ces dernières ont été très souvent coupées en deux par les progrès de la démolition de ces parois, on peut aisément observer comment elles sont façonnées à l'intérieur ; et voici comment Gilbert décrit les

deux types : « La forme la plus simple est celle de l'éprouvette du chimiste (*chemists'test-tube*), cylindre légèrement évasé à la partie supérieure et se terminant à la base par une coupe hémisphérique (*hemispherical cup*) ; dans l'autre forme, une bosse ou un bouton rond (*round boss or knob*) s'élève au centre de la coupe de base » ¹⁾.

Disons tout simplement que le fond d'une première catégorie de marmites est concave, et que le fond d'un second groupe se termine par une saillie de forme conique entourée par une dépression annulaire ; dans ce dernier cas les différents points qui marquent le fond de la dépression ne sont jamais sur un même plan horizontal ; la courbe est spirali-forme.

On avait souvent et longtemps considéré ces deux groupes séparément ; je me suis efforcé de les relier l'un à l'autre, et c'est l'un des objets principaux du mémoire que j'ai précédemment publié : *Les marmites du Barrage de la Maigrauge*. J'ai démontré que lorsqu'une marmite se termine par un fond concave, c'est qu'elle est achevée ou près de l'être. A chaque tourbillon correspond une certaine forme de marmite vers laquelle tend le travail du tourbillon, de même que le travail général du cours d'eau tend vers cette pente qu'on appelle « profil d'équilibre » ; le rayon de giration d'un même tourbillon et qui reste semblable à lui-même va toujours en diminuant à mesure qu'il descend, et il y a un point où ce rayon est égal à 0 ; en ce point le tourbillon travaille au centre du trou qu'il a créé, et c'est par une cavité concave au centre qu'il terminera son œuvre s'il en a le temps. Au contraire, lorsqu'une marmite se termine par un petit cône central plus ou moins surbaissé et entouré d'une dépression, elle doit être

¹⁾ G. K. GILBERT, *Report on the Geology of portions of Nevada, Utah, California, and Arizona*, in ENGINEER DEPARTMENT, UNITED STATES ARMY, *Report upon geographical and geological Explorations and Surveys West of the one hundredth meridian in charge of First Lieut. GEO. M. WHEELER* (rapport ordinairement appelé *Wheeler's Report*), vol. III, *Geology* (Washington 1873), p. 73 ; voir aussi la figure *Typical forms of pot-holes in the granite of the Grand Canon*.

regardée comme inachevée ; le tourbillon s'est arrêté en plein travail, parce qu'il a été interrompu, soit par un affaiblissement trop grand du flot du fleuve, soit par une invasion trop brusque de galets ou de sable qui l'a étouffé en plein développement ¹⁾).

Il est donc naturel que le plus grand nombre des marmites d'Assouan appartiennent au second groupe, et présentent une saillie conique sur leur fond.

Tel est bien le résultat de mes observations ; au premier moment, quand je parcourais les îlots de la cataracte, je confesse que j'étais un peu surpris, en déblayant un grand nombre de marmites, de trouver au fond de *presque toutes* la saillie conique. J'avais jusqu'alors exclusivement observé des marmites soit fluviales soit glaciaires dans l'Europe occidentale et centrale, et l'on sait que le type le plus fréquemment rencontré est le type à fond concave et non le type à fond conique.

En vertu des mêmes causes qui expliquent que la forme à fond conique prédomine à Assouan, on peut comprendre aisément que dans les régions qui ont été longtemps recouvertes par les glaciers et qui sont parsemées de ces marmites, ce soit exactement l'inverse que l'on constate. Les glaciers se meuvent et se déplacent ; mais avec quelle lenteur si on les compare aux cours d'eau ! Les tourbillons que produisent les eaux de fusion restent longtemps à peu près à la même place ; et c'est à peu près aux mêmes endroits que les tourbillons se

¹⁾ C'est par une étude de la forme même des marmites qu'on peut arriver à une classification rationnelle ; il me paraît contestable de faire comme beaucoup ont fait et comme le propose encore F. SALMOJRAGHI dans le travail cité plus haut (*Bol. Soc. Geol. Italiana*, XXI, 1902, p. 248, n. 7), c'est-à-dire de classer les marmites par rapport aux causes qui les ont produites — fluviales ou glaciaires — ce qu'il n'est pas toujours facile et sûr de discerner, et ce qui ne peut être déduit de tel ou tel caractère distinctif de la marmite elle-même. La prudente remarque de HEIM reste toujours vraie : « Il y a bien plus de marmites de géants qui n'ont rien à faire avec la période glaciaire que de celles qui ne peuvent être expliquées que par l'action des glaciers. » (*Handbuch der Gletscherkunde*, p. 545.)

produisent toujours ¹⁾ ; bref, un trou qui a été commencé par un tourbillon est travaillé assez longtemps pour être achevé ; et si le tourbillon qui a commencé le travail s'affaiblit ou disparaît pour une cause quelconque, il est probable que d'autres tourbillons surviendront qui reprendront le travail et l'élaboreront complètement. Et voilà pourquoi dans les pays glaciaires le fond d'une marmite est — non pas nécessairement mais la plupart du temps — creux et non relevé ; il ressemble au fond d'une vraie marmite ordinaire. Qu'on examine les marmites qu'a fait déblayer le prof. Heim au Gletschergarten de Lucerne, ou celles qu'a fait déblayer le prof. Steffens au col de Maloja, qu'a décrites Tarnuzzer ²⁾ et que j'ai moi-même étudiées au mois de juillet 1898, ou celles qu'a étudiées le prof. Partsch dans le Riesengebirge : partout on reconnaîtra le même fait général : comme il s'agit de tourbillons produits par les glaciers, ces tourbillons ont eu le temps de faire aboutir leur action jusqu'à la forme complète, jusqu'à la forme à fond concave ; et c'est cette forme que l'on observe presque en tous les points ³⁾.

¹⁾ Nous ferons remarquer que nous parlons indistinctement ici des tourbillons produits par les « moulins de glaciers » et de ceux qui sont produits par les torrents sous-glaciaires ; on sait qu'il s'est élevé autour de cette question un long débat, dont l'intérêt est bien réduit, depuis qu'il est prouvé que certaines marmites même énormes peuvent être formées en des périodes de temps très brèves ; et il est vraisemblable que les cascades de moulins de glaciers aussi bien que les rapides des torrents sous-glaciaires engendrent les unes comme les autres de puissants tourbillons et par suite déterminent les unes comme les autres des séries et des groupes de marmites.

²⁾ *Die Gletschermühlen auf Maloja*, Chur, Casanova, 1896, 29 p., extrait du *XXXIX. Jahresbericht der Naturfors. Ges. Graubündens*.

³⁾ Les marmites ainsi travaillées en plusieurs fois par plusieurs tourbillons ont tout naturellement des formes oblitérées et vieilles ; et de même que le fond est arrondi, de même les spirales, les pas de vis qui sont parfois si beaux et si nets sur les parois des marmites récemment formées, tendent à disparaître de plus en plus ; j'ai déjà exposé cela ailleurs, et je n'y reviens pas (voir *Les marmites du Barrage de la Maigrange*, p. 8 et 9). Toutefois il y a des marmites glaciaires qui ont conservé de magnifiques pas de vis sur leurs parois, et cela se voit à Lucerne comme au col de Maloja : voir, par exemple, la marmite N° 6

En ce qui regarde les marmites à fond conique de la cataracte du Nil, il est bon de donner ici quelques-unes des mesures que j'ai pu faire : ces chiffres montreront à quel point peut être saillant ce vrai petit pic qui se dresse parfois au fond des trous créés par l'eau. J'ai observé, par exemple, sur l'Ilot des Marmites, une marmite qui avait 1 mètre de profondeur et dont le monticule du fond avait 0^m,23 de hauteur ; c'est dire que son sommet arrivait presque jusqu'au quart de la hauteur totale ; si l'on ajoute que les plus grands diamètres

du *Gletschergarten* à Lucerne et l'une des marmites *Charles-Edouard* de la Maloja, dont on trouvera une reproduction stéréoscopique dans JEAN BRUNHES, *Un nouveau procédé de reproduction appliqué à l'étude et à la représentation des faits géographiques, Phototypie stéréoscopique (avec dix planches stéréoscopiques)*, in *Etudes Géographiques*, I, fascicule 1, planches 4 et 5. Il est facile de comprendre que certaines marmites glaciaires ont pu être élaborées très vite, puis, par suite de conditions exceptionnelles, conservées telles quelles dans leur première intégrité. — Au reste, quand nous parlons de *pérmance* des tourbillons en certains passages déterminés sous le lit des glaciers, et de *répétition* persévérante de l'action tourbillonnaire dans des trous déjà creusés, cela est relatif, et cela ne veut pas dire que les tourbillons sous-glaciaires restent longtemps *identiques à eux-mêmes*, sans changer ni de direction ni d'intensité ; au contraire, nous pensons exactement l'inverse. Malheureusement, on n'a pas encore pu observer d'une manière suivie comment se comportent les tourbillons sous les glaciers ; du moins J. VALLOT a fait des observations intéressantes en 1896 sur la formation des moulins dans l'épaisseur même du glacier de la Mer de glace au Mont-Blanc, et en résumant ses observations, ainsi que celles qu'a faites FONTAINE en 1897, il insiste sur la complication des formes de la cavité des moulins, et il dit en propres termes : « *Cette exploration est très instructive. Elle montre d'une façon certaine que le moulin se forme à la faveur d'une crevasse, dans laquelle il peut se déplacer par suite des moindres variations accidentelles, ce qui provoque la formation de poches successives et l'abandon d'une cavité pour une autre située dans un endroit devenant plus favorable.* » (J. VALLOT, *Exploration des Moulins de la Mer de glace*, in *Spelunca*, N° 16 [*Bulletin de la Soc. de Spéléologie*, 4^e trimestre 1898], p. 175 ; voir aussi *Coupe d'un moulin*, p. 174.) Cette mobilité des « Moulins » entraîne comme conséquence l'intermittence des tourbillons produisant des marmites au pied de ces cascades ; et l'on pourrait en dire autant des tourbillons qui sont produits par les torrents sous-glaciaires.

du trou étaient $0^m,36$ et $0^m,43$, on s'imaginera facilement combien était pointue et aiguë, par rapport à l'ensemble du trou, la pointe inférieure.

Veut-on un autre exemple pris sur un autre îlot voisin de l'îlot des Marmites : la partie qui restait de la marmite avait comme profondeur maxima $0^m,20$, et les deux diamètres en croix avaient $0^m,18$ et $0^m,27$; à la base se dressait un piton de $0^m,09$: qu'on se reporte d'ailleurs à la fig. 6. On voit que ce fond ressemble tout à fait à un vrai fond de bouteille.

Dans la plupart des cas, cela va sans dire, le monticule du fond était moins grand que dans les deux exemples que je viens de donner. Mais je répète qu'il y avait presque toujours dans les marmites des îlots de la cataracte un pareil monticule. — Cette forme de monticule conique était même prise par le sable accumulé dans certaines marmites encore pleines ; le soleil avait rapidement évaporé l'eau, et le sable séché et durci avait précieusement conservé la forme que lui avait imprimée le dernier effort du tourbillon disparu ; c'est ainsi que j'ai observé, entre autres exemples, une petite marmite dont les deux diamètres à la partie supérieure étaient $0^m,22$ et $0^m,18$, et dont la profondeur jusqu'à la surface du sable qui la remplissait était de $0^m,20$; le sable formait un petit renflement très régulier et le sommet de ce cône surbaissé dominait de 5 centimètres la dépression qui l'entourait.

Enfin, si l'on pouvait encore douter que cette forme fût bien la forme caractéristique, la forme normale des marmites *inachevées* et *interrompues*, je citerais une autre série de faits que j'ai reconnus à Assouan, et qui sont encore dus à la configuration spéciale de ces îlots ainsi percés en tous sens par l'eau des crues.

Il se produit en effet là un fait qui est plus rare ailleurs : les tourbillons sont si fréquents, et par suite les marmites sont si nombreuses dans le voisinage les unes des autres que les cloisons usées de plus en plus arrivent à être très minces ; elles sont souvent si minces que tout à coup sous la poussée de l'eau elles s'écroulent. Les marmites sont ainsi brusquement entrouvertes ; elles sont, si l'on peut ainsi dire,

éventrées. Et l'on peut observer que ces cloisons ont été brusquement rompues en examinant de près les bords de ces cassures; là la roche n'est ni lisse ni noire, — encore moins lisse que dans les parties basses des marmites le plus récemment formées. Grâce à cette couche noire d'altération superficielle dont nous avons parlé plus haut et qui arrive à la longue à transformer en parois lisses et noires les parois rugueuses et rouges du granit à gros grains, il est possible de juger, sinon de l'âge absolu des surfaces mises à jour, du moins de l'âge qu'elles ont les unes par rapport aux autres, de leur âge relatif. Et l'on constate que, sur les lèvres de ces cassures, non seulement il n'y a point ce vernis noir, cette couche d'altération, mais elles sont irrégulières et rugueuses; on voit qu'elles n'ont pas été travaillées et polies par le même agent que les parois ou le fond des marmites; et elles apparaissent ainsi comme encore plus récentes que ces surfaces intérieures, et différentes d'elles. — Il y a bien eu, dans ce cas, cassure brusque et non pas usure lente.

Puisque ces marmites ont été brusquement entrouvertes, les tourbillons qui étaient en train de les produire ont été brusquement interrompus. Ce sont là des cas indiscutables d'interruption soudaine du tourbillon formateur. Or, quelle est la forme du fond de ces marmites inachevées? J'en ai examiné de près environ 50 de cette espèce sur les îlots d'Assouan et toutes ces marmites, brisées en pleine formation, présentaient précisément la forme de marmite à fond conique, c'est-à-dire la forme que j'appelle et à bon droit la forme normale de marmite interrompue.

Imaginons un autre mode encore plus curieux d'interruption d'une marmite. La marmite a été non seulement commencée mais partiellement élaborée dans un mamelon de granit; elle se présente sous la forme d'une sorte de cheminée aux parois lisses creusée assez profondément dans la roche: tout à coup un courant plus violent du fleuve survient qui détache et emporte la partie supérieure de l'îlot, qui découronne le mamelon; et la marmite est ainsi coupée en deux: une partie appartient au bloc qui est entraîné, et l'autre partie, la partie inférieure,

reste sur la partie subsistante de l'îlot mutilé. Si l'on nous a permis tout à l'heure de parler de marmites éventrées, on nous permettra de dire en parlant de cette autre série de marmites qu'elles sont décapitées ou tronçonnées. Le cas que nous avons imaginé se trouve plus d'une fois réalisé à Assouan ; on sait qu'il y a dans le granite des fentes que l'on appelle des « joints » ; souvent le flot du Nil entraîne tout ce qui dépasse un de ces joints horizontaux : et l'on trouve sur ces surfaces horizontales, tout récemment mises à nu, encore rugueuses, des fonds de marmites dont la partie supérieure a actuellement disparu. J'ai photographié plusieurs de ces trous ; et encore dans ce cas exceptionnel d'interruption des tourbillons et des marmites, le fond de la marmite offre un relief en forme de cône avec une dépression annulaire. — Parmi tous les faits observés, un s'est présenté avec une netteté extraordinaire, sur une autre petite île un peu plus grande que l'Îlot des Marmites et que l'on appelle Isenarté ; la figure 7 le reproduit exactement. La surface suivant laquelle la partie supérieure du mamelon de granite a été détachée et arrachée correspondait à peu près au niveau du fond momentané d'une marmite qui avait environ 1^m,80 de diamètre ; naturellement ce fond portait une saillie conique ; et lorsque le bloc a été emporté elle est restée en saillie au-dessus de la plate-forme de roche rugueuse qui marque la surface d'arrachement ; sur la figure on reconnaîtra facilement la différence qu'il y a entre l'aspect rugueux et grossier de cette surface qui n'a pas encore été travaillée par les eaux, et l'aspect poli et brillant du fond de la marmite qui résulte de l'usure par un tourbillon. (Le dernier plan de la photographie est constitué par la surface même des eaux du Nil, laquelle était par le vent légèrement ondulée.)

Arrêtons-nous un instant devant cette figure ; c'est un vrai hasard qui a pu permettre de photographier ainsi en relief, au moment des basses eaux, une forme transitoire et qui est en général par définition au fond d'un trou plus ou moins profond : ici nous pouvons examiner en pleine lumière et étudier à loisir ce que l'on n'aperçoit d'ordinaire qu'indistinctement

et dans l'ombre, même à supposer qu'on se soit donné la longue peine de vider et de débayer avec soin une marmite d'une telle dimension ; ici le Nil lui-même s'est chargé du travail de déblaiement ; il a nettoyé et lavé tout exprès pour nous la surface de ce fond de bouteille, et il nous est possible d'en apercevoir les moindres détails : dans quel laboratoire aurait-on pu obtenir un exemple plus caractéristique, mieux fait pour l'observation, et plus clair ?

Tous ceux qui ont entrepris de faire débayer des marmites et qui savent quel travail cela représente et combien il est difficile de mettre complètement à découvert tout le fond et surtout de le photographier, apprécieront à sa valeur la bonne fortune qui nous a procuré le document de la figure 7.

Il convient de noter ici les dimensions de cette marmite de la fig. 7. La protubérance centrale est approximativement conique : son sommet dépasse cette partie du petit couloir en forme d'anneau qui est située droit en avant de la photographie de 0^m,42 ; de ce sommet à la paroi de droite, il y a 0^m,83 et de ce même sommet à la paroi de gauche 0^m,95. Nous reviendrons plus tard sur quelques particularités de ce fond de marmite. Il nous suffit pour l'instant d'avoir montré qu'il ne s'agit pas là d'une petite marmite à peine ébauchée, mais d'une grande marmite qui atteignait déjà de très belles dimensions quand toute l'œuvre a été interrompue. Il est évident que de pareils cas d'interruption se retrouveraient très rarement autre part que sur ces saillies rocheuses des cataractes d'un fleuve à grandes crues, saillies qui sont annuellement submergées par un flot puissant et violent.

Il nous semble que toutes ces diverses séries de faits confirment bien l'opinion que la forme de marmite à saillie conique est le signe distinctif des marmites qui n'ont pas atteint leur complet achèvement.

Un second enseignement général, et qui n'est pas non plus sans importance, se dégage des observations faites à Assouan.

Il ne faut jamais oublier que l'eau n'use pas elle-même

le fond et les parois des marmites. mais qu'elle se sert des galets ou du sable qui s'accumulent dans ces trous comme d'instruments, et que c'est à l'aide de ces instruments qu'elle corrode la roche ¹⁾.

J'ai examiné de près 400 marmites de la cataracte d'Assouan, et j'en ai vidé une cinquantaine ; j'ai toujours noté avec attention quels matériaux se trouvaient dans le fond de ces marmites ; or, dans le fond de deux ou trois à peine, j'ai trouvé un ou deux galets de 0^m,04 ou de 0^m,05 de diamètre. Dans presque toutes je n'ai trouvé que du sable, un sable étonnamment fin. Il faut donc conclure que c'est avec le sable seul que les tourbillons ont creusé le granite si dur d'Assouan.

La constatation d'un fait aussi général à la cataracte du Nil a une réelle importance.

