

Zeitschrift:	Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber:	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band:	53 (1920)
Heft:	199
Artikel:	Contribution à l'étude des phénomènes d'écoulement des cours d'eau : résultats d'observations dans la gorge de la Jougne
Autor:	Lugeon, Jean
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-270536

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

**Contribution à l'étude des phénomènes
d'écoulement des cours d'eau.**

Résultats d'observations dans la gorge de la Jougne

PAR

JEAN LUGEON

OBJET DE L'ÉTUDE

Il n'existe guère de descriptions précises ou même d'expériences sur les phénomènes qui se produisent au sein de l'eau en mouvement.

M. Jean Brunhes¹ dans sa « Tactique des Tourbillons » s'est surtout arrêté à l'action de l'eau sur son support, c'est-à-dire à la forme que prend la roche érodée. Il a admirablement fouillé le problème et l'on n'y saurait rien ajouter.

Par contre une grande partie du processus même d'écoulement, j'entends la dynamique de l'eau courante, est restée imparfaitement étudiée. C'est là en effet une des parties les plus obscures du problème, étant donné que les phénomènes apparaissent sans cohésion.

Si l'on regarde couler de près un organisme fluvial quelque peu bruyant et puissant, on pense facilement que l'eau bouillonnante et jaillissante n'est soumise à aucune loi, si ce n'est à celle de la pesanteur. Mais en reproduisant en plus petit une chute, ou mieux, en examinant attentivement l'eau dans un petit ruisseau,

¹ JEAN BRUNHES : *Le Travail des Eaux courantes*. Fribourg, imp. Fragnière. 1902.

on remarquera une foule de faits constants, facilement érigables en lois. Ainsi une interprétation deviendra facile aussitôt que l'on commencera à connaître avec sûreté un phénomène fixe.

Dans tout écoulement d'un liquide il est deux choses à considérer : 1^o La masse liquide et ses vitesses ; 2^o La surface sur laquelle elle se meut. Quand il s'agit d'un cours d'eau il faut encore envisager l'air, les impuretés, soit les matériaux transportés.

L'étude de l'action de l'eau sur la surface a été profondément étudiée, ais-je dit ; le but de ce travail sera précisément le contraire, soit l'action de la surface sur l'eau.

Ces deux matières se complètent mutuellement mais ont entre elles cette différence essentielle, que la première nécessite des hypothèses, une longue série d'observations, le processus y étant très lent, tandis que la deuxième est de méthode plus physique et plus expérimentale.

Effectivement : lorsque l'on considère une marmite torrentielle, sa forme et sa disposition par rapport au lit qui la contient ou la contenait, l'on se trouve obligé d'imaginer une cause qui l'a fait naître. Sans appareil d'observation, on pense que l'eau, à la façon d'une vrille, a tourbillonné et foré cette excavation. On dit alors que le sable en suspension, actionné par des forces à la composante d'un couple est l'agent érodeur. Cela est vrai puisque l'observation vient ensuite le prouver. Mais quelles sont justement ces actions motrices, ces vecteurs ? Comment se fait-il que l'eau tourne, où en est la cause ? C'est là ce qui semble avoir été négligé. Il manque quelque chose dans les belles descriptions de M. Brunhes ou tout au moins je n'ai su l'y trouver. Ce vide que je vais essayer de combler sans aucune prétention est donc justement l'action de la berge,

du fond, des obstacles du lit sur l'eau courante. Ce sont à eux qu'il faut attribuer la cause première de toute forme subséquente.

C'est à la forme première de la roche, du relief du lit, qu'il faut emprunter l'explication de toute marmite. C'est la forme première qui devient la forme seconde, œuvre de l'eau, et cette deuxième forme de la surface, grâce à un manque de continuité, selon la loi naturelle de l'involution, détermine la forme suivante et ainsi du reste.

De là il est facile de comprendre l'importance de l'étude de l'action des obstacles de son lit, sur l'eau qui y coule.

Le meilleur champ d'observation est fourni par les cours d'eau du genre torrentiel qui offrent probablement la plus grande diversité de matière.

J'essayai, au mois d'avril 1917, de remettre en activité d'anciennes marmites du Chadelard, petit torrent dans les environs de Lausanne. Je m'aperçus combien il était difficile d'observer les mouvements de l'eau une fois qu'elle y circulait. Je voyais bien une cascade se précipiter dans un entonnoir, l'eau s'écraser sur la molasse, mais ne comprenais pas ce qui se passait au pied même de la chute. Je constatais les effets de l'affouillement quelques mois plus tard et alors seulement, en comparant les formes primitives et actuelles de la marmite, j'ai pu expliquer la marche du phénomène. Rien n'avait changé en amont, mais il y avait de notables modifications dans le relief de l'aval. C'était donc que l'eau avait obéi en partie à la nature du lit et qu'elle l'avait vaincu d'autre part. De là, il fut donc facile de trouver sans avoir formulé aucune hypothèse, la marche précise du courant liquide.

Ce procédé d'observation me semble le plus sûr, mais il n'est que rarement applicable. Un autre consisterait à

colorer avec soin la veine d'eau, à examiner sa marche et à conclure ; mais une telle méthode paraît bien peu appropriée.

C'est après ces essais que j'appris les expériences de M. l'ingénieur H.-E. Gruner¹ de Bâle et que j'eus la chance de me faire indiquer par lui-même les bases d'une étude rationnelle.

Il m'a chargé de relever précisément les mouvements de l'eau dans la Gorge de Russille de la Jagne, en Gruyère, le torrent devant y être dérivé pour la construction d'un grand barrage. Cette étude s'offrait donc particulièrement intéressante, car en observant les phénomènes d'écoulement et en les rapportant soigneusement aux berges, on pouvait, la gorge asséchée, tirer d'intéressantes conclusions entre le relief du lit et la corrélation intime qui le reliait à l'eau qui y coulait.

PREMIÈRE PARTIE.

PHÉNOMÈNES CONSTANTS ET LOIS A PRIORI

1. — CONDITIONS PHYSIQUES DE L'ÉCOULEMENT.

On dit qu'un corps solide ou liquide est en équilibre lorsqu'il est soumis à des forces telles qu'il ne peut se déplacer. C'est l'ensemble des points du récipient qui le contient qui sont les forces déterminant son équilibre. Pour qu'il y ait écoulement, il est nécessaire que l'une ou un faisceau de ces forces manquent. Le liquide soumis alors à la loi de la pesanteur s'évadera. Une

¹ H.-E. GRUNER und Ed. LOCHER : *Mitteilungen über Versuche zur Verhütung von Kolken an Wehren*. — Sonderabdruck aus der Schweizerischen Bauzeitung, Band LXXI. 1918. Zürich. — Voir aussi : *Sudien über Wasserbewegung am Wehren* (même auteur, même éditeur).

molécule pressée par la suivante, celle-ci par une troisième s'échapperont du récipient.

Ainsi procède la nature : pour qu'il y ait écoulement, il faut des forces. Toute veine liquide en mouvement, toute eau courante est sollicitée continuellement par l'action de la pesanteur d'une part, et, si l'on veut, par la poussée moléculaire d'autre part. Elle est sollicitée aussi par l'attraction de corps volumineux, par les diverses formes de la force centrifuge, probablement par la loi dite de De Baer, etc. Il serait erroné de ne pas considérer aussi les simples théorèmes de la mécanique rationnelle, applicables à l'eau en mouvement. En outre, il ne faut pas non plus oublier les faits physiques tels que la tension superficielle, l'attraction moléculaire, les lois de la viscosité et bien évidemment les théorèmes de l'hydrodynamique. Je fixerai plusieurs hypothèses sur de nouvelles lois possibles, comme celle de l'avidité de l'eau, dans certaines conditions, à s'étaler, à se décomposer suivant des processus assez compliqués. L'inertie joue aussi un rôle capital. Par le fait d'un faible coefficient de compressibilité, même tout à fait négligeable, elle oblige fréquemment l'eau à suivre un enchaînement de mouvements très solidaires les uns des autres, mais souvent d'une extrême complexité. Ainsi citerai-je les expériences de M. l'ingénieur Gruner.

L'eau qui coule dans un lit encaissé n'a donc point à priori cette simple loi de la pesanteur comme condition intrinsèque, mais est soumise à une quantité d'autres agents promoteurs.

2. — CONDITIONS PHYSIQUES OPPOSÉES A L'ÉCOULEMENT.

Les forces capables d'arrêter l'eau courante dans son lit seront évidemment des obstacles constituant un ensemble de forces qui imposent cet arrêt soit le choc,

soit le frottement, c'est-à-dire par la variation d'inclinaison. On peut trouver inopportun de discuter de si élémentaires conditions, mais je répondrai qu'au simple fait du frottement découle l'explication de plusieurs phénomènes importants subséquents. Ainsi si une masse d'eau chute dans l'air elle acquiert par le fait du frottement, pour une grande part tout au moins, la propriété de se diviser en une multitude de gouttes tendant à la forme sphérique. C'est là une des raisons des déformations que subissent les cascades à partir d'une certaine hauteur.

Si le frottement contre l'air ne semble pas jouer un grand rôle dans les cours d'eau, le frottement des filets contre leurs voisins est de toute première importance. Nous verrons plusieurs cas où le frottement contre les parois et le plancher du lit a lieu d'être aussi signalé comme important facteur.

3. — CONDITIONS NATURELLES DE L'ÉCOULEMENT.

Une loi maintenant parfaitement démontrée est celle de l'érosion régressive. Elle intervient comme premier facteur de modification dans tout système d'écoulement naturel. C'est pour cela qu'on ne saurait jamais l'omettre. Effectivement les cours d'eau tendent vers un profil d'équilibre idéal dont de La Noë¹ a montré la forme parabolique. Les paliers et les ressauts d'un lit ne sauront donc résister à l'action de l'érosion et par là tout l'organisme obéit nécessairement à la loi. Cette importante remarque fixe donc la raison fondamentale du mouvement, de la tactique tourbillonnaire. L'eau a ce grand pouvoir, lorsqu'elle charrie des alluvions, ou tient en suspension des particules solides, d'arriver toujours à vaincre la résistance de tous les obstacles.

¹ LA NOË (G^{al} de) et EMM. DE MARGERIE. *Les formes du terrain.* Paris, 1888. 1 vol. et atlas.

qu'elle rencontre. Cette lutte incessante entre le lit et le courant qui y circule a pour effet d'élaborer le relief du thalweg et de commander l'érosion sur tout le réseau hydrologique du cours d'eau.

MM. de Martonne, Bertault, de Lapparent, etc., ont toujours insisté dans leurs travaux concernant l'érosion, sur le processus que suivent les torrents et rivières pour atteindre leur profil d'équilibre. C'est par saccades et en minant par la base que l'eau travaille. Elle érode plus particulièrement par ses tourbillons les zones des obstacles, les seuils, soit toutes les régions où le lit s'éloigne le plus de la courbe d'équilibre vers laquelle il tend.

On remarque la vérité de ces données sur les plus petits parcours des cours d'eau.

4. — PREMIER ASPECT DE L'EAU EN MOUVEMENT ET CLASSIFICATION.

En regardant couler un cours d'eau, on s'aperçoit immédiatement que ce sont les obstacles qui donnent la « *forme* » à l'eau. A voir un torrent furieux, des rapides, une cascade, on comprend toujours que le relief du lit en est la cause. L'eau se conduit sans ordre au travers des matériaux qui obstruent son lit et son passage. Elle se porte vers les uns plus particulièrement que vers les autres, puis change de chemin quelque temps plus tard pour se frayer un canal autre part. Dans cette irrégularité de l'écoulement il apparaît cependant des lois fixes. Ce sont principalement celles qui règlent la vitesse des molécules. Il existe effectivement une corrélation intime entre le « *fil de l'eau* » ou « *centre d'action* » et les berges. La masse acquiert une plus grande vitesse sur l'axe du lit (quand il est rectiligne et de section régulière) et diminue de vitesse vers les rives. (Courbes isodromes.) La résistance à l'avancement étant inversément proportionnelle au volume

des eaux, la vitesse croît vers le milieu du lit et décroît vers les bords où la veine liquide se trouve moins profonde et davantage en contact avec les obstacles du fond. Il résulte de là cette apparence bouillonnante des cours d'eau du genre torrentiel, suscitée du fait qu'au centre d'action le courant surmonte tout ce qu'il rencontre, s'écrase avec violence contre les rocs, ou les contourne pour continuer vers l'aval sa marche offensive. On voit l'eau s'élancer en jets, bouillonner, tourner, et, par cette lutte contre l'obstacle, arriver peu à peu inéluctablement à le détruire.

Dans ce dédale naît une quantité de phénomènes d'une fixité remarquable, dont on peut facilement retrouver les effets et les causes. Les forces agissantes finissent toujours par aboutir à une certaine résultante, à un processus constant, à un « *équilibre mobile* », tels que l'ont prouvé les travaux de M. l'ingénieur Gruner et comme j'essayerai d'en décrire des exemples.

