

LEÇONS
DE
GÉOLOGIE PRATIQUE.

Paris. — Imprimerie de E. MARRINET, rue Mignon, 2.

LEÇONS
DE
GÉOLOGIE PRATIQUE,

PROFESSÉES AU COLLÈGE DE FRANCE,
PENDANT L'ANNÉE SCOLAIRE 1843-1844,

PAR

M. L. ÉLIE DE BEAUMONT,
SÉNATEUR, MEMBRE DE L'INSTITUT,
PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES MINES ET AU COLLÈGE DE FRANCE.

TOME SECOND.

PARIS,

J. B. BAILLIÈRE ET FILS,
MEMBRES DE L'ACADÉMIE IMPÉRIALE DE MÉDECINE,
49, RUE HAUTEFEUILLE.

BERTRAND, ÉDITEUR.

1849.

(Publié en 1869.)

AVERTISSEMENT.

Les trois leçons que renferme ce demi-volume ont été professées au Collège de France, pendant l'année scolaire 1843-1844, à la suite des douze leçons dont se compose le tome premier de la même publication. Elles ont été mises sous presse peu de temps après la terminaison du premier volume, et le tirage en était effectué avant la fin du mois de mai 1849, époque à laquelle différentes circonstances concoururent à faire suspendre l'impression. MM. J.-B. Baillièrè et Fils, aujourd'hui possesseurs de l'ancien fonds de librairie de M. P. Bertrand, éditeur du premier volume, ayant retrouvé dans leur magasin ces feuilles prêtes à paraître, m'ont proposé dernièrement de les publier : j'aurais désiré y réunir les leçons subsé-

quentes dans lesquelles, en 1844, j'avais poursuivi l'étude des dépôts sédimentaires et donner ainsi au deuxième volume de mes leçons une étendue à peu près égale à celle du premier ; mais d'autres occupations m'empêchant pour le moment de me livrer aux recherches indispensables, je n'ai pas cru devoir repousser la proposition des éditeurs.

Ce fragment demeure sujet à toutes les observations que j'ai consignées dans l'avertissement du volume publié en 1845 et sur lesquelles je me suis fondé pour solliciter, de la part de mes lecteurs, une indulgence dont le demi-volume actuel aura plus grand besoin encore que le volume précédent.

Elle lui sera d'autant plus nécessaire que ces feuilles, longtemps oubliées, paraîtront plus de vingt ans après avoir été imprimées, sans qu'il m'ait été possible d'y tenir compte des observations nouvelles dont la science s'est enrichie pendant l'intervalle. Cependant tous les faits parvenus depuis lors à ma connaissance étant confirmatifs de ceux que j'ai exposés et les principes élémentaires de l'hy-

draulique, avec lesquels j'ai cherché à les mettre en rapport, n'ayant pas changé d'énoncé, j'ai pensé que mon travail pourrait encore atteindre le but d'utilité pour lequel je l'avais entrepris, et c'est dans cette espérance que je me hasarde à le soumettre au jugement du public.

Paris, le 24 novembre 1869.

L. ÉLIE DE BEAUMONT.

LEÇONS

DE

GÉOLOGIE PRATIQUE.

DOUZIÈME LEÇON.

(23 janvier 1844.)

Des torrents et de leurs dépôts.

MESSIEURS,

Dans les leçons précédentes (comprises dans le 1.^{er} volume de cette publication) nous avons commencé à nous occuper des matières généralement incohérentes qui forment le revêtement extérieur du globe terrestre. La terre végétale, souvent remarquable par son étonnante stabilité, les sables mouvants des déserts et des dunes, les cordons littoraux, les matières terreuses ou arénacées que certains fleuves accumulent près de leurs embouchures sous forme de *Deltas*, ont successivement fixé notre attention. Pour continuer ce genre d'investigations, nous avons à examiner maintenant

Objet
des
leçons précédentes
contenues
dans le 1.^{er} volume
de l'ouvrage.

Suite
du même sujet.

Continuation
de l'étude
des

matériaux meubles
répandus
sur la surface
du globe.

Matières charriées
par
les eaux courantes.

Remarques
générales sur les
vallées
et sur le régime
des
eaux courantes.

des matières que les eaux courantes entraînent et qu'elles déposent en partie le long de leurs cours sous forme d'alluvions. Ces dépôts, de même que ceux qui constituent les Deltas, sont une des manières d'être de la terre végétale envisagée, ainsi que nous l'avons fait, au point de vue le plus général ; car il existe une transition insensible depuis les particules terreuses que le plus mince filet d'eau met en mouvement en ruisselant sur un sol incliné, jusqu'aux dépôts fins ou grossiers que les rivières et les torrents charrient le long de leurs cours, et qui constituent assez ordinairement le sol presque toujours si fertile des vallées.

Si nous jetons un coup d'œil général sur les vallées, nous pouvons remarquer en premier lieu qu'elles n'ont pas habituellement une pente uniforme ; elles présentent, lorsqu'on les remonte, à partir de leur embouchure, des parties diversement inclinées, et leur inclinaison augmente et diminue quelquefois alternativement. Dans certains cas la pente d'une rivière, à partir de son embouchure dans la mer, offre une inclinaison qui va constamment en augmentant ; mais souvent aussi on rencontre plusieurs biefs successifs avec des inclinaisons qui augmentent, diminuent, puis augmentent de nouveau. Il y a même quelquefois des parties où le fond de la vallée présente une contre-pente, et par suite un creux plus ou moins profond que les eaux ont rempli : ces parties constituent des *lacs*.

Un cours d'eau est fréquemment partagé en tronçons discontinus, soit par des lacs, soit par des cascades, des cataractes, des rapides. Le Rhône, le

Rhin et beaucoup d'autres fleuves offrent des exemples frappants du partage d'un même cours d'eau en biefs successifs, ayant des régimes particuliers quelquefois très-différents les uns des autres. Mais à prendre la chose en général, la pente des rivières va ordinairement en diminuant depuis leurs sources jusqu'à leurs embouchures.

Il faut remarquer, en parlant des sources des rivières, que la source d'une rivière est en elle-même une chose très-indéterminée. Ordinairement on désigne par ce nom un de ces filets d'eau qui se réunissent l'un après l'autre et coulent ensemble jusqu'à l'embouchure; mais il entre beaucoup d'arbitraire dans le choix de celui des filets d'eau qu'on préfère à ses rivaux pour le décorer, dès sa naissance, du nom que le fleuve entier doit conserver jusqu'à la mer. Si on remonte une rivière, on voit le cours d'eau se ramifier successivement; on trouve quelquefois simultanément une ou plusieurs ramifications, dont chacune, à son tour, en offre bientôt de nouvelles. Ces ramifications ne sont pas de la même force; souvent une d'entre elles est plus droite, moins ramifiée que les autres et reste plus considérable. Quelquefois aussi ces ramifications, ou, en d'autres termes, ces affluents, sont en très-petit nombre: le Nil en offre un exemple; mais le Nil présente en cela un phénomène rare parmi les rivières.

Ramification
des vallées.
Choix arbitraire
du filet d'eau
qu'on appelle la
source
d'une rivière.

La figure dessinée sur une carte de l'ensemble des cours d'eau qui parviennent à la mer par une embouchure de rivière, est généralement assez analogue à celle d'un arbre. Dans cette figure arborescente,

l'une quelconque des branches peut être considérée comme la source : chacun de ses rameaux est une des sources de la masse d'eau qui se jette dans la mer par l'embouchure commune.

- Rien n'indique en thèse générale laquelle de ces ramifications doit être considérée comme la source de la rivière et en conserver le nom jusqu'à sa naissance : souvent il n'y a pas beaucoup de raisons d'appliquer ce nom à l'une quelconque de ces ramifications plutôt qu'à telle ou telle autre. Quelquefois l'usage a prévalu de conserver le nom de la rivière à un affluent moins grand que les autres et qui amène moins d'eau. Ordinairement on donne le nom de source de la rivière à une *source pérenne* plus ou moins remarquable, plutôt qu'à des torrents qui ne coulent que dans les temps pluvieux, et qui sont sujets à tarir plus ou moins complètement dans les sécheresses : la source du Danube et celle de la Durance en sont des exemples.

L'inclinaison de chacun des affluents qui se réunissent successivement pour former une rivière ou un fleuve, suit une loi, une gradation qui lui est propre ; seulement il est vrai de dire, en général, que l'inclinaison est plus grande, dans chaque affluent, vers sa source que plus bas.

Les phénomènes
produits par
les eaux courantes
sont
plus frappants
près de leurs
sources.

Les phénomènes que présentent les rivières sont généralement plus saillants vers leurs sources que dans le reste de leurs cours, ce qui nous amène naturellement à examiner d'abord les vallées près de leur naissance : les eaux y ont une rapidité plus grande que vers l'embouchure ; elles n'y charrient pas seulement des matières terreuses et des sables,

mais encore des graviers, et même des blocs de rocher. C'est surtout dans les pays de montagnes qu'on observe cette manière d'être particulière, qui caractérise les eaux ruisselant sur des pentes très-considerables, et ce sont les *torrents des hautes montagnes* dont je vais maintenant vous entretenir.