En nos pays, dans la plupart des grandes marmites qui se rencontrent sur le lit des torrents ou des cours d'eau et aussi dans toutes les marmites qui sont situées sur le parcours des anciens glaciers, on découvre, lorsqu'on les déblaie, des pierres plus ou moins grosses, quelquefois même énormes, et arrondies par la rotation dans le fond de la marmite. Ces pierres arrondies ont beaucoup frappé les observateurs, et c'est à ces pierres qu'on a attribué le principal travail dans l'élaboration des marmites. De même qu'on appelait quelquefois les marmites glaciaires des *Moulins de glaciers*, *Gletschermühlen*, on a appelé ces pierres trouvées dans les moulins : des *meules*. Et il semblait que ces meules fussent nécessaires pour la formation des trous. D'après l'opinion de certains, la grosse pierre était l'outil essentiel de l'eau ; il était nécessaire et il suffisait à lui tout seul. C'est bien cette conception qu'a vulgarisée

¹⁾ Voir l'exemple tout à fait caractéristique que j'ai décrit dans le travail déjà cité : *Les Marmites du barrage de la Maigrauge*, p. 3 et 4 et planche I : deux marmites en étant progressivement approfondies par les tourbillons se sont rejointes et le vestige de l'ancien mur qui existait entre elles deux n'a subsisté qu'à la partie supérieure sous la forme d'une langue de molasse de 0^m,15 de longueur, laquelle est restée intacte malgré l'action de l'eau courante, tandis que l'eau faisant mouvoir les galets et le sable dans le fond usait tout le reste du mur de séparation.

l'expérience ingénieuse qui a été instituée au *Gletschergarten* de Lucerne ¹⁾ ; rappelons qu'au *Gletschergarten*, sur les indications du prof. Heim, de magnifiques et énormes *Riesentöpfe*, creusés dans la molasse, ont été déblayés. On en compte au moins 32 de dimensions diverses. A côté des cavités naturelles, on a creusé une petite cavité où l'on a placé une grosse pierre ; à un signal donné, un jet d'eau, une sorte de cascade tombe sur cette pierre, et le mouvement vertical de chute se transforme en un mouvement de giration qui met en mouvement la grosse pierre. En vérité cette expérience montre comment le mouvement vertical peut donner naissance à un mouvement rotatoire, bien plus qu'il ne montre comment se creusent ordinairement et naturellement les marmites. — Les images distribuées au *Gletschergarten* nous représentent toujours une seule grosse pierre arrondie (la meule) dans chacune des marmites. — Il se trouve en effet qu'on a soigneusement placé dans chacun des trous une pierre qui est censée avoir

¹⁾ C'est ce que pourraient également laisser supposer des phrases et des expressions comme celle-ci : « Es waschen jene Wassermassen bisweilen Riesentöpfe aus, indem sie entweder in einem Strahle auf den Boden fallen, hier einen Felsblock ergreifen und mit diesem ein Loch aushohlen, oder indem sie einen Wirbel bilden, der in entsprechender Weise wirksam wird. » (ALBRECHT PENCK, *Oberflächenbau*, p. 59, in *Anleitung zur Deutschen Landes- und Volksforschung*, Stuttgart, Engelhorn, 1889, 1 vol. in-8, XVI-680 p.). D'ailleurs l'idée du bloc unique revient fréquemment dans tous les travaux qui s'occupent des marmites ; citons par exemple E. A. MARTEL et G. GAUPILLAT, dans leur note *Sur l'Exploration et la formation des Avens des Causses* : « A l'Aven de l'Egue, le premier puits a 60 m. d'à pic, et 1^m,50 à 6 m. de diamètre seulement ; il est ovale (fissure élargie) et, de haut en bas, sur tout son pourtour, une gigantesque hélice figure le sillon tracé dans la pierre par quelque gros bloc tournoyant dans l'eau furieuse ; peut-être ce bloc git-il au fond de l'admirable puits, sous plusieurs mètres de cailloux récents. » (in *C. R. de l'Académie des Sciences*, 14 octobre 1889). Citons encore PAUL MERCANTON : « De ces marmites.... une seule a conservé le bloc qui a servi à la creuser. Ce bloc, d'environ 0^m,70 de diamètre, parfaitement arrondi, est resté pris dans l'ouverture et git sur un lit de graviers et de menus blocs. » (*Communication sur des marmites de géants en paroi verticale* in *Bul. de la Soc. vaudoise des Sciences naturelles*, 4^e série, XXXII, 1893, p. xx).

été l'instrument de l'eau, et, puisqu'elle est seule, le seul instrument. Dans la marmite N° 1 on observe deux grosses pierres qui, du reste, sont très mal polies et qui n'ont dû prendre, sans doute, qu'une part bien secondaire au creusement de la marmite, laquelle est parfaitement lisse. Dans la marmite N° 2, qui a deux étages très nettement distincts, une petite meule est au fond et une grosse meule est au premier étage, chacune paraissant correspondre par ses dimensions aux dimensions des deux trous. Dans la marmite N° 6, qui a deux trous, le même fait est reproduit : une meule est placée au fond de chaque trou. Dans la grande marmite N° 11, qui est si belle et si compliquée, on peut distinguer 4 trous principaux de différentes tailles : une grosse pierre noire est placée dans la plus grande marmite, et trois autres meules plus petites correspondent aux trois autres trous. Enfin dans la marmite N° 10, qui n'a que 3^m,50 à 4^m de diamètre, on voit un bloc énorme mal poli de 1^m et 1^m,50 de diamètre ! On sent que l'idée fautive de la meule unique a dominé tout cet arrangement, par ailleurs si remarquable ; il fallait absolument trouver à chaque moulin sa meule. Nous avons insisté sur cette préoccupation si manifeste pour mettre en lumière les conséquences des observations faites à Assouan.

Car la réalité est tout autre : ce n'est pas une pierre, mais un ensemble de pierres de différents formats et de différentes dimensions qui se trouvent dans le fond de toutes les marmites mêlé à une masse de graviers et de sables ; cette masse forme un tout qui occupe et recouvre toute la partie inférieure de la marmite, et c'est toute cette masse qui participe au mouvement de rotation imprimé par le tourbillon. Encore une fois, il ne s'agit pas d'une sorte de bolide isolé décrivant une courbe fantastique, mais d'une masse parfois très variée, contenant toujours une grande quantité de petits éléments et de sable, qui reste cohérente, par suite de la présence de ces petits éléments et que l'eau fait tournoyer dans le fond comme un pilon dans un mortier ; les pierres, les grosses pierres, ne sont pas les instruments essentiels du travail ; ce sont surtout les petits éléments, graviers et sables, qui travaillent à l'usure régulière

de la roche en obéissant aux moindres impulsions de l'eau tourbillonnante. Puisque sur les îlots d'Assouan, qui ont été si fortement perforés par les tourbillons, il est évident que le sable est le seul outil de l'eau, il faut conclure que le sable suffit à opérer le taraudage des roches les plus dures. Et nous ajoutons, après l'examen comparé de beaucoup de marmites à Assouan et ailleurs, que non seulement les grains de sable suffisent, mais que ce sont ces grains de sable qui sont nécessaires. Les pierres et les grosses pierres surtout prennent des formes arrondies parce qu'elles sont elles-mêmes frottées incessamment par la mitraille de graviers et de sables qui usent les parois intérieures des marmites ; mais loin de suffire au travail de l'eau, loin d'aider même à ce travail, elles le rendent de plus en plus difficile à mesure qu'elles s'accumulent dans le fond d'une marmite. Elles sont très nombreuses dans les marmites de nos pays et dans les marmites glaciaires parce que les torrents de nos montagnes, comme les glaciers, transportent de gros blocs qui tombent facilement dans ces creux ; mais elles constituent comme une sorte de poids mort qui est beaucoup moins docile que le sable aux mouvements du tourbillon ; et dans bien des cas elles doivent rester relativement immobiles tandis que les grains de sable sont entraînés tout autour d'elles, usant à la fois les parois de ces blocs et les parois de la roche encaissante ; bien plus, elles arrivent souvent à constituer un poids si énorme par leur volume ou par leur nombre que le tourbillon est impuissant à manœuvrer l'ensemble de la masse bigarrée tombée au fond de la marmite, et qu'il cesse d'agir. Bref, les pierres, au lieu d'être l'instrument par excellence de l'eau, jouent dans tous les cas un rôle secondaire, et même souvent ont une action défavorable à la continuation de l'œuvre du tourbillon. Le sable, au contraire, voilà l'arme véritable qu'utilise l'eau pour façonner la roche à son gré. *A Assouan il n'y a pas une seule marmite contenant une de ces pierres appelées meules* : somme toute, le procédé du travail exécuté par le tourbillon ressemble tout à fait à l'usure à l'émeri, au travail du lapidaire qui use de la pierre très dure avec de la poussière de pierre.

Qu'on observe de nouveau maintenant le fond de marmite de la fig. 7, et l'on remarquera sur ce monticule de granite poli à quel point le tourbillon giratoire est en réalité compliqué, comment il se décompose en une série de mouvements secondaires. Si l'on examine cette sculpture dont les détails sont si variés et d'un dessin si précis, on comprendra facilement que c'est le sable qui peut obéir à toutes ces impulsions secondaires du tourbillon et les suivre, et qu'une pierre, une grosse pierre serait impuissante à produire des effets pareils ; une grosse pierre serait un outil trop grossier qui ne se prêterait jamais à un travail aussi délicat et aussi minutieux : autant vaudrait imaginer un graveur qui voudrait graver un dessin sur une plaque de cuivre, non pas avec un burin, mais avec un marteau. — Finalement le sable est par excellence et tout à la fois l'instrument de précision et l'instrument irrésistible du tourbillon.

Un document comme celui dont il s'agit (fig. 7) suffit à lui seul à nous renseigner sur les réels procédés de l'action des tourbillons. Il a cette valeur parce qu'il nous a été fourni sans aucun doute très peu de temps après avoir été élaboré. Supposons que les actions tourbillonnaires se soient longtemps prolongées dans une marmite telle que celle-ci, mais restée intacte ; il est certain que les petites actions de détail se contredisant, les ciselures secondaires auraient disparu, et nous n'aurions plus retrouvé qu'un cône central beaucoup plus indistinct et beaucoup plus informe ; avec le temps ce cône central du fond aurait lui-même disparu pour faire place à une vague concavité. Nous saisissons ainsi sur le vif la différence qui doit exister fatalement entre les marmites où les tourbillons ont longtemps agi, et celles beaucoup plus rares où nous pouvons contempler l'œuvre du tourbillon assez tôt pour qu'elle soit encore fraîche et si l'on peut dire personnelle, assez tard pour qu'elle soit déjà nettement élaborée et caractérisée. Le tourbillon durant, la marmite se transforme et porte à un moindre degré la marque du premier tourbillon créateur.

Les parois et le fond de la marmite, lieu de passage et

de circulation des eaux animées d'un mouvement tourbillonnaire, peuvent être comparées à ces pistes des régions de dunes, à ces chemins de sable du désert ; lorsqu'un petit nombre d'hommes ou de chameaux sont passés par là, leurs traces, gravées dans le sable, sont facilement reconnaissables ; mais si les hommes succèdent aux hommes et les chameaux aux chameaux, les empreintes diverses se multiplient et se détruisent les unes les autres : les traces des premiers disparaissent ; et sur la piste on n'aperçoit plus que la longue trace du sable uniformément bouleversé.

Et maintenant quel est le résultat final de cette action des tourbillons ? Les exemples divers que nous avons donnés et qui proviennent tous de la première cataracte du Nil permettent de l'indiquer. La marmite est un fait instable qui se transforme ; les tourbillons détruisent ce qu'ils ont fait pour continuer leur œuvre ; en fin de compte tous les tourbillons se coalisent pour une œuvre d'ensemble qui est la destruction des masses compactes qui barrent le lit. Les marmites se multiplient et s'accroissent ; elles sont entr'ouvertes et rejointes. Bref, les îlots de granite peuvent être comparés à ces poutres que des insectes ont creusées en tous sens et qui, tout d'un coup, vermoulues, doivent se rompre. En effet, le bloc de roche très dure étant percé en tous sens, un jour vient où les débris de cloisons tombent, où les morceaux de marmite s'effondrent, où tout s'écroule. Ainsi s'accumulent de vrais chaos de débris, dont les fragments divers ont le trait commun de porter sur une ou plusieurs de leurs faces les vestiges visibles d'anciennes marmites. Ces chaos, nous avons encore pu les observer en certains îlots d'Assouan ; qu'on considère la fig. 8 prise sur l'îlot d'Isenarté (le même îlot que celui de la fig. 7), et l'on verra sous quel aspect se présentent les amas chaotiques de portions récemment effondrées. On aperçoit partout quelques formes, vaguement cylindriques ou sphériques, et qui racontent l'histoire de l'écroulement produit. Est-il besoin d'ajouter que lorsque la crue énorme survient, elle a vite fait de balayer ces débris épars, et d'emporter ainsi l'ouvrage qui lui a été préparé ?

On a dit et il est prouvé que d'autres seuils du Nil, d'autres cataractes ont diminué, que certains même ont disparu. Pour notre part nous avons cherché à montrer par quels épisodes successifs ce phénomène général d'érosion des seuils se produisait, nous avons essayé de nous rendre compte de la tactique victorieuse suivie par l'eau pour arriver à démanteler ces blocs de roche si dure.

Et nous avons indiqué quelle importance primordiale doit être attribuée aux tourbillons : ce sont les tourbillons qui préparent l'œuvre d'arrachement et d'emportement ; ils sont le préambule et la condition de toutes les destructions ultérieures.

Nous avons exposé plus haut qu'à Assouan l'action tourbillonnaire est d'abord particulièrement puissante, et en second lieu exceptionnellement visible. Ajoutons qu'à la cataracte d'Assouan le sable ne manque point ; et c'est là, on vient de le voir, une des conditions du succès des tourbillons. A la première cataracte du Nil, non seulement le sable est fourni par la destruction même du beau granite, mais encore il est apporté du désert libyque jusque dans les flots du fleuve ; sur la rive gauche du Nil, en face de l'île d'Eléphantine et plus en amont, se dressent de magnifiques dunes de sable fauve qui viennent mourir dans le fleuve même ; et lorsque le vent souffle, transportant les grains de sable, il les parsème sur tout le Nil ; ainsi l'instrument est à côté de l'ouvrier, à sa disposition ; et dès qu'un tourbillon se produit, celui-ci est sûr de pouvoir entraîner dans son mouvement de giration les grains de sable qui usent.

Il faut enfin noter que les îlots sur lesquels l'action des tourbillons est aussi visible que sur l'îlot des Marmites sont en vérité exceptionnels ; nous n'en avons pas découvert un autre qui lui puisse être comparé. Il semble que l'eau concentre ses efforts, c'est-à-dire ses mouvements tourbillonnaires sur quelques points du cours obstrué ; l'eau n'agit pas sur tous les îlots au même moment et d'une manière uniforme ; certains points sont privilégiés, puis lorsque le travail

achevé, les tourbillons sont tout naturellement déplacés, et le laboratoire naturel se trouve transporté ailleurs. L'étude comparée des îlots d'Assouan évoque ainsi l'idée de chantiers restreints où le plus gros travail est exécuté ¹⁾. Partout, à vrai dire, un certain travail partiel d'usure est opéré, mais encore un coup il s'agit dans le cas de ces phénomènes naturels non pas d'une usure générale et uniforme, mais bien plutôt d'usures brusques, puissantes, localisées et successives. — Et c'est là une des idées essentielles que nous conduira à mettre en lumière l'étude d'une seconde série de faits : les gorges du versant Nord des Alpes suisses.

¹⁾ C'est par cette concentration du travail de taraudage en certains points que s'explique la démolition progressive de masses même énormes ; la méthode suivie par les tourbillons est la même, qu'il s'agisse du lit des glaciers ou du lit des cours d'eau. Les seuils de roche dure qui entravent les grands cours d'eau africains doivent être tous usés et emportés selon les mêmes procédés ; un missionnaire français, le R. P. TRILLES m'a communiqué une photographie des rapides du Félou sur le Sénégal, où l'on aperçoit tout un seuil perforé comme les îlots de la première cataracte du Nil. — De même, sous les glaciers, ou sur les surfaces rocheuses délaissées par les glaciers, les marmites sont le plus souvent groupées et pour ainsi dire massées en certaines zones qui correspondent aux principaux ateliers de forage des tourbillons ; qu'on regarde par exemple la photographie qu'a donnée H. W. TURNER d'une partie du seuil granitique qu'il a observé dans le *Mokelumne River Canyon* en Californie et où il a compté — toutes rapprochées — environ 250 marmites glaciaires : cette représentation évoque une tactique analogue à celle que révèlent les îlots granitiques d'Assouan (*Glacial Pot-holes in California*, in *American Journal of Science*, XLIV, 1892, p. 453, 454 et plate IX).

II. Les marmites des gorges du versant Nord des Alpes suisses.

Si nous désirons connaître quel est le rôle des tourbillons dans l'approfondissement et le creusement des lits des cours d'eau, nous devons choisir comme domaine d'observation un pays encore jeune, dont le modelé sera encore accidenté, où les eaux courantes auront encore beaucoup à travailler, où les lits des cours d'eau n'auront pas encore atteint complètement cette pente régulière qui correspond au profil d'équilibre. Nulle région ne pourra être meilleure pour la fin que nous nous proposons que la région des Alpes. Nous avons concentré nos observations sur une partie des Alpes, -- sur le versant Nord des Alpes suisses. C'est là que nous avons cherché à discerner quelle est la part qui revient aux tourbillons dans l'élaboration des gorges; nous avons successivement visité et examiné toutes les principales gorges des cours d'eau de ce versant.

On sait qu'un cours d'eau cherche à approfondir son lit et à atteindre sa pente d'équilibre, avant de travailler à l'élargir ¹⁾; l'approfondissement précède l'élargissement; c'est dire que la gorge est le commencement de la vallée. Nous voudrions précisément développer cette idée pour montrer avec plus de précision quelle est la marche logique du travail du cours d'eau.

Où trouvons-nous de préférence des gorges dans la région considérée ?

Parmi les grandes vallées principales du versant Nord des Alpes suisses, il faut d'abord mettre à part la haute vallée de l'Inn. Comme l'a très bien indiqué depuis longtemps le prof. Heim, le cours supérieur de l'Inn a été capté par la

¹⁾ VOIR DE LA NOË et EMM. DE MARGERIE, *Les formes du terrain* (Paris, 1888), *Texte*, p. 51 et suiv.

Maira ¹⁾. Rien n'est plus visible que cette capture au col de Maloja ; la vallée de l'Inn remonte doucement jusqu'au seuil de Maloja, à 1800 mètres au-dessus du niveau de la mer ; puis brusquement on aperçoit une sorte de gouffre profond de 200 ou 300 m., et c'est là que les eaux de la Maira coulent, allant vers le Sud. Des deux côtés de ce gouffre, deux cours d'eau qui allaient jadis à l'Inn, la Maira supérieure et l'Orlegna, dont la partie première coule encore dans la direction générale Sud-Nord, s'infléchissent ; ils tombent par des rapides et des cascades dans le fond du trou où se forme la Maira. Quant à la vallée supérieure de l'Inn, pour ces raisons ou pour d'autres, elle se remplit au lieu de se creuser ; le cours d'eau principal n'a plus la force d'emporter les matériaux que ses affluents lui apportent ; ceux-ci produisent sur les deux rives de grands cônes de déjection qui parfois se rejoignent presque comme à Silvaplana. Ces barrages torrentiels déterminent ces beaux lacs célèbres de la Haute-Engadine. Bref, la vallée supérieure s'encombre au lieu de se déblayer, et pour le sujet qui nous occupe, elle est d'un moindre intérêt que les autres grandes vallées.

Par ailleurs, au point de vue de la jeunesse des formes topographiques, il convient de distinguer les grandes vallées longitudinales telles que celles du Rhône du glacier jusqu'à Martigny, ou celles du Rhin antérieur de la source jusqu'à son confluent avec le Rhin postérieur, et les vallées transversales ²⁾. Il va sans dire que les vallées longitudinales se présentent avec beaucoup plus d'ampleur que les vallées transversales. La topographie primitive avait dans celles-là préparé la vallée, et dans le même espace de temps le cours d'eau a pu beaucoup plus avancer son œuvre que dans celles-ci. De là une grande différence de physionomie entre des vallées supérieures telles que celles que nous citons (Rhin et Rhône) et d'autres telles que celles de la Reuss et de l'Aar.

¹⁾ Voir *Jahrbuch Schweiz. Alpenclubs*, XV, 1879-80, p. 429-436 ; et *Ann. de Géographie, Bibl. de 1896*, N° 237.

²⁾ Voir LUGEON, *Recherches sur l'origine des Vallées des Alpes occidentales*, in *Ann. de Géog.*, 15 juillet 1901, p. 295 et suiv.

La vallée du Rhône et la vallée du Rhin dans leur ensemble, sont, en effet, plus ouvertes et comportent moins de gorges que les vallées de la Reuss et de l'Aar. C'est dans ces dernières, au contraire, que nous avons le plus de chance de rencontrer ces formes primitives des vallées qui sont les gorges ; et, en effet, la grande gorge de l'Aar près de Meiringen nous paraît être le type le plus parfait et le plus caractéristique des gorges du versant Nord des Alpes suisses.

Ajoutons que si les vallées longitudinales des grands cours d'eau présentent les caractères d'une plus grande maturité et offrent en principe moins de parties encore étroitement encaissées, moins de gorges, les cours d'eau affluents de ces vallées ont dû, après le retrait des glaciers, se mettre en rapport avec la vallée principale, et souvent leur travail est encore inachevé ; il est même parfois à peine commencé ; et les ruptures de pente entre les lits de ces affluents et les lits principaux se traduisent soit par des cascades soit par des gorges.