A voir un cours d'eau s'engouffrer dans une gorge, ou au contraire à l'examiner à la sortie et dans un lit élargi, on saura classer ces organismes en plusieurs catégories où les phénomènes acquièrent une individualité propre. Ainsi je poserai à priori ces deux classes : *cours d'eau à lit ouvert*, et *cours d'eau à lit encaissé*. Je ne considère pas toutefois les fleuves et rivières profondes, mes recherches ne s'étant adressées qu'à un cours très torrentiel. L'apparence des premiers est entièrement différente des seconds, car ils possèdent la liberté de s'élargir facilement et même de divaguer. On y remarque le lit majeur nettement différencié du lit mineur, une succession très manifeste de petits paliers limités à l'aval par une barricade de galets, à l'amont par une légère chute. (Photos 5 et 6.) Tandis qu'encaissé dans une profonde gorge, le cours d'eau sollicité au mouvement tourbillonnaire est moins sujet à de

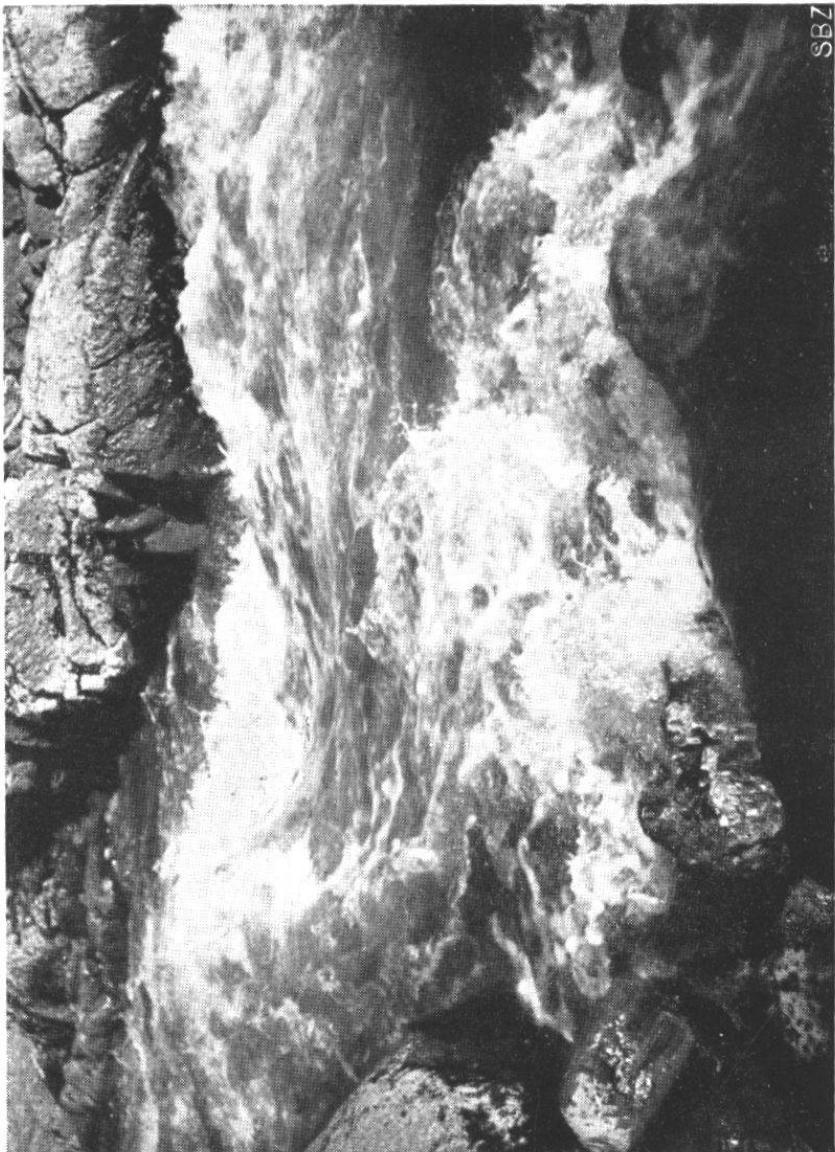


PHOTO 2. — Vague de couverture (amont de l'axe L),
(Cliché Jean Lugeon.)



PHOTO 1. — La gorge de l'axe L à A.
(Vue prise sur l'axe L.) (Cliché Jean Lugeon.)

Photo 3. — L'entrée de la gorge, l'éperon L.
(Cliché Jean Lugeon.)

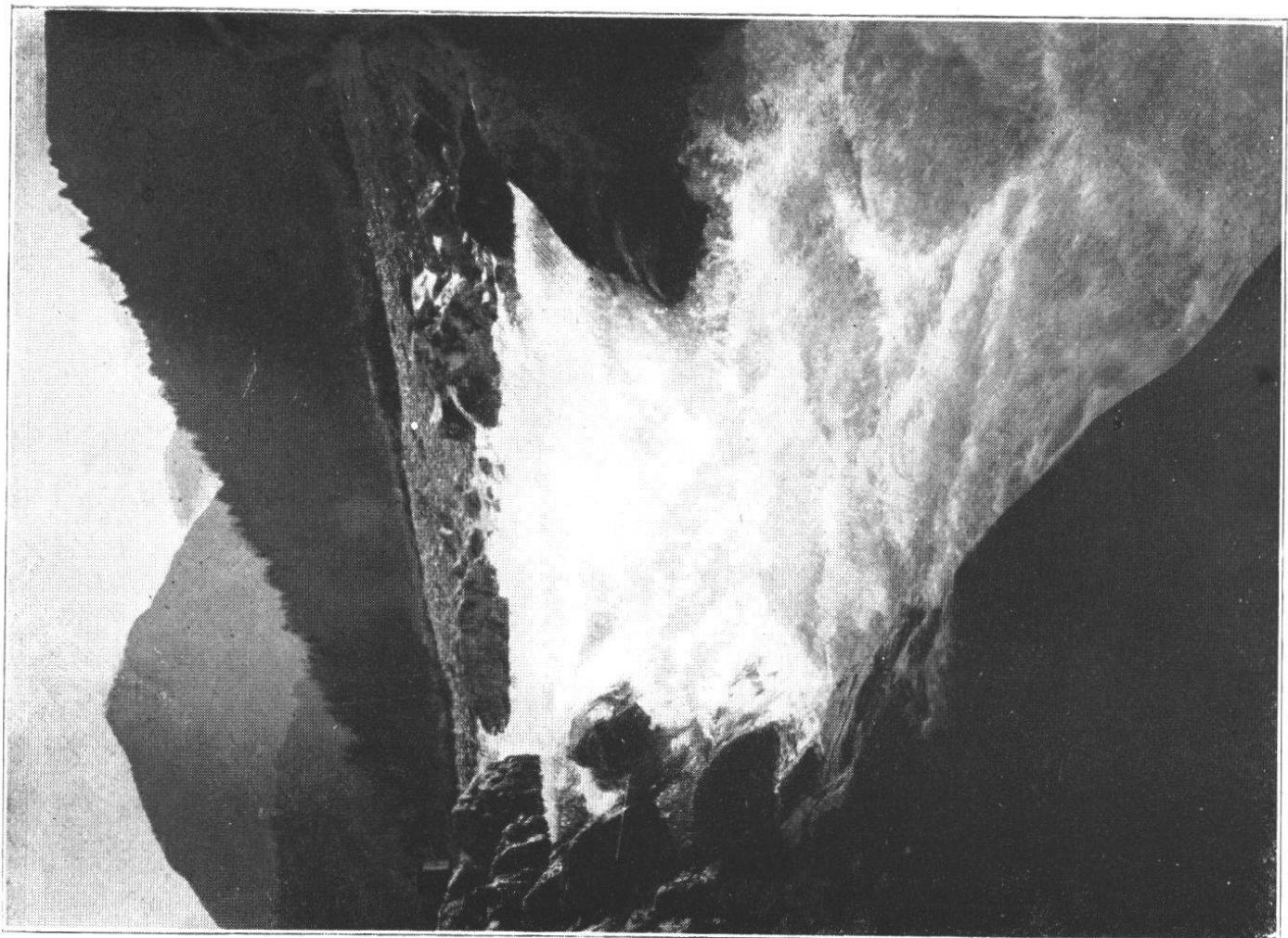
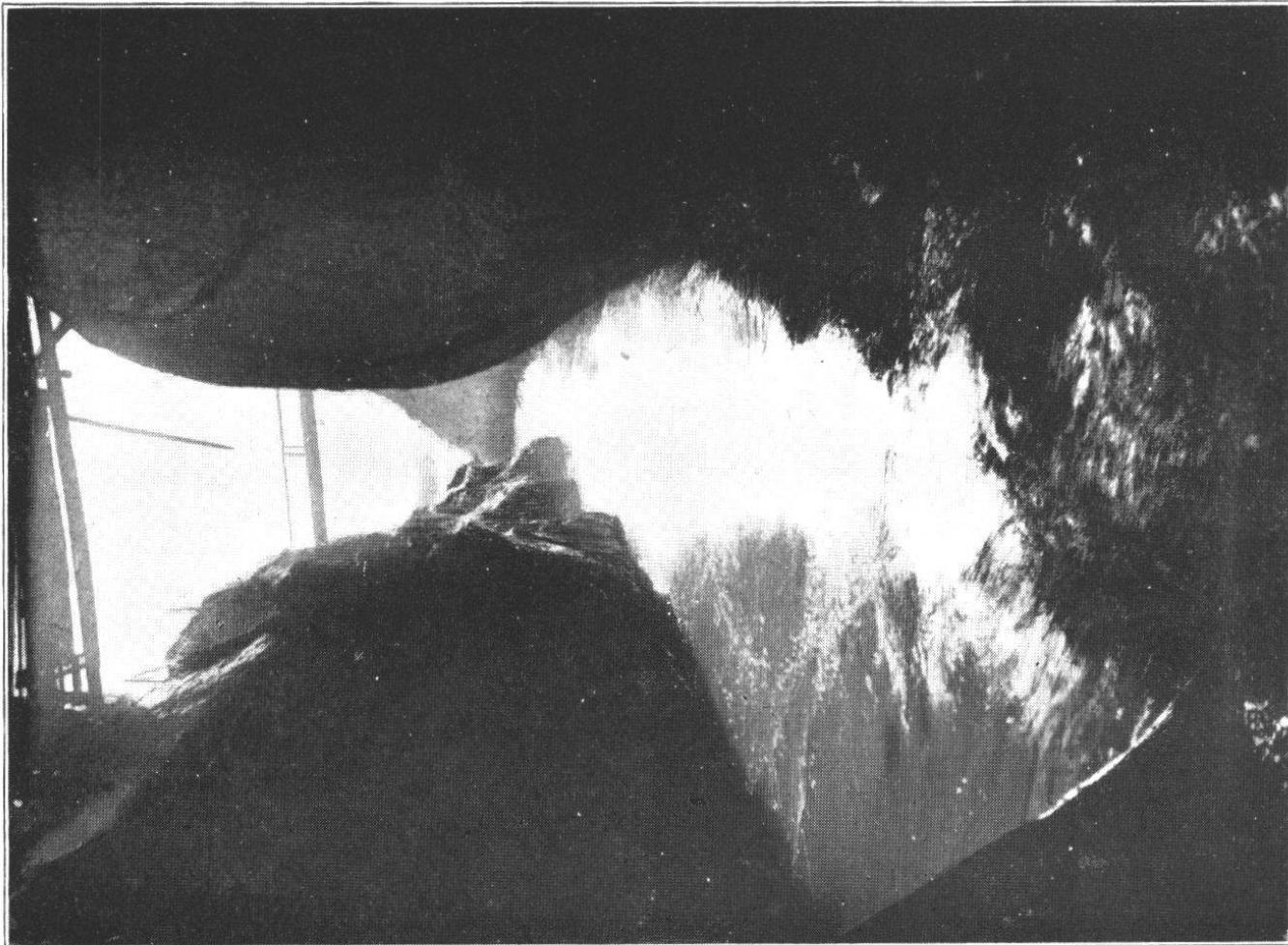


Photo 4, — prise sur l'axe A, rive droite. Partie amont AL.
(Cliché Jean Lugeon.)