*Torrents
des
hautes montagnes.*

Tous les voyageurs qui ont parcouru les pays de montagnes, ont été frappés des phénomènes que les torrents y présentent et des ravages qu'ils y produisent. Beaucoup de voyageurs et de géologues, parmi lesquels on peut citer De Saussure, De Prony, M. Yates, M. Forbes, etc., en ont parlé avec plus ou moins de détails. Dès la fin du siècle dernier, M. Fabre, ingénieur en chef des ponts et chaussées du département du Var, avait publié un *Essai sur la théorie des torrents et des rivières*¹; mais on peut citer particulièrement, comme contenant beaucoup de détails très-précis; à cet égard, l'ouvrage de M. Surell, ingénieur des ponts et chaussées, sur les torrents du département des Hautes-Alpes; et il est aisé de voir qu'il a étudié la nature sur ce point avec plus de suite qu'aucun de ses devanciers. Une partie des notions que je vais vous exposer sur les torrents seront puisées dans l'ouvrage de M. Surell, qui a été couronné par l'Académie des sciences.²

1. Fabre, *Essai sur la théorie des torrents et des rivières.*

2. L'Académie des sciences, dans sa séance du 6 juin 1842, a décerné le prix de statistique, fondé par M. de Montyon, à M. Surell, ingénieur des ponts et chaussées, pour l'ouvrage intitulé : *Études sur les torrents des Hautes-Alpes.* Paris, Carilian-Gœry, 1841.

Distinction
entre les rivières,
les ruisseaux
et les torrents.

Dans les Hautes-Alpes on divise les cours d'eau en trois classes : les *rivières*, les *ruisseaux* et les *torrents*. Cette distinction, qui existe dans le langage même des habitants, se rapporte à trois régimes particuliers, qui donnent lieu, dans les dépôts, à trois manières d'être plus ou moins distinctes; ce ne sont cependant que trois nuances principales, entre lesquelles il y a des intermédiaires.

Les *rivières* sont les cours d'eau dans les lits desquels il coule toujours de l'eau, et dans lesquels cette eau coule avec un certain degré de régularité.

Les *ruisseaux* sont les cours d'eau dans les lits desquels il coule aussi de l'eau pendant toute l'année; mais cette eau est en moins grande abondance que dans les rivières. Les pentes sont, en général, plus considérables, et ces pentes sont interrompues par des cascades plus fréquemment que dans les rivières. Les ruisseaux sont principalement alimentés par des sources qui coulent toute l'année, dont quelques-unes sont d'un produit presque constant, mais dont un grand nombre cependant diminuent ou tarissent même complètement pendant l'été.

Certains ruisseaux sont en outre alimentés par des glaciers, dont l'eau ne découle pas toujours avec la même abondance, et ne coule presque pas en hiver. Les courants d'eau qui sortent des glaciers ont le plus souvent une origine complexe: ils sont formés, 1.° par l'eau provenant de la fonte des glaces et des neiges; 2.° par les sources qui sourdent sous le glacier même; 3.° par les ruisseaux ou les torrents qui, prenant naissance au-dessus des glaciers, viennent s'engouffrer sous leur masse pour reparaître à leur

extrémité inférieure. On donne quelquefois aussi le nom de *torrents* aux cours d'eau qui sortent des glaciers; mais, dans le sens plus précis que nous cherchons à donner à ces noms, ils méritent plutôt celui de *ruisseaux*.

Les *torrents* proprement dits sont des *cours d'eau temporaires*, qui coulent dans des lits où, pendant la plus grande partie de l'année, il n'y a presque pas d'eau, dans lesquels il n'en coule que dans certains moments, et où elle se trouve quelquefois en très-grande abondance par suite d'une concentration opérée par différentes causes vers leurs points de départ.

On doit remarquer encore que l'eau des ruisseaux, excepté de ceux qui sortent des glaciers, est presque toujours limpide. Ils sont très-peu chargés de matières terreuses et ne donnent naissance qu'à des dépôts comparativement très-faibles, tandis que les torrents sont, au contraire, quand ils coulent, chargés de beaucoup de matières terreuses, entraînant même du gravier, des pierres et des blocs de rocher plus ou moins gros. Ils produisent des dépôts très-considérables.

De ces trois espèces de cours d'eau, vous voyez que ce sont les torrents proprement dits qui sont le plus en opposition avec les rivières, telles qu'elles coulent dans les Deltas : c'est là que nous devons chercher les faits les plus différents de ceux que nous avons examinés jusqu'à présent.

On distingue encore les *rivières torrentielles*, qui sont un intermédiaire entre les torrents et les rivières. Toutes les rivières des hautes montagnes sont,

en général, des rivières torrentielles, si on les compare aux rivières qui coulent dans de larges vallées dont l'inclinaison est plus faible.

Trois classes de
torrens
dans les Hautes-
Alpes.

Toutes ces dénominations n'indiquent au reste que des nuances; mais il est cependant utile de vous les signaler comme propres à fixer l'attention sur les modifications principales que présente le régime des eaux courantes; et, ainsi que je le disais, il y a un instant, elles sont assez frappantes pour que les habitants des Hautes-Alpes leur aient consacré des noms différents.

Les torrens des Hautes-Alpes se divisent encore eux-mêmes en trois espèces, et cette division est assez en rapport avec la manière dont ils agissent sur la surface du sol et avec les ravages qu'ils exercent.

M. Surell distingue,

- 1.° Les torrens qui partent d'un col et coulent dans une véritable vallée;
- 2.° Les torrens qui descendent directement d'un faite;
- 3.° Les torrens qui ont leurs sources au-dessous du faite et sur les flancs mêmes de la montagne.

Le faite qui sépare les deux versants d'une chaîne ou d'une crête de montagnes présente quelquefois une dépression plus ou moins considérable, où prennent naissance deux vallées dirigées dans deux sens diamétralement opposés. De cette dépression, qu'on appelle un *col*, partent aussi deux torrens qui suivent les *Thalweg* de ces deux vallées opposées.

1. Surell, Torrens des Hautes-Alpes, page 11.

D'autres torrents partent de certains points de la crête, sans qu'il y ait de cols marqués.

Enfin il y en a qui prennent naissance, non pas près de la crête, mais en certains points des flancs des montagnes. Cela a lieu particulièrement quand la pente est ondulée. Si le flanc généralement uniforme d'une arête de montagnes présente quelque part une dépression ou seulement une pente moins rapide, les eaux s'y rassemblent et il en part un torrent. Il suffit, ainsi que M. Gros vient de le montrer dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences, que des pentes, même très-rapides, offrent une certaine disposition favorable au rassemblement des eaux, pour qu'elles donnent naissance à un torrent.

Ces trois catégories ne sont encore que trois nuances dans la manière d'être des torrents; il existe entre elles de nombreuses transitions. Le principe de cette division repose cependant sur des circonstances qui établissent entre les torrents des différences assez marquées.

Les torrents qui partent des cols, sont ceux qui ressemblent le plus aux ruisseaux. Il est rare que, dans les vallées un peu longues qui aboutissent à un col, il n'y ait pas quelques sources qui coulent toute l'année, et qui, à elles seules, donneraient naissance à un ruisseau; ce ruisseau se change temporairement en un torrent, lorsque des eaux très-abondantes y sont momentanément rassemblées. Dans ce sens ces deux espèces de cours d'eau se confondent. Il arrive ordinairement que ces torrents-là ont un cours plus long que les autres,

et se rapprochent davantage des rivières torrentielles.

Trois parties à distinguer dans chaque torrent.

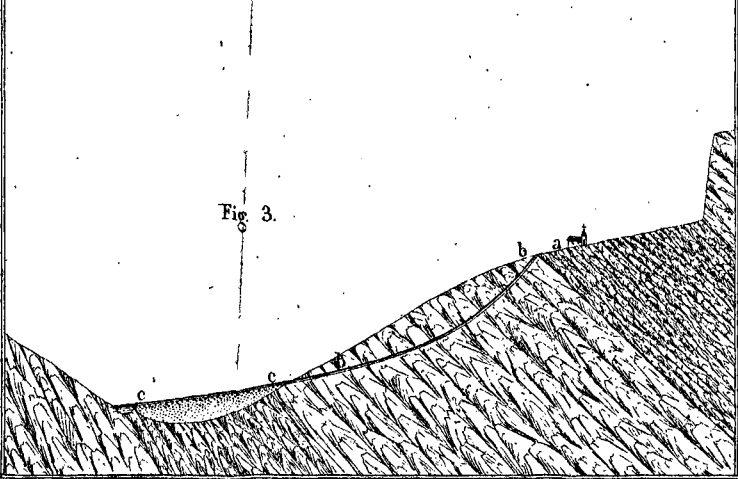
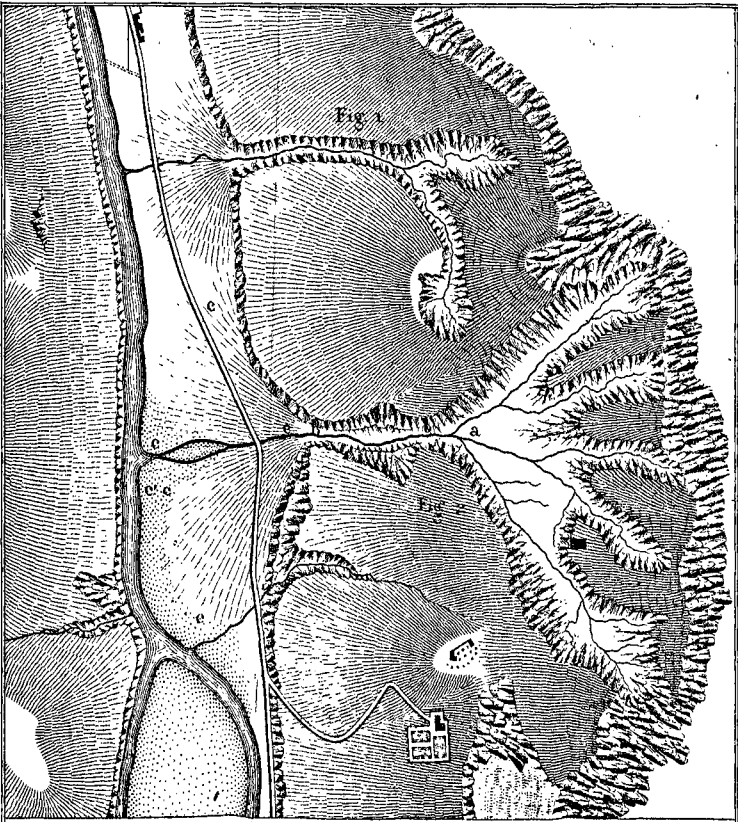
Dans un torrent il y a lieu de distinguer trois parties, et c'est même une division qui peut avoir lieu dans toute espèce de cours d'eau. Nous la retrouverons dans les rivières; mais nous la verrons d'abord d'une manière plus marquée dans les torrents. Les torrents présentent un régime analogue à celui des rivières, mais plus fortement caractérisé: il est, pour ainsi dire, la caricature de celui des rivières. J'ajouterai même que, pour se faire une idée de ce régime qui est propre en général à toutes les masses d'eau, grandes ou petites, qui ruissellent sur la surface du globe, il suffit de considérer les traces laissées par les eaux d'une averse qui ont sillonné une allée de jardin. Le sol, sensiblement incliné du jardin du Luxembourg, en offre constamment des exemples frappants et variés; on a dû y paver les sillons où les eaux se réunissent pour éviter de trop grandes dégradations.

