

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

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 8 (1913-1919)

Heft: 2: Contribution à l'étude du cours de la Sarine et de sa puissance
d'alluvionnement

Artikel: Contribution à l'étude du cours de la Sarine et de sa puissance
d'alluvionnement

Autor: Leclère, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-306987>

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: 23.01.2026

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

MÉMOIRES
DE LA
SOCIÉTÉ FRIBOURGEOISE
DES
SCIENCES NATURELLES



MITTEILUNGEN
DER
NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT
IN
FREIBURG (SCHWEIZ)



CONTRIBUTION
A L'ÉTUDE
DU COURS DE LA SARINE
ET DE
SA PUISSANCE D'ALLUVIONNEMENT

PAR
F. LECLÈRE
DOCTEUR ÈS-SCIENCES



FRIBOURG (SUISSE)
IMPRIMERIE FRAGNIÈRE FRÈRES

—
1919

Table des matières

	Pages
Préface	93
Introduction	97
CHAPITRE I : Cadre de ce Travail	99
CHAPITRE II : Eléments du travail d'un fleuve	106
CHAPITRE III : Travail d'un fleuve	117
CHAPITRE IV : Le lac de Pérolles	132
Conclusion	136
Appendice	138
Bibliographie	151

PRÉFACE

La dissertation de M. François Leclère, qui a valu à son auteur une des mentions les plus honorables, a vu le jour à l'Institut de géographie de notre Faculté des Sciences. M. François Leclère arrivait à son doctorat muni des disciplines pratiques puisées dans les laboratoires voisins de Physique et de Chimie, et c'est grâce en particulier à son habitude des analyses précises en usage dans ces deux laboratoires qu'il a pu mener à bien certaines recherches délicates sur la teneur des alluvions, certains dosages par pesée des résidus secs déposés au fond d'un creuset, qui donnent à sa dissertation une haute valeur, et la rendent utilisable par exemple pour ceux des services des forces hydro-électriques chargés de supputer la durée probable d'un réservoir ou d'un bassin de colmatage.

La Sarine a toujours fait l'objet de prédilection des recherches des étudiants de l'Institut Géographique, dont les préoccupations régionales, depuis que M. Jean Brunhes en fut le premier directeur, ne se sont jamais démenties. On n'a pas oublié la dissertation de M. Cesare Calciati, une des plus remarquables qui aient vu le jour, sur les méandres de la Sarine, où il constatait et cherchait à expliquer la prédominance des méandres sur la rive droite du cours d'eau ; après M. le Dr Calciati, M. le Dr Gemnetti était chargé par moi, dans une dissertation qui n'a malheureusement pas été imprimée encore, par suite des circonstances, d'établir la courbe des débits mois par mois en année moyenne et dans les années d'extrême pénurie, ce qui était une contribution au dossier que nos techniciens sont en train d'établir en prévision de l'établissement des grandes accumulations d'eau de la Jogne et de la Sarine à Rossens.

La dissertation de M. Fr. Leclère est comme la contrepartie de celle de M. C. Calciati : celle-ci était consacrée à l'étude de l'érosion de la Sarine, c'est-à-dire de l'enlèvement de matériaux solides sur les rives et sur le fond, celle-là a pour objet l'étude des phénomènes de transport et de dépôt de ces matières en suspension, de ce qu'on a appelé d'un mot expressif les « débits solides », c'est-à-dire l'alluvionnement, ce que les ingénieurs hydrauliciens dénomment le colmatage.

Ce qui justifiait cette étude en un pareil moment, c'est un fait nouveau dans l'histoire de la Sarine, à savoir le relèvement, en 1910, de l'ancien barrage de Ritter datant de 1871. Le mur de barrage fut relevé de 2 mètres 50, ce qui correspondait, étant donné que le remous atteint jusqu'à 2500 mètres en amont, à une contenance supplémentaire de 400.000^{m³}. Ritter avait décrit, non sans intérêt, dans une publication datant de 1902, certains faits d'érosion qu'il avait observés, lesquels furent repris en des pages restées classiques par M. Jean Brunhes, qui en montra la portée générale ; il essaya de supputer, par un calcul qui fut mis en défaut par les faits, la durée probable du « lac de Pérolles » créé par lui à l'usage des Fribourgeois. La surélévation récente du barrage de la Maigrange justifiait une nouvelle étude à la fois de Géographie physique (Morphologie) et de géographie appliquée aux besoins de nos industries hydro-électriques. et c'est cette étude qu'a entreprise, non sans succès, M. François Leclère.

En quoi a-t-il fait œuvre originale, c'est ce que la lecture des pages qui suivent apprendra mieux que cette courte mise au point. Mais comme toute dissertation inaugurale doit ou devrait s'appuyer sur un ensemble de travaux positifs qui demeurent acquis en dépit de ce que l'on peut penser de la valeur définitive des conclusions, M. Fr. Leclère a étayé son étude théorique sur des travaux de laboratoire qui sont garants de sa conscience ; d'abord ses analyses et ses dosages, en volume et en poids, qui, pour n'avoir pas tous été reproduits à l'impression, n'en forment pas moins un

dossier important ; ensuite, un levé du lit de la Sarine en amont du barrage à 1 : 5000, réduit à 1/10.000, figurant les grèves, les îles, les bancs de sable et de limon, dont la comparaison avec le plan de M. Aebi, à 1 : 5000, et datant de 1905, fait ressortir du premier coup d'œil les différences dans l'emplacement des atterrissements, le déplacement des chenaux, les variations du fil de l'eau ; enfin un relief du cours de la Sarine dans Fribourg, à 1 : 10.000 pour les longueurs, 1 : 6000 pour les hauteurs, relief à gradins où l'on lit, pour ainsi dire, le creusement du cañon et sa profondeur plus grande dans la traversée de Fribourg, l'accentuation du creux des méandres, l'érosion sur la rive concave et le dépôt des alluvions sur le bord convexe, l'amincissement et l'effilement des promontoires en saillie qui séparent deux méandres consécutifs sur la même rive. Dans le lit même de la rivière les courbes de 10 en 10 mètres signalent, par l'espacement ou le rapprochement des gradins, la pente accrue ou diminuée. Une photographie de ce relief, qui aura des répliques — méandres de l'Aar à Bremgarten en dessous de Berne, — est jointe au texte de M. Leclère et en rend plus facile la compréhension. Ces études seront continuées, et sans doute par l'auteur lui-même, et par ses successeurs à l'Institut géographique, dans le même esprit de conscience et d'attention prêtée aux faits positifs qui caractérise la méthode géographique actuelle, aidée de tous les moyens matériels que mettent à la disposition de la géographie les sciences auxiliaires telle que la topographie, la géodésie, et même, dans une certaine mesure, la physique et la chimie.

8 décembre 1918.

PAUL GIRARDIN.

INTRODUCTION

L'idée d'essayer de faire un travail sur la mécanique fluviale, appliquée à la Sarine, m'est venue d'une façon assez naturelle. Je suivais les cours de géographie physique de M. le professeur Girardin ; d'autre part je parcourais souvent la partie navigable de la rivière en amont du barrage. Insensiblement, je fus amené à appliquer les théories exposées à l'Université, au cours d'eau que je voyais presque journellement.

Ce qui frappe, à première vue, le visiteur voyant Fribourg pour la première fois, c'est l'encaissement de la Sarine dessinant des méandres profonds. L'encaissement de la rivière dans son lit de molasse est considérable ; il atteint parfois une centaine de mètres, au Breitfeld, par exemple, près de la route de Marly. M. Calciati a fait, de ces méandres encaissés, le sujet de sa thèse de doctorat. C'est évidemment la caractéristique du cours d'eau, mais un autre phénomène, l'alluvionnement, devenu tangible pour ainsi dire depuis la construction du barrage, tout en étant moins apparent, n'en est pas moins très intéressant. Depuis l'érection du barrage, tous les matériaux charriés par la Sarine : galets, cailloutis, sable et limon, s'amassent régulièrement dans le lac artificiel de Pérolles, posant ainsi un grave problème aux techniciens chargés de l'entretien de l'ouvrage. C'est principalement l'étude de cet alluvionnement et de ses variations, qui constitue le but de ce travail.

L'alluvionnement étant, avec l'érosion, le résultat du travail d'un cours d'eau, il est nécessaire d'étudier le travail de la rivière considérée, et pour cela, de se faire une idée de la force, et de la vitesse qu'elle possède.

Après les travaux remarquables de Du Boys, de M. Ferdinand Wang et de bien d'autres, il était difficile de faire œuvre nouvelle en hydraulique fluviale. Le but de ce travail est plus modeste ; c'est une étude aussi précise que possible de l'application des principales lois de la circulation de l'eau courante à la Sarine.

J'exposerai le résultat de mes expériences, après quelques considérations de mécanique fluviale aussi succinctes que possible.

Une comparaison cartographique sera établie entre le lac de Pérolles de 1905 et celui de 1917, et un essai d'explication sera donné du changement de forme constaté dans les bancs de sable. Enfin il sera parlé de l'éboulement du 31 mai 1917 et de ses conséquences.

Je tiens à exprimer, en terminant, ma gratitude envers MM. les professeurs de la Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg, dont j'ai suivi les cours, et en particulier à M. le professeur Girardin, qui m'a conseillé de faire ce travail.

CHAPITRE I.

Description du cadre de ce travail.

Afin de bien faire saisir les faits auxquels il sera fait ici allusion, ainsi que les considérations qui s'y rapportent et les conclusions qui découlent de ces dernières, il ne m'a pas semblé inutile de faire précéder les chapitres que l'on va lire, de la description du cadre dans lequel se déroulent les phénomènes qui y sont étudiés. Je décrirai ici brièvement la portion du cours de la Sarine qui nous intéresse particulièrement ; ceci fait, je retracerai l'histoire des modifications que cette rivière a subies du fait de la construction d'un barrage à Fribourg, ouvrage destiné à alimenter les turbines des installations hydro-électriques de cette ville.

I. Description du cours de la Sarine.

La Sarine prend sa source dans le massif des Diablerets, qui fait lui-même partie de la chaîne qui borde au Nord la vallée du Rhône. Elle sort du glacier de Zanfleuron, limité à l'Ouest par l'arête du Diableret (3222 m.), au nord par l'Oldenhorn ou Becca d'Audon (3126 m.), et au sud par la Tour St-Martin, à une altitude de 2350 mètres environ au-dessus du niveau de la mer. Elle se jette dans l'Aar à Wileroltigen, à l'altitude de 450 m. Présentant un développement de 120 km. environ, la Sarine possède une pente générale de 1,5 0/0. Ce chiffre n'exprime que la pente moyenne générale de la rivière ; cette pente très forte pendant la première partie du cours de la Sarine, décroît très rapidement. De sa source jusqu'à Gsteig, il

y a une différence de niveau de 1150 m. pour un parcours de 10 km. environ, ce qui donne une pente de 11,5 ‰, alors que la pente de la rivière sur le plateau n'est que de 0,5 ‰.

Il est inutile de faire ici l'énumération des lieux arrosés par la Sarine ; on trouvera la description détaillée du cours de la rivière dans le volume IV du Dictionnaire géographique de la Suisse (page 420 dans l'édition de 1906).

Je me propose plutôt d'essayer de décrire la physiologie de la rivière, dans la partie de son cours qui nous intéresse plus spécialement ici, dans la traversée du plateau aux environs de Fribourg. Pour faire cette description, je recourrai au remarquable travail de M. Cesare Calciati : « Les méandres de la Sarine. Le travail de l'eau dans les méandres encaissés ». Comme je l'ai déjà fait ressortir dans l'introduction, l'encaissement de la rivière d'une part, et les nombreux méandres qu'elle décrit d'autre part, sont les deux traits caractéristiques de la physiologie de la Sarine particulièrement aux environs de Fribourg, où l'encaissement du cours d'eau dans son lit de molasse est maximum ; il équivaut à une différence de niveau d'une centaine de mètres, au Breitfeld par exemple. La Sarine est une rivière jeune au point de vue géologique, car : premièrement les flancs de la vallée qu'elle s'est creusée sont encore très raides ; deuxièmement elle a une très faible influence sur la région du plateau qu'elle parcourt ; enfin son courant est rapide. Nous verrons en effet plus loin que la vitesse du cours d'eau est forte, sauf évidemment lorsqu'il a été aménagé au point de vue hydro-électrique et pourvu d'un barrage qui, nous le verrons plus tard, exerce une action retardatrice et progressive sur la vitesse de la rivière considérée.

L'aspect du cadre où se déroule la Sarine nous étant connu, voyons comment elle y coule. Faisant abstraction du paysage extérieur qui empêche toute illusion, on a peine à reconnaître la même rivière dans la Sarine à l'époque de la fonte des neiges ou après un orage, large, impétueuse.

roulant rapidement des flots d'un jaune tirant parfois sur le brun, et dans la Sarine des jours de bise de l'automne, maigre cours d'eau coulant paresseusement et d'une rare transparence. D'après M. C. Calciati « Le régime général annuel de la Sarine se traduirait normalement par une période d'étiage au commencement de l'hiver et une période de crue au commencement de l'été. En chiffres ronds, elle a 200 jours d'étiage et 100 jours de crue ; le nombre restant appartient au module ». Puis il ajoute : « Cependant la Sarine étant surtout une rivière de montagne, abstraction faite de quelques affluents du Plateau sur sa partie inférieure, est loin d'offrir une régularité constante ; elle se rapprocherait plutôt d'un régime torrentiel. » Ce régime torrentiel est la caractéristique du débit de la Sarine ; bien plus, ce caractère torrentiel va s'accroissant. Les chiffres mesurant le débit de la rivière diminuent régulièrement depuis 1869 à nos jours ; nous verrons pourquoi plus loin. Par contre les 1 440 000 000 mètres cubes d'eau qui tombent par an sur le bassin de réception du cours d'eau produisent des crues abondantes, telles que celle qui eut lieu au commencement du mois de septembre 1908 qui est portée sur les graphiques de débit de l'Entreprise Thusy-Hauterive sous la forme d'une pointe de 300 m³ (300. m³ seulement, car à Thusy, la Sarine n'a pas encore reçu le tribut de la Singine et de la Gérine). Lors de la construction du barrage de Fribourg, l'ingénieur Ritter écrit à propos des alternatives qui s'offraient à lui : « Deux systèmes se présentaient pour mettre en œuvre les forces hydrauliques de la Sarine : 1^o barrer hardiment la rivière réputée dangereuse, puisqu'en quelques heures ses crues subites en portent le débit de 10 ou 20 m³ à 1000 ou 1200 m³ par seconde... » Bien plus, il ajoute en note : « J'avais prévu 1000 m³ dans mes calculs comme débit maximum, mais on se récria et les experts appelés pour disséquer mes projets fixèrent à 1300 m³-seconde le volume des hautes eaux de la Sarine en cas de crue exceptionnelle. »

Nous pouvons ainsi résumer ces quelques considérations : aux environs de Fribourg, la Sarine est une rivière rapide de caractère torrentiel, coulant au fond de méandres profondément encaissés.