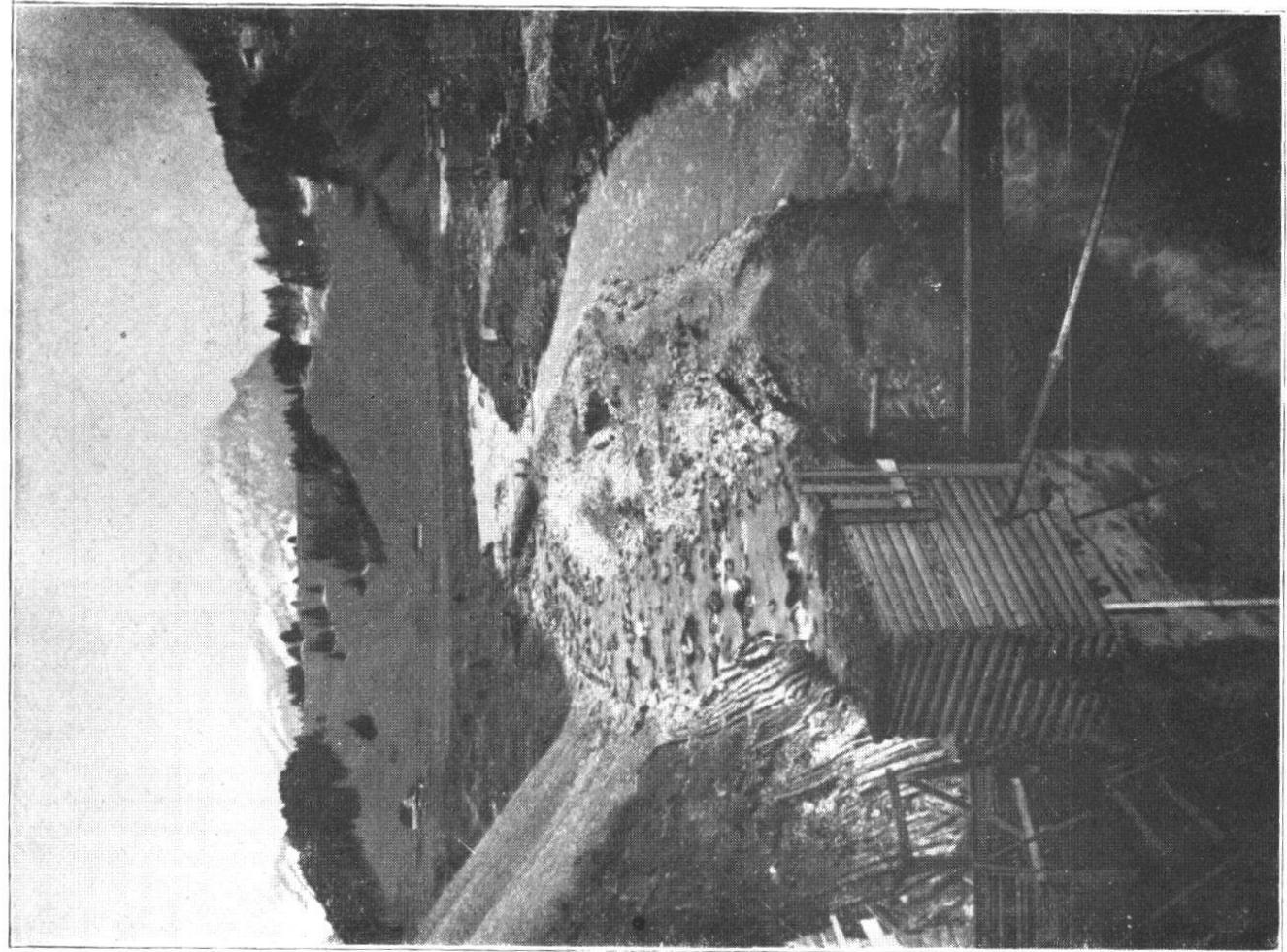


Photo 6. — *La Jogene dérivée*. (Remarquer la succession des paliers et ressauts dans le lit asséché, et ceux en formation dans le nouveau.) (Cliché Jean Lugeon.)



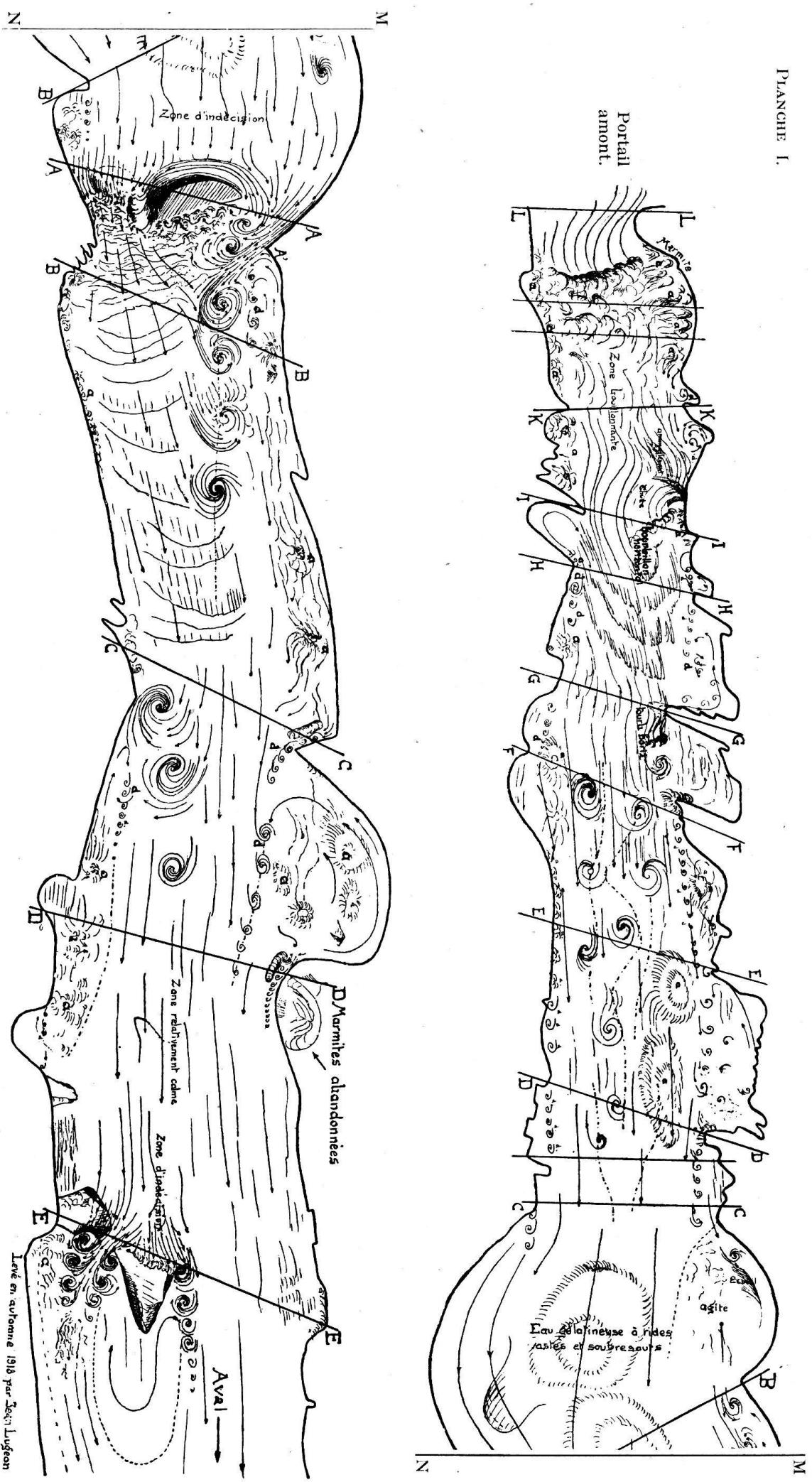
Photo 5. — Caractéristique des cours d'eau à lit ouvert. Succession des paliers et ressauts. (Cliché Jean Lugeon.)



SBZ

PHOTO 7. — *La gorge asséchée de l'axe L à l'axe B.*

PLANCHE I.



Ebauche de l'écoulement dans la Gorge de Russile du torrent de la Jigne.

Echelle : 1/200.

rapides modifications. Ces deux systèmes sont naturellement fonction de la nature du terrain traversé.

Il ne faut pas oublier non plus que dans tout écoulement d'un liquide la cohésion moléculaire joue un important rôle. Ici peut-être plus qu'ailleurs, cette cohésion, ainsi que l'inertie, justifient l'explication par une loi de moindre effort à laquelle seraient soumis les cours d'eau. (Isotropie, Boussinesq.) Il est vrai qu'une telle spéculaction a bien des chances d'apparaître erronée, mais même si la cohésion moléculaire était extrêmement faible, je n'en croirais pas moins devoir lui imputer la raison de ce que les veines d'une certaine importance tendent à rester rectilignes dans la région la plus tourmentée d'un torrent. Je ne craindrai pas de poser à ce propos la proposition suivante : « *La force-vive qu'acquiert une masse d'eau sous l'impulsion d'une brusque poussée oblige les molécules à rester dans l'axe de la poussée jusqu'à ce que l'énergie cinétique tende vers zéro.* » Par là toute gouttelette qui jaillirait hors des veines précitées ne serait que l'effet du frottement contre l'air ou de l'eau ambiante, ou de facteurs secondaires comme cela se remarque dans les cascades.

Je décris dans le chapitre suivant tout ce qui a trait aux différentes forces sollicitant l'écoulement.

5. — DU RELIÉF DE L'EAU, DES PHÉNOMÈNES CONSTANTS DONT ELLE PROCÈDE DANS SON ÉCOULEMENT.

Sans appareil d'expérience, je ne puis développer ce chapitre comme je le voudrais. Il est effectivement le plus vaste de ce travail.

J'essayerai simplement de fixer quelques hypothèses et d'interpréter des phénomènes observés consciencieusement dans la nature.

Maintenant que j'ai très brièvement rappelé les conditions physiques et naturelles de l'écoulement, je vais

essayer d'envisager théoriquement certains phénomènes en espérant ultérieurement pouvoir compléter ce qui n'est ici qu'une esquisse.

1^o Que se produit-il au sein d'une masse d'eau en mouvement, quels sont les divers processus de l'écoulement, quel est en un mot le chemin qui suit chacune des molécules ? Voici la première des questions qui me paraît s'imposer.

En procédant du simple au complexe, considérons une coulisse inclinée dans laquelle on fait couler de l'eau. Si cette coulisse est très peu inclinée aucun phénomène particulier ne se traduit à la surface libre : l'eau paraît simplement glisser tranquillement ; ses molécules acquièrent une certaine vitesse. Supposons que l'inclinaison augmente, voici que tout change. La différence de vitesse entre l'eau du fond et celle de la surface s'accuse de plus en plus ; des phénomènes périodiques apparaissent et l'écoulement s'effectue par saccades avec une régularité assez prononcée (pulsation). Nous sommes donc en possession ici d'un fait : sitôt que la pente augmente, il se produit d'importantes perturbations au sein de la masse liquide en mouvement. On peut supposer théoriquement quelle sera la nature de ces phénomènes par la considération des différentes vitesses de la veine, normalement à leur direction. Dans la fig. 1 B je représente les vitesses par des vecteurs de longueur proportionnelle.

Il se produit un écrasement après un certain parcours, et, à partir de ce point toute une perturbation dans la marche de l'écoulement. Je n'entrerai pas ici dans des considérations plus avancées. Il suffit de dire qu'à un moment donné, par la vitesse acquise, l'eau de la tranche supérieure dépasse l'inférieure, s'écrase brusquement vers l'aval et perd de la vitesse, subit une perte de charge. La tranche inférieure rejoint la région en question et

tout s'embrouille. Les diverses forces en jeu tendent à se combiner et provoquent soit un mouvement de projection du liquide ou des soubressauts que trahit la partie aval du canal.

Remous d'abaissement et d'exhaussement

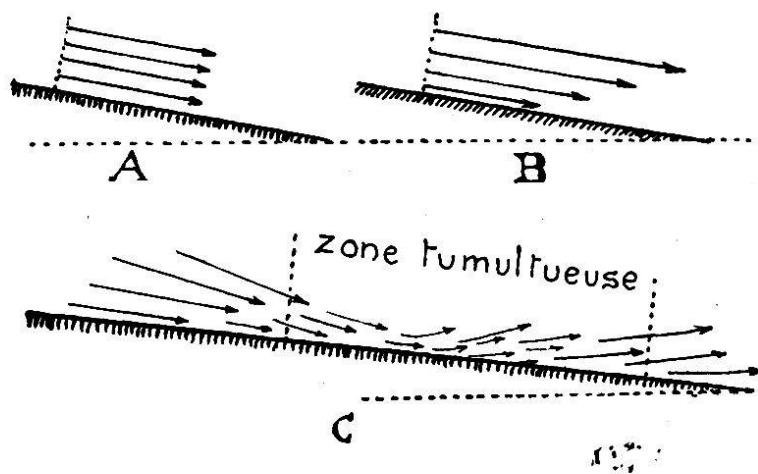


FIG. 1.

En réduisant l'inclinaison et en plaçant dans le cours des obstacles de diverses formes on arrive aux très intéressantes conclusions de M. l'ingénieur Gruner. Cette partie est admirablement traitée dans sa brochure. Je la laisserai donc de côté¹.

6. — DES TOURBILLONS A AXE VERTICAL.

Supposons maintenant que notre canal n'ait plus ses parois parallèles, mais qu'elles affectent la forme suivante (fig. 2). Que se passera-t-il quand l'eau arrivera subitement sur l'axe A? On peut le discuter de diverses manières. En admettant la proposition que je posais au chapitre précédent, la masse fluide ne devrait pas s'occuper de l'augmentation subite de place mais devrait passer outre. Or on sait que cela ne peut se réaliser,

¹ H.-E. GRUNER et ED. LOCHER: *Mitteilungen über Versuche zur Verhütung von Kolkern am Wehren*. Bauzeitung, 1918.

d'après le théorème de Bellanger, que si l'eau possède une très grande vitesse. Cette condition n'étant pas le cas ici, la veine liquide se détendra et envahira l'espace A. B. Au début de l'expérience il se produira une sorte d'appel dans A.B., puis après quelques instants, grâce à l'isotropie de l'eau, l'équilibre sera rétabli dans les fractions amont et aval. Nous aurons pendant l'écoulement deux zones nécessairement moins sollicitées à se déplacer, ce seront les parties semi-circulaires. Une certaine surface limitera ces deux zones du courant général, et, du frottement qui en résultera, naîtront probablement des tourbillons. Les molécules arrivant avec une certaine vitesse dans la partie élargie ne tendront donc pas toutes à rester sur l'axe rectiligne et viendront partiellement buter sur les deux éperons de l'axe B. Il en résultera par conséquent une perturbation dans les filets quasi stationnaires et les filets mobiles de la région A. B.