M. Surell considère dans un torrent trois régions: la région où il *affouille*, la région où il *dépose*, et une région intermédiaire.

Il désigne la première sous le nom de *bassin de réception*, où il distingue l'*entonnoir* et le *goulot*; il appelle la dernière *lit de déjection*: la région intermédiaire est le *canal d'écoulement*.¹

Ces trois parties se reconnaissent presque toujours plus ou moins nettement dans un torrent, quelle que soit la classe à laquelle il appartient. Supposons

1. Surell, Torrents des Hautes-Alpes, page 13.



Gravé par Boutez.

Publié par J. B. BAILLIÈRE et fils.

Lith. Besquet.

d'abord que deux rameaux ou contre-forts de montagne se terminent, comme l'indique la figure 1, pl. I.^{re}, sur les flancs d'une grande vallée, qui sera, par exemple, la vallée de la Durance, et qu'il y ait entre ces deux contre-forts un espace déprimé. La partie supérieure de cet espace, généralement assez évasée, est ce qu'on appelle le bassin de réception; c'est là que se réunissent les eaux destinées à couler dans le torrent. Elles s'y réunissent sous la forme d'un grand nombre de petits torrents partiels; elles coulent d'abord sur les pentes, en très-petits filets, qui augmentent en avançant, à mesure qu'ils se réunissent, et qui ont une dernière réunion dans le fond de cet espace évasé, dont l'ensemble constitue le *bassin de réception*. Plus bas il se présente presque toujours une gorge, un espace où les flancs sont plus rapprochés et plus inclinés, et dans lequel la pente du torrent est extrêmement rapide: c'est cette partie qu'on appelle le *canal d'écoulement*. Dans la troisième partie le torrent rencontre un espace plus ouvert dont la pente est moins grande, et où il dépose une partie des débris qu'il a entraînés le long du canal d'écoulement: c'est là ce qu'on appelle le *lit* ou *cône de déjection*.

*Bassin
de réception.*

*Canal
d'écoulement.*

*Cône
de déjection.*

Dans un torrent qui prend naissance sur le flanc d'une montagne, comme l'indique la figure 2, pl. I.^{re}, il y a d'abord à distinguer le *bassin de réception*: ce bassin de réception aura une assez grande largeur et offrira la forme d'un entonnoir, dont toutes les eaux tendront à se réunir au point *a*. Plus bas il y aura dans le flanc de la montagne une échancreure *bb*, sans quoi ces eaux produiraient un lac :

cette échancrure, qui sera profondément encaissée et dans laquelle les eaux couleront avec impétuosité, sera le *canal d'écoulement*; enfin, il y aura à l'extrémité de l'échancrure le *lit* ou *cône de déjection*, c'est un remblai bombé et souvent très-large, où le cours du torrent est en saillie et sujet à changer de place.

Rôle
que les eaux y
jouent.

Les eaux jouent dans ces trois parties des rôles différents, qui concourent à la formation de la *courbe du lit*. Dans le *bassin de réception*, les eaux produisent des dégradations qui les chargent de matières terreuses, sableuses, pierreuses; elles s'écoulent avec ces matières par le *canal d'écoulement*, et elles les déposent sur le *cône de déjection*.

Causes subites
qui
réunissent les eaux
dans les bassins
de réception.

Les eaux peuvent se réunir dans le bassin de réception par plusieurs causes très-différentes, mais qui, en général, ont cela de commun, qu'elles agissent dans un espace de temps très-court, ce qui est nécessaire pour que la crue soit considérable.

Fontes de neige.

Dans le département des Hautes-Alpes il s'accumule beaucoup de neiges; le vent chaud du midi, qui vient de la Méditerranée, et dont la haute température est peut-être même due quelquefois à l'action exercée par le soleil dans le grand désert de Sahara, fait que les neiges, entre certaines limites de hauteur, fondent presque simultanément. Il en résulte une multitude de filets d'eau, qui se réunissent dans le bassin de réception et s'écoulent par le canal d'écoulement.

Orages.

Quelquefois ce sont les orages de la fin de l'été qui produisent l'accumulation subite des eaux. Le vent chaud qui vient de la Méditerranée, mélangé

sur la crête des Alpes avec le vent froid du nord-est, ou, d'après M. de Gasparin, avec celui du sud-est, donne lieu à des abats d'eau énormes, qui font ruisseler l'eau sur toutes les montagnes, de manière à occasionner une crue générale, plus désastreuse que celle de la fonte des neiges.

Un orage purement local peut aussi donner lieu à la crue d'un torrent ou d'un petit nombre de torrents contigus. Ces crues tout à fait accidentelles sont quelquefois les plus subites et les plus dangereuses.

Les crues des torrents éclatent souvent avec une promptitude surprenante : quelquefois dans l'espace de très-peu d'heures il se réunit dans un bassin de réception une quantité d'eau énorme, qui bientôt fait irruption dans la partie inférieure du lit du torrent avec une extrême rapidité. Dans les temps ordinaires on ne rencontre dans le lit du torrent qu'un très-petit filet d'eau, et cette eau coule avec très-peu de vitesse, tombant lentement de pierre en pierre. Lorsque la masse d'eau devient plus considérable, elle acquiert une vitesse beaucoup plus considérable aussi, de sorte qu'une molécule d'eau qui, lorsqu'il n'y avait pas beaucoup d'eau, mettait une heure pour arriver d'un point à un autre, ne met bientôt plus que le tiers ou le quart du même temps; puis, quand la masse d'eau est très-grande, une molécule finit par arriver en quelques minutes dans la partie inférieure du lit du torrent.

De là résultent souvent des accidents déplora-
bles. Dans les Hautes-Alpes, dans les Cévennes et dans beaucoup d'autres pays de montagnes, les lits des

Rapidité des crues
des torrents.

Accidents
qui en résultent.

torrents servent très-fréquemment de chemins. Il faudrait une heure à un homme pour remonter le canal d'écoulement d'un torrent. Souvent les eaux, quand on y entre, ne coulent qu'en un filet imperceptible, et tout semble annoncer qu'on pourra parcourir toute la partie resserrée du lit, où, à cause de la verticalité des parois, on ne peut marcher ailleurs que dans le lit même du torrent, avant que ce lit cesse d'être à sec; mais lorsqu'on y est engagé et qu'on a parcouru une certaine distance, il survient à l'improviste une masse d'eau énorme qui entraîne les voyageurs surpris.

Explication
de l'arrivée subite
des eaux.

L'accélération qu'éprouve naturellement le cours des eaux, quand leur masse augmente, fait que la masse d'eau résultant d'un orage local et imprévu, arrive dans la partie inférieure du torrent avant les eaux résultant des premières gouttes de pluie, qui, étant moins abondantes, ont pris un cours moins précipité et ont été rejointes et dépassées par celles qui sont tombées plus tard et en plus grande abondance.

Effets singuliers
que produisent les
eaux des torrents.

Quand une fois l'eau est en masse considérable sur une pente rapide, elle y roule avec la vitesse d'un vent impétueux, de manière à faire naître, en chassant l'air, une véritable rafale, comparable à celles que déterminent les avalanches. Plus d'une fois des forêts ont été renversées par des avalanches; cela n'a pas toujours été parce que la neige est passée dessus; ce résultat singulier a quelquefois eu lieu par le seul effet de l'air mis en mouvement. Ce phénomène ressemble encore à l'effet que l'eau produit dans les trompes qui servent de soufflets à

Rafales.

certaines usines à fer. Les torrents occasionnent ainsi des coups de vent épouvantables, capables d'enlever des ponts. On a vu quelquefois des ponts enlevés, non pas par l'eau des torrents, mais, avant que l'eau n'arrive, par l'air que l'eau chasse devant elle.

Ponts
qu'elles enlèvent.

Ces eaux ont une telle impétuosité qu'elles lancent même quelquefois des blocs de rocher, soit par l'effet de l'air mis en mouvement, soit par celui de leur mouvement propre¹. Comme ces eaux roulent sur elles-mêmes avec une très-grande vitesse, les blocs qu'elles entraînent se détachent quand ils arrivent à la surface; et par l'effet de leur densité, qui surmonte plus aisément la résistance de l'air, ils se meuvent au-dessus du cours d'eau comme des projectiles. Dans des ouvrages en bois établis sur de pareils torrents, on a trouvé quelquefois des blocs de pierre qui étaient entrés dans le bois comme des boulets de canon.

Blocs de rocher
lancés.

Des pentes de 6 centimètres par mètre ($3^{\circ} 26' 1''$) sont susceptibles de donner naissance à ces sortes d'effets par la vitesse que l'eau en grande masse y acquiert.²

Pentes
sur lesquelles
ces effets
se produisent.