De plus, le Rhin et le Rhône, après avoir coulé dans de larges vallées longitudinales, se précipitent dans des sillons transversaux, et leurs vallées se rétrécissent : on connaît la porte de St-Maurice où le Rhône coule entre deux hautes murailles calcaires ¹⁾. Dans ces tronçons transversaux du cours les ruptures de pente des cours d'eau affluents sont encore plus considérables : cascades et gorges seront encore les unes plus hautes et les autres plus profondes, témoignant d'une jeunesse plus grande du modelé opéré par les eaux courantes. C'est dans une partie transversale du cours du Rhin que se jette la Tamina, et la Tamina traverse une gorge tout à fait belle et qui nous instruira. C'est dans une partie transversale du cours du Rhône que se jette le Trient, et le Trient a creusé

¹⁾ Voir MAURICE LUGEON, *Sur la fréquence dans les Alpes de gorges épigénétiques et sur l'existence de barres calcaires de quelques vallées suisses* in *Bulletin des laboratoires de géologie, géographie physique, minéralogie et paléontologie de l'Université de Lausanne (Suisse)*, N^o 2, p. 12 et suiv.

également une gorge qui nous fournira de précieuses observations.

Je dois faire ici une déclaration importante au sujet de la méthode suivie dans cette partie de mon mémoire : Je n'ai voulu faire ni une énumération ni une description complètes de toutes les gorges que j'ai visitées ; parmi celles-ci j'ai choisi des types significatifs représentant les divers stades de la formation des vallées encaissées afin de reconstituer l'histoire entière d'un même type. Je prends le phénomène à différents âges, à l'état de toute fraîche enfance, à l'état de jeunesse, de maturité et de vieillesse, et j'espère pouvoir ainsi caractériser l'évolution du même phénomène.

Je commencerai par étudier la gorge de l'Aar, puis celle de la Tamina, puis celle du Trient ; et nous verrons ensuite : 1^o comment des gorges moins avancées et plus fragmentaires nous révèlent le processus de la formation progressive des grandes gorges ; 2^o comment des gorges plus avancées, c'est-à-dire plus détériorées, peuvent se ramener aux premières, choisies comme types.

La gorge de l'Aar ¹⁾.

Rien n'est plus intéressant que de descendre complètement la vallée de l'Aar depuis les glaciers qui lui donnent naissance jusqu'à son confluent avec le Rhin : c'est une des vallées qui offre la collection la plus riche de phénomènes variés de géographie physique.

On sait que peu de temps après avoir quitté les glaciers, les eaux de l'Aar entrent dans une vallée transversale que l'on appelle le Hasli. Si l'on constate combien, dans la partie supérieure de cette vallée transversale, les hautes parois portent encore intactes les grandes surfaces lisses que leur ont imprimées les anciens glaciers, on en conclut facilement que

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille N^o 393, à 1:50000.

le travail de l'érosion fluviale n'est pas encore très avancé : malgré l'approfondissement réel du lit actuel, et malgré la nouvelle section en V que le cours d'eau a déterminée à la partie inférieure de l'ancienne section en U, on est frappé en effet de l'état de conservation générale en plus d'un point de cette ancienne vallée glaciaire en U. On peut distinguer du reste de la vallée un premier bief qui irait des sources jusqu'à la Handeck ; la cascade de la Handeck qui a 75 m. de hauteur marque une importante rupture de pente ¹⁾ ; et un second bief qui est dans l'ensemble plus encaissé, s'étend de là jusqu'au large bassin d'Innertkirchen. En plus d'un point sur cette seconde partie, l'Aar coule au fond d'un lit que bordent des parois très raides ; mais toujours ces parois s'écartent plus ou moins l'une de l'autre et s'évasent en formant le V classique.

Au-delà du bassin d'Innertkirchen, quel n'est pas notre étonnement de trouver la vallée barrée par une immense masse compacte de calcaire qu'on appelle le Kirchet ; on se demande vraiment comment le fleuve a fait pour passer outre, et lorsqu'on pénètre dans cette masse calcaire en suivant le cours même de l'eau, on entre ainsi dans ce qu'on appelle proprement la « Gorge de l'Aar », « Aareschlucht », ou d'un nom plus spécial « Lamm ».

Il serait impossible de pénétrer dans la gorge si on ne l'avait pas aménagée à l'usage des visiteurs en accrochant aux flancs des parois des passerelles et des galeries ²⁾.

¹⁾ Sur les parois de la chute et dans la gorge qui la suit apparaissent nombreuses, mais clairsemées, des formes de marmites. BALTZER a très bien exposé les causes et les conditions de la chute de la Handeck : Voir *Livret Guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse, dédié au Congrès géologique international et publié par le Comité d'organisation en vue de la VI^e session, à Zurich* (Lausanne, Payot, juillet 1894), p. 164.

²⁾ En 1901, on a exécuté de grands travaux d'amélioration, et en particulier là où la gorge était très étroite, on a supprimé les galeries extérieurement accrochées aux parois et on a entaillé ces parois sur plus de deux mètres de hauteur pour construire ainsi un passage plus commode. Mais il faut regretter la moindre commodité d'autrefois, car on a ainsi abattu sur plus de deux mètres de haut des parois exceptionnel-

Au-delà du Kirchet et au sortir de la gorge commence immédiatement, sans transition, la dépression à fond plat de Meiringen qui est tout simplement le début de la longue dépression du lac de Brienz et du lac de Thoune.

La dépression de Meiringen en amont du lac de Brienz est entourée de parois raides ; en ce cas, comme nous l'indiquions tout à l'heure, tous les cours d'eau arrivent à la dépression par des gorges ou par des cascades, et quelquefois par les deux. L'Aar a supprimé toute grande rupture de pente par cette gorge célèbre que nous allons étudier, tandis que le Wandelbach, par exemple sur la rive gauche, débouche du haut de la corniche calcaire et saute presque d'un seul bond jusque dans le fond. Le Reichenbach sur la rive gauche et l'Alpbach sur la rive droite produisent de fortes cascades, mais ces cascades sont mêlées de petites gorges. Ainsi les environs de Meiringen fournissent des types très variés des phénomènes que les ruptures de pente forcent les eaux courantes à produire. Le plus important de tous ces faits est sans contredit la gorge du cours d'eau principal.

A partir du Kirchet et jusqu'à son confluent avec le Rhin, l'Aar ne traverse plus une seule gorge analogue à celle du Kirchet. Il y a donc là un fait unique, exceptionnel, dont nous ne retrouvons l'équivalent ni en amont ni en aval.

La gorge que l'Aar s'est creusée dans le calcaire compact du Malm au Kirchet a environ 1400 m. de longueur ; mais sur la plus grande partie de cette longueur elle n'a rien de très

lement intéressantes, comme on le verra par la suite, des parois qu'il ne sera jamais possible à l'homme de reconstituer, Il faut déplorer qu'on ne conserve pas les monuments géographiques de cette valeur contre les fantaisies de la barbarie civilisée avec autant de soin jaloux et de respect qu'on le fait souvent aujourd'hui pour les monuments historiques. — Dans le même ordre d'idées — et à propos de la chute du Rhin à Schaffhouse, — le prof. HEIM, dont tous connaissent et respectent l'autorité, a fait entendre une protestation indignée contre un projet de dérivation des eaux du Rhin en amont de la grande chute du fleuve. — Voir le texte de son rapport dans *Verhandlungen der Schweiz. Naturforsch. Gesellschaft*, 83. *Jahresversammlung 2-4 Sept. 1900 in Thuisis*, Chur, 1901, p. 185-187.

remarquable au point de vue qui nous intéresse ; un cours d'eau violent et puissant comme l'Aar a presque partout élargi sa gorge, et ce n'est pas tant une gorge qu'un vrai petit canyon : le fleuve coule entre deux falaises verticales de plus de 100 m. de haut par endroits, mais toujours distantes d'au moins 15 mètres et souvent davantage. Toutefois vers l'aval de la gorge subsistent deux défilés qui surprennent par leur étroitesse avant même qu'on ait pu examiner les caractères des parois ; car ces deux parois sont si rapprochées qu'en plus d'un point on peut toucher l'une d'une main et l'autre de l'autre ; en certains endroits même il y a moins d'un mètre entre les deux, tandis que le cours d'eau puissant coule au-dessous dans un boyau profond et le plus souvent plus large que l'espace laissé vide entre les parois. Ici la gorge n'a plus la forme en V, elle n'a même plus la forme d'un U effilé aux branches très allongées ; mais la coupe de la gorge ressemblerait plutôt à la coupe d'un de ces ballons que l'on emploie dans les laboratoires et qui à la suite d'un long col s'épanouissent en récipients globulaires. De ces deux défilés le plus long est appelé « die grosse Enge » « le grand défilé », et il est aussi le plus saisissant. Il n'est saisissant ni par sa beauté qui n'a rien d'extraordinaire, ni par son aspect pittoresque et sauvage qui ne vaut pas l'aspect de beaucoup d'autres gorges des Alpes ou d'ailleurs, mais il est saisissant comme témoin vivant de la genèse de cette gorge. Du haut en bas, sur plus de 25 m. de hauteur, les deux parois qui se font face s'emboîtent pour ainsi dire l'une dans l'autre et se correspondent avec une étrange netteté. Ces deux parois sont constituées par un assemblage étonnamment continu de surfaces intactes quoique incomplètes d'anciennes marmites (voir fig. 9) : toute la superficie de ces deux parois a été conservée telle qu'elle devait être au moment même de l'approfondissement premier de la gorge, et dès lors elle porte un témoignage irréfutable en faveur du mode d'opérer qui a été suivi pour cet approfondissement.

Au petit défilé, appelé « Nasenenge », le spectacle est le même, quoique moins continu et moins éloquent. Enfin le

même phénomène s'aperçoit sur deux anciens cours de l'Aar qui viennent rejoindre la gorge actuelle en amont du grand défilé, l'un sur la rive droite, et que l'on appelle *die Finstere Schlucht*, la gorge obscure, et l'autre sur la rive gauche que l'on appelle *die Trockene Schlucht*, la gorge sèche ¹⁾. Ces gorges sont partiellement remplies de dépôts glaciaires (voir fig. 10); elles sont dans l'ensemble plus larges que les deux défilés de la gorge principale; il semble qu'elles aient perdu une tranche centrale plus épaisse; les marmites sur les parois y sont peut-être moins continues; mais elles sont souvent plus énormes et plus renflées; quelques-unes ne devaient pas mesurer moins de 10 ou 12 m. de diamètre. En tout cas de telles gorges secondaires sont très intéressantes pour l'observateur, car on y peut circuler plus aisément que dans les défilés; on peut plus à loisir et à des niveaux plus variés étudier ces si curieuses empreintes des tourbillons qui ressemblent à d'énormes moules de coquilles.

Dans les deux défilés comme dans les anciennes gorges, de part et d'autre, par places, on reconnaît avec une évidence surprenante les formes évasées d'une même marmite qui a laissé ainsi sur les parois opposées des formes qui se complètent: ce sont comme des amphores éventrées, dont la plus grande partie aurait été brisée, mais dont il resterait face à face deux morceaux dont la rotundité et dont les moulures attesteraient la communauté d'origine (voir fig. 11 et 12 ²⁾).

Dans les deux défilés comme dans les anciennes gorges, on peut suivre pas à pas et reconstituer l'histoire et le jeu

¹⁾ BALTZER, dans *Licret guide géologique dans le Jura et les Alpes*, etc., (v. supra) indique que le nom de ces anciens cours est *Schlauche*, « *finstere Schlauche*, » « *trockene Schlauche*, » et non pas *Schlucht* (p. 160). C'est là sans doute une altération locale du mot *Schlucht*.

²⁾ Nous avons précédemment attiré l'attention sur les avantages de la reproduction stéréoscopique: voir *Un nouveau procédé de reproduction appliqué à l'étude et à la représentation des faits géographiques: Phototypie stéréoscopique* (avec 10 planches stéréoscopiques) dans *Mém. de la Soc. frib. des Sc. Nat. Série: Géologie et Géographie*, vol. I, fasc. 1.

des tourbillons ; on voit comment plusieurs tourbillons de petit rayon ont été tout à coup remplacés par un tourbillon plus puissant qui a unifié les petites marmites d'abord formées, et celles-ci, à peine discernables aujourd'hui, aboutissent à une de ces marmites énormes dont nous parlions tout à l'heure ; puis le grand tourbillon lui-même s'est décomposé en tourbillons moindres, et la marmite énorme, à la paroi très renflée, se décompose en plusieurs marmites qui font succéder des cavités multiples à la grande cavité. Enfin, toute la tranche centrale des marmites petites ou grandes ayant disparu, il est naturel que nous ayons peu de renseignements sur le fond et sur ses caractères ; toutefois on devine souvent par des inflexions qui s'amorcent au bas des parois quelle devait être la forme du fond ; parfois même il en est resté une petite partie comme témoin. Et nul ne sera surpris que tous ces fonds correspondent à la forme de marmites à fond concave, c'est-à-dire à la forme achevée ; rien n'est plus logique puisque la superposition de ces 8 ou 10 séries de marmites sur les parois de la gorge démontrent le succès des tourbillons ; et ils étaient certes assez puissants pour achever l'œuvre qu'ils commençaient, puisque à ceux qui venaient d'achever quelque marmite en succédaient toujours de nouveaux, et toujours entreprenants. Que ce soit un seul tourbillon qui, sans changer, ait eu le temps d'approfondir une marmite, cela est bien peu probable ; et d'ailleurs cela importe peu. Les eaux avaient une puissance et une abondance qui garantissaient la persistance ou la renaissance ininterrompue des tourbillons ; ils se succédaient, continuant et reprenant sans cesse les mêmes marmites, et tout à la fois détruisant de plus en plus les saillies ou les sillons spiraliformes des parois, menant rapidement en fin de compte les marmites à leur achèvement. Voilà pourquoi nous n'apercevons là que des restes informes de ces détails des parois qui ont dû exister au début, et nous ne devinons partout que des fonds à forme concave. C'est l'inverse de ce que nous avons observé à Assouan, où les marmites étaient principalement à fond conique et avec des parois aux formes fraîches. De fait un flot aussi continu et resserré qui, accumulant son

action en un même point de haut en bas, creuse une gorge sur une profondeur de plusieurs dizaines de mètres, est l'inverse d'un flot discontinu, périodique, très largement étalé, qui disperse son action sur une grande étendue, et qui éparpille ainsi un plus grand nombre d'effets moindres.

Cependant le travail, ici et là, obéit aux mêmes lois; il se rattache à la même tactique; et si l'îlot des Marmites et la gorge de l'Aar marquent deux termes extrêmes particulièrement typiques, il va sans dire que souvent les deux modes sont combinés et mêlés.

Avant de comparer à la gorge de l'Aar d'autres gorges du versant Nord des Alpes suisses, il nous reste à dire pourquoi il est très logique que nous ayons rencontré dans le Kirchet deux défilés et plusieurs parties de gorges conservées d'une manière exceptionnelle.

Lorsque le cours d'eau, après avoir approfondi son cours, continue son œuvre, il élargit son lit et sa vallée, et c'est ainsi que les parois des défilés primitifs s'abattent, s'écroulent nécessairement un jour pour faire place à des parois plus ou moins verticales selon la roche, mais toujours assez banales: voilà ce qui s'est produit dans la plus grande partie de la gorge actuelle de l'Aar. S'il reste encore deux défilés intacts, c'est sans doute que cette gorge du Kirchet est la partie la plus récemment formée, la plus jeune de toute la vallée de l'Aar. Maurice Lugeon a étudié de près l'ensemble du Kirchet; dans deux notes préliminaires et dans un mémoire étendu¹⁾, il a

¹⁾ M. LUGEON, *Les anciens cours de l'Aar près de Meiringen (Suisse)* dans *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (Paris), CXXXI, 1900, p. 810-812; et *Anciens thalwegs de l'Aar dans le Kirchet près Meiringen, Notice préliminaire*, dans *Eclogæ geologicae Helvetiæ*, VI, N° 6 (nov. 1900), p. 496. Le mémoire plus étendu nous l'avons déjà signalé: il a paru sous le titre: *Sur la fréquence dans les Alpes de gorges épigénétiques et sur l'existence de barres calcaires de quelques vallées suisses* dans le *Bul. de la Soc. vaudoise des Sciences naturelles*, 4^e série, t. XXXVII, N° 141, sept. 1901, p. 423-454, et planches V-XIII; et dans le *Bul. des Laboratoires de Géologie, Géographie physique, Minéralogie et Paléontologie de l'Université de Lausanne (Suisse)*, n° 2, Lausanne, 1901, 34 p. et IX planches.

très bien indiqué comment « la célèbre colline du Kirchet, si énigmatique au premier abord, se montre formée par une série de gros blocs séparés par des gorges profondes comblées » ¹⁾. Lugeon a compté au moins cinq de ces anciennes gorges creusées par l'Aar, puis successivement comblées par les apports énormes des glaciers. « Il s'agit là d'un très remarquable phénomène d'*épigénie* et de *surimposition glaciaire* » ²⁾. Et l'Aar était obligée après chaque comblement de reprendre son travail, et d'user des tourbillons pour entreprendre une nouvelle gorge. Tandis qu'ailleurs dans sa vallée elle continuait toujours sur le même emplacement ou à peu près son travail de creusement, elle a dû dans le Kirchet recommencer tout à nouveau plusieurs fois de suite ³⁾. Que de temps perdu en un sens ! Et l'on devine que la gorge où elle coule actuellement est incomparablement plus jeune que tout le reste de la vallée. Quoi de plus naturel que de trouver là dès lors des vestiges de la formation première, qui ont ailleurs disparu ! Et il est aussi naturel de trouver ces vestiges dans les anciennes gorges

¹⁾ *Anciens thalwègs de l'Aar*, p. 496.

²⁾ *Les anciens cours de l'Aar près de Meiringen*, p. 812.

³⁾ Ou pour le moins deux fois de suite : Comme nous l'avons fait remarquer dans *La Géographie*, 15 juillet 1902, p. 42, il n'est peut-être pas nécessaire de supposer rigoureusement avec M. Lugeon que « ce mécanisme a dû se renouveler autant de fois qu'il y a de gorges comblées » : ce serait, disions-nous, simplifier et rendre plus vraisemblable cette explication que d'admettre que deux ou plusieurs de ces gorges ou portions de gorges ont pu être creusées par les eaux *en même temps*, correspondant ainsi à un même stade de recul du glacier de l'Aar : de la grande masse glaciaire accumulée en amont dans le Hasli, plusieurs torrents glaciaires, divisés à la rencontre de l'énorme barre calcaire du Kirchet, auraient travaillé *en même temps* chacun de leur côté, élaborant des gorges encaissées ; et ces gorges ou portions de gorges se seraient trouvées à différents degrés d'avancement et d'approfondissement lorsqu'une nouvelle phase de progression du glacier aurait abouti à l'engorgement morainique de tous les sillons déjà élaborés et aurait contraint plus tard les nouveaux torrents glaciaires à s'ouvrir un ou plusieurs défilés nouveaux à travers la masse compacte : en fin de compte, l'Aar actuelle, réduite à un cours unique et partant plus vigoureusement constituée, aurait fait élection d'un seul de ces sillons, la gorge actuelle.

du Kirchet, telles que la *Finstere Schlucht* et la *Trockene Schlucht*, qui après avoir été formées ont été pour ainsi dire arrachées à l'action ultérieure des eaux courantes et conservées à peu près dans leur état originel par le remplissage morainique.

Ajoutons enfin que le calcaire du Kirchet était assez résistant et assez compact pour subir les actions des tourbillons sans se démolir, et pour les conserver ensuite sans les laisser trop vite é mousser ou oblitérer par les agents atmosphériques.

Bref la gorge de l'Aar est un des tronçons les plus récemment formés de toutes les vallées alpines, et il nous fournit à ce titre des documents exceptionnels sur le mode de première formation des gorges et des vallées.