Par suite de l'inégalité entre la vitesse du courant d'arrivée et de l'immobilité relative des secteurs circulaires, je disais qu'il devait naître des tourbillons. Or j'ai constaté à maintes reprises que tel n'était pas le cas si certaines conditions de vitesse n'étaient pas remplies. Ainsi, si l'eau circule très lentement, on voit nettement se former sur la tranche limitant les zones d'inégale vitesse, une ride que je dénommerai dorénavant « *ride limite* » et un vague tourbillon dont le sens de rotation va du courant plus rapide au moins rapide, c'est-à-dire que sur le bord gauche le tourbillon tournera sinistrorum (sens inverse des aiguilles de la montre) et se localisera dans la zone calme ; le même raisonnement s'appliquerait pour le côté droit du canal. Si la vitesse augmente, ces deux tourbillons disparaissent et ce phénomène se complique. Si au contraire la vitesse [atteint un certain optimum (env. 8 km. / h.), il arrive parfois

que les tourbillons se détachent de la paroi et soient emportés sur un certain parcours. Ils meurent vers l'aval, comme happés par le courant. Ce sont les « *tourbillons migrateurs* ».

Schématisation théorique des tourbillons.

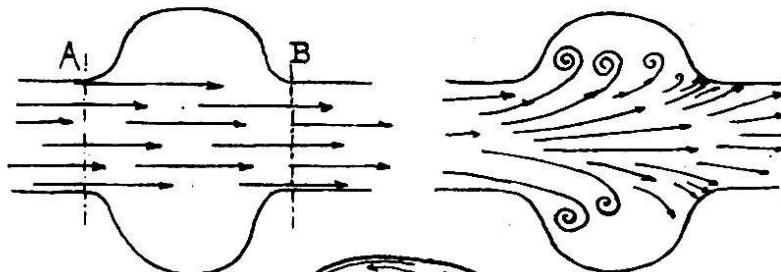


FIG. 2.

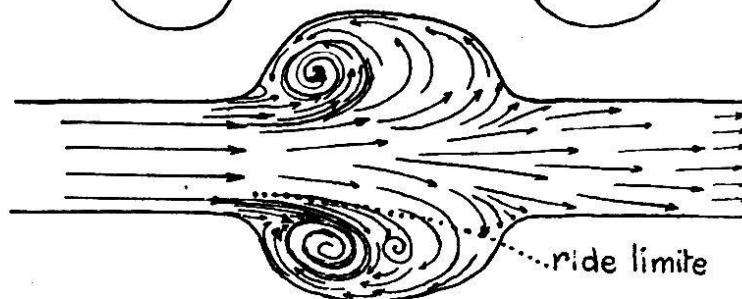


FIG. 3.

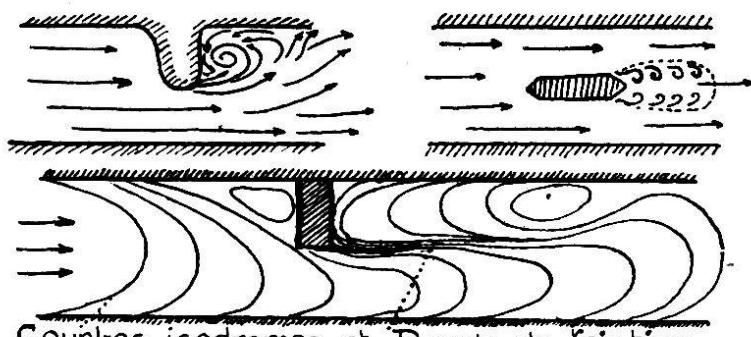


FIG. 4.

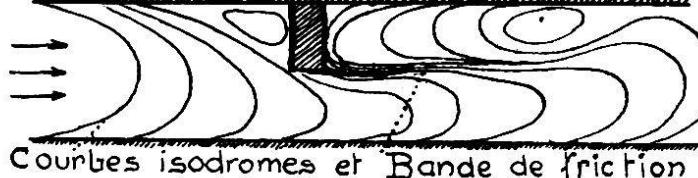


FIG. 5.

La figure 3 montre la direction moyenne probable de l'eau courante dans toutes ses strates supérieures. En vertu des différences de frottement et du choc des filets contre les éperons de l'axe B., on constate encore d'autres phénomènes remarquables en particulier des soubresauts ascendants.

Si la disposition du canal est différente de celle considérée, les tourbillons absorbants ont souvent plus de facilité à se produire. Si par exemple un écueil avance

dans le lit comme le représente le schéma 4, il naîtra immédiatement un tourbillon momentanément fixe, puis migrateur ; c'est ceux que l'on constate toujours en aval des piles d'un pont, où une continue série se succède. Ils sont amorcés directement derrière la pile et entraînés par la masse pour se dissoudre ou se dissocier à très proche distance (1 m. à 5 m.), suivant la vitesse de l'eau et la largeur de la pile (fig. 4).

On peut imaginer de multiples dispositions engendrant des tourbillons, pourvu qu'il y ait toujours une différence de vitesse entre deux ou plusieurs veines. Il en est ainsi par analogie dans l'hypothèse de Faye sur la naissance des cyclones.

Mais on constate toujours que l'eau tourne autour d'un axe à peu près vertical, situé non sur la surface cylindrique limitant les deux filets, mais légèrement à l'intérieur de la veine de moins grande vitesse. En fait, ce n'est pas une surface, mais une zone d'un certain volume, une bande que j'appellerai « *bande de friction* » (fig. 5). En vertu des lois de la viscosité et de la force centrifuge, le phénomène tourbillonnaire se complique. Ainsi le mouvement spiral centripète donne lieu à une élévation de cote de la surface du volume pénétrant (ci-devant l'eau de vitesse plus grande) et à une diminution de cote de la surface de l'eau à moindre vitesse, en sorte qu'il se produit une absorption nécessaire au centre, suscitée par la naissance d'un vide relatif.

Aussitôt que naît le tourbillon, la bande de friction se sectionne en prismes verticaux à la faveur du mouvement tourbillonnaire, c'est-à-dire que dans la zone critique elle disparaît totalement.

Ces considérations concernent les parties supérieures du tourbillon. Je ne voudrais pas trop insister dans le domaine des couches inférieures et considérer la marche du phénomène à la surface du lit, car là se produisent

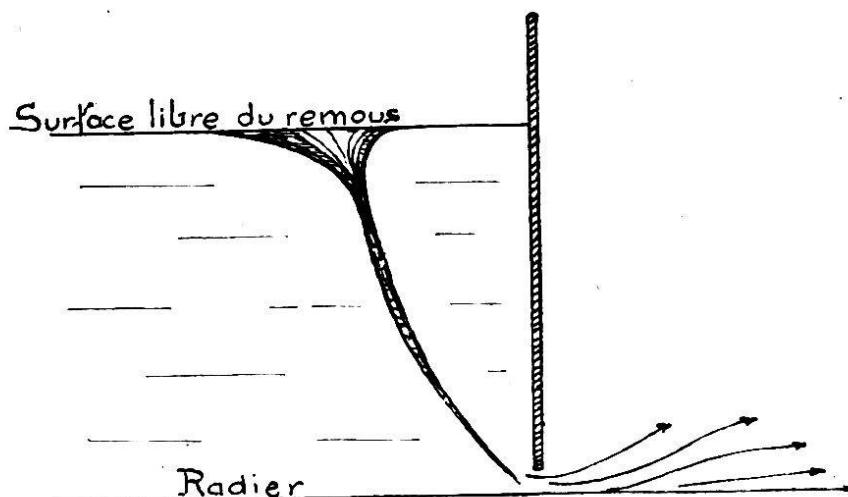
vraisemblablement des phénomènes très complexes. Le mouvement rotatif est engendré aussi bien dans les veines supérieures qu'inférieures, mais en vertu du frottement avec le sol, les molécules se conduisent très différemment de ce que l'on pourrait prévoir. Ainsi j'ai constaté sur des tourbillons dont l'axe avait 70 centimètres de hauteur que l'eau tournait dans un sens spiral centripète de la cote 70 à la cote 40 environ, et que là il se produisait un certain calme au-dessous duquel il n'y avait plus de rotation spirale centripète mais des perturbations très compliquées ayant pour résultante une sorte de mouvement spiral centrifuge. Cela paraît du reste assez conforme à la théorie des tourbillons atmosphériques. (Cyclone dans les zones inférieures surmonté d'un anticyclone dans la haute atmosphère.) Dans la zone inférieure il se produit une sorte de bombardement des bulles d'air englobées par l'absorption. Elles sont chassées d'un peu tous les côtés, mais principalement vers l'aval du liquide rapide, en suivant des trajectoires très irrégulières.

Cette image peu précise ne donne qu'une idée générale du phénomène tourbillonnaire, car il est en réalité extrêmement complexe. Une explication plus rationnelle implique la considération de la hauteur des eaux, des volumes en présence et de données plus précises sur les vitesses. C'est ainsi que par le fait de l'épaisseur de la nappe liquide des rivières on y trouvera généralement peu de tourbillons absorbants à l'inverse des fleuves où la profondeur facilitera considérablement leur existence. Les tourbillons naissant dans des canaux artificiels rectangulaires près d'une vanne, affectent identiquement la forme des trombes artificielles produites dans l'expérience de Weyher¹. Ce sont, individualisés, de longs

¹ C.-L. WEYHER : *Etude et expériences sur les tourbillons, trombes et tempêtes*. Paris. 1889. Gauthier-Villars.

cylindres à diamètres très réduits, sortes de serpents suspendus à la surface libre (fig. 6).

J'ajouterai que dans tous les cas où j'ai pu observer un peu rationnellement ces mouvements tourbillonnaires,



Tourbillon absorbant à giration spirale centripète

FIG. 6.

ils se compliquaient encore par le fait de leur entraînement collectif, dû à la vitesse de la veine rapide. Le mouvement de rotation se combine alors avec le mouvement de translation et le phénomène s'exagère ou diminue d'intensité suivant la trajectoire qu'il est appelé à suivre. (Voir MM. B. et J. Brunhes et Hann, Lehrbuch der Meteorologie.)

Ces tourbillons migrateurs qui sont ainsi abandonnés au courant général suivent toujours une ligne très régulière qui est celle précisément de la *ride limite* ou de la *bande de friction* si la trajectoire de translation s'établit entre deux zones de courant à vitesse différente. Ils forment souvent une sorte de chaîne dont les anneaux extrêmes apparaissent à l'amont et disparaissent à l'aval, avec une remarquable régularité.

Dans le cas où le tourbillon est abandonné dans le

lieu du centre d'action du cours d'eau, soit dans l'axe, il se conduit très irrégulièrement, zigzagant en général sur cette ligne. Il ne tarde pas alors à disparaître, le mouvement tourbillonnaire perdant son individualité, ne devenant plus que superficiel et se dissociant en surface.

Les tourbillons absorbants se dissocient en effet le plus souvent en surface. Cela se comprend facilement parce que l'inertie giratoire, dont est animé le mouvement tourbillonnaire, tend nécessairement à le propager dans les zones ambiantes de moindre pression verticale, soit dans les strates avoisinant la surface supérieure.

En résumé les tourbillons spiraux centripètes à axe « *vertical* », sont engendré par la rencontre de deux

Principe du tourbillon absorbant.

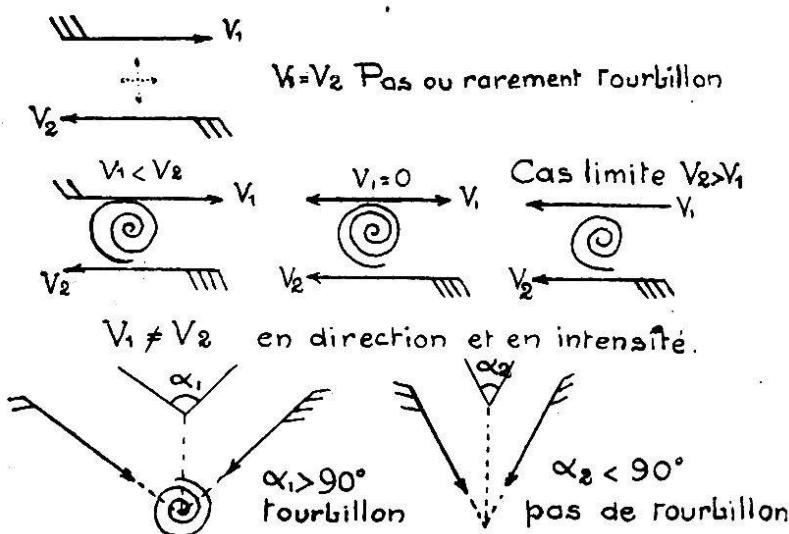


FIG. 7.

courants d'eau de vitesse différente. Les sens relatifs des deux filets peuvent évidemment avoir les dispositions suivantes (fig. 7); les pennes indiquant proportionnellement la vitesse.