Les torrents, animés de ces énormes vitesses, se chargent promptement d'une grande quantité de débris des montagnes. Dans les parties les plus élevées de leurs pentes, ces torrents ne sont encore que de petits filets d'eau qui entraînent seulement un peu de matières terreuses, et même en petite proportion, surtout s'il y a du gazon. A mesure que ces

Comment
les torrents
se chargent de
débris.

1. Surell, Torrents des Hautes-Alpes, pages 34 à 39.

2. *Idem*, *ibid.*, pages 18 et 249.

filets d'eau se réunissent, ils acquièrent une plus grande vitesse, et ils produisent des sillons plus profonds.

Comment
ils dégradent le
terrain.

Une fois le terrain entamé, le phénomène marche très-vite. Des deux côtés des sillons il se fait des éboulements de matières terreuses. Le filet d'eau tend toujours à aller en ligne droite; il choque ainsi les berges des sillons dans toutes les sinuosités et les fait ébouler : l'eau se charge de matières terreuses ébouées; plus elle en est chargée, plus elle est dense, et plus son choc a de force pour une vitesse donnée.

Les torrents produisent ainsi dans leur bassin de réception même de très-grandes dégradations. Le sol du bassin de réception est souvent cultivé, ou du moins occupé par des pâturages. Un champ où une portion de prairie se trouve placée, comme l'indique la fig. 3, pl. I.^{re}, entre deux ravins dont les flancs se dégradent sans cesse, où il arrive constamment des éboulements, préparés souvent par des fentes, comme dans les falaises au bord de la mer. On cite même des villages placés dans la position qui vient d'être indiquée, et quelquefois on est obligé de les abandonner, parce qu'ils menacent de s'ébouler dans le ravin qui les mine. On réussit généralement cependant à arrêter les dégradations, en établissant dans le lit du torrent un barrage solide, que le torrent ne puisse pas démolir et qui l'empêche de creuser plus bas; les matières charriées s'accumulent en amont du barrage jusqu'à son niveau, les eaux se précipitent en cascade par-dessus le barrage et l'état du lit devient permanent. On

Obstacles
qu'on oppose à ces
dégradations.

son niveau, les eaux se précipitent en cascade par-dessus le barrage et l'état du lit devient permanent. On établit ces barrages de différentes façons : quelquefois c'est un gros mur transversal, d'autres fois un rang de pieux garni de branchages.

A mesure que le torrent se grossit par la réunion progressive des divers filets, il devient plus impétueux. Plus il y a d'eau sur une pente donnée, plus la vitesse est grande, toutes choses égales d'ailleurs. Les eaux, en se réunissant, produisent des affluents de moins en moins nombreux, mais de plus en plus puissants, et, par l'effet de leur action prolongée, le fond du bassin de réception se trouve sillonné par des ravins très-creux dans des directions diverses, mais convergentes. Ordinairement ces ravins se réunissent à l'entrée d'un étranglement, qui est, relativement à l'ensemble des affluents dont le bassin de réception est sillonné, comme le *goulot* d'un entonnoir par rapport à son ouverture évasée.

Manière
dont les eaux
se réunissent.

L'existence d'un pareil étranglement tient fréquemment à ce que les roches n'ont pas le même degré de consistance dans toute l'étendue de la montagne. Dans la partie supérieure, le bassin de réception sera souvent très-élargi, parce que le sol sera formé de roches friables, facilement dégradées par les eaux. Plus bas il y aura des couches solides, par exemple des calcaires compactes et durs comme du marbre, qui offriront beaucoup de résistance : là le torrent se réduira à une seule branche, que M. Surell nomme *canal d'écoulement*.

Canal
d'écoulement.

Les torrents sont moins sujets que les ruisseaux à présenter des chutes d'eau ; mais la gorge qui leur

Action
que le torrent
y exerce.

sert de canal d'écoulement se trouve généralement dans une position où un simple ruisseau, qui n'aurait eu presque aucune action sur son propre lit, se précipiterait en cascade. Dans le lit du torrent les ressauts de ce genre ont été plus ou moins complètement effacés, et des gorges étroites et profondes les ont remplacés. Dans cette partie le torrent agit avec un redoublement de violence; il détache toutes les parties qui n'adhèrent pas fortement à la masse, et il use les roches qu'il ne peut détacher, en roulant très-rapidement des pierres sur leur surface; il leur imprime en même temps des secousses qui les ébranlent; et si elles présentent des fentes, les eaux s'y introduisent et tendent à en faire écrouler les parois. Par toutes ces causes réunies il se produit des éboulements dans les flancs du canal d'écoulement, et de là proviennent en grande partie ces gros blocs très-solides que le torrent entraîne avec lui.

Les canaux d'écoulement de beaucoup de torrents ne sont autre chose que des fentes élargies de cette manière; mais comme le torrent ne démolit pas facilement les roches solides, et comme son action n'a même qu'un effet assez limité pour les corroder et les user, il laisse au lit une très-forte inclinaison. L'eau y acquiert une grande rapidité, surtout si le profil du lit est étroit par en bas et à peu près triangulaire, de manière à ce que la section du courant soit toujours presque aussi profonde que large. La rapidité diminuerait si la section était large et à fond plat.

C'est ce qui arrive souvent à l'extrémité infé-

rieure du canal d'écoulement : le lit, moins enfoncé, devient plus large ; il y a une moins grande hauteur de section, la vitesse diminue ; une partie des matériaux entraînés se déposent et forment les *cônes de déjection*.

*Cônes
de déjection.*

A peine sortis des gorges qui leur servent de canal d'écoulement, les torrents changent de régime en rencontrant un sol moins incliné. M. de Prony avait déjà remarqué, dans les marais Pontins, que la pente des eaux des torrents éprouve, en passant de la zone environnante, plus inclinée, à la plaine marécageuse, qui l'est beaucoup moins, une espèce de solution de continuité, de laquelle il résulte que les matières charriées par les eaux se déposent près de leur entrée dans le marais. Ces dépôts causent, ajoute M. de Prony, des obstructions dont les suites sont on ne peut plus dangereuses, surtout lorsque les torrents entraînent des graviers et de gros sables.¹ Il en est exactement de même lorsque les torrents des Hautes-Alpes débouchent des gorges des montagnes dans les parties plates des vallées principales ; elles y entassent des masses coniques de débris qui cachent le pied de la berge de la vallée et qui contribuent à empêcher que les torrents ne tombent en cascade, dans la vallée, à la manière des ruisseaux.

Dépôts
qui
s'y accumulent

Le *canal d'écoulement* est la partie du cours d'un torrent où il est le moins offensif. Ses dégâts se bornent aux éboulements qu'il peut déterminer dans les flancs de la gorge, et qui sont en général peu importants si on les compare aux dégâts qui

Rapports
entre les canaux
d'écoulement
et les
cônes de déjection

1. De Prony, Marais Pontins, page 31.

résultent des affouillements produits dans les bassins de réception et des dépôts opérés sur les cônes de déjection. Le canal d'écoulement est un intermédiaire nécessaire entre les deux autres régions, celle des affouillements et celle des remblais. Cet espace intermédiaire peut se réduire pour ainsi dire à un point; car le torrent peut commencer à remblayer par ses déjections immédiatement au-dessous du point où il cesse d'affouiller; mais ordinairement la région intermédiaire a une certaine étendue; elle est même quelquefois très-longue. Le canal d'écoulement est au reste la partie des torrents la moins bien définie et la plus variable¹, parce qu'elle dépend plus encore de la nature et de la structure du terrain que du régime des eaux.

Longueurs
et pentes
des vallées des
torrents.

En général, les vallées dans lesquelles les torrents des Hautes-Alpes produisent les phénomènes les plus redoutables, sont très-courtes; d'après M. Surell elles ont rarement plus de 5 lieues (20 à 25 kilom.) de longueur; mais leur pente est très-considérable, elle excède quelquefois 8 centimètres par mètre ($4^{\circ} 34' 26''$), et elle n'est jamais au-dessous de 2 centimètres par mètre ($1^{\circ} 8' 43''$).

Pentes et formes
des
cônes de déjection.

Les cônes de déjection ont eux-mêmes des pentes très-fortes: M. Surell en cite par exemple de 5 à 7 centimètres par mètre ($2^{\circ} 51' 45''$ à $4^{\circ} 0' 17''$); il en existe même de plus considérables.

M. Yates, qui a fait dans diverses parties des Alpes des observations intéressantes sur les cônes de débris

1. A. Surell, Études sur les torrents des Hautes-Alpes, p. 16 et 22.

des torrents, les appelle *cônes obtus*, par opposition avec ceux qui résultent de simples éboulements, auxquels il donne le nom de *cônes aigus*. Il leur assigne des pentes de 5 à 15°¹ (pentes qui sont cependant un peu exagérées et qui dépassent certainement beaucoup la moyenne). J'ai mesuré moi-même les pentes des *cônes de débris* d'un grand nombre de torrents que j'ai classés parmi les talus formés par entraînement, et je les ai trouvées comprises entre 5 et 12°; mais je dois faire remarquer que je n'ai pris de mesures que pour ceux dont les pentes étaient très-sensibles à l'œil; que j'ai pris pour chacun d'eux le plus grand angle visible, parce que je cherchais la limite supérieure de ces sortes de pentes, et que j'ai compris dans mes mesures les cônes de plusieurs petits torrents où les grandes crues sont très-rares.²

C'est en tenant compte des mesures prises sur les cônes de débris de ces petits torrents, que j'ai cru pouvoir admettre que les talus latéraux de l'Etna, dont la pente atteint, mais dépasse rarement, 8°, ont à peu près l'inclinaison que tendent à leur imprimer les eaux qui y coulent torrentiellement, et dont la puissance est faible si on la compare à celle des grands torrents des Alpes.