II. Histoire du barrage de Fribourg.

Le meilleur document se rapportant à ce sujet est l'extrait du tome XXX du Bulletin de la Société Neuchâtoise des Sciences Naturelles, Séance du 11 avril 1902. Il a pour titre « Observations et particularités techniques, géologiques et hydrologiques relatives à l'établissement du grand barrage de la Sarine à Fribourg par G. Ritter, ingénieur civil. »

Dès 1867, certains notables de Fribourg chargèrent cet ingénieur d'élaborer un projet d'alimentation de la ville en eau potable sous pression à domicile. En mai 1869, une convention passée entre Ritter et la ville consacrait la création d'une société chargée de l'exploitation d'un projet dit des *Eaux et Forêts* comprenant la construction d'un barrage de 10 m. de hauteur destiné à utiliser intégralement la force de la Sarine, au point où il serait construit. L'installation des machines utilisant cette force, l'élévation d'eau dans un réservoir, de grande capacité, la création de filtres assurant l'alimentation de la ville en eau potable, etc..., etc... Le barrage fut construit en 1870 ; sa longueur est de 195 mètres y compris les fondations latérales non apparentes ; sa largeur de fondation varie suivant la profondeur de 14 à 26 m. ; au-dessus des fondations sa largeur varie de 8 à 10 m. ; la couronne supérieure a 6 m. de largeur, l'eau passe par-dessus lorsque la tranchée de trop-plein, offrant cependant une largeur minima de 30 mètres, ne suffit pas à l'écoulement des eaux. La hauteur du barrage est partout supérieure à 13 m. ; il a la forme d'un arc de cercle appuyé contre les deux rives ; son volume fut estimé à 33 000 m³.

En 1872, le remplissage du lac de Pérolles mit le

lit de la Sarine à sec en aval de l'ouvrage pendant 18 heures. Le volume du lac artificiel ainsi formé est donc pour un débit de 15 m^3 par seconde :

$$V = 18.60.60.15 = 972.000 \text{ m}^3 \text{ ou environ } 1.000.000 \text{ m}^3.$$

Ritter a calculé que le lac de Pérolles ainsi formé, long de 2500 m., exerce une pression de 15 millions de kilogrammes horizontalement sur le barrage.

Lors de la construction de l'ouvrage on s'attendait bien à voir le lac se combler peu à peu, mais cependant pas aussi rapidement que ce fut le cas ; en effet la Sarine dont le lit n'est nulle part bien résistant, charrie, lors de ses crues, des masses alluvionnaires considérables. Ritter prévoyant le comblement, avait installé, dans l'épaisseur même du barrage, une chasse destinée à opérer de temps en temps la vidange du lac ; à ce sujet il écrit : « Malheureusement mes successeurs dans la direction de l'entreprise négligèrent complètement, malgré mes avis réitérés, de faire fonctionner assez souvent le vannage de fond du barrage et de curage du lac, et après deux ou trois années de négligence, les fortes crues amenèrent force bois et débris de toute espèce contre ledit vannage, protégé cependant par un puissant grillage formé de rails de chemin de fer, si bien que le déblaiement de ces matériaux enchevêtrés les uns dans les autres devint impossible et coûta même la vie au scaphandrier que l'on y envoya trop tardivement tenter l'aventure du déblaiement. » Le curage du lac par dragues se montra inefficace et il a fallu se résoudre à exhausser le barrage.

On doit à l'ingénieur Maurer le remplacement par la transmission électrique des câbles télodynamiques qui actionnaient depuis le barrage les usines du plateau de Pérolles et en général la modernisation des installations de la Société des *Eaux et Forêts*.

Il a été creusé, sous Montorge, un tunnel de 300 mètres de long qui alimente l'usine de l'Oelberg, fournissant une chute de 20 m., capable de donner une force maxima.

de 6000 HP. Le canal de décharge a été muni d'un système régulateur au moyen de vannes.

En 1880 on construisit une échelle à poissons au barrage, afin de permettre aux saumons qui remontent la Sarine de franchir le barrage. En 1903, Ritter écrivait : « cette échelle est aujourd'hui presque détruite ensuite de la formation rapide de marmites dans chaque gradin. Quelques-unes de ces marmites atteignent plus de 1 m. de diamètre et des profondeurs allant jusqu'à plus de 3 m. Cela prouve avec quelle rapidité l'eau peut user la molasse et vient à l'encontre de l'opinion de ceux qui se figurent qu'il faut des centaines et des milliers de siècles pour former des ravins et des vallons d'érosion comme ceux de la Sarine ». Ces « marmites de la Maigrauge » sont devenues célèbres dans les annales de la géographie physique depuis que M. Jean Brunhes a attiré l'attention sur ces formations.

Il me reste à retracer brièvement l'histoire de l'alimentation de Fribourg en eau potable sous pression ; pour cela je ne puis mieux faire que de renvoyer à une brochure publiée en 1911 par l'ingénieur Maurer. Ritter avait découvert, lors des sondages qu'il avait fait exécuter avant la construction du barrage, une nappe d'eau limpide et fraîche ; un puits métallique plongeant jusqu'à la nappe capta l'eau qui était refoulée vers le réservoir du Guintzet par une pompe à double effet actionnée par une turbine de 300 HP. à la Maigrauge. Mais « l'eau Ritter » devint peu à peu ferrugineuse et impropre à l'alimentation. Provisoirement on se servit de l'eau de la rivière filtrée à ciel ouvert ; enfin on établit deux puits en 1906 dans un banc de graviers situé sur la rive gauche de la Sarine au-dessous de la Faculté des Sciences. Les analyses chimiques et bactériologiques furent conformes aux résultats obtenus avec une bonne eau potable. On creusa en tout 9 puits d'une profondeur moyenne de 5,50 m. ; un réservoir d'une capacité de 120 m³ reçoit l'eau des puits. Trois moteurs triphasés de 175 HP actionnent trois pompes centrifuges débitant 3 m³ par minute à

une hauteur d'élévation de 170 m. ; ces trois groupes débitent chacun 180 000 litres à l'heure. Les réservoirs du Guintzet où cette eau est mise en réserve ont une capacité totale de 9000 m³.

Enfin on envisage la construction, à Rossens, d'un barrage d'une capacité de 100 000 000 m³ qui produirait un lac dit « de la Gruyère » de 8 km. de long.

Telle est, brièvement esquissée, l'histoire des travaux hydro-électriques entrepris à Fribourg et permis par la création du lac de Pérolles, dont l'étude au point de vue des alluvions fait l'objet de ce travail.

CHAPITRE II.

Eléments du travail d'un fleuve.

Quand une force quelconque déplace son point d'application, on dit qu'elle fournit un travail. Celui-ci varie avec deux éléments de la force : avec sa grandeur et avec le déplacement qu'elle imprime à son point d'application. C'est ce qu'exprime la formule :

$$Q = F \cdot e$$

Pour étudier le travail d'un cours d'eau et ses effets, qui le rendent apparent, il faut étudier les éléments qui nous permettent de définir ce travail : la force, et la vitesse dont dépend le déplacement plus ou moins rapide du cours d'eau considéré.

§ 1. Force d'un cours d'eau.

Qu'est-ce que la force d'une rivière ? C'est la force cinétique de l'eau qu'elle roule, ou comme l'on dit actuellement, sa force d'entraînement. Elle a été étudiée avec précision par Du Boys dans son travail « Grandeur et effets de la force d'entraînement » (Annales des Ponts et Chaussées de 1879, chapitre II).

L'auteur a cherché à déterminer la force d'entraînement, en tenant compte de la profondeur de l'eau, et de la hauteur de chute qu'elle subit. Du Boys admet d'une part, que l'eau se meut d'un mouvement uniforme, et d'autre part, que l'augmentation de force vive de la rivière considérée est à chaque instant annulée par le travail résistant qu'elle est obligée à chaque instant d'effectuer sur son lit. Il pose donc que la force d'entraînement de

l'eau est égale et de sens contraire à la force résistante du lit du cours d'eau. Cette supposition est légitime, car elle est conforme au principe général de l'égalité de l'action et de la réaction énoncé par Newton : « Si une force exerce son action, elle fait naître en même temps une réaction égale et directement opposée. » Partant de ces considérations, il a trouvé pour la force d'entraînement la formule :

$$(I) X = 1000 \cdot H \cdot I$$

expression dans laquelle H désigne la profondeur d'eau, et I le rapport exprimant l'inclinaison du lit du cours d'eau par mètre.

E. Thiéry, traitant le même problème dans son ouvrage : « Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement » (Paris 1891), est arrivé à un résultat analogue. Appelant f l'épaisseur infiniment petite d'un fil d'eau, l la longueur de ce fil d'eau sur le parcours considéré de la rivière, et enfin i l'inclinaison du fil sur l'horizontale, il arrive à la formule suivante donnant la valeur de la force d'entraînement :

$$x = f \cdot d \cdot l \cdot \sin i, \quad d \text{ étant la densité.}$$

Cette force ne dépend pas de l'inclinaison du lit, mais de celle de la surface de la rivière ; on peut le démontrer rigoureusement. En effet, que l'on suppose le fond et la surface du cours d'eau parallèles, convergents, ou divergents, on arrive toujours à la formule précédente.

Nous savons maintenant quelle est la force x d'un filet d'eau de la rivière. Pour trouver la force X de la totalité du cours d'eau, il faut faire la somme des forces de tous les filets d'eau qu'il contient. Cette somme est donnée par l'intégrale définie entre les limites a et b considérées :

$$\sum_b^a f \cdot d \cdot l \cdot \sin i = {}^*F_b^a (f \cdot d \cdot l \cdot \sin i) = F \cdot d \cdot l \cdot \sin i,$$

F désignant la surface mouillée du profil transversal du cours d'eau pendant le parcours considéré. L'angle i étant

* Le signe de l'intégrale est remplacé ici par un grand F .

très petit on peut écrire : $\sin i = \text{tang } i = I$ ou inclinaison de la rivière. De plus

$$F.d.l = M$$

poids de la masse mise en mouvement. La force d'entraînement du cours d'eau est donné par l'expression :

$$(2) X = M.I$$

ce qui revient à dire que la force d'entraînement d'un cours d'eau est égale au produit du poids d'eau qu'il roule par l'inclinaison relative du cours d'eau.

L'identité des formules (1) et (2) données pour calculer la valeur de cette force, est facile à reconnaître. Pour établir la formule (1), on admet qu'un prisme d'eau de base 1 m^2 , et de hauteur égale à la profondeur d'eau du fleuve au point considéré, soit H , repose sur le lit ; sa force d'entraînement est X . En admettant que le poids spécifique de l'eau soit $d = 1000 \text{ Kgs}$ pour 1 m^3 , l'expression $1000 H$ représente dans la formule (1) le poids du prisme considéré, alors que dans la formule (2) il est appelé plus simplement M . Pour que les deux formules soient équivalentes, on doit avoir évidemment :

$$1000 H.I = M.I ;$$

en effet pour un cube égal à l'unité, $H = 1$, et M dans ces mêmes conditions est 1 m^3 , dont le poids est 1000 Kgs . L'inclinaison est désignée dans les deux formules par I ; les deux formules sont donc équivalentes, et peuvent s'employer indifféremment.

Application pratique :

Comme application de cet exposé sur la force d'entraînement, calculons la force d'entraînement de la Sarine à diverses époques, connaissant le poids d'eau qu'elle roule, et l'inclinaison de son cours au point considéré.

1^o) En 1869, la Commission technique de la Société des Eaux et Forêts détermina le débit de la rivière, et trouva 16 m^3 . La pente moyenne générale de la Sarine

est de 1,5 ‰ ; en effet elle sort du glacier de Zanfleuron à 2350 m. d'altitude et se jette dans l'Aar à Wileroltigen à 450 m. Son cours a une longueur de 120 km. environ. avec une différence de niveau de 1900 m. entre sa source et son point d'affluence. La pente moyenne générale est

donc de $\frac{1900}{120.000} = 0,015$ m. soit 1,5 cm par mètre. Tabler

sur la pente moyenne générale ne serait point exact, car la pente de la première partie du cours n'est pas comparable avec celle du tronçon qui avoisine Fribourg, et qui nous intéresse particulièrement. Dans la première partie de son cours, la Sarine possède une pente de torrent, alors que sur le plateau elle a une pente de rivière. Nous prendrons plutôt la pente moyenne du tronçon Thusy-Singine. Entre Thusy, qui est à 640 m. d'altitude, et son point de confluence avec la Singine qui est à 487 m., la Sarine parcourt 51 km. bien que la distance à vol d'oiseau entre ces deux points ne soit que d'une trentaine seulement. La différence de niveau est de $640 - 487 = 153$ m. La pente moyenne du tronçon Thusy-Singine du cours de la rivière

est donc exprimé par le rapport $\frac{153}{51.000} = 0,003$, soit 3 mil-

limètres par mètre, pente bien inférieure à la pente moyenne générale du cours d'eau.

Dans ces conditions, en employant la formule (2). nous pouvons facilement calculer la force d'entraînement ; elle était de 48 kilogrammètres par seconde.