(Soit dit en passant, un crayon que l'on fait rouler

entre les deux mains représente assez fidèlement la gaine centrale du tourbillon, si l'on a soin de mouvoir les mains dans un sens légèrement oblique.)

En considérant les figures 3 et 5 représentant les dispositions de la bande de friction, on saisit facilement qu'il ne peut pas y avoir équilibre entre les deux régions et que nécessairement doivent naître des tourbillons dans la « bande de friction »¹.

7. — AUTRES FORMES DES TOURBILLONS ET MOUVEMENTS TOURBILLONNAIRES.

Ces tourbillons absorbants si caractéristiques dans les gorges de nos torrents et dans les rivières en crue, comme aussi dans les fleuves, restent souvent invisibles quand ils sont engendrés à une certaine profondeur. On remarque alors à la surface des rides anormales et des soubresauts tumultueux. Il est simple d'imaginer un écueil de fond ou une échancrure derrière lesquels viendraient naître ces tourbillons. Ils peuvent aussi en se combinant et en suivant diverses trajectoires produire une foule de petits mouvements dans les détails desquels il serait fastidieux de vouloir entrer, eu égard à l'extrême difficulté de les observer proprement. Nous en considérerons cependant un cas dans la gorge de Russille.

MM. Brunhes considèrent à part cette catégorie de tourbillons, ceux produits plus accidentellement par « des eaux tombant dans une cavité où elles tournent dans un sens ou dans l'autre »². Ce sont des tourbillons que nous appellerons *sédentaires* pour bien montrer la différence d'avec les migrants.

Ce genre de tourbillons plutôt calmes est tout dif-

¹ Pour l'interprétation mathématique, voir H. POINCARÉ : *Théorie des Tourbillons*. 1893. Paris.

² JEAN BRUNHES : *Le Travail des Eaux courantes*. Fribourg. 1902

férent quant à son mode d'action, de celui considéré plus haut. L'eau tourne comme une meule suivant un certain mouvement de rotation régulier, assimilable, par son influence ambiante, aux cyclones atlantico-européens, si l'autre procédé est assimilable à la tornade ou au cyclone tropical.

Ces tourbillons diffèrent précisément parce que la vitesse chez les premiers décrits, est localisée, dans la gaine cylindrique centrale et au delà la vitesse va en diminuant graduellement à mesure que l'on s'éloigne de l'axe, du vide central, tandis que dans les autres la vitesse maximum est atteinte à la périphérie de la masse en rotation et l'ensemble du fluide tournant se meut comme une masse solide.

J'insisterai ici, sur le fait que dans une nappe liquide en mouvement, telle la région avoisinant la trajectoire du centre d'action d'une rivière ou d'un torrent encaissé, les tourbillons rencontrés sont toujours du premier type, précisé dans le chapitre 6, pour autant que j'ai pu le constater dans les fleuves, rivières et torrents de nos Alpes. Ceux du deuxième type, tournant comme une meule, sont toujours localisés dans des zones plus calmes (calmes même si on considère l'ensemble de l'organisme) avoisinant le versant ou y étant même encloisonné. On pourra constater ces faits sur le plan de la gorge.

Je ne me permettrai pas d'entrer dans des considérations plus avancées quant à ce mode d'action ; il est des phénomènes si particuliers et si complexes qu'une théorie ne saurait les interpréter qu'imparfairement.

Si le principe général des tourbillons dit absorbants (ci-dessus premier type) réside dans l'existence de deux filets d'eau à vitesse initiale différente, il est encore d'autres causes pouvant les engendrer. Ainsi j'ai constaté dans la gorge de la Jougne, comme dans divers torrents de nos Alpes où le régime n'était pas trop turbulent, que

de brusques variations de débit, poussées accidentelles, ou appels produits par des vides ou brusques détentes, étaient capables d'engendrer des tourbillons.

Si par exemple, contre un écueil dans le fond du lit, la pression, par une variation de débit ou de vitesse de l'eau, vient à augmenter brusquement, on remarque à la surface un soubresaut immédiatement suivi d'un tourbillon en aval. Ce phénomène très fréquent se manifeste surtout autour d'écueils dans les lits fluviaux. J'ai pu m'en convaincre en observant, à diverses époques de l'année, une section du lit de la Sarine. Ces tourbillons apparaissent le plus souvent pendant les périodes de crue, lorsque les eaux montent et que corrélativement la vitesse superficielle augmente. Aucun motif directement visible ne les faisant prévoir, voici probablement la cause de leurs subites apparitions : Les eaux grossissantes, acquérant par conséquent une force vive plus considérable, charriant de même une masse plus grande de galets, ce que l'on entend parfaitement à l'augmentation de la fréquence des chocs, accumulent souvent et momentanément une certaine quantité de matériaux en des régions du lit. Cette accumulation acquiert une certaine individualité, provoquant sur la tranche d'eau qui l'entoure des différences notables de vitesse. Ce monticule n'atteignant pas la surface de l'eau courante, reçoit donc en amont un courant nécessairement plus intensif que dans les bords, puisque par la rencontre l'obstacle diminue l'énergie cinétique. Il y a au-dessus de l'obstacle une tranche à vitesse très peu inférieure à la vitesse moyenne superficielle, due à la pression inclinée de la masse d'assaut et au frottement ; à ses côtés, la vitesse non accidentée, soit normale, du fleuve ; et, à son aval une vitesse presque nulle ; ceci bien entendu en faibles variations les unes par rapport aux autres. A l'aval se produit alors

un appel continuellement desservi par les filets mitoyens. Un tourbillonnement complexe s'y produira. Il sera, suivant son sens de rotation, retardé ou accéléré par le courant général et prendra alors, avant de se détacher, une certaine importance, entraînant les masses ambiantes, en sorte que le mouvement tourbillonnaire atteindra la surface supérieure.

J'ai vu ainsi de ces tourbillons, comme venant du fond, naître d'une façon continue, être entraînés et se dissocier dans les eaux à quelque 30 mètres en aval. La succession dure jusqu'à ce que, affaibli par l'arrivée de l'eau sous pression, le monticule se démembre et les galets se dispersent à nouveau dans le lit.

Ce phénomène se produit facilement à la rencontre de deux rivières ou à l'embouchure d'une rivière dans un fleuve. J'ai pu l'observer au confluent de la Plessur et du Rhin.

On peut imaginer encore d'autres raisons d'où naîtront ces tourbillons. Ainsi la paroi du lit affecte souvent une forme telle que l'eau en la contournant est obligée de revenir quelque peu en arrière et de tourbillonner sur place. Ces sortes de « *moules à tourbillons* » sont très fréquents dans nos gorges. Ils donnent naissance à des *tourbillons sédentaires*.

Dans mes observations sur les mouvements tourbillonnaires spiraux centripètes du premier type, je n'ai pu calculer avec exactitude le volume d'eau qui prenait part au mouvement, non plus que la vitesse de rotation. Je suis cependant en mesure de signaler que la vitesse de rotation est notablement plus grande, relativement, que la vitesse de translation, et, qu'abstraction faite de tous les courants secondaires qui viennent prendre une part favorable ou défavorable à la rotation, celle-ci est proportionnelle très approximativement à la vitesse et au volume des eaux qui l'engendrent.

Lorsqu'une crue se fait sentir et que la masse par unité de section (ou le périmètre mouillé) augmente dans un lit, les tourbillons absorbants prennent une force bien plus considérable et acquièrent par là même une plus grande vitesse de rotation. Ainsi dans la gorge de la Joggne, des tourbillons de moule de 50 centimètres de diamètre en temps d'écoulement normal, atteignent en temps de crue facilement un mètre, la vitesse angulaire (rotation de 360°) dans la gaine centrale variant dans ces proportions de 3 secondes à $2 \frac{1}{2}$. (Je ne veux cependant pas garantir l'absolue exactitude de ces chiffres, car il est de toute difficulté de mesurer ces grandeurs dans une masse d'eau bouillonnante où le tourbillon lui-même devient très difficile à discerner par le fait de l'écume, de l'air chassé, des multitudes de clapotements, jaillissements, soubresauts, etc.)

8. — DES TOURBILLONS A AXE HORIZONTAL.

A côté des tourbillons absorbants décrits ci-dessus, il existe dans les cours d'eau des mouvements tourbillonnaires apparaissant avec beaucoup moins de régularité, qui ne sont pas propres au processus d'écoulement et que l'on pourrait classer parmi les phénomènes accidentels. Je parle des tourbillons à axe horizontal. Leur mode de formation n'est pas précisément celui des tourbillons absorbants, c'est-à-dire que l'on n'a pas affaire à une bande de friction où deux veines de vitesse différente font naître le mouvement, mais bien au relief direct du lit. Ils naissent aux brusques ruptures de pente, derrière de gros écueils ou par l'arrivée de masses inclinées et à grande vitesse dans des zones de calme relatif. Chaque cas a ses causes propres. On ne saurait les encadrer dans un principe unique comme pour les tourbillons absorbants. Il est cependant possible de classer les divers processus en catégories nettement séparées.

1^o Les coupes de M. l'ingénieur Gruner représentant la marche des molécules dans un canal rectiligne lorsqu'elles sont déviées par des obstacles de diverse nature, cloisons verticales transversales, cylindres, etc., mettent admirablement en évidence les tourbillons à axes horizontaux. (Deckwalze.) A l'examen d'un cours d'eau on remarque que l'eau se conduit à l'aval d'obstacles submergés exactement comme dans ces expériences. (Fig. 8.)

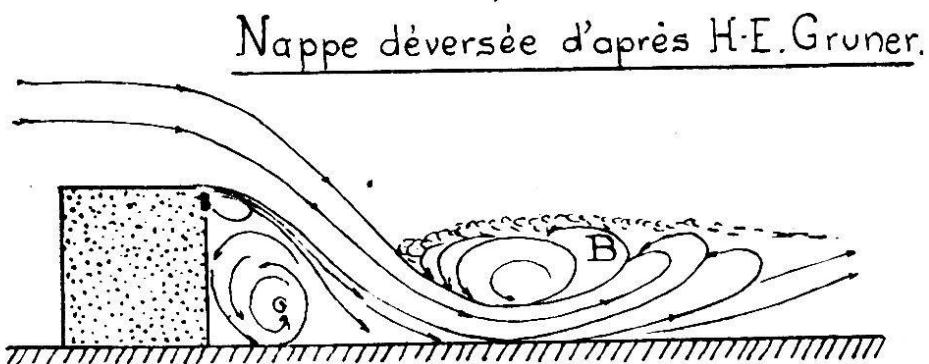


FIG. 8.

Une veine passant par-dessus un obstacle à une certaine vitesse se décompose à l'aval suivant une gerbe dont l'inclinaison dépend de la vitesse et de la hauteur de chute et de diverses autres fonctions, tels les mouvements tourbillonnaires dus au relief de l'obstacle, et de l'équation propre au déversoir. Dans la région aval de l'écueil, le tourbillon tourne à la façon d'une meule, c'est-à-dire qu'il n'y a pas mouvement spiral centrifuge comme dans les cas précédés, mais le cylindre d'eau tourne uniformément. L'eau ne s'y échange pas nécessairement, et un flotteur qu'on y abandonnerait pourrait y tourner longtemps avant qu'il n'en soit arraché par le frottement avec la zone de vitesse.

Généralement les tourbillons horizontaux ne sont jamais spiraux, ils sont assimilables à des cylindres de révolution tournant autour de leur axe. Cependant dans la région B du croquis (fig. 8), la vague déferle

en direction inverse des vagues des nappes stagnantes. L'eau perdant de l'énergie parce que réfléchie par le sol se détend nécessairement. La veine s'écaillle superficiellement, et les « pelures » retombant sur le corps principal tournent en sens inverse de la trajectoire d'écoulement général. Ces pelures s'enroulent sur elles-mêmes formant des « *rouleaux de déferlement* », sorte de « demi-spirales » à axe horizontal dont la rotation complète n'atteint guère plus d'un tour. (Fig. 8.) Ces petits tourbillons horizontaux, d'une minime importance, sont les seuls ou à peu près qui se rapprochent du type des verticaux. Au reste il ne peut exister de tourbillons horizontaux spiraux centripètes étant donné qu'il ne pourrait se produire d'échange liquide par un axe horizontal, l'eau n'étant pas dirigée.

Le déferlement est la caractéristique de tout cours d'eau possédant des écueils importants. L'air englobé par l'eau lui donne cet aspect bouillonnant à l'aval de toute chute. (Voir photos.)

2^o Les tourbillons horizontaux de surface se produisent aussi au bas d'une pente.

3^o Les plus intéressants de ces phénomènes que j'ai pu observer étaient dus à un courant incliné très rapide, s'enfonçant dans une masse d'eau relativement calme. Le principe de ces mouvements se rapproche de celui des tourbillons absorbants du fait que nous avons réellement affaire à deux zones de vitesse très différentes. La masse en vitesse s'engouffrant dans un bassin calme y déplace continuellement les molécules tendant à s'établir sur son passage. Cette lutte amortit l'énergie de la veine, laquelle se transforme ainsi en de véritables cylindres tournant horizontalement. Un cas concret est visible dans la gorge. La fig. 9 schématise un étranglement dans le canyon du Rhône à Bellegarde où naissent des rouleaux déferlant de la bande de friction.