Pour ceux-ci, la pente de leurs cônes de débris

1. Rev. Yates, Mémoire sur l'alluvium; Édimb. *New phil. journal*; tome II, page 13 (octobre 1831).

2. Élie de Beaumont, Recherches sur la structure et sur l'origine du mont Etna. Mémoires pour servir à une description géologique de la France; tome IV, page 212; et Annales des mines, 3.^e série, tome X, page 563.

est certainement inférieure à 8° , et à cet égard M. Yates se trouve à peu près d'accord avec M. Surell. En effet, M. Yates cite des cônes dont la cime est de 500 pieds (152 mètres) plus élevée que la base, et le diamètre de 3 ou 4 milles (4800 à 6400 mètres), ce qui donne tout au plus des pentes de 0,063332 et de 0,^m0475 par mètre, ou de $3^\circ 37' 26''$ et de $2^\circ 43' 10''$; et M. Surell cite des lits de déjection dont la cime est élevée de 70 mètres au-dessus de la base, et dont la largeur dépasse 3000 mètres, ce qui suppose une pente moyenne de 70 pour 1500 ou de 0,^m046667 par mètre¹, c'est-à-dire de $2^\circ 40' 19''$. Une pente moyenne de 4° est donc déjà très-forte pour le cône de débris d'un torrent puissant.

La tendance naturelle des torrents est de couler avec uniformité, de ramener à une pente uniforme chaque arête du cône de déjection. Certaines circonstances modifient à la vérité l'effet produit, et remplacent la ligne droite par une courbe, dont la concavité est tournée vers le ciel. Cette courbure explique en partie les différences qui existent entre les mesures de pentes de cônes de déjection données par M. Surell, et celles que j'ai indiquées d'après les observations de M. Yates et d'après les miennes. Les mesures de M. Surell se rapportent à l'ensemble de l'arête la moins inclinée, tandis que celles de M. Yates, et surtout les miennes, dans lesquelles je cherchais le *maximum*, se rapportent à la partie supérieure et la plus inclinée de l'arête qui se dessinait devant moi. Il faut ajouter que la cour-

1. Surell, Torrents des Hautes-Alpes, page 11.

bure dont je viens de parler, quoique sensible dans les résultats des mesures, est peu apparente à l'œil, d'où il suit que ces cônes, vus de loin, ainsi que M. Surell n'a pas manqué de le remarquer de son côté¹, frappent les yeux par la régularité géométrique avec laquelle ils se dessinent. Dans quelques-unes des grandes vallées des Alpes on les voit se succéder rapidement; et comme c'est toujours un phénomène naturel remarquable que la fréquente répétition de formes régulières et semblables, ce spectacle ne manque jamais d'attirer l'attention de l'observateur.

Apparence
générale
de ces cônes
dans
les grandes vallées
des Alpes.

Dans les vallées du Rhône et de l'Adige ce phénomène est très-frappant. Les cônes de déjection, qui descendent alternativement d'un côté et de l'autre de la vallée, la barrent chaque fois presque en entier, et obligent la rivière qui la parcourt à aller raser successivement l'une et l'autre berge de la vallée. Cet effet est parfaitement exprimé sur les belles cartes du Tyrol publiées par l'état-major autrichien.

Souvent les différentes arêtes d'un même cône ont à peu près la même inclinaison, de sorte que le cône est à base circulaire. D'autres fois les inclinaisons des diverses arêtes sont très-inégales et la base du cône est très-irrégulière.

Il y a des torrents qui descendent dans des canaux extrêmement rapides, et qui, par conséquent, ont une grande tendance à continuer leur cours en ligne droite, de manière que les arêtes situées dans

1. A. Surell, ouvrage cité, page 18.

la direction suivant laquelle le torrent débouche, se trouvent plus longues et moins inclinées que les arêtes latérales. De là il résulte qu'un pareil torrent n'obstrue la vallée principale où il tombe que sur une petite longueur; il la barre en quelque sorte par une digue étroite et élevée, et c'est une chose assez bizarre de voir qu'on est obligé de monter plus ou moins rapidement pour arriver au torrent. La vallée de l'Adige, celles de la Salza, du Rhône, de l'Isère, de la Durance, et beaucoup d'autres, présentent un grand nombre de ces montées, au sommet desquelles se trouve un pont sur un torrent.

En pareil cas les torrents entassent souvent des débris des deux côtés de leur lit, de manière à se former à eux-mêmes des digues latérales. Si le torrent éprouve une crue plus considérable qu'à l'ordinaire, il peut se faire qu'il rompe une de ces digues et se déverse d'un côté. Mais cela n'arrive pas assez habituellement pour que ce régime se maintienne; le torrent reprend de lui-même la ligne droite, et les digues latérales se rétablissent et se conservent.

De pareils torrents finissent par se trouver suspendus sur une sorte de levée creusée en forme de sillon à sa partie supérieure. Sur le chemin qui conduit de Barcelonette au village de Faucon, on traverse un torrent qui a une pente assez considérable. Comme on arrose les terres dans les environs, on avait à faire passer un canal d'irrigation dans le terrain coupé par le torrent. On a agité la question de savoir si on couperait le cône de débris pour faire passer le canal au-dessous du torrent,

Observations
sur les
cônes de déjection
de la vallée
de Barcelonette.

ou si on le ferait passer sur un pont par dessus : on a préféré le premier mode de construction. Le torrent coule sur un lit qu'il a élevé lui-même avec des berges très-rapides des deux côtés ; il n'a pas été difficile de couper ce cône, qui est assez étroit, d'y bâtir une voûte sous laquelle passe le canal d'arrosement, et de rétablir les berges du torrent.

Il existe près de Barcelonette un autre torrent, dont on a grand soin de nettoyer le lit, parce que, si on le laissait s'obstruer, l'eau se déverserait sur les côtés et pourrait inonder la ville.

On pourrait citer beaucoup d'autres singularités dans l'entassement des matières charriées par les torrents. Dans un ouvrage qu'il vient de publier sous le titre de *Voyage dans les Alpes*, ouvrage qui peut être comparé aux voyages de Saussure pour la variété des objets dont il traite, M. Forbes cite dans la vallée de Saint-Nicolas, au pied du mont Rose, un grand nombre de torrents extrêmement fougueux, qui ont formé des deux côtés des digues de blocs mélangés de cailloux, de gravier et de petits fragments résultant du choc des blocs les uns contre les autres, et de sable argileux produit par le broiement de ces mêmes blocs. Les digues ont latéralement le talus d'éboulement qui convient aux différentes matières, et M. Forbes fait remarquer que l'entassement des blocs a lieu de la même manière que dans les *moraines* des glaciers. C'est là, ajoute-t-il, une circonstance qu'il est bon de constater, et qui n'avait pas été signalée de manière à fixer l'attention.

« Entre Saint-Nicolas et Randa on traverse un

Observations
de M. Forbes
sur les
cônes de déjection
de la vallée
de Saint-Nicolas.

torrent impétueux qui accumule les blocs sur ses deux rives, sous la forme de digues, qui servent, jusqu'à un certain point, à arrêter sa fureur, tandis que le niveau de son lit est continuellement exhaussé par les détritrus qu'il accumule. Quand la barrière est rompue par une crue extraordinaire, la contrée sur l'une des rives est nécessairement inondée.

Ressemblance
des dépôts
qui s'y forment
avec les *moraines*
des glaciers.

« Il s'agit seulement ici de torrents des plus sauvages et des plus puissants qui descendent sous un grand angle, et qui agissent sur les blocs avec assez d'énergie pour les pousser, avec l'aide de la gravité, à une grande distance et pour les façonner en masses irrégulièrement arrondies. Un tel régime est celui des torrents où il roule dans les crues plus de pierres et de matières terreuses que d'eau. Sous le rapport de la forme, les digues latérales formées par ces torrents ressemblent aux *moraines* des glaciers, la pente extérieure, et même la pente intérieure étant généralement déterminées par l'angle sous lequel les blocs sont en repos. Les matériaux, de part et d'autre, sont semblables : ce sont des blocs anguleux, plus ou moins émoussés par la friction, sans être jamais complètement arrondis ou polis, du gravier anguleux et du sable à grains aigus. Dans la disposition de ces matériaux, je n'ai pas observé, dit M. Forbes, cette régularité d'arrangement qu'on indique comme le caractère distinctif entre l'action de l'eau et celle des glaciers ; au contraire, les dépôts de ces torrents semblent être complètement dépourvus de lits alternatifs de matériaux fins et grossiers ; et, comme dans les vraies moraines, les gros blocs se trouvent souvent à la partie supérieure. »¹

1. Forbes, Voyages dans les Alpes, page 310.

Même lorsque les torrents forment des cônes de débris d'une assez grande régularité, il ne faut pas s'attendre à y trouver des matières disposées suivant une loi uniforme dans la direction de chacune des arêtes. Le torrent abandonne les matières qu'il charrie, aussitôt que sa vitesse n'est plus capable de les pousser en avant. M. Yates a observé que, dans les cônes formés par les torrents, les fragments de roches les plus gros restent à la cime, tandis que, dans les cônes formés par éboulement, c'est le contraire¹. Les gros blocs sont abandonnés sous des angles considérables; les graviers sous des angles moindres; les sables et la boue sous des angles plus faibles encore. Mais ces débris ne se partagent pas tous exactement d'après leur volume, parce que des sables, par exemple, se trouvent immédiatement couverts par de gros galets, et les galets par de gros blocs; on voit de petits fragments qui sont déposés pêle-mêle avec les blocs, dans leurs interstices, et d'autres qui sont entraînés avec les matières plus ténues, provenant de la desagrégation des matières molles dans lesquelles le bassin de réception s'est formé. Tous ces matériaux se trouvent donc pêle-mêle, et si l'on faisait une section dans un cône de déjection, on trouverait dans beaucoup d'endroits des accumulations confuses d'un mélange de galets, de sable fin, et même de matières terreuses.

Disposition
habituelle
des
matières charriées
dans les
cônes de déjection.