2^o) En 1880, le Conseil Fédéral fit mesurer le débit de la Sarine ; on trouva 9 m³ par seconde, ce qui donne une force de 27 kilogrammètres par seconde.

3^o) En décembre 1904, une mesure du débit de la rivière a donné pour résultat 7 m³, ce qui correspond à une force de 21 kilogrammètres par seconde.

4^o) Enfin, par les jours de bise du mois d'octobre, où la Sarine atteint son minimum de débit, ainsi que nous le montrent les courbes annuelles, la quantité d'eau roulée

peut, paraît-il, tomber à 4 m³. La force d'entraînement n'est alors que de 12 kilogrammètres par seconde.

Résumons ces résultats en un tableau :

Années	Kilogrammètres	Mètres cubes
1869	48 kgm. correspondant à	16
1880	27 kgm. » » »	9
1904	21 kgm. » » »	7
Actuellement parfois :	12 kgm. » » »	4

Ces résultats marquent une décroissance rapide de débit, par conséquent de force et de puissance de la Sarine. A quoi peut tenir cette forte diminution, forte en effet, car parfois le débit peut tomber au quart de ce qu'il était il y a une cinquantaine d'années ?

Avant de rechercher les causes de ce phénomène, remarquons qu'il n'y a pas lieu de s'alarmer de ces diminutions toutes temporaires, constatées dans cette courte statistique. Il suffit de jeter un coup d'œil sur les graphiques annuels de débit du cours d'eau, établis par l'entreprise électrique Thusy-Hauterive, pour voir que ces minimums sont largement compensés par les crues du printemps, et par les apports provenant des orages et de la fonte estivale des neiges.

Ces courbes présentent l'aspect d'une série de pointes et de rentrants. Un bon baromètre enregistreur inscrit sur son tambour une courbe plus accidentée qu'un appareil moins sensible ; il enregistre plus vite, et avec plus d'ampleur, les plus minimes variations de la pression atmosphérique. De même la Sarine devient de plus en plus sensible aux précipitations, qui tombent sur son bassin de réception. Elle enregistre par une crue rapide et forte un orage, mais retombe vite à un faible débit. En résumé elle prend un caractère torrentiel.

Cet état de choses doit provenir d'une grande rapidité de ruissellement de l'eau tombée sur le bassin de réception vers la rivière qui est chargée de son drainage. Cet apport des précipitations au cours d'eau a été en effet rendu plus rapide par le déboisement et par le drainage.

Le déboisement, la plaie moderne des pays de montagne, supprime les arbres, spécialement organisés pour retenir l'eau des précipitations de mille manières, fait disparaître la terre végétale, qui s'en gorge comme une éponge, ne la rendant que peu à peu au fur et à mesure des besoins causés par la sécheresse, met à nu la roche sous-jacente, qui, usée, ravinée, emportée vers la rivière, lui donne cette couleur jaune caractéristique des temps de crue, enfin donne peu à peu au pays dans lequel il sévit un aspect aride, pelé et désertique.

Le drainage a pour but d'empêcher l'eau de séjourner dans les terres arables et d'assécher les marais, régularisateurs par infiltration du débit de la rivière dans le bassin de réception de laquelle ils se trouvent. Ce dernier facteur, de jour en jour plus important, favorise beaucoup l'apport des précipitations au cours d'eau, drainant le pays sur lequel elles tombent.

Evidemment ce n'est point une rivière à caractère torrentiel, que choisit le technicien pour alimenter ses turbines. Il remédie aux inconvénients des cours d'eau irréguliers par la construction de barrages formant des lacs artificiels, dont le niveau est maintenu constant par un jeu de vannes approprié. Mais un barrage s'alluvionne plus ou moins vite ; tel est le cas de celui de Fribourg, qu'il faut exhausser ou draguer. Un lac artificiel de grandes dimensions serait bien préférable ; c'est ce dont on parle actuellement pour le canton de Fribourg.

§ 2. *Vitesse d'un cours d'eau.*

La vitesse d'un cours d'eau est l'espace parcouru en l'unité de temps par un point donné d'un fil d'eau de ce cours d'eau. Disons immédiatement que cette vitesse variera, suivant la position du fil d'eau dans lequel est choisi le point, dans la rivière considérée. En supposant l'accélération à chaque instant annulée par le frottement sur le lit, l'eau pure, c'est-à-dire non chargée de matériaux, coulera d'un mouvement uniforme.

Bien des formules ont été proposées pour mesurer la vitesse des cours d'eau ; une des plus employées est celle d'Eytelwein :

$$v = k \sqrt{R \cdot i}$$

où R représente la profondeur hydraulique, exprimée par le rapport suivant :

$$\frac{S}{P} = R = \frac{\text{Section transversale}}{\text{Profil mouillé}},$$

i l'inclinaison, et k une constante, variable d'ailleurs avec le caractère du cours d'eau considéré. On admet ordinairement pour k les valeurs suivantes :

10, pour les torrents charriant beaucoup de matériaux solides, c'est le cas de la majorité des cours d'eau de montagne ;

40, pour les cours d'eau plus considérables, ayant toutefois leur source dans une région montagneuse. La constante doit être de cet ordre de grandeur pour la Sarine ;

50, 60, et même plus encore pour les grands fleuves.

Ordinairement on prend 50 pour valeur de k. Cette formule n'est qu'approchée, car, dans son établissement, qui est d'ailleurs aisé, on ne tient pas compte de l'influence de la nature du lit de la rivière.

La détermination théorique de la vitesse d'un cours d'eau en un point donné est une opération compliquée, nécessitant une série de sondages et de mesures pour connaître exactement les dimensions de la section transversale, au point où l'on veut mesurer la vitesse de la rivière.

Il est plus aisé de mesurer cette vitesse expérimentalement c'est cette méthode qui fut employée. On observe avec une bonne montre à seconde le temps que met un flotteur, de bois par exemple, pour descendre un parcours jalonné, ou mesuré avec précision au moyen d'un curvimètre sur une carte à grande échelle.

Application pratique :

Etudions, au moyen de cette méthode pratique, l'influence qu'exerce le barrage sur la vitesse des eaux qu'il

recueille. Pour cela, mesurons la vitesse de la Sarine en amont du barrage, en des endroits de plus en plus éloignés de l'ouvrage.

Remarquons d'abord que la vitesse est presque complètement amortie dans le voisinage immédiat du barrage. De plus, l'action de ce dernier ne se fait pas sentir probablement au-delà du coude, qui se trouve entre l'usine chargée d'alimenter le réservoir de la ville et l'Asile des vieillards; l'eau arrive en ce point avec une vitesse de rivière à pente forte, si bien qu'il est assez pénible de passer la Sarine à gué en cet endroit, ou de la remonter en barque au-delà de ce coude; un fort tourbillon se produit au bas de la falaise; ensuite, la vitesse du cours d'eau est déjà nettement diminuée. La vitesse est faible à la Pisciculture et diminue de plus en plus jusqu'au barrage.

Mesure de la vitesse de la Sarine au Breitfeld.

Un flotteur de bois mis à l'eau en ce point mit 45 minutes à parcourir 350 mètres. On avait donc pour valeur de la vitesse :

$$v = \frac{350}{45.60} = 0,129 \text{ mètres par seconde, ou } 464,4 \text{ m. à l'heure.}$$

Mesure de la vitesse de la Sarine à la Pisciculture :

Un flotteur de bois mis à l'eau en ce point mit 5 minutes 40 secondes à parcourir 100 mètres, ce qui donne une vitesse de

$$v = \frac{100}{340} : 0,294 \text{ mètres par seconde, ou } 30 \text{ centimètres environ, ce qui correspond à } 1080 \text{ mètres à l'heure.}$$

Nous avons donc la décroissance suivante :

1^o Avant l'usine : vitesse normale de la rivière, de l'ordre d'une dizaine de kilomètres au moins.

2^o) A la Pisciculture; on constate une vitesse d'un kilomètre à l'heure environ.

3^o) A la falaise du Breitfeld, on constate une vitesse d'un demi kilomètre à l'heure environ.

4°) Au barrage, la vitesse est presque complètement amortie.

Ces constatations ont été faites le premier Juin 1917, le lendemain de l'éboulement du Breitfeld, causé par d'abondantes pluies qui avaient fait notablement grossir le débit de la Sarine.

Ces chiffres montrent très nettement l'influence retardatrice et progressive exercée par le barrage sur la Sarine jusqu'à une distance de 2500 m. de l'ouvrage.

Passons maintenant à l'étude d'une particularité très intéressante : le fil d'eau. Le fil d'eau est, à chaque point de son cours, le point le plus rapide du courant d'une rivière. Si ce fil d'eau est déplacé, dévié, il se produit une érosion dissymétrique ; le cours d'eau creuse des méandres.

Pour déterminer le fil d'eau d'un fleuve, il faut mesurer avec précision la vitesse de divers fils d'eau de ce fleuve, choisis plus ou moins éloignés des deux rives.

Soit à déterminer le fil d'eau d'une rivière entre les deux sections transversales o et o' .

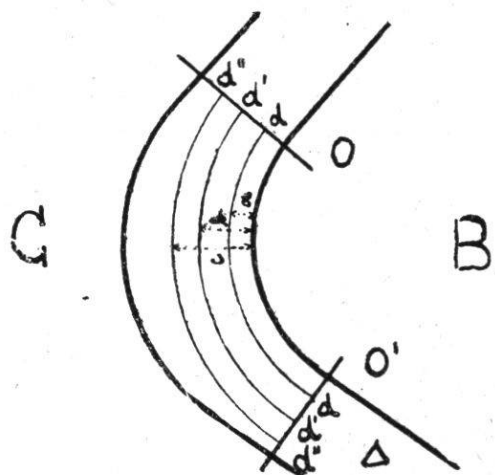


Fig. 1.

Un observateur jette un flotteur à une distance a du bord ; au moment où le flotteur tombe à l'eau, il presse sur le bouton d'un chronomètre totalisant les secondes. Un second observateur, placé en aval, à une distance me-

surée exactement, repère la section o' , comme le premier observateur l'a fait pour la section o ; il observe le corps flottant et fait un signal, au moment où le flotteur passe par la section o' . Le premier observateur arrête son chronographe ; soit t le nombre de secondes employé par le corps flottant pour parcourir l'espace dd séparant les deux sections o et o' . On recommence en faisant parcourir au flotteur l'espace $d'd'$ situé à une distance b du bord de la rivière, puis en lui faisant parcourir l'espace $d''d''$. Soient t' et t'' les temps employés par le corps flottant pour effectuer respectivement ces deux parcours. On constatera dans le cas figuré par le dessin ci-contre que $t'' < t' < t$; comme d'autre part approximativement $dd = d'd' = d''d'' =$ la base mesurée, on en déduira facilement les vitesses des divers fils d'eau considérés :

$$v = \frac{dd}{t}, \quad v' = \frac{d'd'}{t'}, \quad v'' = \frac{d''d''}{t''}.$$

En raison de l'égalité des espaces et de l'inégalité des temps mis à les parcourir, nous avons : $v'' > v' > v$.

On peut traduire ce fait graphiquement. Soient deux axes de coordonnées OX et OY ; portons en ordonnées les vitesses aux trois distances diverses de la rive B , et ces mêmes distances en abscisses. Nous obtiendrons une ligne du genre de la ligne OSC .

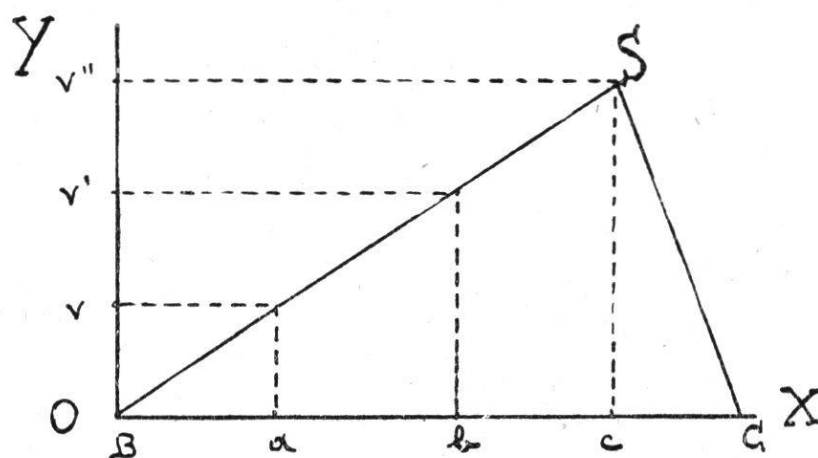


Fig. 2.

Application pratique :

Au moyen de cette méthode, nous pourrions facilement

construire une carte du fil d'eau de la rivière étudiée, en répétant cette opération un certain nombre de fois et en réunissant les points où l'on observe la plus grande vitesse pour tracer le parcours du fil d'eau.

Cette méthode est très utile pour déterminer le fil d'eau dans les tronçons rectilignes d'un cours d'eau, où son parcours est bien moins apparent que dans les tronçons sinueux. Elle fut employée pour déterminer le fil d'eau aux environs de la Pisciculture.

Détermination du fil d'eau à la Pisciculture.

La base mesurée avait 100 mètres de longueur ; les résultats suivants furent obtenus :

1^o) Près du pilier de la passerelle détruite, le flotteur emporté par le courant met 6 minutes pour parcourir la base ; sa vitesse dans ce fil d'eau était donc exactement d'un kilomètre à l'heure.

2^o) Près de l'îlot sablonneux, plus rapproché de la rive droite que de la rive gauche, le flotteur emporté par le courant met 7 minutes pour parcourir la base, ce qui correspond à une vitesse de 857 mètres à l'heure.

Le fil d'eau est donc en cet endroit plus rapproché de la rive gauche que de la rive droite.

CHAPITRE III.

Travail d'un fleuve.

Nous sommes maintenant en possession des éléments qui nous permettent de nous faire une idée exacte sur le travail d'un cours d'eau : sa force et sa vitesse.

Avant de passer à l'étude de ce travail, voyons comment on peut calculer l'énergie dépensée par un cours d'eau de façons diverses sur son lit, entre sa source et son embouchure.