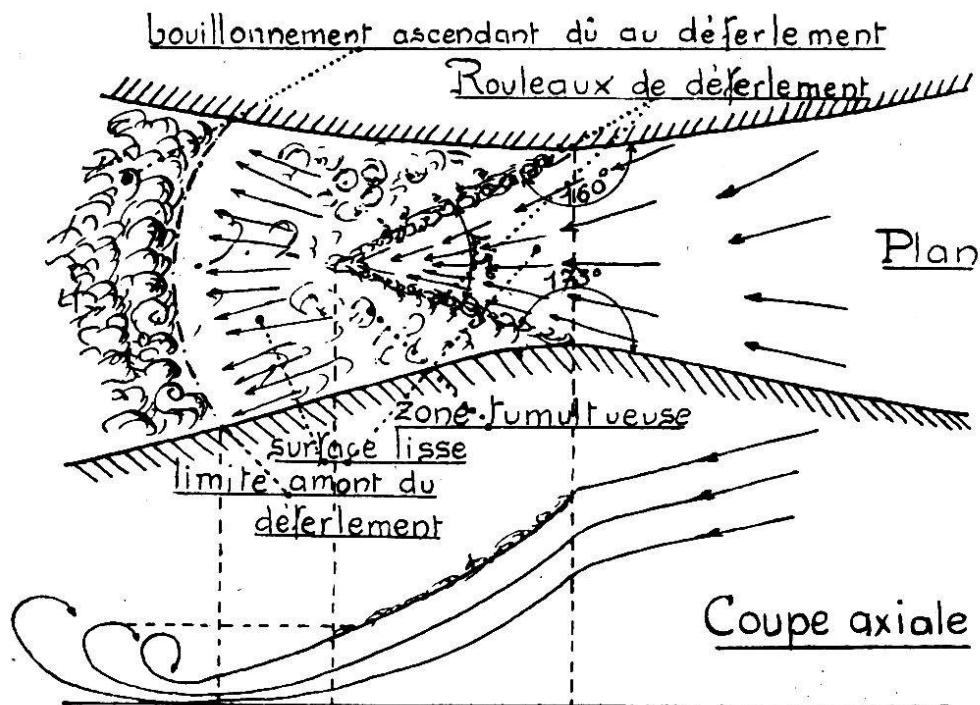


FIG. 9.

9. — SOUBRESAUTS ASCENDANTS.

A côté des mouvements tourbillonnaires absorbants, appelés aussi *Helmolzswirbeln*, les tourbillons horizontaux, on serait tenté de croire qu'au processus d'écoulement des cours d'eau appartiennent aussi des tourbillons ascendants. Il n'en est rien. Par contre sous différentes formes apparaissent au sein de la masse une série de phénomènes ascendants que l'on peut classer en « *soubresauts* », « *mamelons* », « *couronnes et verrues* », tous convulsions engendrées par des composantes verticales ou inclinées agissant du bas et provoquées par une série de causes dépendant directement du relief du lit et du processus même d'écoulement.

Ces phénomènes sont beaucoup plus fréquents qu'on ne serait tenté de le croire, et c'est à eux qu'il faut attribuer la plupart des brusques variations de débit et de ces ondes, sortes de seiches fluviales périodiques que l'on constate longitudinalement aux cours d'eau.

Les soubresauts ascendants se trahissent à la surface par de grandes rides circulaires à l'origine et se déformant très rapidement, emportées par le courant. (Caractéristique de la surface libre des grands fleuves à écoulement régulier.) Il arrive constamment pour des raisons locales de brusques variations de vitesse dans les veines de fond, et, comme poussées vers le haut, les strates supérieures se boursoufle en sortes de mamelons assimilables à des gâteaux de gélatine. Ces mouvements ascendants à période régulière provoquent toujours dans les zones relativement calmes des protubérances caractéristiques d'un régime stable. Elles sont parfois accompagnées d'émissions gazeuses qui ne sont autres que de l'air englouti à l'amont par quelque vague de forme particulière.

A côté de ces soubresauts ascendants, on remarque presque toujours contre un écueil ou dans un étranglement où l'eau est forcée, des crêtes de petits mamelons affectant la forme de verrues à axe parfaitement vertical. Elles s'expliquent facilement en accordant à l'eau sous pression la propriété d'être réfléchie sous un petit espace si elle vient à frapper une paroi. Le frottement d'une masse d'eau en vitesse provoque aussi, s'il est dû à la berge, par exemple, de ces successions mamelonnées. Ces petits « *objets liquides* » en « *équilibre mobile* » sautillent sur eux-mêmes à cause de l'irrégularité du régime d'écoulement.

On peut, il est vrai, les expliquer différemment en supposant qu'entre le courant général et la berge se forme par suite du frottement une sorte de crevasse fictive.

L'eau de vitesse s'écrasant sur les obstacles des berges s'y dissociera fatalement. Les masses comprimées formeront ces verrues dansantes. (Fig. 10.)

Les poussées ascendantes provoquent superficiellement

ment encore d'autres phénomènes remarquables. C'est à elles qu'il faut attribuer une surface ridée, cisaillée en vaguelettes tranchantes ou ce que l'on appelle couramment « *l'eau bouillonnante* », par analogie avec l'eau en ébullition.

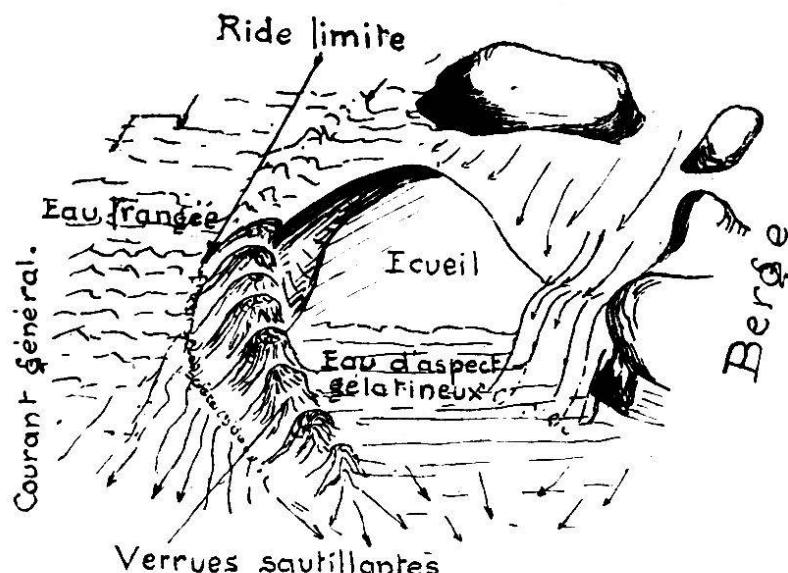


FIG. 10.

Ces phénomènes apparaissent sous de si nombreuses formes qu'il deviendrait oiseux de les analyser individuellement dans cette courte monographie.

10. — PHÉNOMÈNES AUXILIAIRES.

Nous avons envisagé dans ces quelques pages la plus grande partie des particularités de l'écoulement. Il reste néanmoins à côté des trois principaux caractères d'un régime varié, une foule d'autres phénomènes qu'on pourrait appeler auxiliaires. Il me paraît utile de signaler quelques-unes des formes liquides qu'on retrouve dans tout organisme.

DES DIFFÉRENTES VAGUES : Manquant d'un vocabulaire précis, ne l'ayant pas trouvé dans la littérature,

je me suis vu obligé d'introduire certains termes, imageant ces faits propres à l'eau.

J'entends par « *vague d'assaut* », la forme que prend l'eau directement en amont d'un écueil, forme très caractéristique, sorte de volume proéminent encapuchonnant l'obstacle. Ce terme pourrait aussi être remplacé par « *vague de coiffe* », si l'eau submerge complètement l'obstacle qui serait ici un « *galet coiffé* ». Le croquis schématique figure ce phénomène. (Fig. 11.)

Vague d'assaut et vague de coiffe.

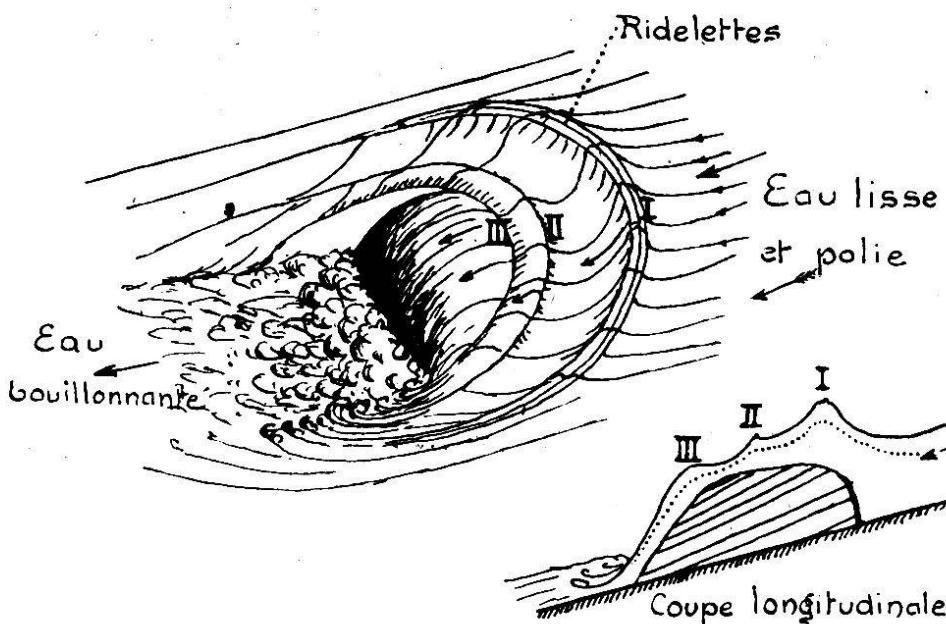


FIG. 11.

La coupe faite longitudinalement représenterait la surface en équilibre mobile résultant de toutes les composantes des forces dont sont animées les molécules. L'interprétation de la forme de cette aire est aisée si l'on suit par la pensée la trajectoire d'une goutte se déplaçant de l'amont vers l'aval. En effet, arrivant de I, elle est chassée vers II par la pression exercée par la face amont de l'écueil sur la masse liquide. En II elle descend puis remonte en III par le fait du frottement

sur la face supérieure de l'écueil. Ainsi se dessinent ces étages de rides plus ou moins prononcées. J'ai voulu me rendre compte de ces divers profils que déterminent des écueils aux vagues de coiffe. Disposant d'une plaque de tôle très mince, je l'ai placée verticalement et longitudinalement sur l'obstacle, en ayant soin de découper le profil du galet afin que l'application fût aussi parfaite que possible à la surface. J'ai pu ainsi obtenir expérimentalement le dessin de la surface. Ayant préalablement enduit la plaque, l'eau circulant, chargée de matériaux sableux très fins, a dessiné en dissolvant partiellement l'enduit des stries trahissant exactement la trajectoire des filets. J'ai entrepris une série d'expériences analogues qui feront l'objet d'un travail spécial.

En amont et en aval de ces vagues de coiffe l'eau change d'aspect. Si le régime est régulier et que la coiffe n'atteigne pas plus de 15 centimètres d'épaisseur, le liquide apparaît poli à l'amont, bouillonnant, gélatineux ou frangé à l'aval, directement sous l'obstacle. Ce sont des caractères remarquables à côté de la conduite sans ordre d'une masse d'eau en vitesse.

Resteraient encore à citer une quantité d'autres phénomènes similaires que je réserverais pour plus tard.

DEUXIÈME PARTIE.

DESCRIPTION ET INTERPRÉTATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LA GORGE DE RUSSILLE DU TORRENT DE LA JOGNE EN GRUYÈRE

Afin d'éclaircir et préciser un peu les notions de ces précédentes pages, je vais entreprendre la description des divers mouvements de l'eau représentés sur la grande

planche de ce présent mémoire. Ce plan levé non sans d'assez grandes difficultés, souvent attaché à la corde dans des rochers de calcaires du Malm très glissant, donne une vision fidèle des mouvements visibles à la surface des eaux. Il a été cependant possible d'analyser les courants à diverses profondeurs, les observations portant sur plusieurs mois de l'été et l'automne 1918 où la Jogne subit une de ses plus fortes crues et par les sécheresses de septembre resta longtemps à de très basses eaux.

La cote au-dessus du lit de la surface représentée est la hauteur moyenne des eaux soit 1 m. 30 à 2 m. 50 suivant la largeur de ce lit. La vitesse d'écoulement est très variable, de 3 m. /sec. en moyenne pour la longueur totale.

Les photographies donnent des détails topographiques qu'il serait difficile de représenter sur le plan, sinon en perspective, les berges étant à peu près verticales ou même surplombantes. La comparaison des profils transversaux levés lors de l'asséchement de la gorge montre qu'ils se rapprochent tous de l'auge classique.