Il peut arriver qu'une certaine année le torrent se soit simplement déversé par-dessus son bord, et

1. Rev. Yates, Mémoire sur l'alluvium; *Edimb. New phil. journal*; tome II, page 13 (Octobre 1831).

ait répandu sur le sol, qu'il aura inondé, des matières fines ou boueuses, et qu'une autre année il fasse dans ce même bord une brèche, par laquelle il coulera avec toute son impétuosité en charriant de gros blocs, qu'il abandonnera immédiatement. Il se produit ainsi des alternatives de matières de différentes grosseurs; mais la couche, formée par chacune de ces sortes de matières, n'a rien de régulier.

Natures diverses
de ces matières.

Les matières qui se déposent sur les cônes de déjection des torrents sont de natures diverses, suivant les circonstances. Leur nature dépend avant tout de celle des substances qui résultent de la désagrégation du terrain dont est formé le bassin de réception, et aussi un peu de la nature de celles qui peuvent s'ébouler des flancs de la gorge ou canal d'écoulement. Les flancs de la gorge sont ordinairement solides; ils donnent, suivant les circonstances, des blocs dont les angles sont simplement émoussés, ou bien des cailloux d'un volume plus ou moins réduit. Le bassin de réception produit souvent des matières terreuses. Les torrents charrient donc non-seulement du gravier, mais encore de la boue. Cette boue est elle-même déposée, mais elle ne l'est pas généralement près de la naissance des cônes de déjection; elle est souvent entraînée dans la rivière principale, où tombent les torrents; et celle-ci la dépose lorsque sa vitesse devient assez faible pour le permettre. Cette boue est d'une consistance remarquable; quelquefois elle se solidifie avec une assez grande facilité, et elle acquiert par la seule dessiccation une consistance presque pierreuse. Dans

le département des Hautes-Alpes on donne à cette boue noire le nom de *lave*. Lorsqu'elle est très-pâteuse, par suite de la grande proportion de matières terreuses qu'elle contient, elle s'arrête sur des pentes plus considérables qu'on ne serait fondé à le supposer d'après la finesse des molécules dont elle se compose.

Les matières charriées par les torrents peuvent s'arrêter, suivant leur manière d'être et leur grosseur, sur des talus plus ou moins rapides. D'après M. Surell, dans les grands torrents des Hautes-Alpes, le gravier, de la grosseur de celui dont on recharge les routes macadamisées, se dispose sur des pentes qui n'excèdent pas $2\frac{1}{2}$ centimètres par mètre, ou $1^{\circ} 25' 55''$. Les galets, qui ont moins de 25 centimètres de côté, se déposent sur des pentes qui varient entre $2\frac{1}{2}$ et 5 centimètres par mètre, ou entre $1^{\circ} 25' 55''$ et $2^{\circ} 51' 45''$. Les blocs qui ont jusqu'à un demi-mètre cube se déposent sur des pentes de 5 à 8 centimètres par mètre, ou de $2^{\circ} 51' 45''$ à $4^{\circ} 34' 26''$ ¹. Enfin, sur des pentes plus fortes encore, et surtout dans les gorges de leurs canaux d'écoulement, les torrents peuvent entraîner des blocs gigantesques. On voit des blocs de 3 à 4 mètres de longueur, et même souvent des blocs plus considérables, ayant 50 mètres cubes et au delà, qui ont été poussés par des torrents.

Les dévastations des torrents ne se bornent pas à raviner et à entraîner les terrains sur lesquels ils coulent : ils produisent aussi des effets désastreux

Pentes
sur lesquelles les
torrents
abandonnent
des matières
de
diverses grosseurs.

Ravages
que les torrents
produisent
en couvrant des
terrains cultivés
des matières qu'ils
charrient.

1. A. Surell, ouvrage cité, page 30.

par les matières infertiles qu'ils déposent sur des prairies ou sur des champs cultivés.

Aujourd'hui, par exemple, le bord d'un cône de déjection est en c , pl. I.^{re}, fig. 2; mais dans quelques années il sera en c' ; le champ qui est entre c et c' , composé d'une terre fertile, aura été recouvert dans l'intervalle d'une si grande quantité de cailloux roulés, qu'il ne serait pas possible de l'en débarasser.

Culture
ou boisement
des
cônes de déjection
praticable
à la longue.

Les cônes de déjection des torrents deviennent quelquefois productifs, car les entassements de débris qui se forment sur la surface du globe deviennent terre végétale aussitôt qu'ils cessent d'être fréquemment remaniés. Les débris amenés par le torrent sont la matière première de la terre végétale; ils renferment à la vérité de très-grosses parties; ce sont de gros blocs, ce sont des galets de différente grosseur; mais il y a aussi un mélange de parties plus ténues, et souvent même de boue. Dès que la stabilité s'est établie, dès que les matières charriées par le torrent cessent d'être capricieusement couvertes et lavées par les eaux, elles deviennent de la terre végétale: des forêts s'y établissent, ou bien on peut les cultiver: mais pour cela il faut que le torrent soit maintenu dans un lit fixe, et cesse de venir se répandre dans l'endroit où la végétation a commencé à prendre pied. Aussi l'industrie des habitants s'exerce-t-elle à concentrer le torrent dans un lit déterminé, de manière à ce qu'il ne se déverse pas sur les côtés. Dans ce but on emploie, suivant les circonstances, différents moyens, tels que des épis, des digues, des chevalets, des coffres.

Le torrent
doit avoir reçu
préalablement
une direction fixe.

L'un des procédés les plus efficaces consiste à construire des épis, qui obligent le torrent à suivre une certaine direction. Les torrents deviennent ainsi l'objet de grandes dépenses; mais malheureusement ils se jouent souvent des obstacles qu'on a cherché à leur opposer, et dans une crue extraordinaire, ils anéantissent en quelques heures le fruit de plusieurs années de travail.

Les routes qui traversent les lits de déjection des torrents sont condamnées à demeurer presque constamment dans l'état le plus précaire. Il est très-difficile d'établir un pont sur le lit perpétuellement mobile d'un torrent; et lors même qu'il demeure constamment dans le même lit, il met souvent le pont hors de service en élevant ce lit; d'autres fois il mine le pont en affouillant le lit; mais les affouillements sont moins à craindre que l'exhaussement. Dans certains cas on est obligé de faire monter la route jusqu'au sommet du cône de déjection, pour établir le pont sur les extrémités des roches solides qui encaissent le canal d'écoulement.

Les observations relatives aux torrents méritent d'autant plus d'attention que des faits analogues s'observent aussi dans les rivières. La forme d'un torrent, comme je le disais tout à l'heure, et comme M. Surell l'avait déjà remarqué¹, est celle d'une rivière dont la pente est exagérée; ce n'en est, pour ainsi dire, que la caricature. Le canal d'écoulement représente le lit de la rivière dans sa partie moyenne, où s'est établi un régime à peu près uniforme; le

Routes
qui traversent
des
cônes de déjection.

Difficulté
de l'établissement
des ponts.

Analogies
entre le régime
des torrents
et celui des rivières

1. A. Surell, ouvrage cité, p. 21.

bassin de réception, dans lequel un grand nombre de filets d'eau se réunissent, représente la partie supérieure du bassin de la rivière, où les affluents sont nombreux et faibles : le Delta d'un fleuve peut être comparé à certains égards au cône de déjection d'un torrent.

Dans la Seine, par exemple, on pourrait considérer les parties qui sont entre le confluent de l'Oise et la mer comme représentant le canal d'écoulement; la partie supérieure au confluent de l'Oise, comme représentant le bassin de réception. La Seine n'a pas de Delta, mais un *estuaire*, ce qui empêche la dernière partie de la comparaison de pouvoir se compléter. Il y a un grand nombre de fleuves qui n'ont pas de Delta, parce que les eaux de la mer, mises en mouvement par les marées et les courants, agissent de manière à emporter les matières terreuses qui pourraient former un Delta; ce n'est pas que la matière du Delta ait manqué, mais cette matière a été portée ailleurs. Pour le Nil, où il n'y a pas d'affluents, la plus grande partie de son cours se rapporterait dans notre comparaison au canal d'écoulement, et son Delta représenterait le cône de déjection.

Exceptions
et modifications
qu'elles
comportent.

Cette assimilation ne doit cependant pas être prise dans un sens absolu; elle comporte des exceptions et des modifications nombreuses, et chaque fois, par exemple, qu'une rivière présente alternativement des parties plus ou moins inclinées, chaque partie rapide peut être comparée au canal d'écoulement d'un torrent, et la partie moins inclinée qui la suit, joue souvent par rapport à elle le rôle d'un

lit de déjection. Ces parties larges et plates que présente çà et là le fond de presque toutes les vallées, ont été plus d'une fois considérées comme les bassins d'anciens lacs dont les eaux se seraient ouvert des issues. De simples résultats de nivellement nous prouveront plus tard que ce système, quoique souvent reproduit, est, dans la plupart des cas, dénué de fondement, tandis que l'assimilation des parties larges et plates des fonds des vallées, avec les cônes de déjection des torrents et avec les deltas des fleuves, est en harmonie avec un grand nombre de faits importants.

Beaucoup de cours d'eau intermédiaires entre les véritables torrents et les rivières principales, notamment ceux que M. Fabre et M. Surell appellent *torrents-rivières*¹ et *rivières torrentielles*², donneraient matière, ainsi que vous le concevrez aisément, à des considérations du même genre. On peut en dire autant des ruisseaux.

Torrents-rivières
et
Rivières torrentielles.

Les phénomènes qui se passent dans tous les cours d'eau se ressemblent, se lient entre eux, et ne diffèrent réellement les uns des autres que par les grandeurs diverses de certains éléments, grandeurs qui déterminent ce qu'on appelle leur *régime*.