Une remarque s'impose dès l'examen de cette première gorge ; à propos des gorges nous aurons à diverses reprises à parler de phénomènes d'*épigénie* ou de *surimposition glaciaire* ; nous en signalerons même plusieurs exemples qui n'ont pas encore été signalés (voir en particulier le carton face à la p. 192). Et on ne saurait en être surpris. « Dans les vallées comblées par les moraines ou par les alluvions fluvio-glaciaires, les cours d'eau postérieurs à la dernière glaciation n'ont pas en tous points retrouvé exactement leur ancien lit ; et, divaguant à droite ou à gauche, ils ont dû s'enfoncer progressivement dans la roche qui formait un des flancs des anciennes vallées ; se creusant ainsi des portions de lit en pleine roche, ils n'ont pas pu travailler aussi vite que s'ils avaient déblayé la moraine ; et ces parties *les plus nouvelles* de ces vallées se présentent à nous avec les caractères de vallées *plus neuves*, c'est-à-dire sous la forme de gorges aux parois plus ou moins verticales, fréquemment sous la forme de gorges à marmites » ¹⁾. Ces deux séries de faits, d'ordre différent, se trouvent donc tout naturellement associés.

¹⁾ JEAN BRUNHES, in *La Géographie*, 15 juillet 1902, p. 41.

Gorge de la Tamina ¹⁾.

La Tamina recueille les eaux du versant occidental du Calanda et va se jeter dans le Rhin près de Ragatz. La gorge de la Tamina est située à 5 kilom. en amont de Ragatz ; c'est dans la gorge même que jaillit la fameuse source de Pfäfers dont les eaux ont une température de 30° à 31° et qui a été la cause d'une station balnéaire déjà ancienne.

Quand on remonte la vallée de la Tamina en venant de Ragatz, on entre dans une vallée encaissée, mais dans toute la partie d'aval on n'aperçoit du haut en bas presque aucune trace de marmites : sur cette magnifique paroi de flysch de la rive droite qui domine verticalement le cours d'eau et qui, même par places, surplombe, on ne distingue aucune surface lisse. Ce sont des couches gréseuses qui paraissent se démolir assez facilement. Tout près du niveau de l'eau on aperçoit exceptionnellement quelques parois lisses et, de loin en loin, quelques marmites.

Puis, en remontant encore, la vallée se resserre un peu davantage ; on a profité d'un rapide pour établir un petit barrage ; et là les formes de marmites sont beaucoup plus nombreuses. En amont du barrage, les versants deviennent bien plus adoucis que dans la partie inférieure ; la végétation a eu le temps de s'y implanter ; et ces versants sont boisés presque jusqu'au niveau de la rivière ²⁾.

Plus haut enfin, les versants redeviennent plus raides et moins boisés, et l'on parvient au vieil établissement de bains de Pfäfers que l'on doit traverser pour arriver à la gorge proprement dite appelée la *Gorge de la source, Quellenschlucht*. Cette gorge a environ 300 m. de long jusqu'à la source thermique ; dès le premier coup d'œil, on reconnaît qu'elle est du même type que celle de l'Aar, et elle est encore due à un phé-

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 402, à 1:50000, et Feuille n° 270, à 1:25000.

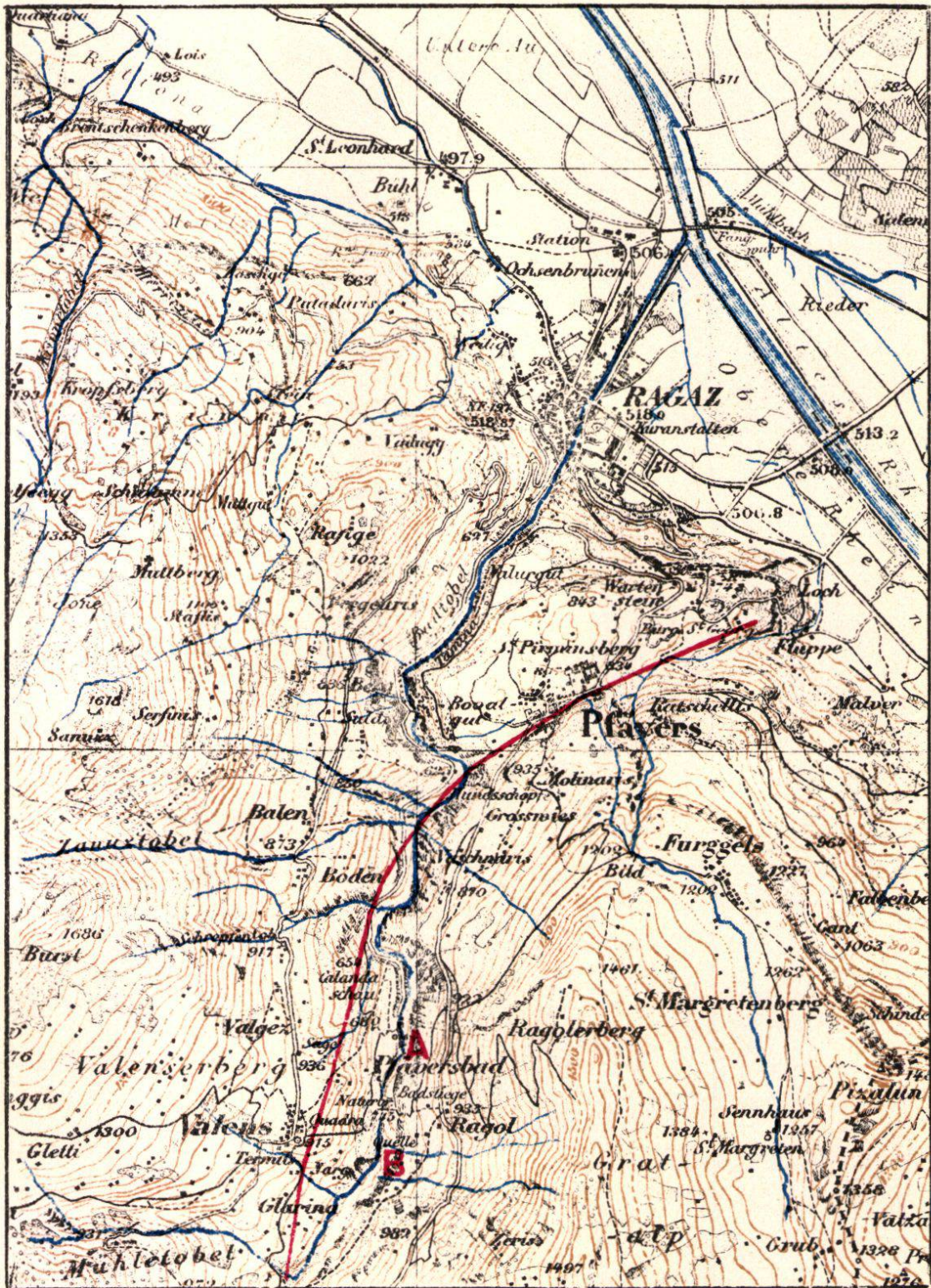
²⁾ Cette partie plus adoucie correspond à la région où l'axe du « trog » glaciaire rencontre et coupe le « thalweg » actuel : voir le carton.

nomène d'épigénie glaciaire. Ce phénomène est tout à fait visible pour qui suit la vallée de la Tamina non plus au niveau de l'eau courante ou à peu près, c'est-à-dire dans la gorge, mais à 300 mètres au dessus, le long des routes qui relient les petits villages des deux rives. Immédiatement au-dessus de la source, à la cote 850, des éboulements montrent même à nu la boue glaciaire ; c'est la moraine qui remplit encore en ce point le fond de l'auge sur la rive gauche, et c'est sur ce seuil adouci et étalé de la moraine conservée qu'est bâti Valens (voir le carton face à cette page) ¹⁾.


Revenons à la gorge de la source. En général les parois ont moins intégralement subsisté des deux côtés à la fois qu'elles ne l'ont fait dans la gorge de l'Aar ; elles se font moins vis-à-vis ; en général l'une s'est beaucoup plus éboulée que l'autre. Par exemple l'on trouvera sur l'une des faces, sur la rive gauche, à peu près à 200 m. en aval de la source, une paroi qui porte les traces de marmites de grand rayon et qui est comparable aux plus beaux morceaux de la gorge de l'Aar, mais la paroi qui fait face ne répond plus pour ainsi dire à celle-ci, elle est plus démolie. Et cela vient sans doute de ce que le sillon creusé par la Tamina est dans son ensemble assez éloigné de la verticale : il est très fortement incliné de la droite vers la gauche. Cela vient aussi de la qualité de la roche : en plus d'un point de la gorge de la Tamina l'effritement de la surface s'est déjà produit. Dans toute la gorge on a dû faire beaucoup plus de travaux de maçonnerie pour éviter les éboulements que dans la gorge de l'Aar. Ainsi, 100 m. en aval de la source on aperçoit la partie supérieure d'une marmite gigantesque, vraie calotte hémisphérique qui a plus de 10 m. de diamètre : on a été obligé de construire un mur et de la remblayer pour l'empêcher de disparaître.

L'ensemble pourtant se présente comme à la gorge de l'Aar, et nous ne voulons pas répéter ce que nous avons déjà

¹⁾ Il est curieux de constater que les deux villages de Valens et de Pfäfers sont tous les deux situés sur les méplats conservés de l'ancien » trog » glaciaire.



Gorge de la Tamina, à 1 : 50000.

 Axe approximatif de l'ancien « trog » glaciaire.

AB Gorge de la Source.

Reproduction de l'Atlas Siegfried faite avec l'autorisation
du Service topographique fédéral.

dit, Ici aussi le travail de l'eau est multiple, varié, successif ; ici aussi les marmites s'agrandissent, puis s'effilent ; ici aussi plusieurs aboutissent à la même, laissant à la paroi dans la partie supérieure une trace de leur ancienne cloison, tandis qu'au contraire une grande marmite se subdivise en plusieurs plus petites.

En suivant ces formes de haut en bas, et en voyant se développer, se dilater, s'épanouir ces magnifiques formes courbes, on peut imaginer ici comme là quel a été le travail de l'eau en de pareils ateliers de forage. Mais la gorge de la Tamina — et c'est un trait qui la distingue de la gorge de l'Aar — paraît au premier abord voûtée, c'est-à-dire fermée complètement dans la partie supérieure à 90 ou 100 m. du niveau actuel de l'eau. En un point même, à 70 m. à peu près en aval de la source, les deux parois sont si bien rejointes qu'un petit sentier qui conduit du village de Valens sur la rive gauche au village de Pfäfers sur la rive droite, profite de ce pont naturel, « Naturbrücke », appelé aussi « Beschluss », « fermeture ». Mais en observant de près ce plafond on y distingue très nettement le sillon étroit aux bords faits de tronçons circulaires, aux lèvres festonnées, qui a marqué le premier travail de l'eau. Les deux bords supérieurs sont tout simplement reliés par des blocs éboulés qui forment ainsi par endroits une voûte continue ¹⁾.

Le premier sillon est donc resté très étroit dans la partie supérieure, tandis que des élargissements considérables se produisaient au-dessous, constituant des espèces de salles qui rappellent tout à fait les salles de certaines cavernes : un peu en aval de la grande marmite dont il est question plus haut, toute la rive droite s'élargit en amphithéâtre et forme une très vaste chambre. Parce que dans l'ensemble le flysch gréseux

¹⁾ Il est impossible de ne pas rapprocher de la gorge de l'Aar et de la gorge de la Tamina une gorge située dans les Alpes de Savoie, la gorge de la Dranse du Biot ; cette gorge est creusée dans le même calcaire du Malm dans lequel l'Aar a creusé sa gorge ; et de gros blocs éboulés constituent comme à la Tamina une véritable voûte, un vrai pont, qui porte le nom de Pont du Diable.

de la Tamina est beaucoup moins résistant que le calcaire dur du Kirchet, parce qu'il est beaucoup plus enclin à se démolir, la gorge de la Tamina reproduit moins purement que la gorge de l'Aar le simple sillon d'érosion dû aux seuls tourbillons. Elle nous donne déjà quelques exemples *très réduits* mais *significatifs* de certains phénomènes qui se produisent par excellence et en grand dans les terrains fissurés et caverneux, et qu'on désigne sous le nom générique de *cavernes*.

Gorge du Trient ¹⁾.

Le Trient va se jeter dans le Rhône entre Martigny et Vernayaz, un peu en amont de Vernayaz ; sa vallée débouche par une gorge encaissée dans la vallée à fond plat où coule le Rhône ; cette gorge est creusée dans des roches cristallines (gneiss avec granulite, eurite et chlorite).

La gorge du Trient est sensiblement plus ouverte et plus large que la gorge de la Tamina et surtout que les défilés de la gorge de l'Aar.

Quand on entre dans la gorge du Trient on est étonné de la différence entre l'état d'altération des parties hautes des parois et l'état de conservation des parties tout à fait basses ; à coup sûr cela se reproduit dans une certaine mesure en toutes les gorges, mais rarement avec des traits différentiels aussi saisissants qu'au Trient : les parties hautes des deux parois sont même tout à fait démolies ; les parties moyennes portent des vestiges de marmites mais sensiblement altérés et beaucoup moins expressifs qu'à la Tamina ou à l'Aar. Bien plus, jusqu'aux parties basses, parfois jusqu'à 5 ou 6 mètres du niveau actuel de l'eau, les mousses, les fougères et même de petits arbustes se sont emparés de la surface des parois.

Il s'agit ici d'une gorge qui a été occupée par le glacier postérieurement à sa formation partielle ; on voit très bien le poli et les stries glaciaires sur quelques points des parois,

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuilles n° 526, à 1:50000.

notamment sur quelques protubérances ; il n'y a que la partie inférieure de la gorge qui ait été façonnée par les eaux courantes sans subir d'autre action. Et c'est à juste titre qu'on peut discerner de bas en haut trois zones successives :

1° La partie basse jusqu'à 5, 6 ou 7 m. du niveau de l'eau : dans cette partie les parois sont ce qu'elles sont à l'Aar ou à la Tamina, portant de multiples débris de marmites : c'est la partie récemment formée par le cours d'eau.

2° La partie moyenne représentant d'anciennes marmites mais rabotées par le glacier ; et cette partie moyenne n'existe que par places ; en plusieurs points elle a été démolie, et se confond alors avec la partie supérieure.

3° La partie supérieure où les parois sont beaucoup plus éloignées l'une de l'autre et n'ont que le caractère banal et indistinct des parois écroulées.

Somme toute la gorge du Trient, qui a été au moins en partie creusée par les eaux courantes avant la dernière et définitive disparition des glaces, marque un stade beaucoup plus avancé de l'élargissement et de la démolition progressive du sillon primitif d'érosion ; et comme les parties basses elles-mêmes sont plus élargies, on y peut faire quelques observations de détail que le flot encaissé de la Tamina et de l'Aar ne permet jamais de faire :

Ainsi l'on aperçoit au niveau de l'eau, du côté des parois, de petits seuils qui sont émergés aux basses eaux et qui montrent le travail actuel des tourbillons. Le travail du Trient porte, semble-t-il, sur une étendue un peu moins resserrée : il est moins concentré sur un seul chenal. Et l'on constate que cela s'est reproduit à différents niveaux. En suivant la partie de la galerie qui court le long de la paroi de la rive droite et vers le milieu de la gorge on trouve une marmite de plus de 4 m. de diamètre et qui est tout à fait un type de marmite interrompue ; une saillie conique fait réapparaître la roche au milieu de la marmite, tandis que des débris divers entourent cette saillie, débris terreux recouverts de quelques mousses et de quelques herbes. Bien rares cas d'interruption mais qui prouvent que les tourbillons du torrent se sont légèrement

déplacés en s'approfondissant ; bien faibles et minuscules divagations du principal effort destructeur du cours d'eau, mais qui suffisent cependant à faire ressortir par opposition combien est extraordinaire l'allure presque rectiligne et continuellement resserrée du *grand défilé* de l'Aar : celui-ci, après examen, reste bien le type par excellence.

**Gorges en formation, et spécialement gorges du Trümmelbach ¹⁾
et du Dündenbach ²⁾.**

Il est donc manifeste que ces gorges étroites, où le lit actuel est souvent plus large que le sillon profond déterminé par les deux parois aux grandes empreintes en forme de coquilles, sont dues à l'action des tourbillons.

Il ne suffit pas de constater le fait ; il est curieux de se rendre compte de la marche du phénomène. Or comment l'eau s'y prend-elle pour creuser ainsi sur des longueurs de 30, 50 et 100 mètres et sur des hauteurs de 25 à 30 mètres et plus de longs couloirs faits de marmites superposées et qui se rejoignent pour constituer une seule gorge taillée de la même manière sur toute son étendue ? On devine aisément en effet que si les tourbillons travaillaient davantage en amont qu'en aval ils arriveraient à former un cours souterrain ; et soit que dans la partie d'aval la couverture du cours souterrain subsistât, soit qu'elle s'écroulât, le phénomène serait différent de celui que nous constatons : c'est-à-dire des parois présentant *d'une manière continue* sur plus de 50 m. de longueur et plus de 25 m. de hauteur les vestiges de l'action tourbillonnaire.

Il faut distinguer en effet deux questions : la formation d'un lit de cours d'eau par des marmites successives qui se rejoignent en se trouvant à peu près toutes au même niveau : c'est le cas que représente si bien le lit autrefois souterrain de

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 488 à 1:50000.

²⁾ Atlas Siegfried, même feuille.

la perte du Rhône, un peu en amont de Bellegarde (France) ¹⁾. Le lit avait été formé par la jonction de marmites tourbillonnaires dans une couche de calcaire assez tendre au-dessous d'une couche de calcaire plus dur laquelle était seulement percée de trous circulaires distincts, orifices supérieurs de ces mêmes marmites ; aujourd'hui du reste on a fait sauter sur toute la longueur de l'ancienne perte du Rhône cette couverture de calcaire plus dur ²⁾.

Beaucoup de cours d'eau montrent ainsi un chenal résultant de la jonction de marmites : A. Penck dans sa *Morphologie der Erdoberfläche* ¹⁾ cite des exemples de lits de cours d'eau partiellement formés de la sorte, il renvoie lui-même à un mémoire de Reusch ³⁾ et il donne un croquis typique d'une rivière de Norvège : *Flussbett unweit der Borgundskirche in Lårdalen, Norwegen*.

Enfin si l'on veut bien se reporter à la figure 13 qui représente une petite partie du lit d'un affluent de la rive gauche de la Sarine tout près de Fribourg, on trouvera un type bien caractérisé d'un couloir d'écoulement constitué par des marmites rejointes ⁴⁾.

Encore sur cette figure est-il à remarquer que les marches successives de l'escalier sont très visibles, et ce cas-miniature nous permet de passer tout de suite à des cas qui vont nous conduire à l'explication très claire des grandes gorges proprement dites.

¹⁾ Voir DE LA NOÉ et E. DE MARGERIE, *Les formes du terrain* (Service géographique de l'Armée), Paris Imp. Nat., 1888, 1 vol., *Texte*, in-8 ; et 1 vol., *Planches*, in-8 : voir *Texte*, p. 49-50, et *Planches*, Pl. XVII.

²⁾ La gorge du Chauderon, qui a été creusée par la Baye de Montreux, et qui est toute proche du lac Léman, offre de nombreux exemples de chenaux constitués par la réunion de marmites successives ; on y peut voir aussi comment les marmites contribuent au recul des cascades : une petite cascade, dans la partie inférieure de la gorge, laisse très bien apercevoir les deux systèmes de marmites qui lui ont donné naissance et qui sont encore séparés par une petite protubérance, seul reste d'une ancienne cloison.

³⁾ Voir p. 313 et 314.

⁴⁾ *Jettegryder dannede af Elce in Nyt. Mag. f. naturc.*, 1877.

Parmi toutes les gorges que nous connaissons il en est deux qui nous paraissent représenter d'une manière exceptionnellement saisissante la marche du phénomène que nous cherchons à analyser : la gorge du Trümmelbach et la gorge du Dündenbach.