La Jogne avant son entrée dans la gorge de Russille, sciée dans une barre de Malm, coule dans une vaste cuvette morainique. A la sortie du défilé elle retrouve un lit ouvert plus large, la roche rencontrée, calcaire plus tendre, ayant offert moins de résistance à l'érosion.

Les éperons qui avancent dans le lit du torrent sont des couches presque verticales, dirigées sous un angle de 70 à 80 degrés avec l'axe de la vallée pour la zone A L amont et sous 50 à 60 degrés pour la zone A E aval.

A l'entrée dans la gorge, le torrent subit un brusque étranglement. Le lit qui atteignait 11 m. de largeur n'en offre plus que 6 sur l'axe transversal L, portail

amont du cours, photo 3. Le profil longitudinal marque aussi un brusque ressaut provoquant ainsi une chute d'environ deux mètres. L'eau s'engouffre dans cette véritable crevasse avec fracas, donnant naissance à une splendide vague d'assaut s'écrasant brutalement dans l'anfractuosité surcreusée L K. L'influence de ce phénomène est portée jusqu'à 15 m. en aval par un jeu de violents soubresauts amenant continuellement des masses d'air à la surface et donnant ainsi à cette région du canal un aspect bouillonnant.

Cette zone turbulente a été longue à analyser, car plusieurs phénomènes complexes y apparaissent simultanément. J'ai pu cependant formuler une interprétation assez exacte après l'examen de la gorge asséchée. Le croquis fig. 12 représente la coupe longitudinale de 8 m. en amont de L. où naît une vague de couverture

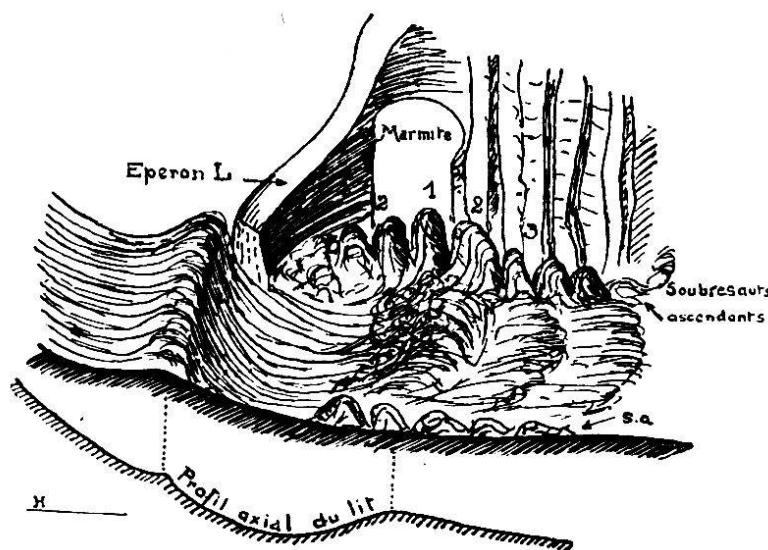


FIG. 12.

provoquée par un gros écueil (photo 2) à l'axe transversal K. Après la vague, l'eau reprend sur quelques mètres un régime assez régulier puis, arrivant sur l'éperon L, littéralement étranglé, chute en donnant naissance à un profil superficiel difficilement explicable. Le

croquis dessiné de la rive droite met ce phénomène en évidence. (Fig. 12.) Accompagnant cette véritable gerbe liquide, une remarquable succession de soubresauts ascendants, cités ci-devant sous le nom de verrues saillantes, dont les sommets s'élèvent à 50 et même 70 centimètres au-dessus du niveau superficiel du grand courant tourbillonnant, appliqués contre la paroi gauche.

Au premier abord, tellement étrange est le phénomène, il semble que cette succession est provoquée par une série de puissants gicleurs chassant l'eau du plancher du lit contre la paroi. En mesurant la hauteur de ces verrues, je me suis rendu compte que celles du milieu, c'est-à-dire vers I, tourbillonnent toujours à une cote

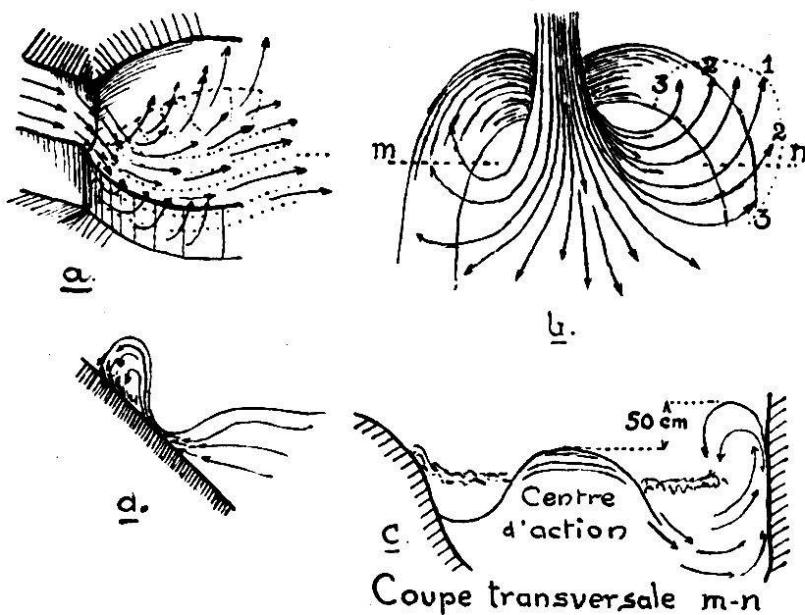


FIG. 13.

supérieure aux autres. En outre la crête des têtes descend à gauche et à droite de I vers 2 et 3 amont et aval. Il s'ensuit que l'hypothèse représentée aux croquis 13^a et 13^b de la réflexion de la chute par le radier du lit ¹,

¹ Un jet d'eau s'écrasant contre une surface ne se réfléchit pas suivant les lois physiques : angle d'incidence égale angle de réflexion.

contre les parois, s'explique aisément. Le lit, directement derrière l'éperon L, s'élargissant légèrement, oblige l'eau à se détendre. Les figures schématiques montrent clairement la marche des molécules. J'ai pu me convaincre de l'exactitude de cette interprétation en suivant attentivement le relief du rocher après la dérivation des eaux.

L'importance de ces soubresauts ascendants, « Wassermühlen, » comme les a dénommés M. l'ingénieur Gruner pour cette région du lit, est beaucoup plus remarquable sur la rive gauche par le fait de la disposition verticale de la berge. Par leur travail intensif ils ont du reste poli la roche et donné naissance à une excavation demi-cylindrique assimilable à une marmite verticale, parce qu'élaborée par un burinage essentiellement ascendant. Sur la rive droite la berge est aussi coiffée d'une succession de verrues sautillantes, qui, quoique expliquées par le même processus, sont plutôt dues à la composition de l'effort d'écrasement horizontal de la veine de vitesse, comme le montre le schéma 13^d, et de la poussée due au mouvement ascendant. Ces forces du reste plus faibles de ce côté, à cause du relief de la section L-K, semblent agir simultanément sur un petit espace, sur une mince mais longue bande longitudinale. Elles expliquent la forme si originale de ces verrues sautillantes.

Passant de cette zone complexe où à l'amont et à l'aval de K naissent sur la rive gauche deux tourbillons de moule qui tournant dans de véritables marmites parfaitement polies et striées cè qui a été observé à l'assèchement du lit, un phénomène extraordinaire apparaît entre les axes L et K. Là, une vague stationnaire, sorte de volume cylindrique longitudinal, sectionné par un cône d'axe horizontal dont le sommet serait à quelques décimètres à l'intérieur du versant

gauche, a été inexplicable jusqu'au moment où, analysant le radier, j'ai remarqué, comme faisant à peu près la projection orthogonale de la vague, une contre-pente rocheuse dans le lit. Nous avons affaire ici à un de ces phénomènes d'érosion particuliers, analogues au surcreusement glaciaire, tels qu'ils ont été découverts pour la première fois par mon père¹ dans le canyon du Rhône à Génissiat en 1909 et par M. Kilian² lors des travaux sur le Fier en 1918. L'inclinaison suivant le sens amont-aval est égale approximativement à un angle de 15 degrés exprimé par la tangente 0 m. 70 sur 2 m. 50. Il ressort de là que la forme prise par l'eau courante surmontant une telle contre-pente doit nécessairement être celle précitée. (Fig. 14.) L'énergie cinétique des molécules

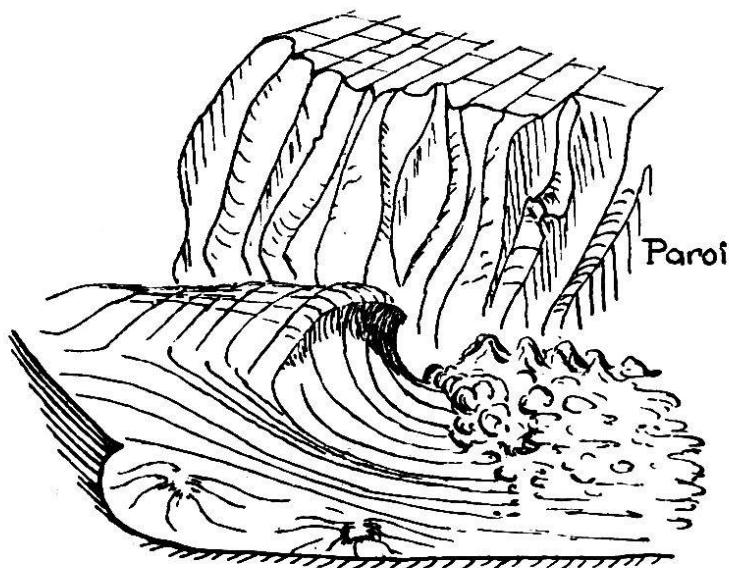


FIG. 14.

allant en effet en diminuant jusqu'à zéro, puisqu'elles sont obligées de suivre une route ascendante, laisse la veine se déchirer à l'extrémité aval de la contre-pente,

¹ MAURICE LUGEON : *Etude géologique sur le projet de barrage du Haut-Rhône français*. Mémoires de la Société géologique de France. Quatrième série. Tome II, mémoire 8.

² V. KILIAN : Sur l'existence de contre-pentes dans le profil en long du Fier, près Seyssel (Ain, Haute-Savoie), C.-R. sommaire Soc. Géol. de France, 8 avril 1918.

l'action seule de la pesanteur entrant alors en jeu. Cette nappe d'eau concave vers le ciel affecte la forme d'une surface conique et non cylindrique parce que la contre-pente est légèrement gauchie.

Suivant le cours des eaux, entre les axes K et I sur la rive droite naissent deux larges soubresauts à période régulière, amenant sans discontinuité une masse de bulles d'air à la surface. L'air englouti bien en amont est ainsi transporté et apparaît dans des zones relativement calmes.

Les encoches entre I et H et H et G donnent naissance à des successions, des chaînes de petits tourbillons absorbants. Leur sens de rotation est évidemment dirigé de la zone de grande vitesse dans celle de vitesse moindre.

L'éperon de gauche G, dont l'arête est inclinée, renversée contre le versant, forme un obstacle important au courant général qui, tendant déjà à s'uniformiser, provoque un étranglement de la veine, l'eau ayant eu le temps de se détendre entre H et G. C'est là que naissent ces remarquables tourbillons à axe horizontal mentionnés plus haut.

Si l'eau animée d'une certaine vitesse fuit les obs-

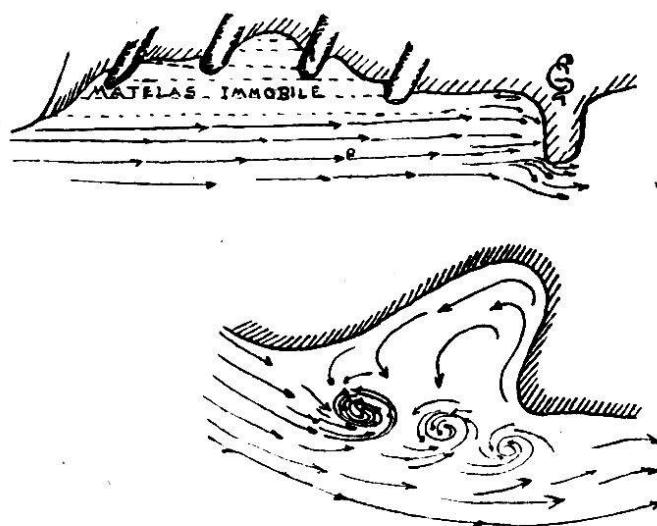


FIG. 15.

tacles qui ne sont pas directement placés sur sa trajectoire, comme le montre la fig. 15, c'est-à-dire qu'elle a tendance à se maintenir sur une trajectoire rectiligne par la naissance d'un matelas adhérant à la paroi, ici l'éperon G avance juste suffisamment pour mordre le courant général. L'écrasement qui en résulte n'est pas considérable, mais suffisant pour provoquer un vide à l'aval qui se remplit immédiatement par des courants de sens contraire se formant dans la poche G-F gauche. La veine superficielle, inclinée longitudinalement, rencontrant sous un angle de 60 degrés l'arête rocheuse, inclinée elle aussi, s'engouffre dans l'eau plus calme de la poche, et, par la surface de frottement entre ces deux eaux de vitesse différente, l'eau s'enroule à la manière d'un ressort spiral en des cylindres tournant, avançant rapidement vers l'aval jusqu'à leur dissociation. Ce phénomène est d'une remarquable netteté, car l'eau de vitesse s'engouffrant entraîne de l'air qui trahit admirablement par ses bulles les cylindres que l'on voit ainsi aisément tourner. Les trois mètres qui séparent les éperons G et F sont insuffisants pour amortir par le frottement la vitesse de l'eau. Elle vient alors s'écraser sur l'éperon F, provoquant un amoncellement formé de verrues sautillantes. La marche du phénomène est rendue beaucoup plus complexe encore par l'apparition d'un petit tourbillon absorbant superficiel au-dessus des tourbillons horizontaux. Il s'explique par un faisceau de filets à vitesse très grande, chassant directement dans la poche. J'ajoute que cette poche est sollicitée à de continues convulsions, sortes de trépidations irrégulières, balancements de la surface autour d'axes de direction très variable.