Pour se rendre compte de ce qui se passe dans les torrents et les rivières relativement aux dépôts qu'ils produisent, on doit encore avoir égard à ces mêmes éléments, à la pente du cours d'eau, à sa vitesse, et aussi à la nature et à la quantité des matières

1. Fabre, Essai sur la théorie des rivières, p. 37.

2. A. Surell, Torrents des Hautes-Alpes, p. 7.

terreuses que les eaux peuvent tenir en suspension. Une des différences qui existent entre les torrents et les rivières, c'est que les rivières ne charrient que du gravier ou de la boue, tandis que les torrents charrient des blocs de rocher; les charriages et les dépôts de ces débris de grosseurs différentes, s'opèrent de part et d'autre d'après les mêmes lois mécaniques.

La quantité totale d'eau dépensée dans une crue de torrent n'est pas très-considerable.

L'action des torrents a plus d'énergie que celle des rivières; mais il ne faudrait pas croire que la quantité d'eau nécessaire pour produire les grands effets qu'on voit s'y opérer, soit en elle-même extrêmement considérable. Un torrent ne peut dépenser pendant une crue que la quantité d'eau qui tombe en quelques heures dans un bassin de réception, dont l'étendue est toujours assez limitée. M. Surell a essayé de jauger l'eau qui passe dans certains torrents des Hautes-Alpes, au moment de leur plus grand gonflement: il a trouvé qu'en une seconde il s'y débite une quantité d'eau un peu supérieure à celle que la Seine ou la Garonne débite habituellement dans le même espace de temps, et qui est de 130 à 150 mètres cubes¹. Ce gonflement maximum dure très-peu; les eaux qui le produisent coulent toutes à la fois: c'est là ce qui fait leur puissance, et très-peu d'instant après qu'elles ont occasionné les plus grands désastres, le torrent est à sec². M. Surell cite des crues remarquables par les dégâts qu'elles ont produits, et qui n'ont pas

1. A. Surell, *Torrents des Hautes-Alpes*, p. 250.

2. De Saussure, *Voyages dans les Alpes*, §. 2121.

duré *une heure en tout* !¹ Or, dans une crue d'une heure, où le torrent mènerait pendant chaque seconde la même quantité d'eau que la Seine, il ne débiterait que $\frac{1}{365,25 \times 24}$ ou $\frac{1}{8,766}$ de la quantité d'eau totale que la Seine débite annuellement, abstraction faite de ses crues. Cette quantité, qui suffirait à peine pour remplir un étang de cinq mètres de profondeur et d'un dixième de kilomètre carré (ou de cent hectares) de superficie, ne saurait être considérée comme très-considérable, au point de vue des phénomènes généraux de la nature; mais la concentration de ces eaux leur donne une grande puissance et réalise complètement l'adage *vis unita fortior*.

1 Ce qui caractérise essentiellement les torrents et ce qui peut même servir à les définir, c'est que *leur lit est disposé de manière à réunir en un seul flot toute l'eau tombée, en même temps, sur un certain espace*. Cette eau accumulée, donnant lieu à un débit égal à celui de la Seine ou de la Garonne, acquiert la vitesse que prendraient la Seine ou la Garonne, si elles coulaient sur les mêmes pentes que les torrents dont il s'agit, vitesse énorme, que M. Surell évalue à 14,^m28 par seconde². Mais on doit remarquer qu'elle dépend à la fois des pentes et des quantités d'eau débitées. Sur ces mêmes pentes un simple filet d'eau n'acquerrait qu'une vitesse insignifiante. Ainsi que de savants ingénieurs, M. Lecreux et M. Defontaine, l'ont remarqué

Caractère essentiel
des torrents.

Leur puissance
est due à la
concentration
de leurs eaux.

1. A. Surell, *Torrents des Hautes-Alpes*, p. 37.

2. *Idem, ibid.*, p. 250.

depuis longtemps, si on pouvait diviser les eaux que la disposition des lieux fait concourir dans un torrent, on s'en débarrasserait sans qu'elles produisissent aucun des effets désastreux dont nous avons parlé.¹

Le déboisement
favorisent
leur action.

La situation actuelle des Hautes-Alpes facilite malheureusement la production de ces effets. On a déboisé les pentes où naissent une foule de torrents. Quand il y existait des forêts, les eaux ne pouvaient pas se réunir rapidement sur les pentes du bassin de réception; elles arrivaient très-lentement à l'entrée du canal d'écoulement; la même quantité d'eau tombait peut-être quelquefois en peu d'instants dans le bassin de réception; mais elle mettait dix fois plus de temps à en sortir, et elle en sortait beaucoup moins chargée de terre et de débris. Le sol se trouvait consolidé par les racines des arbres et par les arbustes et les herbes qui croissaient à leur pied. A mesure qu'on a abattu les forêts, les effets des torrents sont devenus plus désastreux; ils ont enlevé la *chair* des montagnes, suivant l'expression pittoresque de M. de Prony², pour n'en laisser que l'ossature; aussi commence-t-on à sentir la nécessité de reboiser les bassins de réception; le déboisement a même été cause qu'il s'est formé

1. M. de Saint-Venant, ingénieur en chef des ponts et chaussées, vient de proposer, dans un Mémoire dont l'application pourrait rendre de grands services, une méthode générale pour la dérivation des eaux pluviales qui entraînent les terres des sols en pente et qui inondent les vallées. Cette méthode consiste dans le creusement d'un grand nombre de petites rigoles très-peu inclinées, qui éloignent les eaux pluviales du thalweg. (Ann. des chem. vic.; 1846.)

2. De Prony, Marais Pontins, p. xxxvii (introduction).

des torrents en des endroits où l'on n'en connaissait pas auparavant. Les effets en ont été d'autant plus fâcheux, que ces torrents se sont établis à l'improviste.

Ce que je dis pour le département des Hautes-Alpes, c'est-à-dire principalement pour la haute vallée de la Durance, a eu lieu à diverses époques dans d'autres parties des Alpes. La rapidité croissante avec laquelle le Delta du Pô s'est accru dans les derniers siècles, avait fourni à M. de Prony, comme nous l'avons vu précédemment, une première application de ces mêmes considérations.¹

Ce contraste entre les montagnes boisées et celles qui sont dépouillées de végétation, vérifie la remarque que nous avons déjà faite² relativement à l'influence des racines des végétaux sur la stabilité de la terre végétale. Cette même remarque est encore confirmée par un autre contraste depuis longtemps remarqué des voyageurs : celui qui existe entre les rivières limpides des contrées sauvages et les rivières troubles des pays cultivés.

Contraste
entre les rivières
des pays sauvages
et celles
des pays civilisés.

Les rivières et les torrents qui coulent sur un sol susceptible d'être dégradé par les eaux, se teignent naturellement de sa couleur. De là quelques-uns de leurs noms, tels que la *rivière Rouge*, l'*eau Blanche*, l'*eau Noire*, etc. Lorsque les torrents prennent naissance dans des parties où les terres et les roches molles sont naturellement noires, les eaux qui y coulent sont noires comme de l'encre et quelquefois beaucoup plus épaisses que ne l'est l'encre la plus bourbeuse.

1. Voyez tome I^{er}, p. 343.

2. *Idem*, *ibid.*, p. 167.

Quantité
spécifique
de
matières terreuses
que l'eau peut
tenir
en suspension.

La *quantité spécifique* de matières terreuses que l'eau peut tenir en suspension, est très-variable; elle dépend de la vitesse de l'eau et de la finesse plus ou moins grande des matières. Plus les torrents ont de pente et de vitesse, et plus ils ont de facilité pour maintenir les matières terreuses et pierreuses en suspension. On a de la peine à se figurer jusqu'à quel point les eaux des torrents peuvent en être chargées. On a cru pouvoir calculer qu'il y a quelquefois, en poids, un huitième seulement d'eau, et sept huitièmes de matières terreuses ou pierreuses dans la masse fluide qui suit la déclivité d'un ravin. Il y aurait peut-être un peu d'exagération dans cette évaluation, si on l'appliquait aux torrents proprement dits; mais elle se rapporte surtout à ces torrents de boue appelés, dans les Alpes, *Nants sauvages*, que de Saussure a décrits dans ses voyages¹. Je vais vous citer un exemple de ces sortes de torrents, sur lesquels j'aurai d'ailleurs à revenir en parlant des éboulements, auxquels ils se lient presque aussi bien qu'aux torrents véritables; car ils forment une sorte d'intermédiaire entre les uns et les autres.

Quantité énorme
que les
Nants sauvages
en renferment.

Phénomènes
produits en 1835
dans le *Nant de*
Saint-Barthélemy,
près
Saint-Maurice.

J'ai eu occasion de voir, il y a quelques années, un exemple un peu exceptionnel, il est vrai, de ce genre de phénomènes, qui présentait des circonstances très-remarquables et dignes d'une sérieuse attention; ce n'était pas précisément l'effet d'une fonte de neiges, ni d'un orage, mais celui d'un éboulement qui avait eu lieu en Valais, près de Saint-Maurice. A la suite d'un violent orage survenu pendant la nuit, un

1. De Saussure, Voyages dans les Alpes, S. 485.

quartier de la cime de la *Dent de midi* s'était détaché le 26 août 1835, à 11 heures du matin, entraînant dans sa chute une portion du glacier ou du *neve* qui couvre un des flancs de la montagne; le tout s'était éboulé dans un vallon, qui jouait dans le phénomène le rôle de bassin de réception.

Cet amas de matières terreuses et de glaces fondait, et fondait par degrés; l'eau coulait par flots successifs, entraînant une immense quantité de terre et de pierres. La matière fluide suivait la pente d'un vallon qui débouchait dans la vallée du Rhône, entre Saint-Maurice et la cascade de Pisse-Vache, par une gorge étroite, à l'issue de laquelle elle se répandait sur le cône de déjection du torrent qui sort de cette même gorge et qui est appelé *Nant du bois noir*, ou *Nant de Saint-Barthélemy*. La surface du cône de déjection se recouvrait d'une eau noire comme de l'encre, qui arrivait jusqu'au Rhône, après avoir abandonné sur son passage, à mesure qu'elle perdait de sa vitesse, en s'étendant, une partie des matières qu'elle tenait en suspension.