Ces deux gorges sont assez voisines l'une de l'autre. L'un des deux torrents, le Trümmelbach, descend des glaciers du massif de l'Eiger et de la Jungfrau, et va se jeter dans la Lutschine Blanche, 3 kilomètres en amont de Lauterbrunnen. On sait comment se présente la vallée de Lauterbrunnen ; elle est encaissée entre deux énormes parois calcaires, et c'est bien là que toutes les eaux sont soumises à de brutales ruptures de pente ; sur la rive gauche le Staubbach tombe de si haut qu'il se réduit en poussière avant d'arriver en bas, ainsi que l'indique son nom (Staub, poussière). Et sur la rive droite le Trümmelbach en est à une période plus avancée ; il ne tombe plus du haut de la corniche ; il s'est déjà partiellement encaissé, et la gorge est commencée. Mais c'est encore une gorge à son début, c'est-à-dire une gorge à escaliers ; chaque palier représente une petite gorge en formation, que sont en train d'élaborer les eaux qui tombent en cascade du palier précédent et supérieur. On peut distinguer, dans la partie qui est aménagée pour les visiteurs, 4 grands paliers, que des passerelles ou des ponts permettent d'examiner à loisir ; dans cette gorge qui se fabrique sous nos yeux, pour ainsi dire, on voit très bien comment les paliers reculent peu à peu, laissant béants devant eux des sillons profonds que bordent des parois faites de vestiges de marmites. La fig. 14 est prise du pont n° 3 (le pont inférieur étant le n° 1) et elle est prise vers l'aval ; l'on peut y discerner aisément les éléments d'une gorge qui sera plus tard identique à celle de l'Aar. Et pareillement le long de la chute inférieure près du pont n° 1 s'étagent de grandes marmites très bien formées, aussi énormes que la plupart de celles de l'Aar ou de la Tamina.

Des gorges en formation, analogues à la gorge du Trümmelbach, on en trouve d'autres spécimens dans la vallée même de Lauterbrunnen, par exemple ces deux gorges dont les eaux

rejoignent la Lutschine sur la rive droite et devant lesquelles passe le chemin de fer de montagne qui gravit péniblement la terrasse de Wengen, pour aller ensuite à la Wengernalp et de là à la Petite Scheidegg.

Il est surtout une grande paroi où s'aperçoivent de multiples gorges à marmites à divers degrés de maturité : c'est cette énorme paroi calcaire (Hochgebirgskalk) qui borde au sud le Trümleten Thal et au-dessus de laquelle s'élèvent les trois massifs de la Jungfrau, du Mönch et de l'Eiger : là trois glaciers se développent grandioses, et se terminent tous les trois par plusieurs filets torrentiels qui sculptent la roche ; les eaux torrentielles qui s'échappent surtout de deux d'entre eux, le Giessengletscher et l'Eigergletscher, ont déjà élaboré des portions de gorges du type Trümmelbach, des sillons qui sont en miniature des gorges de l'Aar.

Dans les petites gorges — dites Giesseri sur la carte Siegfried à 1:50000 — et qui sont formées par les eaux échappées du Giessengletscher sur le flanc nord de la Jungfrau, dans ces gorges en formation dont nous avons parlé tout à l'heure à propos du Trümmelbach, on peut noter un cas d'élaboration de deux gorges voisines, à peu près parallèles et destinées à être rejointes, qui doit être rapproché du cas que nous allons examiner, du cas de l'Hexenkessel.

Le Dündenbach est un affluent de la Kien qui est elle-même un affluent de la Kander. Il descend de cet ensemble de massifs qui se rattachent à la Blümlisalp, et pour aller rejoindre la Kien il doit franchir et sauter cette haute falaise calcaire qui entoure de trois côtés la dépression de Tschingel. Il est intéressant de voir comment le Dündenbach est en train de réduire peu à peu cette rupture de pente qui force aussi tant de ruisseaux ses voisins à se précipiter uniquement en cascades. Encore ici on trouve une série de paliers, et à chacun de ces paliers l'eau élabore des marmites dont les traces restent ensuite aux parois. Mais si les parois du Trümmelbach sont mieux conservées, plus typiques et plus parlantes que celles du Dündenbach, on assiste d'une manière beaucoup plus visible dans la gorge en formation du Dündenbach au travail

des tourbillons. La gorge est plus ouverte et mieux éclairée ; on peut gravir les pentes qui avoisinent le torrent, et voir de très près les différents étages. Un des sauts inférieurs du torrent forme une fort belle et grande cascade qui a des traits de ressemblance avec celle de la Handeck sur l'Aar (voir plus haut), et le point le plus important à examiner est précisément le palier d'où part cette cascade. Ce palier est bien entendu loin d'être simple : il a ce caractère de présenter en même temps que des goulets perforés par lesquels l'eau se précipite et tombe, — et à côté de ces goulets, — une immense cuve et deux très belles coupes dans lesquelles s'engouffre une partie des eaux qui viennent du palier supérieur : ces eaux ainsi détournées du goulet qui conduit à la grande cascade se jettent dans ces vraies marmites en cours d'exécution ; l'on voit là comment se transforme leur mouvement de chute verticale en un mouvement de giration ; l'on assiste au tournoiement de l'eau soit dans la grande cuve qui a 8 m. de diamètre, soit dans l'une des deux coupes qui a presque 2 m. de diamètre (l'autre coupe plus petite qui a des formes tout à fait régulières est aujourd'hui ouverte par les eaux et le tourbillon n'y pénètre plus). On contemple en grand et tel qu'il se produit réellement le phénomène qu'imité l'expérience du Gletschergarten de Lucerne dont nous avons parlé plus haut. Nulle part aussi vivement qu'en face de la plus grande de ces cuves je n'ai senti la puissance inexorable de l'eau tournoyant et entraînant avec elle les matériaux qui usent ; le flot du tourbillon est relativement lent, mais majestueux et puissant. Quant à la plus grande des deux coupes dans laquelle pénètrent et agissent sans cesse les eaux furieuses d'un tourbillon, elle a frappé depuis longtemps l'imagination des paysans qui lui ont donné le nom d' « Hexenkessel », « Chaudière de la sorcière » ¹⁾.

Le fait essentiel qu'il importe de retenir après l'examen de cette partie de la gorge du Dündenbach c'est que tandis

¹⁾ Sur la feuille 488 de l'Atlas Siegfried on trouve seulement inscrit le nom (beaucoup plus fréquent dans les gorges alpines) de « Pochtenkessel ».

qu'un cours d'eau torrentiel est dans sa plus grande masse précipité dans un trou profond et forme cascade, il trouve le moyen non seulement de travailler en amont du seuil de chute à creuser son lit et à préparer le recul de la cascade, mais encore de détacher pour ainsi dire une partie de ses eaux sur les flancs de son lit principal, et de les consacrer à l'élaboration de nouvelles marmites : ces marmites en s'écroulant partiellement un jour produiront un élargissement brusque de l'étroit goulet primitif, tout en laissant aux parois nouvelles des traces aussi visibles et aussi parfaites du creusement tourbillonnaire que pouvaient en porter les parois de l'étroit goulet lui-même. Si l'élargissement de la gorge se produisait par le simple effet de la démolition mécanique, par l'écroulement des parois, les traces des marmites disparaîtraient ; il est curieux de constater comment un élargissement partiel peut être produit par l'effet direct des tourbillons : lorsque les cloisons extérieures des marmites auront été emportées et qu'il ne restera plus en présence que les deux parois de la gorge aux formes plus ou moins concaves, qui pourrait dire si ces concavités appartiennent à un seul système de marmites ou à plusieurs ? En plus d'un cas où la gorge, tout en étant très large, porte de part et d'autre ces vestiges des tourbillons, comme il arrive par exemple dans la *Finstere Schlucht* ou dans la *Trockene Schlucht* de la gorge de l'Aar, je crois très satisfaisant pour l'esprit de pouvoir admettre un processus multiple analogue à celui qu'on a la rare occasion d'observer à l'Hexenkessel du Dündenbach.

En tout cas ces deux exemples du Trümmelbach et du Dündenbach nous ont bien fourni tous les éclaircissements que nous souhaitions. Ils sont des types de gorges en voie d'élaboration ; et voilà pourquoi ils nous renseignent si clairement sur les épisodes successifs du creusement, épisodes qui doivent aboutir à la gorge parfaite, telle que celles de l'Aar, de la Tamina ou du Trient.

Autres gorges du versant Nord des Alpes suisses.

Les trois gorges de l'Aar, de la Tamina et du Trient sont donc les trois types les plus parfaits de gorges que nous offrent les vallées du versant Nord des Alpes suisses. A coup sûr il y a bien d'autres gorges analogues, notamment les gorges du Gorner ¹⁾ : dans les gorges creusées par la Viège et qui sont situées un peu amont de Zermatt, les parois schisteuses montrent visiblement du haut en bas les restes des marmites par lesquelles les tourbillons ont témoigné là encore de leur action semblable à celle d'une vrille. Mais, nous croyons pouvoir l'affirmer, aucune autre partie encaissée de vallée n'est plus caractéristique, pour la forme et pour les dimensions, que les gorges de l'Aar, de la Tamina et du Trient.

Après avoir étudié ces trois types, jetons un coup d'œil sur quelques autres cas plus restreints ou plus détériorés, mais dont l'examen critique complètera les données que nous avons recueillies jusqu'ici.

La Reuss dans la première partie de son cours coule comme l'Aar dans une vallée transversale. La vallée actuelle de la Reuss n'a guère dans l'ensemble un profil différent de la vallée de l'ancien glacier. C'est à peine si dans le fond elle a écorné le lit de la vallée glaciaire. Et elle n'a creusé des portions de gorge vraiment profondes que dans les passages où, s'étant éloignée de l'ancien lit du glacier, elle s'est taillé un lit beaucoup plus nouveau ; alors immédiatement les rives de la gorge se redressent, deviennent souvent verticales et dans le fond apparaissent même çà et là quelques marmites.

En dehors de là, on remarque relativement très peu de traces de l'érosion tourbillonnaire. Il faut dire que le granite du Saint-Gothard (protogine) se débite aisément en gros morceaux, en parallélipipèdes, et telle est la seule raison qui puisse expliquer et qui explique en effet que par exemple dans la partie supérieure de la vallée, en amont de Göschenen,

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 535, à 1:50000.

dans la gorge encaissée du Pont du Diable, il y ait sur les parois si peu de marmites tourbillonnaires : c'est à peine si l'on en aperçoit une bien formée dans un bloc homogène en face de la chute du Pont du Diable ¹⁾.

Ce granite est en effet divisé en blocs divers par de grandes fentes verticales qu'on appelle *diaclasses*; A. Daubrée a très longuement disserté de l'influence des joints horizontaux et des diaclases verticales sur les formes de certaines roches superficielles ²⁾; et l'on pourrait répéter tout ce qu'il a dit sur ce sujet à propos des parois des lits de rivières encaissés.

Lorsque la roche se débite en gros blocs selon des fissures naturelles, les marmites sont rares. Ce n'est pas à dire que les tourbillons n'existent pas et ne travaillent pas; mais la roche n'est pas assez longtemps fixe pour que la marmite ait le temps de s'élaborer. Le tourbillon entre en jeu et commence son œuvre; tout à coup une ligne de moindre résistance est atteinte, et un grand pan s'écroule, et toute l'économie du courant tourbillonnaire se déplace, et tout est à recommencer. Ainsi le tourbillon d'eau travaillant en des masses peu cohérentes ou insuffisamment cohérentes pour subir longtemps un pareil rabotage, détermine des écroulements; ces écroulements sont encore l'œuvre du tourbillon en un certain sens; mais il n'y a pas de forme représentant son œuvre propre; il n'a pas produit l'effet normal d'un rabot ou d'une lime qui polit, mais l'effet plus général d'un coup de butoir ou d'un coin.

Les parties encaissées de la vallée de la Reuss sont tout à fait caractéristiques au point de vue de l'effet des diaclases; souvent le lit de la rivière principale ou de ses affluents est bordé de deux parois verticales où se dessinent très nettement les parallépipèdes déterminés par les fentes verticales: tel est l'aspect de la gorge terminale de la Göschenen-Reuss qui

¹⁾ Il paraît qu'au pied même de la chute, dans le lit de la Reuss, se trouve une énorme marmite; mais lorsque je suis passé au Pont du Diable, les eaux étaient toujours trop fortes pour que je pusse l'observer.

²⁾ A. DAUBRÉE, *Etudes synthétiques de géologie expérimentale*, I, p. 300-373; et ADDITION, II, p. 705-717.

après avoir arrosé le Göschenen-Thal vient rejoindre la Reuss principale à Göschenen même ; tel est encore l'aspect de la gorge grandiose de la Meien-Reuss que traverse plusieurs fois le chemin de fer du Gothard près de Wassen. Et dans les petites gorges de la vallée principale, il en est de même. Je n'ai constaté qu'une exception, une seule bien caractérisée, au défilé connu sous le nom de *Pfaffensprung*, entre Wassen et Gurtellen ¹⁾ ; sur une longueur de quelques dizaines de mètres les tourbillons ont pu former un sillon profond qui ressemble en petit aux défilés de l'Aar ; les formes des parois sont analogues à celles que nous avons décrites, et les parois surplombent le lit actuel de la Reuss. Mais cela est tout à fait localisé ; quelque dix mètres plus loin, en aval du pont de la route, les parois redeviennent banales et verticales, sans aucune trace de marmites. Au Pfaffensprung la masse rocheuse était plus compacte et plus résistante, et elle a pu être marquée pour longtemps de la première empreinte des tourbillons. D'ailleurs d'autres parties des gorges de la vallée ont pu commencer par être semblables au Pfaffensprung ; mais si les diaclases n'ont pas interrompu dès le début la formation des marmites, on comprend qu'elles ont considérablement hâté leur disparition, en facilitant l'écroulement des parois, en accélérant l'élargissement du sillon primitif. Et le rôle des diaclases dans un cas comme dans l'autre explique également ce résultat : le petit nombre de niches et de restes de marmites aux flancs des parois actuelles.

Ce qui s'est passé dans la vallée de la Reuss s'est passé dans le plus grand nombre des gorges, et notamment dans cette gorge célèbre de l'Hinter-Rhein (Rhin postérieur), laquelle est en amont de Thusis et porte le nom bien connu de Via Mala ²⁾. Sur la plus grande partie de la Via Mala, et en particulier dans cette portion inférieure qui va de Rongellen jusqu'à Thusis, il n'y a pour ainsi dire pas de marmites aux

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 394, à 1:50000.

²⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 410, à 1:50000.

parois ; la gorge est un canyon aux parois verticales, creusé dans les schistes des Grisons. Ceux-ci sont aussi traversés par d'immenses diaclases, et à la Via Mala même on voit en plus d'un point d'une manière très manifeste comment ces grandes fentes verticales préparent de formidables et brusques écroulements. — Au-dessus de Rongellen, la gorge est resserrée de nouveau et là où a été jeté le *deuxième pont*, elle devient tout à fait étroite. C'est le point intéressant à examiner. On aperçoit en amont du pont le Rhin couler à 80 m. de profondeur dans un sillon très étroit qui est exactement du type des défilés de la gorge de l'Aar, mais qui n'a guère plus de 40 m. de longueur ; et en aval du pont on voit le Rhin s'engouffrer de nouveau dans un sillon de même nature.

En amont du deuxième pont, on doit remarquer le gros bloc de schiste, recouvert d'herbes et d'arbres, qui s'est exceptionnellement conservé sur la rive droite. Et en face, sur la rive gauche, à la hauteur de la route et près de la route même, on reconnaît les vestiges de deux ou trois grandes marmites sur un éperon qui avance aussi en face du précédent. C'est à ce double éperon conservé que correspond dans le bas le chenal étroit : la démolition générale des parois a épargné ces deux passages, et nous devons à cette circonstance la conservation d'une sorte de document primitif ¹⁾.

Nous pourrions multiplier les exemples ; nous pourrions citer une gorge toute voisine de la Via Mala, ce Schyn, qui porte un nom identique à celui de la Via Mala, « Pass Mal », et au fond duquel coule un affluent du Rhin postérieur, l'Albula ²⁾. La gorge du Schyn est si bien démolie que de grands sapins ont déjà poussé en paquets sur les bords mêmes de l'eau, sur les éboulis accumulés au pied des versants écroulés.

¹⁾ Dans son travail *Geologie der Hochalpen zwischen Reuss und Rhein* (Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, 25. Lieferung, Bern, 1891), le prof. HEIM étudie la Via Mala (p. 460 et suiv.), et il montre comment le glacier a envahi la gorge au moins jusqu'au niveau de la route, voir même plus bas par endroits.

²⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 410, à 1:50000.

Nous pourrions encore indiquer d'autres cas répondant à des stades plus compliqués. La gorge du Durnant par exemple (le Durnant est le cours d'eau qui sert de chenal d'écoulement au lac de Champey et qui va rejoindre la Dranse de Martigny, affluent du Rhône) est une gorge à étages ¹⁾ ; c'est une gorge du Trümmelbach plus ouverte, plus avancée et à échelons plus distants ; elle se compose d'une série de 15 paliers et de 14 cascades. Elle est creusée dans des schistes qui se désagrègent facilement, et elle est un bon type d'une gorge où les marmites n'ont même pas le temps d'être achevées pour ainsi dire avant d'être détériorées ; il y a en effet peu de marmites bien visibles. Cependant la disposition en escaliers devrait hâter, semble-t-il, la disparition de quelques-uns des nombreux paliers. Mais les eaux roulent de gros blocs de granite qui sont précipités dans les trous commencés à chaque étage, et ces gros blocs au lieu d'aider à la destruction paraissent bien la retarder en remplissant ces trous jusqu'à leur partie supérieure ; ils gorgent pour ainsi dire ces marmites, et les tourbillons ne pouvant plus entraîner cet énorme poids sont réduits sinon à l'inaction du moins à une paralysie partielle.

La gorge de la Lutschine, au pied du glacier inférieur de Grindelwald ²⁾, mérite aussi une visite et un examen : entre le pont à l'amont et la cabane à l'aval, sur un espace de 40 à 45 m., le glacier a moins démoli que dans tout le reste de la gorge ; là les deux parois sont plus rapprochées, elles portent plus de traces de marmites ; par places elles sont du type Aar et Tamina, ou mieux du type Trient, c'est-à-dire avec une démo-

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 526, à 1:50000. — Brève et bonne description du Durnant dans le *Dictionnaire géographique de la Suisse* qui est en cours de publication (sous la direction de CHARLES KNAPP, MAURICE BOREL et V. ATTINGER), voir I, p. 648. Par ailleurs, faut-il écrire Dranse avec un s ou un c ? Nous espérons que ce dictionnaire — vraiment excellent — nous renseignerait d'une manière certaine sur ce point : mais tandis que, dans le texte, on écrit *Dranse*, la carte à 1:250000 de la p. 636 porte partout *Drance*, et le titre de l'article admet les deux orthographes : *Dranse* et *Drance*.

²⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 396, à 1:50000.

lition partielle, une altération des arêtes qu'explique le passage de la glace. Beaucoup de blocs éboulés relient par endroits ces deux parois. En dehors de ce court espace, les parois sont indistinctes et perpendiculaires, présentant seulement de loin en loin une ou deux niches. Au bas de ces parois, il s'est produit moins de démolitions : de là une plus grande fréquence de marmites.

Il faut surtout que ces exemples divers nous permettent de bien comprendre la signification des gorges caractéristiques que nous avons d'abord étudiées.

En somme la marmite est un fait qui ne dépend pas uniquement de l'eau, de la force qui travaille, mais aussi de la roche sur laquelle le travail doit s'opérer. Il est des roches qui ne peuvent pas supporter jusqu'au bout l'action du tourbillon, et tels sont notamment tous les terrains non compacts, terrains d'apport ou d'éboulis.

Un excellent exemple nous est fourni par la Julia, ce petit cours d'eau qui vient du col du Julier et qui va se jeter dans l'Albula. En aval de Molins, la Julia traverse une gorge pittoresque appelée la Rofna ¹⁾ ; toute cette gorge est creusée dans des terrains instables, dans des terrains déposés par les glaciers ou constitués par des roches facilement délitables ; le cours d'eau descend entre des pentes d'éboulis, et il n'y a pas trace de marmites ; ce ne sont pas les tourbillons qui manquent, mais les roches assez compactes et résistantes pour adopter et garder les empreintes des tourbillons.