La circulation de l'eau à la surface de la terre est continuelle. L'eau des mers évaporée forme les nuages ; ces derniers se condensent, poussés par les vents sur les montagnes, en neige ou en pluie. Le ruissellement, les ruisseaux, les rivières et enfin les fleuves ramènent à la mer le produit de ces condensations ; le même cycle recommence, et ainsi de suite. Ces transformations successives doivent obéir à la loi de la conservation de l'énergie ; en d'autres termes, le travail dépensé par l'élévation de l'eau des mers, doit se trouver récupéré pendant le retour des cours d'eaux vers la mer. Il l'est en effet, en grande partie ; mais il reste cependant aux fleuves une certaine force vive à leur embouchure.

Soit T le travail nécessaire pour élever l'eau, t le travail exercé par le fleuve pendant son cours, enfin t' l'énergie qui lui reste à la fin de son parcours. On a entre ces trois quantités la relation :

$$T = t + t' \quad \text{ou} \quad t = T - t'$$

cette dernière permettant de calculer le travail exercé par le cours d'eau. Le travail d'élévation de la vapeur d'eau est

égal au produit de la masse élevée par la hauteur à laquelle elle est portée :

$$T = h.p.$$

D'après la formule de l'énergie cinétique :

$$E = \frac{1}{2} mv^2, \text{ comme } m = \frac{P}{g}$$

l'énergie restant au cours d'eau à son embouchure sera

$$t' = p \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Le travail exercé par le fleuve pendant son cours sera donc égal à la différence de ces deux travaux :

$$t = h.p - p \cdot \frac{v^2}{2g} = p \left(h - \frac{v^2}{2g} \right). \quad (3)$$

Application pratique :

D'après cette formule, où h désigne la hauteur moyenne de chute du cours d'eau considéré, calculons, pour une rivière débitant à son embouchure 10 m^3 , le travail qu'elle effectue sur le pays qu'elle draine, si ce dernier possède une altitude moyenne de 700 m. , sa vitesse étant de deux mètres par seconde, ce qui correspond à $7200 \text{ m. à l'heure.}$

On a $t = 10.1000. (700 - 4/19,6) = 6.997.960$ kilogrammètres, ce qui donne en chevaux-vapeur : 93.306 HP.

Ce cas donne un résultat assez bien applicable à la Sarine, qui se trouve dans des conditions numériques de même ordre que celles qui ont été posées ici.

Comment s'exerce le travail d'un fleuve ? Telle est la question qui se pose maintenant.

Le fleuve travaille à niveler la contrée qu'il draine ; jeune, il établit d'abord, d'une façon plus ou moins parfaite suivant les roches constituant son lit, son profil d'équilibre. Il creuse presque exclusivement dans la direction verticale. Ainsi la Sarine est une rivière jeune ; sa puissance de travail est encore consacrée, en majeure partie, à approfondir son lit. Ce fait est frappant : de l'extrémité de l'Avenue de Pérolles, la Sarine ne laisse guère soupçonner l'entaille profonde qu'elle a creusée dans la molasse.

Le creusement en profondeur diminue d'importance, lorsque le profil d'équilibre de la rivière est grossièrement établi : l'élargissement du cañon primitif lui succède. Le sapement, les éboulements ensuite, élargissent l'entaille. Les deux rives, de perpendiculaires qu'elles étaient, s'inclinent de plus en plus, jusqu'à ce qu'elles atteignent une inclinaison variable avec la roche dont elles sont constituées : c'est ce que l'on appelle le talus d'équilibre. Ainsi, aux endroits où l'élargissement du cañon de la Sarine commence, sous ce qui reste de la falaise primitive, on trouve des talus d'inclinaison $\frac{2}{3}$ environ, ce qui correspond à 66,6 $\frac{0}{0}$, talus d'équilibre de la molasse.

L'action régressive des affluents s'exerçant d'une façon analogue, le réseau hydrographique d'une contrée ayant trouvé son équilibre travaille activement à le niveler, découpant le pays qu'il draine en compartiments qu'il use petit à petit.

Ajoutons à cette érosion hydraulique les érosions glaciaires, éoliennes, chimiques ou corrosives de l'eau, agissant encore mécaniquement par le gel, et l'on comprendra facilement que des régions montagneuses accidentées s'abaissent au cours des siècles et deviennent enfin des pénéplaines légèrement vallonnées, drainées par des fleuves lents et réguliers.

Nous venons de voir de quelle façon travaille un fleuve suivant son âge ; voyons maintenant comment il travaille. Le cours d'eau procède dans son travail d'érosion comme le mineur exploitant une mine : il désagrège les matériaux et les transporte ensuite vers son embouchure. Seulement le mineur se sert de la pioche et de la pelle, et le minerai est emporté dans une benne, tandis que le fleuve, mieux outillé, a un instrument de travail unique : l'eau courante qui use et transporte à la fois.

Bien plus, les matériaux transportés, cailloux et sable, servent au creusement ; en effet, au fond d'une marmite de géant bien conservée, on trouve souvent les galets qui ont servi à la creuser. M. Jean Brunhes a publié le résultat de

très intéressantes observations qu'il a faites sur les marmites creusées par la Sarine dans l'ancienne échelle à poisson de la Maigrauge ; de même les tourbillons chargés de sable agissent à la façon des scies circulaires, laissant après leur action des surfaces polies, concaves et régulières.

L'eau travaille donc par elle-même, et par les matériaux qu'elle transporte. En temps de crue, le débit, la vitesse et le charriage des cours d'eau peuvent augmenter d'une façon considérable ; aussi, pendant ces périodes, les cours d'eau travaillent-ils plus qu'en temps ordinaire.

Les produits de l'érosion ne restent pas sur place, ils sont entraînés par l'eau. Le cours d'eau dépose peu à peu, tôt ou tard, soit à une certaine distance en aval, soit plus loin encore vers son embouchure, les matières arrachées à son lit. En effet, désignons par f la force vive de la rivière, et par r la résistance des matériaux charriés ; entre ces deux quantités, nous pouvons avoir les relations :

$$f > r, \quad f = r, \quad \text{ou} \quad f < r.$$

Un cours d'eau doit alluvionner, au bout d'un parcours plus ou moins long ; supposons-le dans la situation la plus favorable, vers le commencement de la courbe représentant son profil d'équilibre, c'est-à-dire non loin de sa source. Nous avons $f > r$. Le cours d'eau possède alors un excès de force

$$F = f - r ; \text{ comme } f - r > 0.$$

Cet excès de force vive lui permet d'attaquer son lit plus fortement ; le charriage de la rivière augmente : r croît. Mais à mesure que le fleuve se rapproche de son embouchure, la pente décroît et f diminue. Il arrivera donc un moment où l'on aura $f = r$, condition correspondant à un état d'équilibre, où le fleuve se contente de transporter les matériaux qu'il roule sans ronger ses rives. Enfin, la pente diminuant encore, nous aurons bientôt $f < r$, et le fleuve commencera à déposer les substances qu'il transporte.

Ces considérations toutes théoriques ne s'appliquent naturellement qu'à un cours d'eau idéal, dont tous les filets d'eau couleraient à la même vitesse, supposition en

contradiction flagrante avec l'expérience, qui nous apprend l'existence d'un filet liquide plus rapide que les autres dans tout cours d'eau, et que nous nommons fil d'eau.

Ceci explique le fait que, sur une partie de son profil d'équilibre où son fil d'eau satisfait à la condition $f=r$ ou même $f>r$, un fleuve peut parfaitement déposer des matériaux que d'autres parmi ses fils d'eau, que j'appellerai filets marginaux, contiennent, s'ils ne satisfont qu'à la condition $f<r$. Voilà pourquoi nous trouvons souvent superposés les deux phénomènes d'érosion et d'alluvion. Un dessin éclairera ce raisonnement :

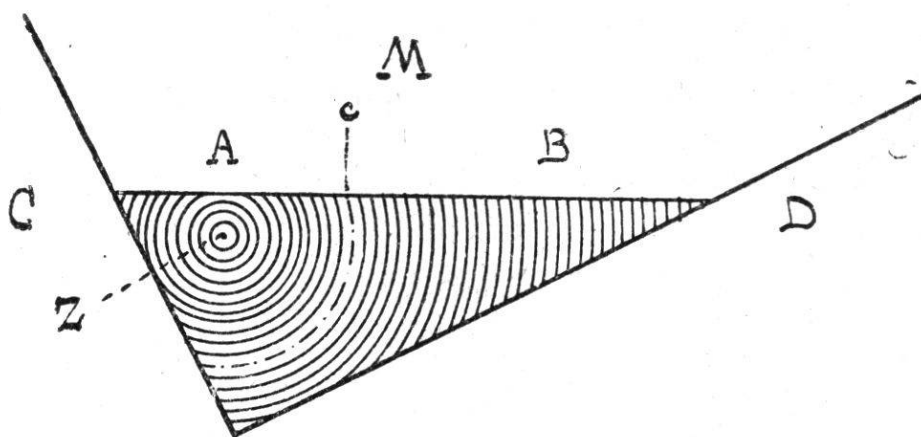


Fig. 3.

Dans un méandre M, le fil d'eau est plus rapproché de la rive concave C que de la rive convexe D. Si nous traçons une section transversale du cours d'eau au méandre M, nous obtiendrons une figure analogue au diagramme ci-dessus. Les courbes concentriques renferment les filets d'eau possédant la même vitesse (courbes isotaches) ; le fil d'eau est en Z. Soit c la courbe correspondant à l'état d'équilibre $f=r$. Dans la partie A de la section à travers notre méandre, nous aurons $f>r$ et par conséquent érosion, tandis que dans la partie B de cette même section, nous aurons $f<r$ et par suite accumulation ou alluvion.

Si nous tenons à jour la carte du méandre M considéré, nous serons obligés, au bout d'un temps qui dépendra de la force d'entraînement du cours d'eau considéré et de la résis-

tance de la roche formant son lit, d'approfondir encore la rive concave C, et d'augmenter la superficie de la rive convexe D, laquelle n'augmentera pas de la quantité intégrale de matériaux arrachés à la rive C, une partie de ceux-ci étant entraînée en aval.

Ce changement rapide de forme des rives d'un cours d'eau, oblige à des remaniements fréquents des cartes à grande échelle qui en sont dressées, surtout si, comme c'est le cas pour la Sarine, aux causes naturelles viennent encore s'ajouter des causes artificielles, telles que la construction ou l'exhaussement d'un barrage.

Maintenant que nous avons examiné sommairement les conditions d'érosion et d'alluvionnement, voyons de quelle façon se fait le dépôt des matériaux charriés, quand la force vive du cours d'eau tombe au dessous de la limite de vitesse nécessaire à leur transport.

On a dressé des tableaux donnant les vitesses requises pour le transport des matériaux de charriage suivant leur calibre.

Ainsi on trouvera, en consultant une table de ce genre, qu'une vitesse V par seconde est requise pour qu'une rivière roule des galets, et ainsi de suite pour les autres matériaux, les vitesses décroissant avec la taille des matériaux transportés. D'une façon générale on a un tableau de l'aspect suivant :

V	vitesse limite de transport des galets,
v	» » » » du cailloutis,
v'	» » » » du sable,
v''	» » » » du limon.

Si, pour une cause quelconque, la formation d'un lac artificiel, au moyen d'un barrage par exemple, comme c'est le cas pour la Sarine à Fribourg, la vitesse de l'eau courante décroît, la rivière déposera progressivement les matières qu'elle charrie, car, nous l'avons vu à propos de la vitesse d'un cours d'eau, l'action d'un barrage exerce une action retardatrice mais progressive sur la vitesse d'une rivière.

Soit W la vitesse de la rivière à une distance R du barrage, trop grande pour que son action puisse se faire sentir jusque-là ; dans ces conditions le cours d'eau, s'il a une vitesse initiale suffisante, entraînera tous les produits de son érosion.

Soit r , la distance jusqu'à laquelle l'action de l'ouvrage se fait sentir, la vitesse diminue. A partir de la distance D , où la vitesse a la valeur V , les galets commencent à se déposer. A partir de la distance d , où la vitesse tombe à la valeur v , le cailloutis se dépose. En d' la vitesse étant v' le sable commence à se déposer ; enfin en d'' la valeur de la vitesse n'étant plus que de v'' , le limon se dépose à son tour. A une distance e du barrage encore plus petite, la vitesse m étant presque nulle, le dépôt est complet. Le tableau suivant peut servir à mettre ce fait en évidence :

Distances		Vitesses		Dépôts
R	—	W	—	nuls,
r	—	w	—	nuls,
D	—	V	—	galets,
d	—	v	—	cailloutis,
d'	—	v'	—	sable,
d''	—	v''	—	limon,
e	—	m	—	complets.

Application pratique :

Voyons maintenant comment la Sarine distribue ses alluvions en amont du barrage de Fribourg.

1^o) Les galets ne semblent guère aller au-delà de l'usine hydraulique, sauf en temps de crue naturellement.

2^o) Le cailloutis s'arrête aux environs de la station inférieure du Téléférique de Pérolles.

3^o) Le sable se dépose principalement dans la région du cours d'eau avoisinant la Pisciculture.

4^o) Plus loin, entre la Pisciculture et le barrage, se déposent le sable fin et le limon.

Evidemment, ceci n'est qu'une évaluation grossière ; une étude approfondie du dépôt des sables gros et fin, ainsi

que du limon, nécessiterait un échantillonnage microscopique précis, dont les prises d'essai seraient progressivement et régulièrement éloignées du barrage.

Maintenant que les conditions d'alluvionnement nous sont connues, examinons comment se produisent les dépôts.

Les divers matériaux s'accumulent, et se tassent, en formant des bancs de galets, de cailloutis ou de sable qui prennent la forme des endroits de la rivière où le peu de vitesse de l'eau permet aux matériaux dont ils sont formés de se déposer.

C'est pour cette raison que l'on peut trouver, même dans le lit d'un torrent de montagne, des cuvettes relativement tranquilles, où l'on constate la présence de cailloutis et même d'alluvions sablonneuses, dans la Viège de la vallée de Saas par exemple.