A partir de l'axe F le régime d'écoulement se régularise, le canyon offrant une section plus régulière et rectiligne. Sur le plan sont disséminés quelques gros

tourbillons absorbants accompagnés d'importants soubresauts ascendants. Ils apparaissent irrégulièrement et suivent des trajectoires très diverses. Nous avons affaire ici à une zone (F D) où l'eau tout en tendant à un régime régulier est soumise à des variations de débit sollicitées par la zone turbulente amont. On remarque en effet dans les gorges des torrents de montagne de ces sortes de seiches longitudinales, vagues voyageantes, provoquées par un concours de phénomènes hydrologiques complexes. Il suffit de quelques fractions de mètre cube circulant plus ou moins rapidement dans telle partie du lit pour qu'incontinent les régions avoisinantes soient le siège d'un phénomène particulier. L'analyse du lit asséché n'ayant montré aucune particularité saillante dans les profils transversaux de la zone précitée, l'interprétation des tourbillons mentionnés ne peut que devenir hypothétique. Après l'examen de cas similaires dans d'autres organismes à puissant débit, j'imagine qu'entre F et D se forment simplement des bandes de friction, anomalies résultant de la variation du frottement, lui-même lié intimement aux variations de débit. Au reste les matelas aqueux qui tapissent les parois en sont une raison primordiale. Les tourbillons naissent en effet plus fréquemment dans les bords qu'au centre d'action. Ils sont en outre tous dextrorum dans la demi-section longitudinale droite et sinistrorum dans l'autre. Quant à la sinuosité de la trajectoire d'entraînement des masses tourbillonnantes, elle se laisse expliquer sans difficultés.

Les figures diverses que l'on discerne ne demandent pas d'interprétation. Pour être complet il faut cependant signaler que les deux grands soubresauts ascendants entre E et D gauche ont une périodicité quasi parfaite, quoique contrariée évidemment par les variations de débit. Ils naissent d'une veine de fond glissant

dans une échancrure longitudinale, demi-cylindre horizontal, creusé dans la roche entre F et E • rive gauche. Cette échancrure est due à un processus d'érosion non mentionné dans la littérature.

L'amoncellement sur l'axe D., éperon rive gauche, a sa cause mentionnée.

Arrivé sur l'axe C, le courant général, sans subir de notable variation de vitesse, subit par contre une perte de charge considérable. Elle est compréhensible puisque le lit des 2 m. 50 de profondeur qu'il avait en amont, n'en a plus que 1 à 2 dans les grandes poches C. B et B A. Là, l'eau qui semble séjourner est d'apparence gélatineuse et verte. De vagues et vastes soubresauts ascendants sillonnent la surface de rides circulaires se déformant bientôt en sortes d'ellipses parce qu'entraînées vers l'aval. L'apparition de ces pulsations à périodes régulières, de 10 en 10 secondes, est localisée là où le courant est de vitesse maxima.

Ces deux poches se remplissent fréquemment de galets quand le niveau des eaux baisse après la crue. Ils y séjournent jusqu'à la prochaine hausse, tout en se disséminant.

L'OBSTACLE A.

Le plus merveilleux phénomène de la gorge de Russille est certainement la vague coexistant avec les tourbillons, provoqués par ce gros écueil A. L'eau qui suit là des trajectoires simples et nombreuses met cet admirable exemple à l'appui des théories sur les tourbillons de moule, les tourbillons descendants, les soubresauts, tous phénomènes y apparaissant simultanément.

Avant de former la vague de coiffe couronnant l'écueil, l'eau est dans une sorte d'indécision moléculaire. L'isotropie fait que les molécules se trient, se divisent pour se joindre aux deux veines coulant à gauche et à droite de l'obstacle. Celles d'entre elles qui n'ont pu suivre

ces trajectoires buttent sur l'obstacle et forment la coiffe s'élevant à quelques décimètres au-dessus du niveau amont. Cette vague de coiffe se déverse symétriquement sur les deux veines.

La demi-section gauche entre les axes A et B est le siège d'un puissant phénomène giratoire. Le relief du lit du canyon accuse au droit de la face aval du bloc A, une profonde excavation calotique où l'eau vient s'engouffrer par un canal demi-cylindrique incliné, élaboré dans l'étranglement formé par le bloc et la berge gauche. La poche A B offre tout spécialement une forme favorable à l'accélération de la vitesse d'écoulement. La paroi polie est incurvée en sorte que la trajectoire du maximum de vitesse, le centre d'action, lui soit rigoureusement parallèle. L'eau glisse très facilement comme s'engouffrant dans un entonnoir et acquiert rapidement un maximum de vitesse dans le canal cylindrique. Le volume des eaux passant par cette échancrure est en outre considérable.

Avant d'arriver dans la poche surcreusée à l'aval de l'obstacle, la veine se divise en deux veines qui sont parfaitement délimitées. Cette séparation s'explique par le relief même du support, surcreusement au droit de l'obstacle et palier horizontal vers l'aval. Les filets qui étaient le plus près en contact avec la paroi gauche vont se projeter vers l'aval ; ceux qui étaient le plus rapprochés de l'obstacle, appartenant à la veine de droite, vont s'engouffrer dans l'excavation et tourbillonner énergiquement sur eux-mêmes. Ce puissant tourbillon dextrorum ainsi formé est un admirable exemple de tourbillon de moule. L'eau étant dirigée dans le canal, puis forcée dans l'excavation, suit une trajectoire spirale centripète entraînant dans son violent mouvement toutes les molécules qui auraient tendance à stagner. La face aval de l'écueil perpétuellement inondée jus-

qu'à une certaine hauteur par un champ de soubresauts ascendants, provoqués par ce gros tourbillon. En effet, l'eau tourbillonnante descendante, animée d'une grande énergie, rencontrant le seuil du lit, se réfléchit vers le haut, vers les zones de moindre résistance, celles qui justement sont sous la face de l'écueil. Du reste un vide relatif appelle constamment et avec d'autant plus de vigueur ces soubresauts à se localiser.

Le déversement de la vague de coiffe rend le phénomène un peu plus complexe, parce qu'en s'écrasant sur la veine, il donne naissance à un deuxième tourbillon non moins important qui facilite la giration du premier. Ce deuxième tourbillon avorte assez fréquemment lorsque les molécules de la vague de coiffe sont entraînées par la veine de grande vitesse.

La succession de gros tourbillons absorbants, type pur, qui naît de la deuxième veine, celle qui n'entre pas en giration dans la marmite, s'explique aisément par la bande de friction limitant le contre-courant apparaissant à l'aval de l'arête A'. Ces tourbillons sont les plus puissants de la gorge, la vitesse des deux courants qui leur donnent existence étant l'une très grande, l'autre négative, puisque coulant en sens inverse. À peine le tourbillon est-il formé (on a grand'peine à l'identifier, tant est rapide sa formation) qu'il se détache, entraîné, pour suivre une trajectoire l'amenant sur l'axe du canyon.

De prime abord on est tenté de croire que les tourbillons entre B et C se forment incessamment au lieu même où on les perçoit : mais ce n'est pas le cas, ils ne se constituent bien qu'en un seul point et sont immédiatement entraînés. C'est par l'extrême rapidité du processus que l'on en voit toute une série. Leur vitesse giratoire est telle que l'inertie entrant en cause n'est vaincue par le frottement que bien en aval. Par de hautes

eaux il n'était pas rare de les voir descendre le canyon jusqu'à 15 et 17 mètres de leur nid. Sur leur trajectoire d'une remarquable fixité, le mouvement spiral est souvent favorisé par des bandes de friction occasionnées par les contre-courants dus aux berges.

Ces puissantes manifestations sont impressionnantes à analyser.

La veine coulant dans le sillon à droite de l'obstacle A, n'offre qu'un intérêt secondaire. L'eau n'acquiert pas là une grande énergie. Elle s'écoule rapidement, affectant une forme superficielle cisaillée jusqu'à la rencontre de la trajectoire des tourbillons. La Joggne n'a point érodé de ce côté de sillon bien net, la nature du rocher, couches très inégalement disposées, ne s'y prêtant pas favorablement. La vague de coiffe se déverse sur la veine sans donner lieu à quelque fait bien précis.

Il ne faudrait pas croire de par cette esquisse que le processus d'écoulement autour de l'axe A soit d'une absolue constance. Rien n'est plus capricieux qu'un tourbillon. Si son individualité est parfois remarquable au sein d'un cours d'eau, d'autres fois son existence est douteuse. Ainsi il suffisait que le débit du torrent varie dans des limites étroites pour qu'à la hausse des eaux, les tourbillons de la demi-veine aval quittent leur trajectoire et buttent la rive droite, tandis qu'à l'étiage on n'apercevait qu'irrégulièrement les tourbillons de moule.

Arrivant sur l'axe C, où un défilé contracte légèrement la nappe courante, un nouveau gros tourbillon absorbant, type pur, siège avec constance directement à l'aval de la coupure occasionnée dans le lit par les deux éperons tranchants en regard. Son gîte étant relativement accessible, j'ai pu sans appareil d'expérience bien compliqué en mesurer les diverses coordonnées déjà mentionnées. La pulsation régulière de cette figure

aqueuse fait qu'elle se détache périodiquement au si, entraînée par le courant général. Cependant l'énergie giratoire n'étant manifestement pas puissante, ce tourbillon expire facilement de 3 à 5 mètres en aval.

Sur la rive gauche, un écueil donne la vie à une chaîne de petits tourbillons de moule, entraînés jusque dans la poche C D gauche, pour s'y dissocier et réapparaître en tourbillons absorbants du second processus. La grande marmite C D offre une série de phénomènes de moindre intérêt.

La Jagne coulant alors dans un lit large n'est plus engagée par le relief à prendre des formes d'écoulement spécialement intéressants. En aval de l'axe E, où un double écueil engendre une double grappe de tourbillons absorbants s'expliquant aisément, le torrent retrouve son lit ouvert, caillouteux et très encombré. La galerie de dérivation débouchant en cet endroit, les observations prenaient vers l'aval moins d'intérêt.

CONCLUSIONS.

On peut se rendre quelque peu compte par l'exposé de l'écoulement dans ce tronçon de gorge, combien sont nombreux et complexes les phénomènes qui appartiennent à l'écoulement des cours d'eau. Nous avons affaire ici, il est vrai, à un exemple tout spécialement remarquable, car sur ces 80 mètres de longueur, la Jagne est la synthèse générale de tous les phénomènes caractéristiques aux torrents et de ceux de presque tous les organismes fluviaux. J'ai parcouru de nombreux cours d'eau de tous genres en Suisse et à l'étranger, mais n'ai rencontré nulle part de si bel exemple, rendu d'autant plus captivant à l'étude puisque les eaux devaient y disparaître.

Le processus général d'écoulement des cours d'eau se résume donc en un nombre restreint de phénomènes

très individuels, réalisables expérimentalement et qui se combinent tout naturellement. Tous les phénomènes, d'ordre quelconque, ont leur cause première toujours rattachée aux deux classes essentielles, savoir : 1^o *écoulement sans perturbations, régime permanent varié*, 2^o *écoulement avec perturbations, régime varié, varié*. A cette seconde classe appartiennent les phénomènes décrits, soit : 1^o *Tourbillon absorbant descendant, spiral centripète, sinistrorum ou dextrorum, sédentaire et migrateur*. 2^o *Tourbillon à axe vertical spiral ou pas, dit tourbillon de moule exclusivement sédentaire*. 3^o *Tourbillon à giration spirale ou pas, autour d'un axe horizontal*. 4^o *Soubresauts ascendants dénommés s'ils sont vastes : convulsions ascendantes, s'ils sont petits : verrues sautillantes*. 5^o *Vagues de coiffe et d'assaut*.

Indépendamment de ces faits précis, les trajectoires moléculaires de l'écoulement affectent, quoique avec certaines restrictions, toutes les formes d'inclinaison imaginables. Mais il est à noter qu'il n'existe pas de tourbillons ascendants spiraux centripètes en analogie avec les tourbillons descendants.

Je fais volontairement abstraction dans cette étude de tout ce qui a trait à l'érosion.

Puisse ce petit travail sans prétention aucune, contribuer tant soit peu à l'étude si captivante, mais malheureusement trop délaissée, des beaux phénomènes dont la Nature a doté les cours d'eau.