De même un cours d'eau tel que l'Engstligen, d'Adelboden jusqu'à Frutigen c'est-à-dire jusqu'à son confluent avec la Kander, coule presque constamment dans d'énormes masses de glaciaire ; et ces masses s'éboulent si aisément que les talus raides, rongés encore par les eaux, et souvent marqués des longues balafres claires de glissements et éboulements récents, ne sont point partout recouverts d'herbes ou d'arbres et laissent par place apercevoir la boue et les blocs de la moraine ; il n'y a bien entendu sur ces talus rien qui puisse

¹⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 426, à 1:50000.

porter l'empreinte des tourbillons : mais si par suite d'un phénomène d'épigénie glaciaire il est arrivé comme par exemple un peu en amont de Steg et du pont de fer de la route ¹⁾ que le cours d'eau atteignant la roche sous-jacente, ait dû s'y creuser un lit entièrement nouveau, et que cette roche ait formé une masse assez compacte et cohérente, tout aussitôt les marmites apparaissent : il nous reste même une courte portion de gorge (environ 30 m.) qui est du même type que la gorge de l'Aar : c'est ce que les habitants du pays appellent le *Pochtenkessel* ²⁾ : le *Pochtenkessel* de l'Engstligenthal est exactement par rapport à l'ensemble de la vallée ce qu'est le *Pfaffensprung* par rapport à l'ensemble de la haute vallée de la Reuss. Et ce que nous disons de l'Engstligen, nous pourrions le dire de quelques-uns de ses affluents, et tout spécialement du Tschenten, dont les eaux se précipitent du Gsür, un des sommets de la chaîne du Niesen, et vont rejoindre l'Engstligen sur la rive gauche. Dans son travail d'approfondissement postglaciaire le torrent s'est écarté en un point de son lit antérieur ; et on peut encore observer là un phénomène d'épigénie glaciaire que nous signalons comme l'un des plus manifestes et des plus caractéristiques. Ayant à travailler en pleine roche résistante et compacte, les tourbillons ont laissé la marque encore toute fraîche de leur activité récente : c'est la gorge qu'on appelle *Cholereenschlucht*. Cette petite gorge a ceci d'intéressant qu'on peut aisément en voir l'intérieur et en observer aussi la partie supérieure ; on y constate avec beaucoup plus de facilité ce qui est également visible à la

¹⁾ La route de Frutigen à Adelboden traverse deux fois l'Engstligen, une fois sur un pont de fer et une fois sur un pont de bois ; les deux ponts ont été naturellement placés à des points resserrés de la vallée ; il est à remarquer que ces deux ponts correspondent l'un et l'autre à des phénomènes d'épigénie glaciaire. Au reste ce sont là des coïncidences naturelles, très logiques, et qu'on peut souvent constater : les gorges résultant de l'épigénie sont par définition assez jeunes et le plus souvent étroites ; aussi les a-t-on utilisées pour franchir les cours d'eau. — Le vieux pont de St-Maurice jeté sur le Rhône correspond précisément à la gorge épigénétique.

²⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 463, à 1:50000.

gorge de la Tamina : le sillon supérieur qui représente le premier travail des tourbillons est très étroit ; à la Cholerschlucht, une partie de l'un des sillons supérieurs ne laisse pas entre les deux lèvres un intervalle de plus de 30 centimètres ; première ouverture qui indique une action très modeste des tourbillons ; puis en approfondissant le sillon, en augmentant la hauteur de chute des eaux, les tourbillons sont devenus de plus en plus puissants ; leur rayon et leurs ambitions se sont accrus à la fois pour ainsi dire ; et les eaux qui pénétraient par la minuscule fente ont été entraînées en d'énormes mouvements de giration qui ont créé en profondeur une gorge grandiose ; cette gorge est par endroits à la Cholerschlucht trente fois plus large que le sillon conservé à la partie supérieure ¹⁾.

D'autres roches, sans être aussi délitables que la moraine, sont par nature hétérogènes et se prêtent peu à l'élaboration prolongée des marmites ; de cette catégorie est le fameux poudingue (*Nagelfluh*) de la molasse suisse ; on sait que ce poudingue est étonnamment résistant et qu'il constitue des reliefs prononcés tels que le Rigi ; mais il est composé de très nombreux éléments disparates ; aussi dans les gorges creusées dans cette roche voit-on quelques marmites s'amorcer, mais atteindre rarement des formes parfaites et finies, et s'oblitérer souvent en petits chenaux aux parois assez indistinctes jusqu'au moment où les écroulements partiels emportent tous les premiers vestiges des efforts tourbillonnaires ; un des meilleurs types de ces gorges, d'ailleurs moins intéressantes, est la petite gorge de l'Hünibach près de Thoue, gorge dite *Kohleren Schlucht* ²⁾.

¹⁾ Dans un travail tout récent, EMILE CHAIX a justement insisté sur cet évasement des parois vers le bas dans certaines portions de gorges ; voir *Erosion torrentielle post-glaciaire dans quelques vallées* Le Globe (Genève), t. LXI, 1902, *Mémoires*, p. 3 et planche I.

²⁾ Atlas Siegfried, Feuille n° 353, à 1:25000.

En somme le travail du tourbillon est à la genèse de toute gorge profonde entaillée dans une roche résistante ; mais s'il n'apparaît dans les gorges actuelles que d'une manière assez rare et sous des formes fragmentaires, c'est qu'au travail d'approfondissement succède le travail d'élargissement ; de même les eaux pluviales, les eaux ruisselantes et les agents atmosphériques agissent d'une manière continue sur ces parois et en oblitérent de plus en plus les caractères primitifs. Il est donc plus vraisemblable qu'il n'apparaîtrait dès l'abord que toutes les gorges creusées en roche dure ont commencé par être constituées par des chapelets de marmites, et il est très naturel qu'en beaucoup de ces gorges — nécessairement élargies — il ne soit resté que çà et là, aux flancs des parois, quelques lambeaux incomplets de ces excavations éventrées, mais des lambeaux dont les formes en creux et le modelé lisse sont encore si reconnaissables. Il est encore très naturel que tant de gorges creusées dans des roches hétérogènes ou peu résistantes ne présentent pas de formes manifestes de l'action des tourbillons. Et cela ne contredit en rien la part première et essentielle que nous croyons devoir attribuer aux tourbillons dans l'élaboration des gorges par les eaux courantes.

III. Résultats généraux des deux séries d'observations précédentes.

La disparition progressive des seuils des cataractes et le creusement des gorges, tels sont bien deux des phénomènes qui révèlent le mieux l'activité puissante des eaux courantes.

En ce qui regarde les gorges, il y a un demi-siècle seulement, on ne pouvait imaginer que les eaux courantes aient pu opérer toutes seules un pareil travail ! et l'on sait qu'on avait imaginé pour les expliquer la théorie des fentes initiales, dite *Spaltentheorie* ¹⁾. Il est utile de rappeler que même les expériences de laboratoire avaient paru confirmer complètement la théorie des fentes.

A coup sûr ce qu'on appelle la géologie expérimentale a rendu et est appelée à rendre de grands services ; mais il y a toujours tant de différence entre les dimensions des phénomènes produits dans les laboratoires et ceux qui sont produits dans la nature que nous pouvons faire des confusions en interprétant la réalité expérimentale. Un homme tel que M. Daubrée a écrit à la suite de quelques expériences faites : « Quelques-unes des expériences précitées reproduisent en outre, dans leurs détails, la configuration des vallées de *fracture* ou d'écartement. Il est des vallées qui ne sont que des fissures à peine entr'ouvertes comme celles de la Tamina, du Trient ou de la Via Mala, en Suisse ; du Fiers en Savoie ; la perte du Rhône près Bellegarde.... » ²⁾. Il faut avouer que les exemples

¹⁾ On trouve l'indication des principaux documents concernant la *Spaltentheorie* dans : A. PENCK, *Die Bildung der Durbruchthäler*, Wien, 1888 ; et plus récemment dans : M. LUGEON, *Recherches sur l'origine des vallées des Alpes occidentales* (*Annales de Géogr.*, 15 juillet 1901, p. 296 et 299).

²⁾ A. DAUBRÉE, *Etudes synthétiques de Géologie expérimentale* (Paris, Dunod, 1879), I, p. 370. — Il est juste d'ajouter que tout en professant des erreurs aussi nettes que celles que nous citons, DAUBRÉE lui-même avait indiqué quelle prudence on devait apporter à généra-

étaient choisis bien à faux ¹⁾. Et cela prouve que l'observation précise et minutieuse de ce qui est doit toujours précéder et accompagner l'expérimentation : la meilleure méthode consiste à observer les faits là où dans la nature ils se présentent dans des conditions de simplicité et de netteté telles qu'elles peuvent égaler les conditions qu'on voudrait réaliser dans un laboratoire.

L'idée de la fente initiale ayant donné naissance à la gorge se révèle même dans certains noms courants tels que *Pfaffensprung* (vallée de la Reuss) : *Sprung* est une expression qui s'applique à une faille ²⁾ et qui implique bien l'idée d'une fracture, d'une cassure.

liser les expériences de laboratoire. Voir notamment I, p. 288, 289. — Mais les idées sur les fentes initiales étaient courantes : voici, par exemple, ce que nous lisons encore dans un livre de VIOLLET-LE-DUC, qui est aujourd'hui assez oublié et dont les idées excusent l'oubli, mais qui mérite toujours d'être consulté à cause des remarquables figures dessinées par l'auteur lui-même : « Les gorges profondes dans lesquelles passent parfois les torrents, telles que celles du Trient, du Triquent, de la Via Mala, de Dioza, de Notre-Dame de la Gorge, de Bérard, de val Tormanche, etc., et dont ils ont évidemment usé et poli les parois, sont des fêlures naturelles qui existaient au moment des soulèvements et dont ces torrents ont profité pour s'écouler, mais qu'ils n'ont pas creusées... L'eau n'a pas fait à travers des roches dures ce trait de scie, et, si elle l'avait fait, elle n'aurait pas laissé pures les arêtes... La fêlure primitive donnait toujours une série d'angles rentrants et saillants, et forçait le courant à se porter tantôt sur un bord, tantôt sur l'autre... » (*Le Massif du Mont-Blanc, étude sur sa constitution géodésique et géologique, sur ses transformations et sur l'état ancien et moderne de ses glaciers, avec cent vingt figures*, Paris, Baudry, 1876, p. 161, 162 et 163).

¹⁾ Disons ici que dès 1872, H. GERLACH, qui était un observateur de premier ordre, déclarait sans détour que la gorge du Trient était le résultat de l'action des eaux (*Das Südwestliche Wallis, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz*, 9. Lieferung, Bern, 1872, p. 11). — Le Prof. ALBERT HEIM explique de même la Via Mala (*Geologie der Hochalpen zwischen Reuss und Rhein, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz*, 25. Lieferung, Bern, 1891, p. 460 et suiv.).

²⁾ E. DE MARGERIE et A. HEIM. *Les dislocations de l'écorce terrestre. Die Dislocationen der Erdrinde, Essai de définition et de nomenclature, Versuch einer Definition und Bezeichnung*, (Zürich J. Wurster, 1888, in 8°, VIII-154 p.). Voir notamment p. 11 et p. 22.

Or si l'on a cherché si longtemps à expliquer l'origine des gorges étroites et encaissées par des fentes primitives, c'est qu'on n'expliquait pas suffisamment la genèse de ces gorges, et c'est qu'on ne faisait pas assez grande l'intervention des tourbillons. A coup sûr, il y a des roches fissurées par excellence, comme certains calcaires, dans lesquelles tous les phénomènes d'érosion sont dirigés pour ainsi dire par des fentes d'un autre ordre, et nous en parlerons tout à l'heure ; mais ce sont là des cas plus complexes, et qui ne doivent pas être choisis comme spécimens typiques de l'action propre des eaux courantes. Au contraire, pour les gorges de la Reuss, par exemple, la démonstration a été décisive : quand on a fait les tunnels de la ligne du Gothard, on a passé trois ou quatre fois sous la vallée, et on n'a pas trouvé la moindre trace d'une fente, d'une cassure ¹⁾. — En voyant combien grande est la part des tourbillons, tout s'explique logiquement et aisément.

Il suffira donc de résumer ici quels sont à la suite de cette étude les faits acquis :

Quand l'eau doit emporter un grand seuil très large sur une surface très étendue, et tout aussi bien quand l'eau doit approfondir son cours d'une manière très considérable pour atteindre son profil d'équilibre, — dans l'un et dans l'autre cas et dans tous les cas intermédiaires, — l'eau emploie un moyen de détruire exceptionnellement puissant, à savoir le mouvement de giration, le mouvement tourbillonnaire. Le procédé est général : il est universel. — Nous avons parlé de tactique ; et c'est en effet d'une vraie tactique qu'il s'agit.

Les traces des formes directes engendrées par ces tourbillons sont assez nombreuses ; mais elles sont bien plus rares que les tourbillons eux-mêmes. Les marmites, on les reconnaît souvent çà et là ; mais rares sont les points où l'on peut observer des chapelets continus de marmites dans un même lit, ou des superpositions suivies de marmites sur une même paroi.

¹⁾ Voir SIR JOHN LUBBOCK, *The Scenery of Switzerland*, Londres, Macmillan, 1898, p. 160.

Les tourbillons comme moyen d'attaque de l'eau sont en somme bien plus fréquents que les formes typiques qui résultent de leur action.

D'où vient donc cette contradiction entre la généralité que nous attribuons à l'action des tourbillons et la relative rareté des formes caractéristiques de cette action ?

A. Il faut d'abord que la roche sur laquelle s'exerce l'action du tourbillon soit assez compacte, assez homogène et assez résistante pour qu'elle ne cède pas sous la poussée de l'eau avant que le tourbillon ait eu le temps de sculpter la roche selon sa méthode. En beaucoup de points les tourbillons détruisent sans laisser de traces de marmites pour une raison souveraine, c'est que la qualité de la matière sur laquelle ils agissaient ne leur a pas laissé la possibilité d'élaborer des marmites.

Ici devrait se placer tout un examen détaillé des phénomènes révélés par la spéléologie, par la science dont E. A. Martel est le plus actif représentant en France. Il serait inopportun d'introduire ici un aussi long chapitre ; mais nous voulons du moins en noter les idées directrices, pour indiquer exactement quels sont les rapports étroits entre ces études et les nôtres propres.

Quand j'ai visité le gouffre de Padirac, j'ai été très surpris de trouver si peu de traces de marmites. Et de fait les marmites qui se rencontrent en assez grand nombre dans les « couloirs », c'est-à-dire dans les défilés des vallées souterraines, sont en somme rares dans les puits verticaux et dans les grandes salles des cavernes ¹⁾.

La raison en est que les cavernes se rencontrent le plus souvent dans des calcaires très fissurés : les fentes et les trous sont dans ces roches si nombreux qu'ils imposent des directions à l'eau, et que les moindres actions de l'eau sont suivies d'éboulements et d'écroulements très considérables et très

¹⁾ Voir aussi E. A. MARTEL, *Padirac, Etude d'hydrologie souterraine* in *La Géographie*, I, 1900, p. 365-384.

rapides. Nous n'avons qu'à consulter au hasard un des rapports si intéressants des « campagnes souterraines » de E. A. Martel ; ou bien encore reportons-nous au très beau travail de Félix Mazauric sur *Le Gardon et son canyon inférieur*. Nous y voyons très clairement mis en lumière le rôle des fentes dans la formation des vallées souterraines et par suite des vallées à ciel ouvert qui en résultent ¹⁾.

Cette étude complète et consciencieuse de Mazauric montre comment les dérivations souterraines arrivent à être la cause d'un canyon à ciel ouvert. Et cette démonstration devait être faite. Elle a été bien faite. Mais il faut toujours distinguer l'action de l'eau dans ces masses où les vides abondent ; là les actions saccadées, intermittentes de l'eau sont encore compliquées par les trous naturels, par les fentes qui portent brusquement et plus loin l'action de l'eau : « La rivière a creusé partout à la fois, dit Mazauric, abandonnant et reprenant

¹⁾ Donnons quelques exemples. E. A. MARTEL écrit : « Il est bien clair que la première cause de la formation de la caverne est la création (comme dans tous les terrains calcaires) d'un réseau de fissures par les dislocations de l'écorce terrestre ; qu'ensuite des eaux sauvages infiltrées, en arrière, dans les fentes ou crevasses superficielles des terrains plus élevés, ont peu à peu agrandi chimiquement et mécaniquement les fissures préexistantes, et créé à la longue un réseau de drainage souterrain, convergeant vers le collecteur unique qui est la sortie de la caverne. » (*La Grotte de la Balme, Isère. Recherches en Suisse et en Savoie. X^{me} Campagne souterraine, 1897*, in *Mémoires de la Société de Spéléologie*, N^o 19, avril 1899, p. 224) ; il écrit encore un peu plus loin : « Le gouffre des Verts est un simple *aven* d'érosion pratiqué dans une diaclase, du type classique des puits naturels du calcaire » (p. 237) ; « C'est le mode usuel, bien connu maintenant, de circulation des eaux souterraines du calcaire qui descendent de strates en strates, d'un étage horizontal supérieur à un étage horizontal inférieur, par l'intermédiaire des diaclases verticales, recoupant la stratification et élargies par érosion et corrosion » (p. 244), etc. — Voir aussi comment MAZAUERIC explique la formation de la superbe caverne appelée *Spelunque de Dions* dans son ouvrage, *Le Gardon et son Canyon inférieur* (*Mémoires de la Société de spéléologie*, N^o 12, mars-avril 1898), p. 139 et 140. — Il convient de remarquer encore que MARTEL fait beaucoup moindre que l'Autrichien KRAUS la part des effondrements, voir *La Spéléologie* (collection Scientia), p. 44 et suiv.

successivement ses anciens lits »¹⁾. Et certes Mazaucic, pas plus que Martel, ne négligent d'observer les marmites de géants et de leur attribuer une grande importance²⁾. Mais encore une fois ils se trouvent dans des conditions exceptionnelles ; ils sont en face de roches sur lesquelles les actions chimiques sont extraordinairement énergiques et les actions mécaniques accélérées par des prédispositions physiques. L'action de l'eau est là trop rapide et trop variée pour qu'on puisse avec autant d'autorité que dans les cas que nous avons étudiés, observer la part primordiale qui revient aux tourbillons. Si donc les spéléologues n'ont pas accordé une influence première aussi grande que nous aux tourbillons, c'est qu'ils ne devaient pas la leur accorder, étant donné le théâtre spécial de leurs observations ; néanmoins, leurs conclusions générales s'accordent très naturellement avec les nôtres.

B. En second lieu les tourbillons ne sont pas toujours aussi actifs qu'ils pourraient l'être pour deux causes opposées :

a) tantôt ils n'ont pas assez d'instruments à leur disposition, ils n'ont pas des éléments susceptibles de travailler sous leur impulsion et l'on pourrait dire à leur guise : il leur manque en particulier les grains de sable, ces outils par excellence. Pourquoi au contraire les formes de marmites que

¹⁾ P. 102.

²⁾ VOIR MAZAUCIC, OUV. cité, p. 140, 141. De même E. A. Martel et G. Gaupillat disent : « Beaucoup d'avens se composent d'une superposition de puits ovales, en forme de bouteilles aplaties, réunis par des couloirs courts et horizontaux. Ces puits multiples (il y en a cinq à Tabourel) sont de vraies *marmites de géants*. Dès qu'une fissure horizontale fournissait à l'eau un échappement latéral, elle forait un couloir jusqu'à la prochaine fracture verticale : puis celle-ci devenait à son tour le goulot d'une nouvelle bouteille inférieure et ainsi de suite (Hures, Bessoles, Baumes-chaudes, Combelongue, la Bresse, Tabourel). » (*Sur l'exploration et la formation des Avens des Causses*, in *C. R. Acad. Sc.*, 14 oct. 1889, p. 2). Voir surtout E. A. MARTEL, *Sur les récentes explorations souterraines et les progrès de la Spéléologie*, in *Congrès géologique international, Comptes rendus de la VIII^{me} session, en France* (Paris, 1901), p. 408 ; et *La Spéléologie* (collection Scientia), p. 39 et 40.

nous avons observées dans ce terrain de la Suisse qu'on appelle « molasse » sont-elles si parfaites ? Sans aucun doute, parce que l'usure de la molasse elle-même donne du sable, c'est-à-dire l'instrument par excellence : ainsi le moindre torrent coulant sur la molasse se trouve toujours bien outillé. Il est aussi bien outillé que le Nil à la première cataracte ; et cet unique instrument des tourbillons du Nil lui suffit pareillement. Les cascades qui tombent sur des surfaces à pente très raide ne retiennent pas les grains de sable ; elles ont une force énorme, mais elles n'ont pas d'instruments, et elles produisent moins de travail à leur pied qu'un petit torrent qui est abondamment pourvu de sable.

b) Tantôt ils sont obstrués, arrêtés ou même éteints par de gros matériaux qui sont plus ou moins brusquement jetés dans les trous qu'ils commençaient à creuser ; l'outil dans ce cas est trop grossier pour l'ouvrier d'art qu'est le tourbillon ; et l'outil est aussi trop lourd : le tourbillon reste impuissant ou à peu près.