Il faut bien se garder de croire les différents dépôts alluvionnaires séparés par des limites immuables et nettement délimitées. En pratique, il est difficile de déterminer la limite entre les galets et le cailloutis. Des matériaux mixtes, pour ainsi dire, forment transition entre ces deux catégories de dépôts ; ils sont bien petits pour des galets, et trop gros pour être rangés dans le cailloutis.

Divers dépôts peuvent même se superposer, comme la constatation en fut faite, en aval de la station inférieure du téléphérage de Pérolles. Considérons la limite entre le cailloutis et le sable, qui est relativement nette ; survienne une crue, la vitesse de la rivière augmente ; les points de vitesse limite de dépôt des divers matériaux charriés sont déplacés vers l'aval ; en conséquence, du cailloutis se dépose là où ordinairement les alluvions sont sablonneuses ; après la crue, la vitesse de la rivière reprend sa valeur normale ; les points de vitesse limite de dépôt des substances charriées, remontent vers l'amont, et le cailloutis, déposé pendant la crue hors de sa région habituelle de dépôt, est

recouvert peu à peu de sable ; on trouvera donc là une superposition d'alluvions.

L'érosion et l'alluvionnement, les deux termes du travail d'un fleuve, nous sont maintenant connus ; reste à étudier le transport des matériaux et l'influence qu'il exerce sur ce dernier.

C'est un fait d'expérience journalière, que le transport de matériaux par les fleuves. En temps de crue, l'énergie d'une rivière bénéficiant d'un notable accroissement, l'érosion augmente et par suite le transport avec elle. La rivière se trouble et charrie alors de grandes quantités de matières solides ; ainsi la Dranse à Martigny contient parfois 35 parties solides pour 1000 parties d'eau, en poids, ce qui donne un pourcentage de transport de 3,5 0/0.

De ce transport, qui est triple en réalité, nous ne voyons qu'un seul aspect : la suspension des corps dans l'eau. L'entraînement des pierres par roulement sur le lit nous échappe complètement, d'autant plus que l'eau est troublée par tout ce qu'elle charrie ; de même nous ne voyons rien du transport des substances dissoutes dans l'eau courante. Pour étudier d'une façon plus approfondie ces diverses formes de transport, il est nécessaire de les considérer au point de vue quantitatif. L'étude des conditions de transport par roulement a été faite mathématiquement, dans le cas de la mise en mouvement de corps de forme géométrique, de sphères par exemple. Ces résultats sont très intéressants, mais leur vérification est malaisée, d'autant plus que les corps roulés n'ont que fort rarement une forme géométrique parfaite. Ici, l'on se heurte à l'une des principales difficultés que l'on rencontre dans l'application des mathématiques aux Sciences naturelles ; le calcul algébrique est relativement facile à appliquer, mais le remplacement dans les formules obtenues des lettres par des données numériques est difficile.

Le transport par dissolution s'étudie en faisant une analyse chimique quantitative de l'eau de la rivière considérée. En général, l'eau des fleuves contient 18,25 0/0

en poids de matières dissoutes. Ces substances sont nombreuses et se trouvent dans l'eau courante à l'état de carbonates, de phosphates, de sulfates, de nitrates, de chlorures, d'oxydes ; on trouve encore de la silice, de l'alumine, et enfin des matières organiques. Des analyses de ce genre ont été effectuées sur l'eau de la Sarine ; il était inutile de les refaire ; notons cependant que l'eau de la Sarine est fortement calcaire. Restait à déterminer la teneur en matières transportées par suspension par la rivière ; c'est ce qui fut fait.

Application pratique :

Pour faire cette détermination, on pourrait se contenter de séparer ces substances au moyen d'une bouteille à filtrer au vide, mais si l'on veut opérer avec précision, il faut employer la méthode de filtration ordinaire, bien qu'elle soit plus lente. Dans la filtration au vide, qui est brutale, de petites particules tenues en suspension par l'eau peuvent passer entre le papier et l'entonnoir, l'étanchéité du raccord entre les parois de ce dernier et le papier filtre n'étant jamais parfaite ; le premier dispositif, convenant parfaitement aux manipulations de chimie organique, laisse donc à désirer quand il s'agit de faire une analyse quantitative exacte du poids des substances tenues en suspension par l'eau.

Le procédé suivant fut donc employé : l'eau, versée dans un entonnoir de grande capacité, passe de la douille de ce dernier très lentement dans un tube de caoutchouc, dont l'ouverture est convenablement réglée par une pince ; un compte-goutte termine le tube ; l'eau s'en échappe goutte à goutte pour tomber dans un petit entonnoir, où est disposé un filtre quantitatif de petit modèle. Le poids de ce filtre brûlé et réduit en cendres est $p' = 0,000.07$ gr. Du petit entonnoir, l'eau, abandonnant sur le filtre les impuretés qu'elle charrie, doit passer claire dans un ballon, placé en-dessous pour la recueillir. Pendant la filtration, qui est très longue, les suspensions les plus pesantes se déposent au fond du ballon d'essai, et l'on filtre les derniers centimè-

tres cubes, contenant la plus grande partie des suspensions, dans un second filtre gravimétrique identique au premier : ce changement de filtre a pour but d'accélérer l'opération. On rince plusieurs fois soigneusement à l'eau distillée le grand entonnoir et le tube de caoutchouc avec le compte-goutte ; le produit de ces lavages est soumis à la filtration. On sèche ensuite les deux filtres, puis on les place dans un creuset propre, et taré à l'avance. Après calcination des deux filtres avec leur contenu, on introduit le creuset dans un dessiccateur à chlorure de calcium. Enfin, on pèse le creuset ; l'excédent de poids constaté, diminué du poids, d'ailleurs presque négligeable des deux filtres calcinés, donne le poids de matières charriées par l'eau du fleuve :

$P - 2p = p$, poids de matières pour 1000, si la prise d'essai était de un litre.

On peut objecter à cette méthode que la calcination, détruisant les substances organiques qui peuvent se trouver en suspension dans cette eau, fausse la mesure de la masse de matériaux charriés par l'eau de la rivière considérée. A ceci, répondons que, ce qui nous occupe ici étant la contenance en matières purement minérales de cette eau, c'est plutôt un avantage de détruire par la calcination les matières non minérales contenues dans l'eau à analyser. Il est particulièrement intéressant de faire ces analyses en temps de crue régulière, au printemps, ou accidentelle lors des orages d'été par exemple, enfin en temps de basses eaux. Pour que les divers résultats soient comparables entre eux, il faut faire autant que possible les prises d'essai toujours au même endroit et à la même profondeur, la quantité de matières tenues en suspension variant avec la profondeur.

Il importe, dans ce genre de travaux, de s'entourer des plus minutieuses précautions. Pendant l'analyse, la propreté la plus rigoureuse s'impose et il importe de protéger la filtration contre l'introduction de poussières, qui, vu le poids minime de matières obtenu et la longue durée de l'opéra-

tion, finiraient par fausser d'une façon sensible le résultat de l'analyse. Pour éviter cet inconvénient, on couvre le grand entonnoir d'une plaque de verre, tout en laissant arriver l'air, en introduisant entre le rebord de l'entonnoir et la plaque une mince cale ; on protège de la même façon le petit entonnoir d'un carton percé d'une ouverture circulaire laissant tout juste passage à l'extrémité du compte-goutte.

Voici un exemple de détermination de la teneur en matières contenues en suspension par l'eau de la Sarine :

1^o) Epoque de la prise d'essai : 9 mai 1917 à 10 h.¹/₂ du matin.

2^o) Lieu de la prise d'essai : Extrémité du débarcadère de la Pisciculture.

3^o) Volume de la prise d'essai : 1000 cm³ mesurés dans un ballon jaugé, contrôlé à 15^o centigrades.

4^o) Position de la prise d'essai : A la surface.

5^o) Conditions météorologiques : Fonte des neiges active, et pluie la nuit précédente, le niveau de la Sarine étant un peu supérieur à son niveau habituel.

6^o) Résultats :

Poids du creuset plus la substance :	5,794.3 grs.
Poids du creuset moins la substance :	5,645.9 grs.
Poids de la substance :	0,148.4 grs.

Correction pour le poids des filtres :

Poids brut de la substance :	0,148.4 grs.
Poids de 2 filtres pesant chacun 0,000.07 :	0,000.14 grs.
Poids précis des substances charriées :	0,148.26 grs.

Un litre d'eau de Sarine contenait donc 0,15 gr. environ de matières en suspension.

L'influence d'un pareil contenu peut paraître infime, mais si l'on prend la peine de faire quelques calculs simples, on appréciera à sa juste valeur l'importance de ce facteur.

Supposons que la rivière roule 10 m³ par seconde ; à

chaque seconde passera par la section transversale considérée un poids de matériaux tenus en suspension égal à :

$$10\,000 \cdot 0,15 = 1500 \text{ grs.} = 1,5 \text{ kg.}$$

En une journée, si les conditions restent identiques, un poids de

$$24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 1,5 = 129.600 \text{ kg.}$$

soit d'environ 130 tonnes passera par la section transversale considérée ; c'est la charge de 13 wagons de marchandises ordinaires. Cet alourdissement apparaît encore bien plus important si nous l'envisageons s'exerçant sur de grandes masses d'eau, comme le lac de Pérolles tout entier. De plus, il faut encore remarquer que la prise d'essai de l'analyse précédente a été faite à la surface de la rivière et non dans des couches d'eau plus profondes où le transport est plus considérable.

Ces résultats numériques font bien comprendre l'importance de l'alluvionnement des fleuves travailleurs, et font apprécier à sa juste valeur un facteur aussi minime en apparence que le transport par suspension.

Examinons maintenant quelle est l'influence de ce transport de matériaux sur le mouvement de l'eau d'un fleuve. On remarque facilement l'action de ce transport par suspension sur la vitesse de l'eau courante, en observant la vitesse d'une rivière, dans des conditions de débit identiques naturellement, quand ses eaux sont limpides, puis quand elle charrie des matières en suspension. Ceci s'explique théoriquement, au moyen de calculs trop longs à exposer ici, que l'on trouve d'ailleurs dans l'excellent livre de M. Ferdinand Wang.

Ces calculs montrent que la vitesse, après l'alourdissement, est donnée par la formule :

$$v' = C \cdot v,$$

où v représente la vitesse du cours d'eau considéré avant la surcharge. Comme C est plus petit que 1, on en con-

clut immédiatement que, toutes choses égales d'ailleurs, la vitesse de l'eau chargée de matériaux est inférieure à celle de l'eau limpide. Bien entendu, il faut effectuer la comparaison dans des conditions identiques. Un observateur superficiel serait tenté d'affirmer le contraire, parce qu'il a vu en temps de crue une rivière fortement chargée en matériaux de suspension posséder une vitesse manifestement supérieure à celle dont est animée cette même rivière, alors qu'en temps ordinaire son charriage est bien moindre, sans réfléchir à l'augmentation de débit provenant de la crue. Cette loi peut également s'exprimer de la façon suivante : la vitesse moyenne d'un cours d'eau varie en raison inverse de son contenu en substances charriées. En continuant les calculs, on arrive à une autre formule :

$$\frac{v}{v'} = \frac{c}{c'} = \frac{g + a(d-g)}{g}$$

où v et v' représentent les vitesses de la rivière considérée avant et après l'alourdissement, c et c' les constantes respectives de ces vitesses (dans la formule $v = C\sqrt{RI}$), g étant le poids spécifique de l'eau pure, enfin a désignant le coefficient, exprimant le rapport entre le volume de l'eau pure et le volume des matériaux, d étant le poids spécifique de ces derniers.

Application pratique :

Une application numérique montrera l'intérêt de ces considérations. Soit $C = 50$, la constante du cours d'eau considéré, $d = 2\,500$ kg. le poids spécifique des substances tenues en suspension, g le poids spécifique de l'eau pure étant de 1000 kg. Supposons égal à $1/10$ le rapport a entre le volume des corps entraînés et le volume d'eau les transportant, nous avons :

$$\frac{50}{c'} = \frac{1150}{1000} \quad \text{et} \quad c' = 43,47.$$

Etant donnée la proportionnalité des vitesses et de leurs constantes, nous pouvons calculer la vitesse, d'après l'alourdissement de l'eau courante. On obtient la proportion :

suivante en supposant la vitesse primitive égale à 2 m. par seconde.

$$\frac{2}{v'} = \frac{50}{43,47} \quad \text{d'où } v' = 1,73 \text{ mètre par seconde.}$$

Ainsi, pour un alourdissement de $\frac{1}{10}$ en volume de son eau par le transport de matériaux en suspension, la vitesse d'une rivière coulant à raison de 2 m. par seconde est réduite à 1,73 m., la diminution est de $\frac{1}{8}$ environ ou de 12,5 0/0.

Les formules employées pour effectuer ces calculs ne sont qu'approchées ; en effet le frottement, nullement négligeable, des matériaux sur le lit, n'entre point en ligne de compte dans leur établissement ; cependant on peut à la rigueur admettre les résultats obtenus.

Examinons enfin l'influence de l'alourdissement de l'eau sur son travail. On peut établir, mathématiquement, une équation entre le travail par seconde ou puissance d'un cours d'eau avant son alourdissement, et celle qu'il possède après ; l'exposition de la méthode, toute théorique, employée pour trouver cette relation, sortirait du cadre plutôt pratique de ce travail. Qu'il nous suffise de dire ici que la puissance augmente avec la surcharge, la masse agissante devenant plus pesante, et qu'elle est proportionnelle au rapport des vitesses après et avant l'alourdissement, de sorte que l'augmentation de puissance d'un cours d'eau provient de trois causes : surcroît de charriage, de débit et de vitesse ; c'est ce que nous constatons en temps de crue.

Telles sont les considérations les plus importantes, faites sur le travail général de la Sarine ; nous en étudierons les effets dans le lac de Pérolles.

Comme on vient de le voir, les aperçus théoriques ont été rendus aussi succincts que possible.

CHAPITRE IV.

Le lac de Pérolles.

L'observateur le moins attentif ne passera pas longtemps à examiner le lac de Pérolles sans remarquer les changements notables qui s'opèrent peu à peu dans la forme de ses rives, et dans celle des bancs de sable qui l'encombrent.

La capacité du barrage diminue toujours du fait de l'alluvionnement de la rivière qui l'alimente, alluvionnement bien plus considérable qu'on ne l'avait prévu, et qui rendit nécessaire l'exhaussement de l'ouvrage.

J'ai l'intention d'examiner ici les principaux changements survenus depuis douze ans dans le lac de Pérolles. L'état des lieux en 1905 est donné par la carte, à l'échelle de $1/5000$, de Fribourg et de ses environs immédiats, dressée par M. Aeby à cette époque. La carte adjointe à ce travail est celle de 1905 à l'échelle de $1/10000$, et le calque qui s'applique sur cette dernière donne la configuration du lac en 1917 ; la comparaison est ainsi bien facilitée. Pour plus de clarté, les points de la carte dont il est parlé dans le texte sont numérotés sur la carte, ce qui évite les confusions.

Nous remonterons le lac de Pérolles depuis le barrage jusqu'à l'usine hydraulique, en signalant les changements principaux survenus.

Au point 1 se trouve une presqu'île rocheuse. Elle n'est pas formée de roche en place, mais des restes d'un éboulement de la falaise ; en effet, la direction des strates de la molasse qui la forme fait un angle d'au moins 10° avec la direction des strates de la roche constituant la falaise. Ce détail n'est point indiqué dans la carte du lac de Pérolles

de 1905, mais c'est une omission et non un fait nouveau, car des photographies de l'époque prouvent son existence à ce moment.

Le banc de sable 2 a diminué, non par érosion, comme certains que nous étudierons en amont, mais par submersion, à la suite de l'exhaussement du barrage effectué depuis. En conséquence un chenal 3, triple, s'est ouvert à la pointe du cap du Breitfeld ; la branche la plus rapprochée du cap est rarement praticable, même aux embarcations de faible tirant d'eau ; la seconde et la troisième branche offrent un passage meilleur, employé pour couper au court, notamment par les ouvriers descendant le bois coupé au barrage. Des matériaux, provenant probablement de la falaise, ont formé en 4 un petit amas de déjections, absent dans la carte de 1905. Le petit îlot 5 a probablement la même origine.

Le cône de déjection 6 a diminué, mais par submersion seulement ; en effet l'examen des profondeurs montre qu'il se continue sous l'eau, le courant de la rivière étant trop faible en cet endroit pour l'entamer ; d'ailleurs les profondeurs près du rivage, en 6, sont beaucoup plus faibles qu'un peu plus loin, en 7 par exemple.

Le banc 8 a fortement diminué par submersion, formant ainsi un chenal 9. Par contre deux bancs nouveaux 10 et 11 ont apparu, dûs à des causes que nous allons voir à l'instant. Entre eux existe un seuil peu profond, de même qu'entre la partie du banc 8 voisine du banc 10 et ce dernier. Ces passages ne sont praticables que lorsque le débit de la Sarine est moyen. C'est à ce point du lac de Pérolles que s'est produit l'éboulement du 31 mai 1917. Nous y reviendrons.

Les deux bancs nouveaux, 10 et 11, paraissent dûs à la destruction de la partie a du banc 12, principalement. En effet, en exhaussant le barrage, on a diminué la pente en amont ; l'eau pour couler a nécessairement réduit la longueur de son parcours, pour garder une pente suffisante à son écoulement. Au lieu d'aller frapper la paroi du

Breitfeld vers 13, le courant s'est rapproché de l'ancien banc 8 vers 9, mais trop peu pour l'user ; au contraire, il a formé peu à peu le banc 10, car, rectifiant son cours, au lieu de passer au point 14, il se rapprochait de la partie a du banc 12, qu'il usait par conséquent.

Il est fort probable que cette rectification du fil d'eau de la Sarine sous le Breitfeld, est également cause de la formation de la pointe sablonneuse 12c, qui se prolonge par un seuil peu profond jusque sous la falaise en 13. formation qui a dû se faire encore en partie aux dépens de la partie a du banc 12, entièrement disparue, ainsi que l'on peut s'en rendre compte au moyen de sondages. La partie b du banc 12 a disparu par simple submersion, comme le montrent les faibles profondeurs que l'on constate, aux lieux primitivement occupés par ce banc, dans la carte de 1905.

La rive s'est notablement creusée au point 14, par suite d'éboulements successifs ; le dernier glissement de terrain a emporté le sentier de la promenade Schoch sur une longueur de quelques mètres.

En 15, on a élevé une chaussée, ce qui a formé une petite lagune. Le banc de sable 16 a fortement diminué par submersion ; il affecte maintenant la forme d'une pointe, rattachée faiblement en amont à la terre ferme.

Le banc 17 a presque complètement disparu ; il n'en reste qu'un seuil, sur lequel sont établis les piliers les plus avancés de la station inférieure du téléferage de Péroilles. L'alluvionnement, que nous remarquons dans la région en aval, doit provenir en partie de la destruction du banc précédent.

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, que les galets se déposent entre l'usine hydraulique et la station inférieure du téléphérage ; aussi, à cause de l'exploitation des bancs de cailloutis et de galets, au moyen de dragues sur cette partie du cours de la Sarine, n'est-il guère possible de faire une étude sérieuse des changements constatés. Il faut nous contenter ici de donner l'état actuel des lieux.

Le banc 18 a bien diminué ; il s'est allongé ; un chenal étroit le sépare de la rive droite. Ce chenal communique en deux endroits, a et b, avec le courant. Sa profondeur est bien plus forte près de la rive que près du banc ; nous nous trouvons probablement ici en présence d'un remaniement ; un changement de direction du fil d'eau a provoqué cet alluvionnement d'une partie du lit autrefois profondément creusée. Un récent éboulement a en partie obstrué le chenal qui se trouve entre le banc 18 et la rive droite.

Le banc 18, ainsi que sa pointe 19, est sablonneux ; c'est un bon exemple de la simultanéité de différentes alluvions. Le banc 20, de gravier et de galets, paraît avoir diminué ; c'est dans ce banc que sont établis les puits de l'usine hydraulique.

L'eau creuse fortement le coude en amont de l'usine, déposant abondamment sur la rive droite. C'est à ce coude que nous avons limité le lac de Pérolles, et que par conséquent se termine notre revision de la carte de 1905.

Le 31 mai 1917, à la suite d'une forte pluie, un éboulement, estimé à 2 000 m³ au moins, se produisit dans la partie supérieure de la falaise du Breitfeld, en face du banc de sable 10. Une forte vague coucha tous les roseaux poussant sur les bancs de sable ; de ce fait, le courant principal fut partiellement obstrué. Un phénomène très intéressant se produisit alors : le fil d'eau fut dévié vers la rive gauche, et passa entre les deux bancs 10 et 11, approfondissant notablement en un temps relativement court le chenal 9.

Tels sont les principaux changements survenus depuis 1905 dans l'aspect du lac de Pérolles ; outre leur intérêt particulier, ils présentent à plus d'un point de vue un intérêt général, montrant l'évolution de la forme des bancs de sable, leur recoupement après leur formation, et l'influence de causes accidentelles sur les modifications de direction du fil d'eau de la rivière ; le tracé approximatif du chemin parcouru par ce dernier, dans le lac de Pérolles, est indiqué sur la carte.

Cette carte de 1917 n'a, comme toutes les cartes à

grande échelle d'un cours d'eau travailleur et alluvionnant activement, qu'un intérêt passager ; au bout d'un temps relativement court elle ne correspondra plus à la réalité qu'elle représente actuellement (été 1917).

CONCLUSION

Examinons quels sont les résultats de cette courte étude. Nous avons vu les causes tendant à rendre de plus en plus torrentiel le caractère de la Sarine, ainsi que l'influence du barrage sur la vitesse de cette rivière. Une méthode simple nous a permis de déterminer le fil d'eau dans les cas douteux, et de dresser ainsi une carte du parcours de ce dernier dans le lac de Pérolles.

Le calcul, approximatif bien entendu, de l'énergie dépensée par la Sarine sur son lit, nous montre que ce travail est de l'ordre d'une centaine de mille de chevaux-vapeur. Les marmites de la Maigrauge montrent l'importance du creusement tourbillonnaire, et permettent d'en généraliser l'application. Nous avons essayé d'expliquer les superpositions d'alluvions en étudiant les conditions d'érosion et d'alluvionnement, ainsi que l'ordre normal et progressif de dépôt des matières charriées, suivant leur poids.

L'analyse de l'eau de la Sarine, suivie de simples calculs, nous a montré l'importance de l'alluvionnement par suspension, perturbateur au plus haut point des installations hydro-électriques ; puis nous avons examiné l'influence de ce transport sur le mouvement de la rivière même, et sur le travail qu'elle est capable d'exécuter.

Pour finir, nous avons fait, au point de vue des alluvions, une comparaison entre la carte du lac de Pérolles en 1905 et en 1917.

Quelles conclusions peut-on tirer de ces quelques pages ? Il semble que l'on peut les ramener à deux principales :

Premièrement, une rivière, même de faible débit, suffit ordinairement, surtout si elle est barrée, ce qui constitue une sorte d'éprouvette pour ses alluvions, pour étudier les lois régissant la circulation de l'eau courante et les effets de cette circulation. Deuxièmement, il importe en pareille matière de ne point juger d'après les apparences, mais d'après des études sérieuses et quantitatives si possible ; ainsi un ruisseau à forte pente travaillera plus qu'un paisible ruisseau. M. de Lapparent insiste sur ce point lorsqu'il évalue le travail du Nil ; il écrit à ce sujet : « Aussi, malgré le volume de ses eaux et l'incomparable développement de son cours, le fleuve égyptien n'accomplit-il qu'une œuvre géologique restreinte. Impuissant à former des dépôts en dehors de la protection du cordon littoral, si ce n'est dans le voisinage immédiat de ses bouches principales, il s'est borné, depuis la période historique, à exhausser le sol d'alluvions par lequel il avait antérieurement remplacé son estuaire. Il est tel petit torrent des Alpes qui, à l'heure présente, modifie peut-être la surface du globe plus efficacement que ce cours d'eau immense, dont le domaine s'étend depuis l'équateur jusqu'au delà du 33^e degré de latitude ! »

Evidemment, les quelques observations consignées ici n'ont qu'une valeur intrinsèque minime ; la nécessité des longues séries d'observations, des statistiques, n'est plus à démontrer : c'est le procédé de la Science actuelle et future.

APPENDICE

Première note. — Puissance de la Sarine.

Il ne m'a pas semblé inutile d'ajouter ici quelques compléments relatifs à la puissance d'érosion et à la puissance d'alluvionnement de la Sarine, c'est-à-dire à son action considérée au point de vue du temps.

1^o *Puissance d'érosion de la Sarine.*

Je me contenterai de donner une évaluation du temps que la Sarine mit à creuser son lit. L'ingénieur Ritter, dans l'extrait du tome XXX du Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles, intitulé « Observations et particularités techniques, géologiques et hydrologiques relatives à l'établissement du grand barrage de la Sarine à Fribourg », rapporte le fait suivant : la tranchée de trop-plein du barrage a subi de 1872 à 1902, une usure moyenne de 1 m. d'épaisseur. Cette remarque peut servir de base pour l'évaluation de la durée nécessitée par le creusement du lit de la Sarine, car, de même que les falaises dans lesquelles est creusé ce dernier, la tranchée de trop-plein est taillée en pleine molasse. La profondeur du cañon est d'une centaine de mètres, ce qui, à raison d'un mètre par trente ans, donne une durée :

$$t = 30 \times 100 = 3000 \text{ ans.}$$

Cependant le lit de la rivière a une largeur minima double de celle de la tranchée, aussi l'érosion fut-elle deux fois moins forte et la durée de l'usure deux fois plus longue, ce qui nous donnerait 6000 ans.

Une seconde correction s'impose ; l'usure de la tranchée fut comparativement rapide parce que sa pente est de 1 0/0.

alors que la pente générale de la Sarine est de 3⁰/100, soit environ trois fois moindre. La vitesse d'un cours d'eau est donnée par la formule déjà citée :

$$V = k \sqrt{R \cdot I}$$

dans laquelle k est une constante, et où R et I représentent respectivement la profondeur hydraulique (quotient de la section transversale par le profil mouillé) et l'inclinaison du lit. Soit v la vitesse de la rivière avec une pente $I=1$ et v' celle trois fois plus forte de l'eau dans la tranchée de trop-plein qui possède une pente $I'=3$; les vitesses étant proportionnelles aux racines carrées des pentes, nous avons :

$$\frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{I}}{\sqrt{I'}} \text{ ou } \frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{3}}, \text{ d'où } v \times 1,75 = v' \text{ et } v = \frac{v'}{1,75}$$

En conséquence, en tenant compte de la pente, la vitesse de la Sarine est normalement 1,75 fois moins grande que celle que prend l'eau dans la tranchée de trop-plein. On admet que l'usure est proportionnelle à la vitesse, donc l'usure exercée par la Sarine sur son lit est 1,75 fois moins forte que celle que produit l'eau dans le canal de décharge que constitue la tranchée de trop-plein. Il faudra également 1,75 fois plus de temps à la Sarine pour affouiller son lit d'une certaine quantité qu'au courant d'eau du canal pour enlever une épaisseur équivalente. Il nous reste donc à multiplier notre chiffre de durée par 1,75 et

$$t = 1,75 \times 6000 = 10.500 \text{ ans.}$$

Cette évaluation n'est pas absolue, bien entendu, et Ritter ne s'illusionnait pas sur la précision de ses calculs lorsqu'il écrivait : « Mais un dernier facteur intervient : c'est celui des graviers quaternaires ou galets de la rivière, qui agissent tantôt comme éléments protecteurs de la surface molassique lorsqu'ils sont au repos, tantôt comme facteur d'usure rapide lorsqu'ils sont en plein mouvement, témoin les marmites du canal de trop-plein déjà relativement énormes et dont je m'occuperai plus loin ».