Et l'on peut ici se demander si l'action des eaux qui coulent sous les glaciers n'est pas souvent réduite et interrompue par les énormes masses que les glaciers charrient. Cela nous expliquerait du même coup pour quelles raisons sur le parcours des anciens lits glaciaires nous retrouvons tant de grandes marmites bien conservées ; elles ont été conservées parce qu'elles ont été comblées par les amas de la moraine de fond. — Par là nous touchons à l'une des questions les plus importantes qui peuvent être rattachées à notre étude. Nous réservons ce sujet pour un autre mémoire. Qu'il nous suffise de rappeler une dernière fois que même les marmites dites glaciaires, les « Gletschermühlen », ne sont pas l'œuvre de la glace, mais des eaux torrentielles qui coulent sous la glace ¹⁾.

On discute beaucoup sur les effets véritables de l'érosion fluviale et de l'érosion glaciaire. Peut-être la question serait-elle éclaircie si l'on savait exactement *comment* le glacier

¹⁾ Voir par exemple A. DE LAPPARENT, *Traité de Géologie*, 4^e édit., *Phénomènes actuels*, p. 290.

creuse ¹⁾. C'est par des études de cet ordre qu'on pourra parvenir à résoudre définitivement le problème. Quant aux formes de marmites, sous les glaciers aussi bien que dans les lits fluviaux, elles sont toujours dues aux eaux courantes. Ne serait-il pas important de convenir que si les glaciers ont une action puissante de creusement, ils le doivent surtout aux eaux courantes que produit sans cesse sur leur fond la fonte de la glace?

C. En troisième lieu le tourbillon étant un ouvrier très actif tend toujours à détruire son œuvre précisément parce qu'il la continue : l'eau use sans cesse du mouvement de giration, elle élabore une marmite, puis une autre, puis elle les entrouvre, puis elle les relie, puis elle en crée d'autres, puis les tourbillons se déplacent et se remplacent, puis de nouvelles formes sont élaborées qui compromettent ou détruisent l'intégrité parfaite des premières; bref, le lit d'un cours d'eau qui travaille est un atelier de forage incessant: ce n'est pas un musée où les choses se conservent sans changement. Ainsi les formes des marmites s'oblitérent nécessairement parce que d'autres tourbillons entreprennent toujours d'autres marmites. Bien plus, nous l'avons dit, lorsque les eaux courantes poursuivent leur travail de creusement et d'élargissement, les parois, qui portaient primitivement les vestiges des marmites, s'écroulent et disparaissent. Toute trace de marmite doit être finalement emportée par les eaux courantes, si celles-ci continuent à creuser. Et nous arrivons à cette conclusion étrange :

¹⁾ Il conviendrait de développer par des observations complémentaires et nouvelles le paragraphe très remarquable mais un peu trop bref du *Hanbuch der Gletscherkunde* d'A. HEIM, Abschnitt VII, E, 3, b), § 3, *Bacherosion der Gletschern*. Il conviendrait surtout d'imiter et de poursuivre des explorations, bien dangereuses mais très fécondes, telles que celle de H. VALLOT sous la Mer de glace, voir ci-dessus la note 3 des p. 165 et 166. — A noter ici le curieux et suggestif article où ROBSIEGER a établi un parallélisme entre les phénomènes qui se produisent dans les glaciers et ceux qui appartiennent aux roches fissurées : *Die Karstformen der Gletscher* (*Geographische Zeitschrift*, 1, 1895, p. 182-204). — Il faudrait suivre, si c'était possible, les eaux des glaciers jusque dans leurs actions sur le fond du lit glaciaire.

le meilleur témoignage en faveur de l'efficacité irrésistible de l'œuvre effectuée par les tourbillons est précisément la rareté ou même l'absence complète de marmites sur les flancs de la plupart des vallées.

Ainsi les marmites sont vouées à la disparition ; elles ne peuvent se rencontrer que dans des cas exceptionnels, et même dans ces cas exceptionnels elles ne se conservent que peu de temps. — Du moins des cas exceptionnels, comme ceux que nous avons exposés, doivent être pour nous des cas révélateurs ; ils révèlent tout ce que font les tourbillons ; ils nous autorisent, ils nous obligent même à attribuer à l'eau en giration le rôle extraordinaire qui lui revient dans la genèse non seulement des *gorges*, mais d'une manière plus générale dans la genèse des *vallées*.

En somme, c'est le procédé le plus actif. C'est de cette manière que l'eau fait le gros ouvrage, emporte les principaux obstacles, attaque les roches les plus dures. Rien n'est comparable à cette action. Et l'on comprend maintenant quelle signification on est en droit de donner à des faits tels que l'Ilot des Marmites ou que les gorges de l'Aar, de la Tamina et du Trient. Ce sont des documents peu nombreux, mais qui ne peuvent être que peu nombreux. Ils sont comme des types exceptionnellement subsistants d'une espèce en général disparue. Et comme nous le disions dans une *Note* à propos de ces gorges : « Elles n'ont pas la simple valeur de faits locaux, dus à des causes particulières : activité locale des tourbillons, dureté spéciale de la roche. Elles représentent un stade général et précis de la formation des vallées encaissées. Au lieu d'être regardées comme des faits exceptionnels, elles doivent être regardées comme des faits *normaux*, *exceptionnellement conservés* » ¹⁾.

Quel que soit le nombre relativement faible et quelle que soit l'exiguité relative de ces faits, il nous est donc permis

¹⁾ *Sur un principe de classification rationnelle des gorges creusées par les cours d'eau*, in *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXXXIV, 20 mai 1902, p. 1161.

d'en tirer quelques conséquences plus générales. Car les observations que nous avons faites à Assouan et dans les vallées suisses ont encore une certaine portée en ce qui concerne les conceptions d'ensemble sur la formation des vallées.

On a dit que les couches dans lesquelles se sont établies ces vallées profondes qu'on appelle des canyons ont été progressivement et régulièrement creusées par les eaux courantes, comme est traversée par la scie une masse de pierre ou de bois qu'on présente successivement aux dents de cette scie. C'est là une comparaison suggestive et élégante qui fait mieux comprendre le résultat final que les péripéties du travail successif ; si l'on disait : « tout se passe comme si..., etc » la comparaison serait plus juste. Au reste dans le cas de soulèvements très lents et progressifs la comparaison peut être regardée comme plus exacte ; mais ce n'est pas le cas ordinaire. Les forces naturelles qui agissent en un sens avec une si grande régularité, ne produisent pas des effets aussi uniformes ni aussi uniformément progressifs ¹⁾.

De même les expériences qui font très bien comprendre que l'érosion est régressive, et que tout le profil d'équilibre s'établit en rapport avec le niveau de base, et que l'approfondissement se produit avant l'élargissement de la vallée ²⁾, ont

¹⁾ E. A. MARTEL, de son côté, et pour ses études propres, arrive à une conclusion tout à fait analogue à la mienne : « Quelque restriction en effet qu'il faille apporter à la généralisation à outrance de la théorie des effondrements intérieurs, il faut cependant encore reconnaître que diverses localités montrent l'énorme influence qu'ils ont exercée parfois sur la surface du sol. Il y a des cas où la propagation des effondrements successifs au-dessus du cours d'une rivière souterraine a pu arriver jusqu'au creusement d'une véritable vallée ; pour les étroits canyons sinueusement creusés dans la masse des régions calcaires, il est probable que la première phase de la formation n'a pas consisté dans le simple sciage vertical par des rivières creusant leur lit de plus en plus, mais bien dans le développement, puis l'écroulement des cavernes... écroulements qui ont tracé le sillon originaire, l'amorce des canyons actuels. » E. A. MARTEL, *La Spéléologie ou Science des cavernes*, dans la collection *Scientia*, Paris, Carré et Naud, 1900, p. 51.

²⁾ VOIR DE LA NOÉ et DE MARGERIE, *Les formes du terrain, Texte*, p. 22 et suiv.

cependant l'inconvénient de donner une idée trop simple du processus suivi ; ce profil d'équilibre est une limite vers laquelle tend le cours d'eau, et l'expérience et la réalité ne sont guère comparables que lorsque le cours d'eau, tout à fait *adulte*, approche du moment où son profil d'équilibre est régulièrement établi : mais avant d'atteindre cette limite, que d'actions diverses ! que de zigs-zags dans le détail aboutissent à cette courbe assez régulière dans son ensemble, au « profil d'équilibre » ! En réalité le lit d'un cours d'eau qui creuse sa vallée se décompose en une série de fractions ; chaque obstacle d'arrêt qui détermine en amont une zone de dépôt constitue un petit niveau de base, qui durera parfois longtemps, et tout le cours d'amont pourtant n'aura une action érosive et régressive qu'en rapport avec ce niveau de base temporaire. En second lieu comment disparaîtra cet obstacle, comment sera-t-il enlevé ? Non pas par un travail régulier, mais par un travail pour ainsi dire saccadé et qui n'a aucun rapport avec cette espèce de sciage progressif qu' imagine la comparaison plus haut signalée.

Le travail de creusement d'une vallée se produit en effet par saccades ; il y a des points où l'eau travaille, et d'autres où elle dort. C'est donc une série discontinue de laboratoires qui constitue le théâtre de l'activité réelle de l'eau, celui où elle travaille à ramener tous les points de son lit à cette courbe théorique qu'on appelle le profil d'équilibre. Le travail ne s'opère pas tout le long de la vallée ; mais le long de la vallée se trouvent disséminés de véritables chantiers où l'eau s'attaque à la roche.

On connaît les canyons classiques des gorges du Tarn ; lorsqu'on les descend sur les barques qui font le trajet de Ste-Enimie au Rozier, on est frappé de la succession des *rapides* appelés dans la langue du pays les *ratch* ou *rayols*, et des espèces de grands lacs calmes appelés *planiols* (plaines d'eau) et où l'eau semble stagnante. Au Tarn l'opposition est plus forte, plus saisissante que dans bien d'autres cours d'eau. Mais telle est bien l'allure de toutes les rivières qui ne sont pas de très vieilles rivières et particulièrement de toutes les

rivières alpines : à des rapides plus ou moins violents succèdent des parties où le cours est encore rapide, mais qui sont, par rapport aux fractions du cours correspondant aux gorges, de véritables *planiols*.

Et si au lieu de considérer uniquement le *lit* d'un cours d'eau nous considérons la *vallée*, c'est-à-dire ce sillon qui résulte de l'action passée et prolongée du cours d'eau, et qui porte plus ou moins visibles les traces de son histoire, nous lirons dans les vallées alpines d'une manière éclatante que le fleuve a procédé de la sorte, tantôt s'étalant en grandes nappes, tantôt s'encaissant et se précipitant en un lit étroit et rapide ; ici ce sont ces grands bassins ouverts des vallées alpines qui sont situés en amont des gorges et qui correspondent à ces terrasses, à ces amas de dépôts que les eaux accumulaient dans le repos, en attendant que la brèche qui s'ouvrirait en aval fût assez profonde pour qu'elles pussent s'écouler.

C'est donc une idée purement théorique que celle qui nous fait représenter d'une manière continue la courbe d'un cours d'eau ; ce n'est pas une courbe continue, c'est une ligne brisée qui doit représenter le profil des cours d'eau jeunes comme les cours d'eau alpins. De la représentation théorique et conventionnelle pourraient naître quelques conceptions erronées.

Il faut aussi considérer ce qu'est la vallée en plan avec ses élargissements et ses rétrécissements successifs. On pourrait presque dire qu'ainsi vue en plan dans sa réalité une vallée nous présente une série de nœuds et de ventres ; c'est là encore une comparaison théorique et dont il ne faut pas être dupe ; mais il convient d'insister sur ce caractère discontinu des vallées.

Au point de vue de l'activité humaine, les gorges resserrées comme le Schyn (Albula), la Via Mala (Rhin), la Tine (Sarine), ont été longtemps des barrières plus infranchissables pour les hommes que des crêtes élevées et des cols difficiles. Ainsi se sont trouvés isolés du bas de la vallée les habitants des hautes vallées ¹⁾. Dans la vallée de la Viège, une route était

¹⁾ Voir les exemples cités dans PAUL GIRARDIN, *Des conditions de*

construite au-delà de St-Nicolas, et une autre, bien entendu, dans la partie basse, et ces deux tronçons de route n'étaient raccordés que par un sentier muletier. Aujourd'hui où les chemins de fer remontent les grandes vallées en se souciant peu des gorges, nous ne comprenons pas assez ce qu'ont été la gorge vraie ou le vrai canyon dans les pays de hautes montagnes. Les gens de deux hautes vallées accolées à un même massif communiquaient plus facilement par les hauts passages qu'elles ne communiquaient avec les pays d'en bas.

L'on ne saurait trop recommander pour mettre en lumière la physionomie discontinue des vallées le procédé très simple et très expressif qu'emploie Hans Ravenstein dans ses cartes des Alpes suisses et autrichiennes à 1:250000 ¹⁾ : il figure en vert les parties plates à quelque niveau qu'elles se trouvent, et si l'on suit sur cette carte des vallées alpines comme celles de la Kander, de la Simme ou de la Sarine, on voit de petites taches vertes discontinues s'échelonner jusque près des sources : ce sont les plaines d'épanouissement séparées par les rétrécissements, et ce sont les principaux points d'établissement et de concentration des hommes.

Nous sommes finalement conduits à une conclusion tout à fait conforme à celle que nous avons tirée de nos premières observations sur les marmites du barrage de la Maigrange et que nous avons rappelées dans les premières pages du présent mémoire : L'eau exécute un travail considérable sur un point déterminé durant un temps très court ²⁾ ; puis elle se

la vie dans les hautes vallées alpestres à l'altitude de 800 mètres dans le Bulletin de l'Association des anciennes élèves de Fontenay-aux-Roses, 1901.

¹⁾ *Karte der Schweizer Alpen in 2 Blatt, et Karte der Ost-Alpen in 9 Blatt, Verlag von Ludwig Ravenstein, Francfort-sur-le-Main.*

²⁾ A l'appui des mêmes considérations, on pourrait encore signaler les faits consignés dans le mémoire de B. Doss, *Ueber einen bemerkenswerthen Fall von Erosion durch Stauhochwasser bei Schmarden in Kurland* (Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 54. Bd., 1902, p. 1-23). On en trouvera le résumé dans le Mouvement géographique de *La Géographie* (Paris), n° du 15 décembre 1902.

repose pour ainsi dire et va reprendre en un autre point son travail violent, vainqueur, irrésistible. Les actions de l'eau comme force naturelle ne sont donc régulières et semblables à elles-mêmes, ni sur un grand espace, ni durant un long intervalle de temps. — L'étude des tourbillons ne révèle pas seulement l'une des plus intéressantes péripéties du travail des eaux courantes : mais l'examen détaillé de ce mécanisme élémentaire nous renseigne encore sur la marche générale de l'œuvre destructrice qui est opérée par les eaux courantes.



FIGURES 1-4. L'ÎLOT DES MARNITES A LA CATARACTE D'ASSOUAN.

Clichés de l'auteur.

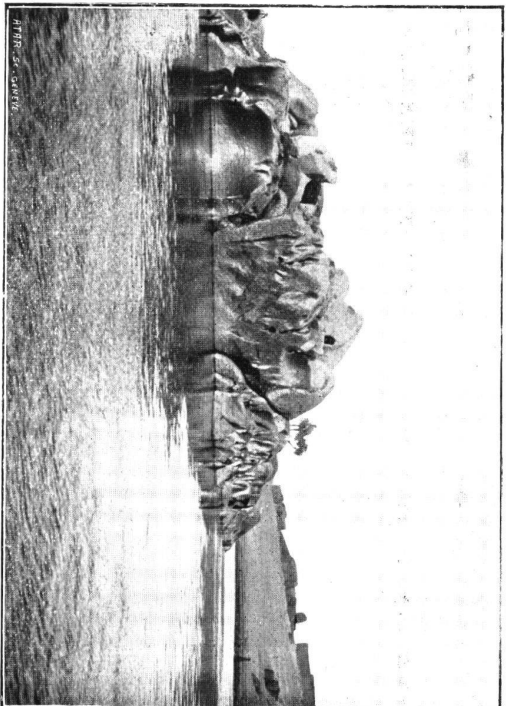


Fig. 1. L'Îlot des Marnites, vu du Sud.

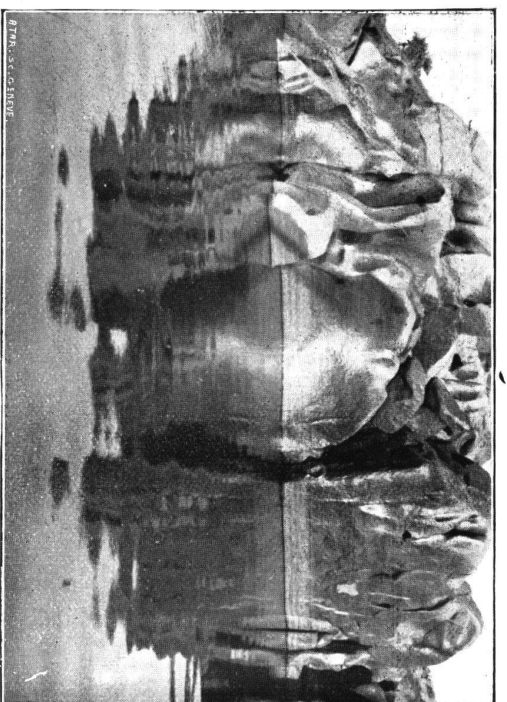


Fig. 2. L'Îlot des Marnites, vu du Sud et de plus près.

Dimensions générales de l'Îlot : de l'Est à l'Ouest, 30 mètres ; du Nord au Sud, 18 mètres ; hauteur au-dessus du niveau des eaux au moment où la photographie a été prise, 8 mètres.



Fig. 3. Une portion de la partie orientale de l'Îlot des Marnites.

Hauteur approximative de la partie photographiée : 5 mètres.

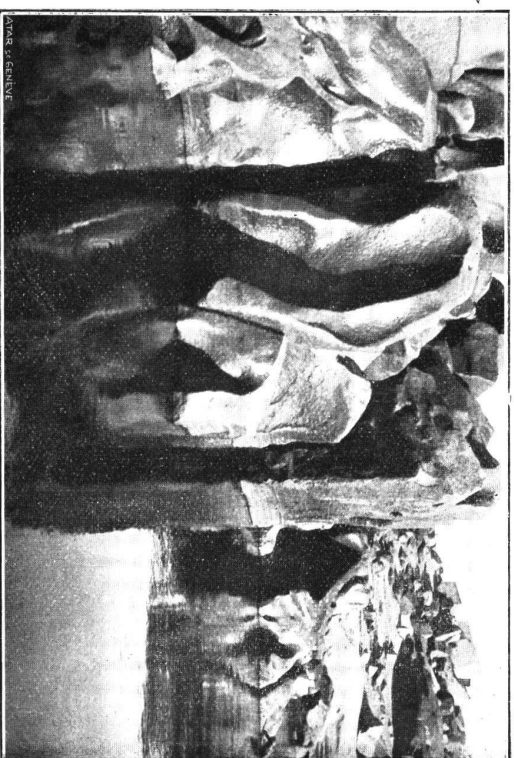


Fig. 4. Une autre portion de la partie orientale de l'Îlot des Marnites.

Hauteur approximative de la partie photographiée : 3 m, 50.

FIGURES 5-8. SUR DIVERS ILOTS GRANITiques DE LA CATARACTE D'ASSOUAN.

Clichés de l'auteur.



Fig. 5. Le point culminant de l'îlot des Marmites.
Hauteur approximative de la partie photographiée: 2 m.

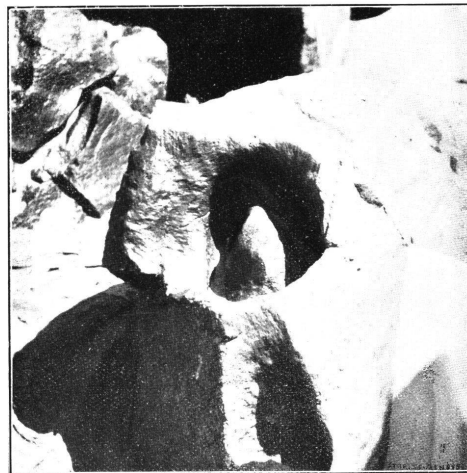


Fig. 6. Îlot appelé « Isenarté » : une marmite inachevée à fond conique très aigu.
Dimensions : profondeur, 0^m,20 ; deux diamètres en croix, 0^m,18 et 0^m,27 ; hauteur de la proéminence conique, 0^m,09.