Ce qui est important à retenir de ces considérations, c'est que théoriquement une dizaine de milliers d'années peut suffire à une rivière pour se creuser dans la molasse un lit profond de cent mètres environ.

2° Puissance d'alluvionnement de la Sarine.

En ce qui concerne la puissance d'alluvionnement, Ritter se contente, dans la brochure citée, de calculer le charriage des matières lourdes. Il estime à 342 000 m³, en trente années, l'apport des graviers par la Sarine, ce qui donne, pour une année, $342\,000/30 = 11\,400$ m³ pesant :

$$P = V \times d = 2,5 \times 11\,400 = 28\,500 \text{ tonnes,}$$

en admettant le chiffre 2,5 comme densité moyenne de la pierre.

Quant au charriage des fins matériaux, du limon, Ritter n'en donne aucune évaluation même approximative, et cependant il lui était impossible en 1902 de méconnaître l'importance de ce facteur qu'il avait négligé en 1872. lorsqu'il assignait au comblement du lac qu'il venait de créer une date beaucoup plus lointaine que 1902, époque à laquelle il constate précisément dans cette brochure que « des masses de sables ténus et de limons l'envahissaient de plus en plus et finirent, après une quinzaine d'années, de le combler entièrement ». Ce sont ses propres paroles. Il ajoute plus loin : « Pour opérer scientifiquement, il faudrait pendant plusieurs années, récolter un volume d'eau chaque jour, le laisser déposer, mesurer le volume du dépôt ou le peser, faire l'addition et l'on aurait la puissance effective moyenne du charriage fluvial observé ». Il est pour le moins surprenant que Ritter n'ait pas effectué, ou du moins fait faire une analyse d'une telle simplicité portant sur le transport limoneux de la rivière qu'il barrait. On trouvera plus haut un exemple d'analyse de l'eau de la Sarine montrant d'une façon frappante l'importance d'un apport qui peut atteindre en un jour 130 tonnes, ce qui correspond à un trouble très normal de l'eau et à un débit faible de 10 m³ par seconde. En temps de crue, la ri-

vière peut rouler 1000 m^3 par seconde, avec une proportion de limon au moins double de celle constatée lors de l'analyse sur laquelle est basé le calcul précédent, soit $2 \times 0,15$ grammes par litre $= 0,30 \text{ gr.}$, coefficient dont l'augmentation est décelée par le virage que subit la couleur des eaux du jaune au jaune-brun. Dans ces conditions le transport effectué par la Sarine en un jour sera :

$$P = 0,3 \times 1000 \times 3600 \times 24 = 0,3 \times 1.000.000 \times 86.400 = 25.920.000.000 \text{ grs}$$

ou $P = 25.920.000 \text{ kgs} = 25.920 \text{ tonnes.}$

Ce chiffre laisse loin derrière lui les 28.500 tonnes qui représentent l'apport annuel du gravier. Heureusement pour le barrage, la plus grande partie du limon passe par dessus l'ouvrage, mais il en reste suffisamment pour l'ensabler d'une façon régulière et croissante ; telle est l'importance du facteur ignoré lors de la construction du barrage et encore pendant de longues années après sa mise en service, car je crois que ce travail publie la première analyse du transport limoneux de la Sarine. Ritter prévoyait bien que des recherches de ce genre se feraient plus tard, quand il écrivait à propos de l'intérêt d'un échantillonnage journalier de l'eau de la Sarine au point de vue de sa contenance en limon : « Cela se fera avec le temps et je rends attentifs ici nos jeunes collègues sur le vaste champ ouvert à leurs ardeurs scientifiques et labeurs futurs, dans le domaine inexploré de l'usure par l'eau de la croûte terrestre, ainsi soumise à l'action corrosive des eaux atmosphériques condensées s'écoulant dans les océans et dans les lacs. En ajoutant au volume constaté la matière dissoute par les eaux, on aurait là un facteur fort important de la puissance de dissolution, d'érosion et de comblement des eaux courantes. » C'est spécialement en ce qui concerne les barrages qu'il importe de se rendre compte à l'avance de la puissance d'alluvionnement du cours d'eau à barrer.

Seconde note. — Méthode pour calculer les effets de l'érosion.

La théorie des lois qualitatives de l'érosion est actuellement fort avancée ; par contre l'étude quantitative de ses effets l'est moins. Je n'ai nullement la prétention de faire ici œuvre nouvelle, car les quelques vues qui vont suivre ne sont que des applications. Je me contenterai de proposer une méthode qui, permettant le calcul des volumes enlevés par l'érosion, présenterait peut-être l'avantage de combler une lacune.

Avant d'exposer cette application, je tiens à défendre son principe. Il arrive parfois de rencontrer des personnes qui, si paradoxal que cela puisse paraître, n'admettent pas encore que les diverses branches de la science puissent se rendre de mutuels services ; pour ces personnes les cloisons qui séparent les divers savoirs que l'homme peut acquérir ne sont jamais assez étanches : pour elles, les mathématiques sont une chose et la géographie physique une autre ; la première est abstraite et la seconde concrète, par conséquent il ne peut y avoir de rapports entre elles. M. H. Bouasse, dans son cours de mathématiques générales (Paris, Delagrave) réagit à juste titre contre cette tendance invétérée ; on trouve en effet dans ce livre (page 468 de la seconde édition) une étude des surfaces topographiques. L'auteur, qui a publié un traité, utilisable non seulement par quelques spécialistes, mais encore par les physiciens et ingénieurs, définit ainsi le but des Mathématiques (page 9) « Le but des Mathématiques est l'étude des fonctions, de leurs représentations et de leurs corrélations géométriques. Leur utilité pratique provient d'une sorte de division du travail entre les expérimentateurs (physiciens et ingénieurs) et les mathématiciens proprement dits. Ceux-ci se sont proposé l'étude des fonctions in abstracto et de certaines fonctions particulières. Ils ont ainsi créé, en apparence, indépendamment de tout souci utilitaire, par des

procédés au premier abord complètement artificiels, une sorte de musée des fonctions où les expérimentateurs viennent chercher ce dont ils ont besoin pour la représentation et l'étude des phénomènes. Bien entendu, aucune de ces fonctions continues ou discontinues n'est la représentation rigoureuse des faits ; mais on peut trouver parmi elles une représentation schématique, approchée, de première approximation.» Appuyés par cette autorité, revenons à notre sujet.

Le volume topographique ou actuel d'une région augmenté du volume enlevé par l'érosion est égal au volume structural ou primitif de cette région :

$$V_s = V_t + V_e$$

si V_s , V_t et V_e représentent respectivement les volumes structuraux topographiques et d'érosion. Quel est l'élément qui différencie le volume structural du volume topographique ? C'est la surface libre de la région considérée, la surface du volume structural étant devenue par l'érosion la surface topographique du volume correspondant.

Avant d'aller plus loin, il importe de définir nettement ces deux surfaces. Les portions de l'écorce terrestre qui ont subi une diminution de hauteur du fait de l'érosion, avaient été soulevées à un certain niveau par des dislocations et des plissements ; c'est l'aspect d'une région considérée immédiatement après la fin de la transformation d'ordre tectonique qu'elle vient de subir que l'on nomme surface structurale. Considérons une plaine uniforme constituée par la superposition régulière des terrains archéen, primaire, secondaire, tertiaire ; par suite du refroidissement graduel de notre planète, qui force l'écorce terrestre à se contracter, notre plaine devra réduire la surface qu'elle occupe ; par conséquent elle se plissera et se couvrira d'une suite d'anticlinaux et de synclinaux. Nous pourrions calculer approximativement la hauteur atteinte par les plissements en considérant l'inclinaison des couches diverses qui les forment. C'est ainsi que l'on a pu évaluer

la hauteur des sommets de certaines montagnes avant que l'érosion n'ait commencé son œuvre destructrice sur les plissements qui les portaient. Dans le cas d'un anticlinal par exemple, nous pourrions connaître la hauteur atteinte par le sommet du pli, au-dessus de la plaine primitive, en mesurant l'inclinaison des couches dont il est formé, lesquelles convergent vers la perpendiculaire élevée dans l'espace suivant l'axe du pli ; évidemment il faudra tenir compte dans cette estimation, de l'aplatissement du profil de l'anticlinal à son sommet, facteur qui introduira dans notre évaluation de hauteur une correction négative. Connaissant la hauteur d'un plissement, son étendue et quelques points intermédiaires, nous obtenons le profil de la surface structurale ; on tâchera ensuite de trouver une courbe exprimable algébriquement sous la forme générale $y_1 = f_1(x)$ identique au profil obtenu ; ainsi l'anticlinal qui nous a servi d'exemple est peut-être susceptible d'être représenté par une sinusoïde de la forme :

$$h = a \sin u$$

Voyons maintenant comment cette surface primitive se transforme peu à peu en la surface actuelle que nous nommons topographique. Considérons un anticlinal qui vient de se former ; l'eau provenant des précipitations atmosphériques va ruisseler à sa surface en de nombreuses rivières parallèles entre elles : c'est l'état conséquent du réseau hydrographique couvrant le pli, dont les cours d'eau suivent la pente générale. Des phénomènes de captures se produisent bientôt, grâce à de moindres résistances locales, qui favorisent certaines rivières ; à mesure que se multiplient ces captures, la physionomie du réseau hydrographique qui draine le pli prend un caractère de plus en plus concentré : c'est le régime subséquent. Finalement, la concentration se poursuivant, les nombreuses rivières du réseau se jettent dans une autre rivière devenue un fleuve par suite des circonstances locales qui la favorisaient. C'est l'action de ce complexe hydrographique, travaillant sans relâche, du modeste sous-affluent au puissant émissaire, à

l'abaissement de son bassin de réception, qui a transformé la surface structurale que des calculs nous permettent de reconstruire en une surface topographique que nous avons sous les yeux. Soit $y_2 = f_2(x)$ la fonction représentée par la ligne traçant le profil de la surface topographique.

1^o) Ces points établis, proposons-nous de calculer en un point la hauteur des terrains enlevés par l'érosion. Cette hauteur est égale à la différence des ordonnées des deux profils des surfaces structurale et topographique en ce point :

$$h = y_1 - y_2 ;$$

au point d'abscisse x_0 les fonctions deviennent :

$$y_1 = f_1(x_0) \quad \text{et} \quad y_2 = f_2(x_0)$$

d'où l'on tire : $h = y_1 - y_2 = f_1(x_0) - f_2(x_0)$, expression permettant de calculer h .

2^o) Cherchons maintenant entre deux points a et b , d'ordonnées respectives x_0 et x_1 de la courbe $y_2 = f_2(x)$ la section des matériaux enlevés à la surface structurale ; en d'autres termes il s'agit de calculer la surface s égale à la différence des deux aires comprises entre les courbes représentatives des deux fonctions, les ordonnées élevées aux points a et b d'abscisses x_0 et x_1 et enfin l'axe des abscisses : $s = s_1 - s_2$, la formule $s = \int_{x_0}^{x_1} f(x) dx$ permet d'évaluer les aires correspondant aux deux fonctions ; on a :

$$s_1 = \int_{x_0}^{x_1} f_1(x) dx \quad \text{et} \quad s_2 = \int_{x_0}^{x_1} f_2(x) dx$$

on en tire :

$$s = s_1 - s_2 = \int_{x_0}^{x_1} f_1(x) dx - \int_{x_0}^{x_1} f_2(x) dx = \int_{x_0}^{x_1} [f_1(x) - f_2(x)] dx$$

3^o) Comparons ensuite les longueurs des deux profils des surfaces structurales et topographiques. Pour cela il nous faut rectifier les deux profils au moyen de la formule :

$$l = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + y'^2} dx.$$

En conséquence les longueurs des courbes représentatives des deux fonctions seront :

$$l_1 = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + f_1'^2(x)} dx \quad \text{et} \quad l_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + f_2'^2(x)} dx$$

* Dans cette formule et toutes celles qui suivent le signe de l'intégrale est remplacé par un grand F.

d'où l'on tire la différence de longueur des deux courbes rectifiées :

$$l = l_1 - l_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + f_1'^2(x)} dx - \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + f_2'^2(x)} dx$$

$$l = \int_{x_0}^{x_1} (\sqrt{1 + f_1'^2(x)} - \sqrt{1 + f_2'^2(x)}) dx.$$

4^o) Calculons enfin le volume érodé. Il est donné par la relation

$$V_e = V_s - V_t$$

Soit $z_1 = \varphi_1(x, y)$ la représentation algébrique de la surface structurale et

$z_2 = \varphi_2(x, y)$ la représentation de la surface topographique.

Cherchons le volume compris entre la surface structurale et un plan servant de base.

Le volume d'une mince colonne de base $dx \times dy$ est

$$dV_1 = dy \times dx \times \varphi_1(x, y)$$

et le volume total :

$$V_1 = \iint \varphi_1(x, y) dx dy.$$

De même le volume compris entre la surface topographique et le plan de base sera :

$$V_2 = \iint \varphi_2(x, y) dx dy.$$

Le volume érodé est égal à la différence des deux volumes calculés, soit :

$$V = V_1 - V_2 = \iint \varphi_1(x, y) dx dy - \iint \varphi_2(x, y) dx dy$$

$$V = \iint [\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)] dx dy$$

Evidemment pour que toutes les formules précédentes soient rigoureusement applicables, il faudrait que le terrain sur lequel s'exerce l'action de l'érosion soit homogène et, de plus, que l'usure qui l'entame soit parfaitement régulière.

Une application simple montrera l'intérêt de ces considérations ; proposons-nous de calculer le volume de terrain enlevé par un cours d'eau qui s'est creusé une vallée. Plusieurs cas peuvent se présenter : une gorge en I, une vallée en V, une vallée de contour polygonal ou enfin une vallée très large. Nous calculerons la surface d'une section transversale de la vallée, puis nous la multiplierons par la longueur considérée du cours de la rivière.

Revenons cependant aux formules générales établies plus haut ; on ne peut nier que les éléments qu'elles supposent connus ne soient difficiles à obtenir. Pour cette raison, la courte étude qui précède peut paraître au premier abord une application totalement dénuée de portée pratique de quelques formules de calcul intégral à la théorie de l'érosion. Je vais essayer de montrer que tel n'est pas le cas. En premier lieu il ne faut pas oublier que certains profils que l'on rencontre en morphologie présentent une régularité remarquable et possèdent un caractère pour ainsi dire mathématique. Si de Lapparent a écrit au commencement d'un paragraphe (Géologie, Phénomènes actuels, livre premier, page 165 de la 5^{me} édition) où il nie la possibilité de représenter géométriquement le profil d'équilibre des cours d'eau : « Une telle courbe serait continue et susceptible d'une expression géométrique, si la masse de l'eau courante demeurerait invariable et que le terrain soumis à l'érosion offrît partout la même nature », il concède cependant, à la fin du paragraphe, que : « Néanmoins, dans un très grand nombre de cours d'eau, le travail de l'eau est déjà assez avancé pour que le profil en long diffère peu d'une courbe d'équilibre ». Cette concession, faite par un tel maître en la matière, est précieuse à retenir. N'oublions pas que certains cours d'eau sont remarquables au point de vue de la régularité de leur profil, le Rhin antérieur, par exemple, sauf dans la toute première partie de son cours, et plus encore le Regen et la Wien affluents du Danube. Penck, dans sa « Morphologie der Erdoberfläche » (première partie, page 323) reproduit le profil, particulièrement théorique, pourrait-on dire, de cette rivière. Si l'on prend la peine de comparer ce profil avec une courbe représentant une fonction du second degré de la forme $y = ax^2$, on sera frappé de l'analogie des deux lignes ; le profil de la rivière est à peu de chose près parabolique ; par conséquent nous sommes en présence d'un profil naturel susceptible d'être représenté par une fonction du second degré. Si la surface structurale drainée

par ce cours d'eau est un anticlinal dont le profil peut être représenté par une sinusoïde, nous pourrions passer immédiatement à l'application des formules données plus haut qui pouvaient paraître tout à l'heure d'inutiles complications. Tel n'est cependant pas mon but, car le développement de ces considérations, bien qu'intéressantes, entraînerait des développements trop longs pour une simple note, et d'un ordre d'idées tout à fait différent de celui dans lequel est écrit le reste de ce travail. Il me suffit d'avoir exposé ici le principe d'une méthode qui, j'espère l'avoir prouvé, a plus de valeur que celle d'une simple curiosité.

Avant de terminer, il me reste à faire remarquer que, dans tout ce qui précède, nous avons supposé avoir à calculer des volumes arrachés au bassin qu'il draine par un cours d'eau hypothétique ayant atteint son profil d'équilibre. Rigoureusement parlant un tel cours d'eau n'existe pas ; je proposerai donc de l'appeler *cours d'eau parfait*, puisqu'aucune rivière et aucun fleuve ne suit réellement le profil idéal qu'est supposé suivre celui sur lequel nous avons raisonné.

Aux objections que pourrait susciter cette nouvelle définition, je répondrai simplement que les différences de ce genre entre les lois que nous établissons et la nature ne sont pas choses extraordinaires ; les sciences physiques en présentent de semblables, bien que moins accentuées. Il en est ainsi dans toutes les branches de la Science humaine, lorsqu'abandonnant les considérations mathématiques purement abstraites, nous abordons l'étude des choses concrètes ou phénomènes ; ainsi aucun gaz ne suit rigoureusement la loi de Mariotte établie pour un gaz idéal appelé *gaz parfait* par les physiciens. J'espère que cette comparaison fera accepter l'expression *cours d'eau parfait* inaugurée ici, et que l'étude mathématique des formes de la surface de notre planète viendra confirmer les quelques idées exposées dans cette note.

Troisième note. -- Relief de Fribourg et de ses environs.

Le relief est d'un puissant secours dans l'enseignement de la morphologie, c'est pourquoi j'en ai construit un représentant Fribourg et ses environs. L'institut géographique possède, il est vrai, un relief de cette région, mais il est un peu réduit, car il est à l'échelle 1 : 25 000 ; aussi le relief dont la reproduction a été annexée à ce travail a-t-il été exécuté au 1 : 10 000. Il forme un carré de 33 cent. de côté ; à cette échelle, un centimètre représente cent mètres, le terrain représenté par le relief est donc un carré qui mesure 3300 mètres de côté et dont la surface est de 9,99 km.², soit approximativement 10 kilomètres carrés. Les hauteurs ont été exagérées intentionnellement par rapport aux longueurs, et cela pour deux raisons : premièrement, la reproduction photographique du relief présente des contrastes plus forts mettant mieux en lumière les formes du terrain ; deuxièmement, les démonstrations relatives à l'érosion de la Sarine sont facilitées, cette dernière frappant à première vue. L'échelle adoptée pour la représentation des hauteurs est de 1 : 6000, l'exagération est donc égale à

$$1 : 6000 / 1 : 10\,000 = 10\,000 / 6000 = 1,666$$

ou approximativement 1,5. Les hauteurs sont donc exagérées de moitié environ par rapport aux longueurs.

A propos de reliefs, je tiens à signaler ici l'intérêt de blocs-diagrammes en argile plastique (prenant très bien les couleurs) qui donnent une image fidèle et fort suggestive, et cela parce que représentant la troisième dimension, des formes suivant les terrains, de l'évolution des cours d'eau, de la morphologie en général.

Bibliographie des livres consultés

De Lapparent. Traité de Géologie (5^e édition).

Alb. Penck. Morphologie der Erdoberfläche.

Annales des Ponts et Chaussées de 1879.

Ferd. Wang. Wildbacherverbauung.

C. Calciati. Les méandres de la Sarine. Le travail de l'eau dans les méandres encaissés.

Ritter. Observations et particularités techniques, géologiques et hydrologiques relatives à l'établissement du grand barrage de la Sarine à Fribourg. Bulletin de la société neuchâteloise des Sciences naturelles tome XXX,

Thèse de M. Gemnetti (manuscrit inédit). Séance du 11 avril 1902.

Plan au $\frac{1}{7500}$ de Fribourg.

Graphiques de l'Entreprise Thusy-Hauterive publiés dans la thèse de M. C. Calciati.

Atlas topographique Siegfried.

Notes de cours sur l'érosion de M. le professeur *Girardin.*

Publications des *Services industriels* de Fribourg.

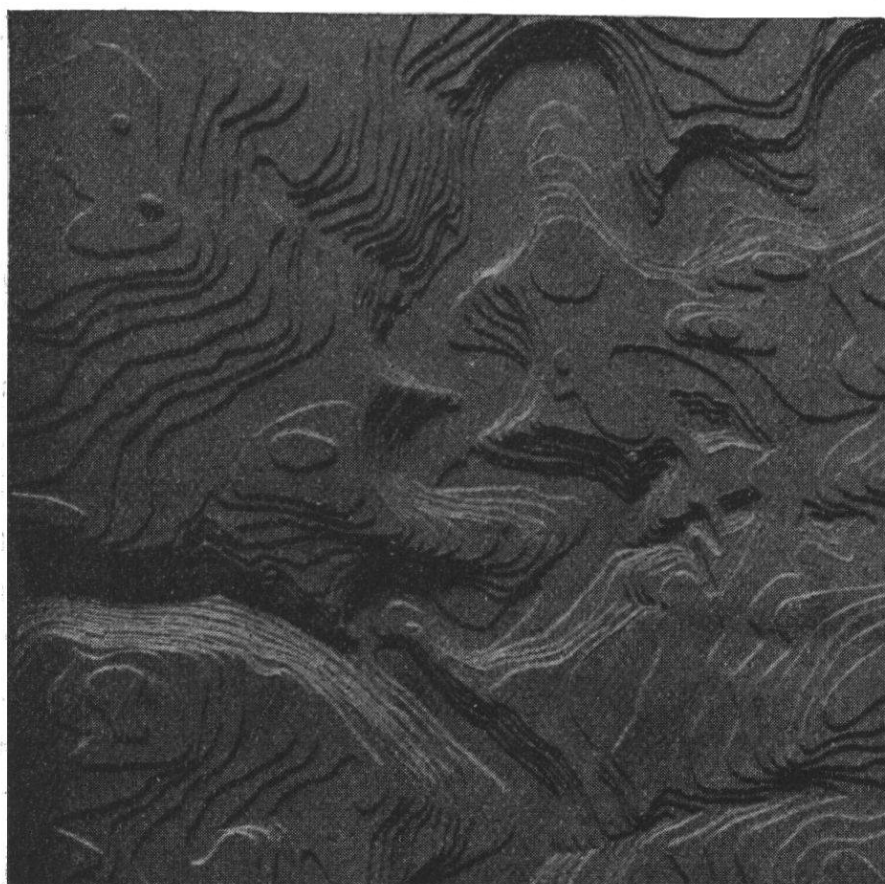


Fig. 4. — Relief de Fribourg au 1:10.000. *F. Leclère.*

LAC DE PEROLLES (en 1905)

Légende



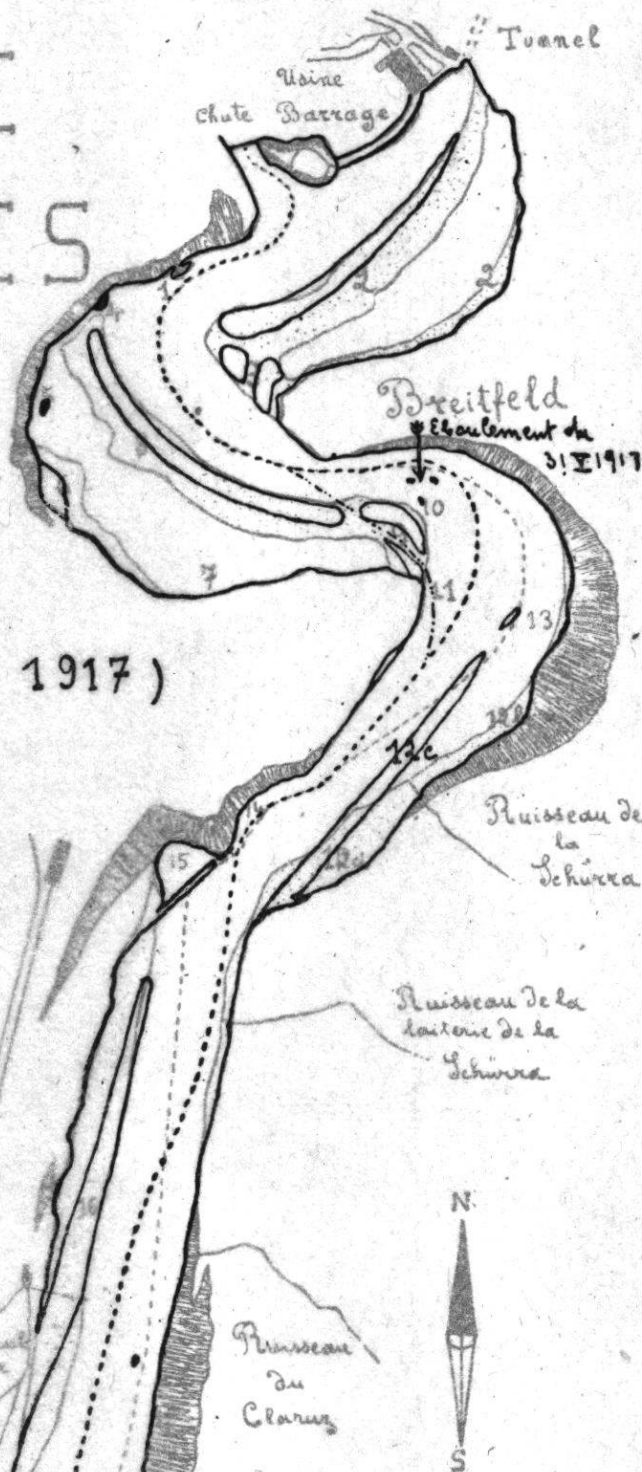
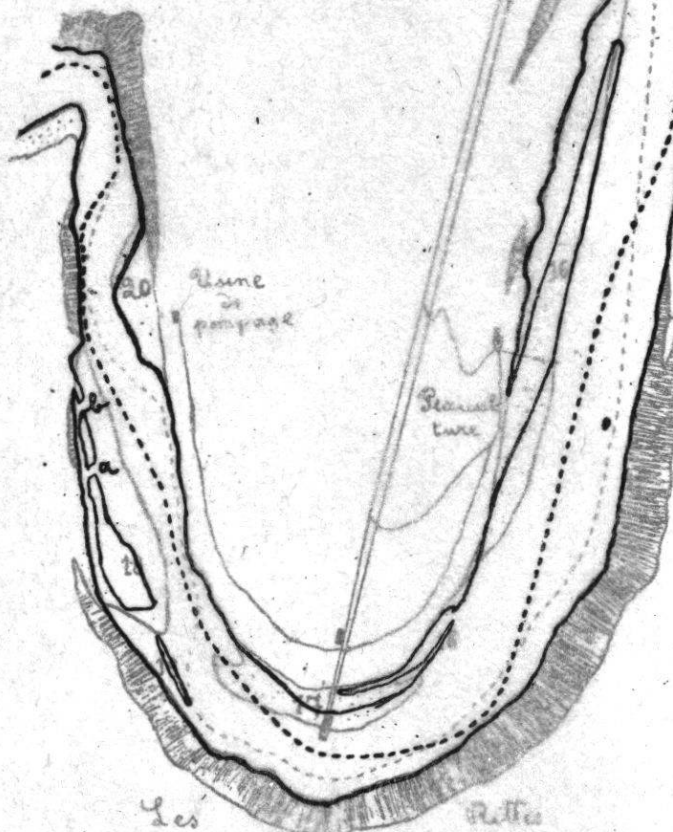
Rochers
Alluvions
Fil d'eau

(en 1917)

Perolles

Nouveau fil d'eau
après l'éboulement.

T. de forage



N.

S.

Orientation.

Echelle : 1/10.000

Réduction de l'original au 1/10.000