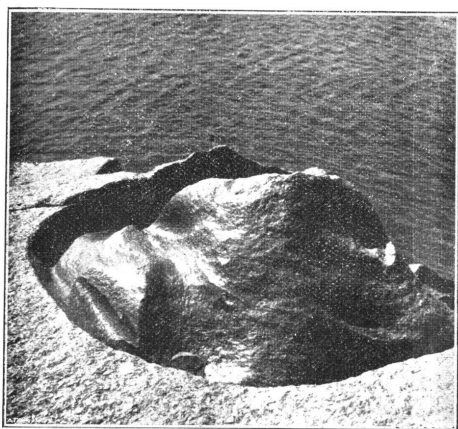


Fig. 7. Îlot appelé « Isenarté » : proéminence conique d'une très grande marmite dont toute la partie supérieure a été emportée.
Hauteur du sommet au-dessus du point le plus bas du sillon circulaire, 0^m,42 ; diamètre de la marmite de droite à gauche, 1^m,80.



Fig. 8. Îlot appelé « Isenarté » : chaos de débris de marmites.
Largeur approximative de la partie photographiée, 9 m.

FIGURES 9 ET 10. GORGES DE L'AAR.

Clichés de l'auteur.

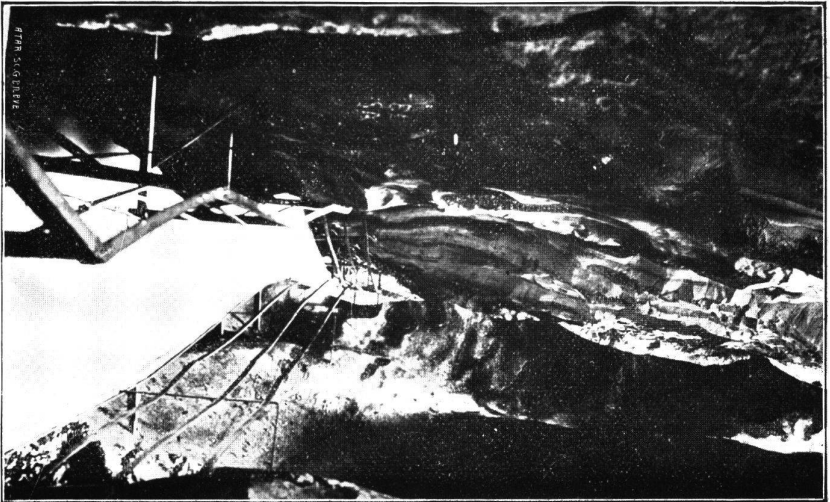


Fig. 9. Gorge actuelle de l'Aar : défilé dit « Grosse Enge ».
Hauteur approximative de la partie photographiée, 20 mètres.

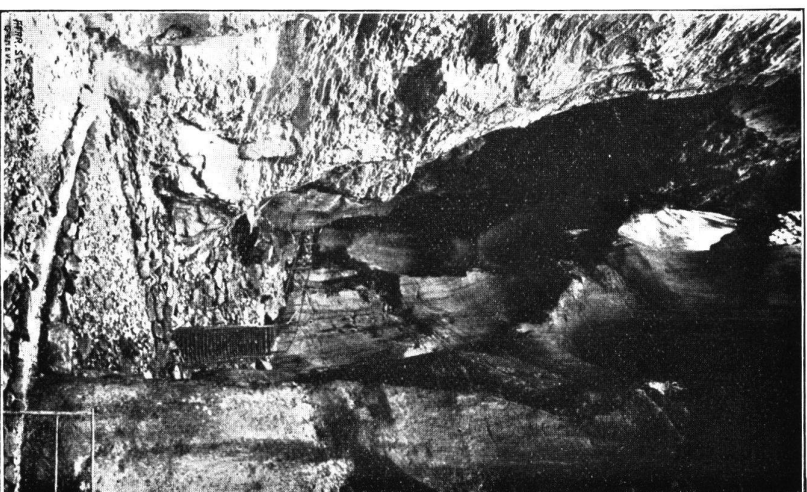
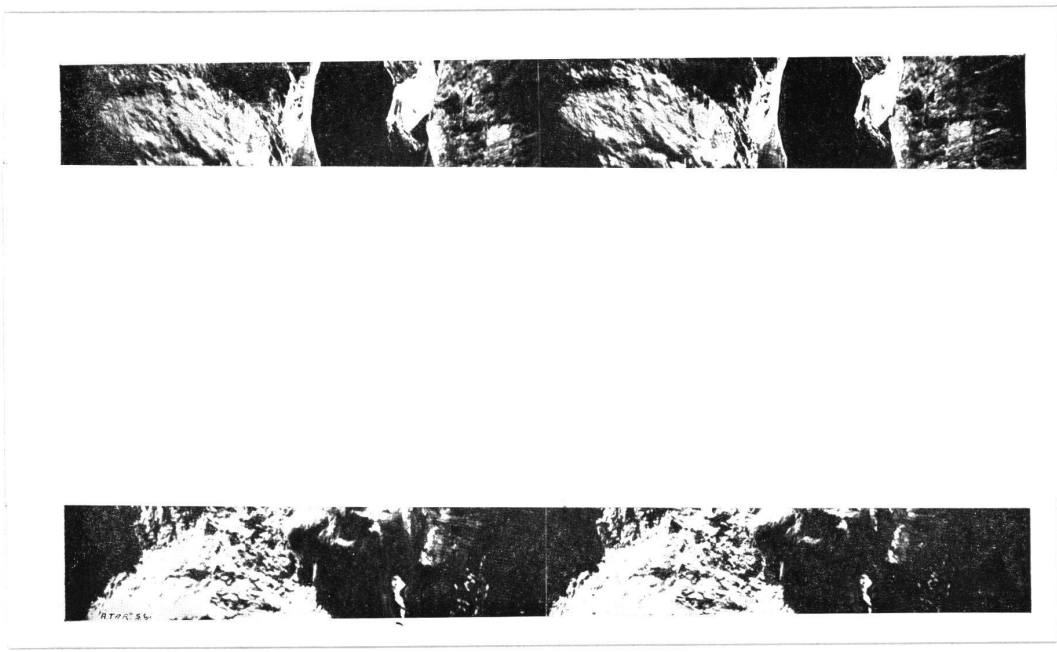


Fig. 10. Ancienne gorge de l'Aar, appelée « Finstere Schlucht ».
Hauteur approximative de la partie photographiée, 18 mètres.

FIGURES 11 ET 12. GORGES DE L'AAR.

Clichés stéréoscopiques de l'auteur.



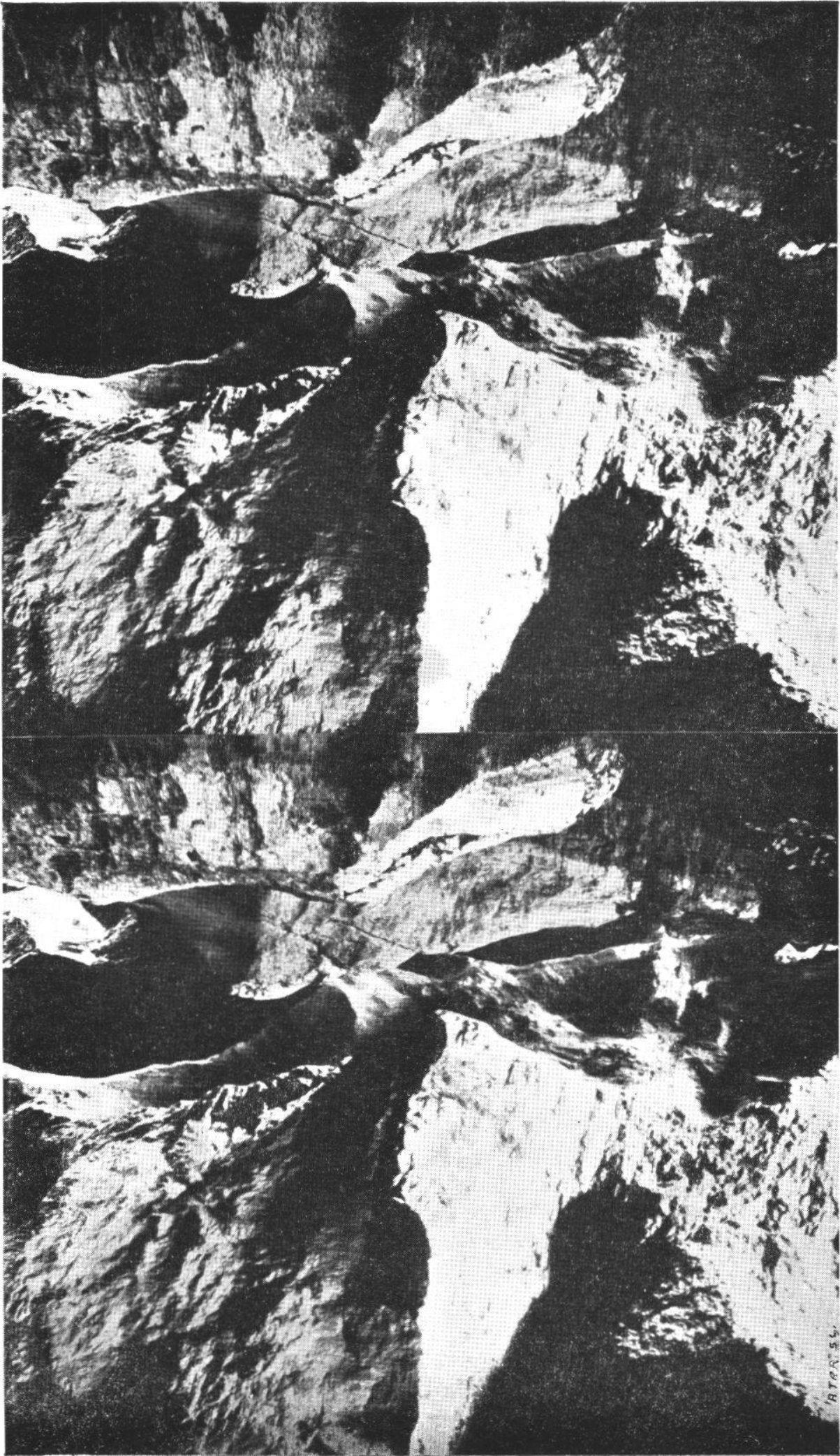


Fig. 11. Gorge actuelle de l'Aar : une des parties du défilé appelé « Nasenenge »),

Hauteur approximative de la partie photographiée, 6 mètres.

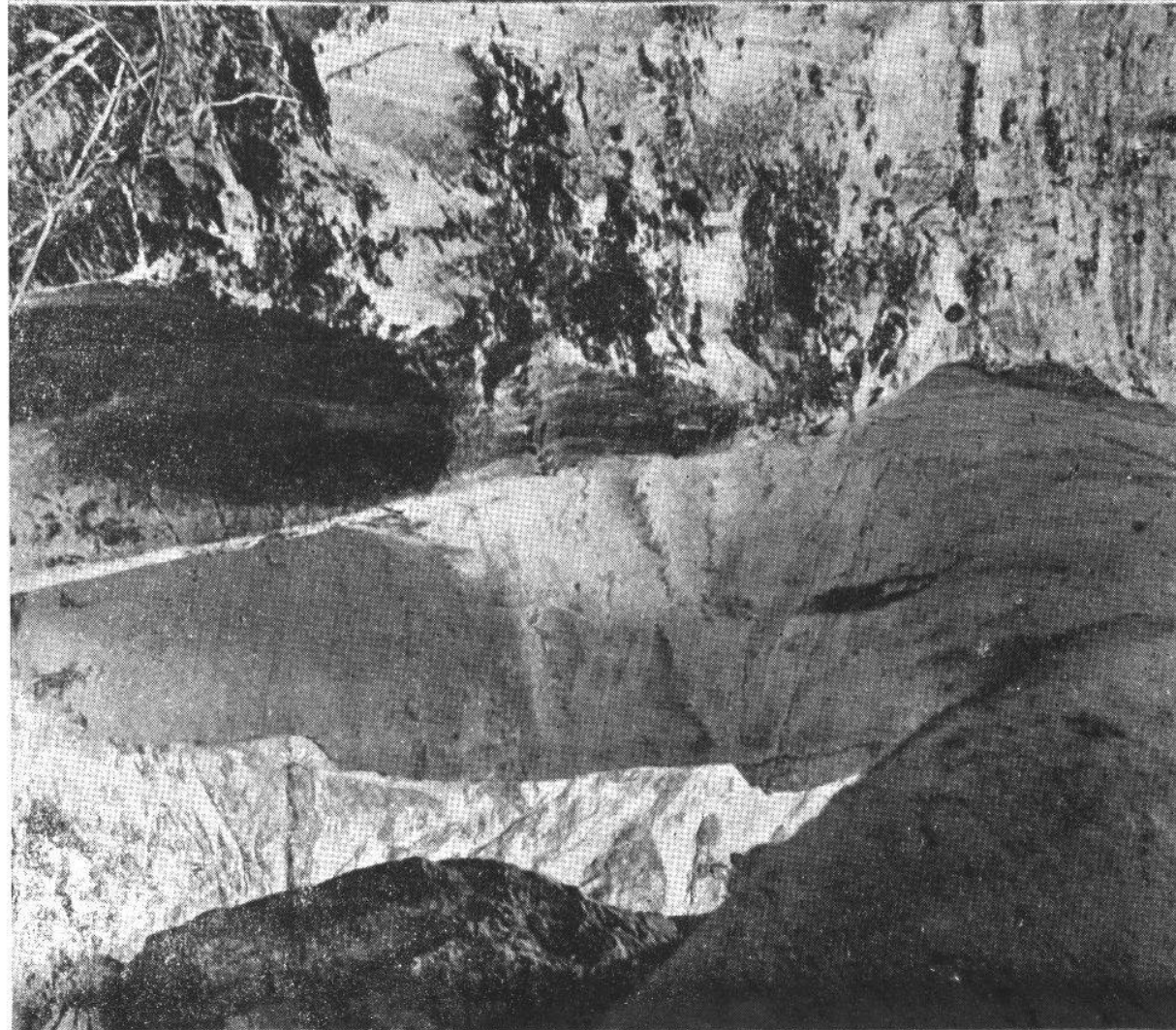
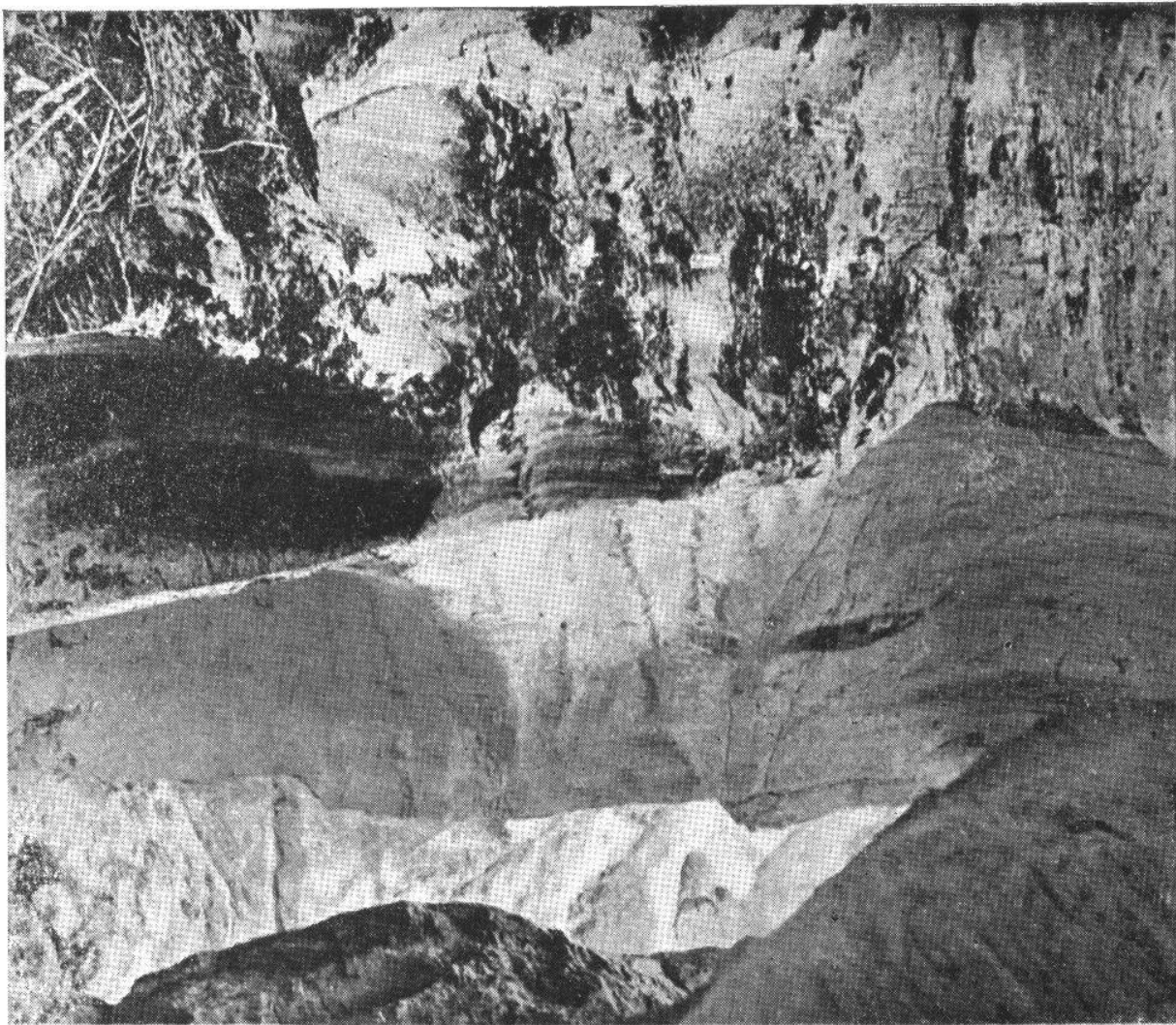


Fig. 12. Ancienne gorge de l'Aar dite « Finstere Schlucht ».
Hauteur approximative de la partie photographiée, 9 mètres.

FIGURES 13 ET 14. GORGES EN FORMATION.

Clichés de l'auteur.



Fig. 13. Petit chenal formé de marnites rejointes, dans un ravin, affluent de la Sarine, près de Fribourg.
Diamètre de la marnite centrale, 1 mètre.

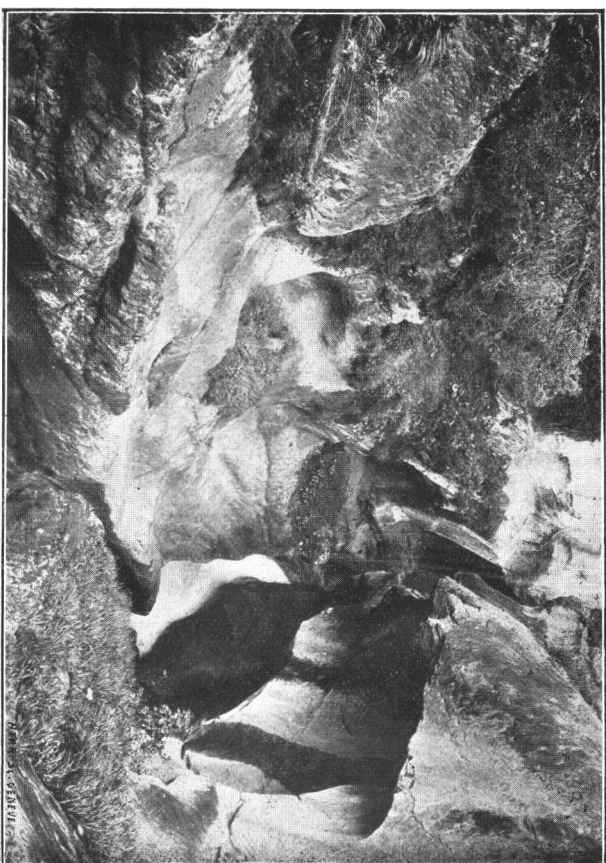


Fig. 14. Gorge du Trümmelbach : partie de la gorge, vue du pont n° 3, vers l'aval.
Hauteur approximative de la corniche à marnites, 6 mètres.