Le phénomène se renouvela presque périodiquement pendant plusieurs jours; le 29 août il était encore très-fréquent et très-intense. Chaque fois que la fusion de la glace avait produit une quantité de boue suffisante pour qu'elle pût rompre la cohésion et le frottement, cette masse se mettait en mouvement et venait déboucher avec une impétuosité extrême par la gorge de Saint-Barthélemy.

Les matières terreuses abandonnées par le torrent acquerraient très-promptement de la consistance, et au bout de deux ou trois jours on pouvait marcher

sur leur surface. Une portion considérable du cône de déjection en fut recouverte, et en quelques endroits on en mesura une épaisseur de plusieurs mètres.

L'événement dont je viens de parler n'était pas complètement sans exemple dans le pays, car on y a conservé le souvenir d'un premier éboulement de la Dent de midi qui, en l'année 548, produisit ou agrandit le cône de débris du Nant du bois noir, ainsi qu'une accumulation de blocs calcaires, sur laquelle on a bâti une chapelle, et détruisit une ville romaine, qui occupait auparavant le même emplacement.

Grande pesanteur
spécifique
de la matière
coulante.

Elle flottait
des blocs calcaires.

Un effet curieux à observer dans cette débâcle, c'était de voir avec quelle facilité des pierres et même des blocs de calcaire compacte de plusieurs mètres cubes étaient entraînés par la masse boueuse en mouvement, sur laquelle ils semblaient flotter comme des morceaux de bois sur de l'eau ordinaire.

Si l'on s'étonnait de voir ainsi des blocs de rocher retenus par le seul effet du mouvement à la surface d'un fluide qui ne pouvait pas avoir une pesanteur spécifique tout à fait aussi grande que la leur, je rappellerais que le puits artésien de l'abattoir de Grenelle, lorsque ses eaux deviennent troubles, ramène de son fond, c'est-à-dire de la profondeur de 547 mètres, des masses considérables de matières terreuses, mélangées de sable et de gravier, et que, même lorsque ses eaux sont limpides, elles font monter jusque dans le bassin où elles sont reçues, à 53 mètres au-dessus du sol, et à 580 mètres au-dessus du fond, des grains de sable, des graviers et jusqu'à de petits galets d'argile gros comme des noisettes.

Toutefois, comme ici le mouvement du fluide n'est pas un mouvement ascensionnel direct, vous concevez qu'il ne peut compenser qu'une assez petite différence de pesanteur spécifique, et vous voyez que, s'il n'y avait pas dans cette masse les sept huitièmes de matières terreuses, il fallait toujours qu'il y en eût une grande proportion, afin que le mélange des matières terreuses et pierreuses et de l'eau pût faire flotter les blocs.

Il est aisé de calculer quelle serait la pesanteur spécifique de la masse fluide d'un torrent qui contiendrait seulement $\frac{1}{8}$ de son poids d'eau, et où les sept autres huitièmes seraient formés de matières

Pesanteur
spécifique
d'un
mélange d'eau
et de
matières terreuses.

terreuses ayant une pesanteur spécifique de 2,50, qui est en nombres ronds la pesanteur spécifique moyenne des roches les plus répandues. Soient p le poids d'un décimètre cube du mélange, v le volume et en même temps le poids de la quantité d'eau qui y entre, et dont la densité est 1, v' le volume des matières terreuses qui y entrent également, on aura

$$v + v' = 1, \quad v = \frac{1}{7} v' 2,50;$$

$$p = v + v' 2,50$$

d'où l'on tire

$$v' = \frac{7}{9,50}, \quad v = \frac{2,50}{9,50};$$

$$p = \frac{2,50}{9,50} + \frac{7 \cdot 2,50}{9,50} = \frac{8 \cdot 2,50}{9,50} = 2,105.$$

Le poids 2,105 d'un décimètre cube du fluide représente en même temps sa pesanteur spécifique. Il serait facile de généraliser ce calcul.

On peut concevoir qu'un pareil fluide, assez fortement agité pour que l'eau ne se sépare pas des

matières terreuses, fasse flotter des pierres sur sa surface pendant un assez long espace, et le fait que le Nant de Saint-Barthélemy flottait réellement des blocs de calcaire compacte, peut, à son tour, autoriser la supposition que nous avons faite sur la proportion du mélange. Mais, en général, la quantité de matières boueuses en suspension dans les eaux les plus troubles est infiniment moins considérable. Je vous cite comme une limite extrême ce qu'on peut supposer avoir eu lieu dans un cas exceptionnel. Les eaux des torrents, même dans leurs crues les plus violentes, ne renferment pas ordinairement une aussi grande accumulation de matières terreuses. Cela a lieu seulement dans quelques cas particuliers, au nombre desquels on peut citer ceux où, comme nous l'avons vu précédemment, des boues composées de matières terreuses fines coulent et s'arrêtent d'elles-mêmes sur des cônes de déjection d'une inclinaison très-sensible.

Comparaison
des
courants boueux
très-épais
avec les coulées
de lave.

Les habitants des Hautes-Alpes donnent à ces espèces de coulées boueuses le nom de *laves*, et dans la réalité il n'y a pas une différence aussi grande qu'on pourrait le croire au premier abord entre un torrent boueux qui pousse devant lui des blocs de rocher, et qui en fait même flotter sur sa surface, et un courant de lave qui chemine sur la base faiblement inclinée d'un volcan. Ce qu'il y a de certain c'est que des courants de lave couleraient très-facilement sur les pentes où les torrents exercent leurs principaux ravages, pentes que nous avons vu n'être pas en général au-dessous de 2°. On peut s'en convaincre en jetant les yeux sur

le tableau des valeurs numériques des pentes des principales coulées de lave dans les différentes contrées volcaniques de l'Europe, que j'ai publié à la suite de mes recherches sur la structure et sur l'origine du mont Etna¹. On y verra qu'un grand nombre de coulées de lave se sont étendues sur des pentes inférieures à 5° et même à 2°.

Les eaux des rivières, même dans leurs plus grandes crues, contiennent généralement moins de matières terreuses en suspension que celles des torrents. Les eaux des torrents coulent dans les rivières après avoir perdu une partie de leur vitesse et après avoir déposé une partie des matières pierreuses et terreuses qu'elles entraînaient et qu'elles tenaient en suspension. Ces dernières continuent à se déposer par degrés à mesure que la vitesse diminue. C'est surtout dans les ruisseaux et dans les rivières qu'on peut observer tous les intermédiaires entre les eaux fortement troublées et les eaux complètement limpides.

La quantité spécifique de matières terreuses contenues dans les eaux troubles est généralement très-petite.

On pourrait se tromper, et on se trompe en effet très-souvent, en cherchant à juger par la couleur de l'eau de la quantité de matières terreuses qu'elle tient en suspension. On voit quelquefois des torrents ou même des rivières où l'eau est complètement noire, et dans lesquels il n'y a cependant qu'une très-petite quantité de matières terreuses. M. de Prony a déjà remarqué que « la couleur foncée que prennent certaines eaux qui se trouvent mêlées avec

¹ Mémoires pour servir à une description géologique de la France, t. IV, p. 217, et Annales des mines, 3.^e sér., t. X, p. 567.

des terres qu'elles ont délayées, n'est parfois qu'un indice très-équivoque de la quantité *spécifique* du limon qu'elles charrient. Ainsi l'Amaseno, l'un des fleuves qui coulent dans les marais Pontins, a, lorsqu'il est en crue, ses eaux fortement colorées d'une teinte rougeâtre, ce qui les faisait supposer très-chargées avant les expériences auxquelles elles ont été soumises et les connaissances de fait acquises depuis 24 ans; mais cette teinte rougeâtre est due à une terre ocreuse, dont une petite quantité suffit pour colorer un grand volume d'eau¹. »

Faits et remarques
à ce sujet.

Quand il s'agit de rivières qui coulent sur des pentes faibles, où la vitesse n'est pas très-considérable, la quantité spécifique de matières terreuses en suspension est très-loin d'être ce qu'elle est dans les torrents, et il est facile de se convaincre, par plusieurs observations très-simples, que la quantité de matières terreuses tenue en suspension dans les rivières n'est pas très-considérable, du moins, en général. Il arrive assez fréquemment, par exemple, que dans une vallée deux rivières se réunissent, et que toutes les deux ne deviennent pas troubles en même temps. Parmi les rivières qui se réunissent, on peut même en citer dont l'une reste trouble pendant des semaines entières, tandis que l'autre est limpide, comme la Saône et le Rhône à Lyon. Le Rhône est souvent très-clair, tandis que la Saône est bourbeuse. Au-dessous du confluent leurs eaux coulent côte à côte, sans se mêler, pendant un assez long intervalle, souvent

1. De Prony, Marais Pontins, page 36.

pendant une lieue, et demeurent très-distinctes. La Loire et le Loiret, près d'Orléans, produisent le même effet. Tous les voyageurs qui ont visité les confluent des grandes rivières, ont parlé de la lenteur avec laquelle s'opère le mélange de leurs eaux. En pareil cas il ne peut exister une grande différence de pesanteur spécifique entre l'eau trouble et l'eau limpide; car, si la différence était notable, la plus pesante se placerait au fond, et l'autre flotterait au-dessus.

Ce peu de tendance qu'ont les eaux troubles et limpides à s'enfoncer l'une au-dessous de l'autre, ou à se mélanger, s'observe aussi dans les lacs, notamment dans celui de Genève. Lorsque de quelque point élevé des montagnes qui dominant Villeneuve ou Meillerie on promène ses regards sur le lac, on voit, au milieu de ses eaux limpides, de larges taches jaunâtres semblables à des nuages; ce sont les eaux troubles du Rhône, qui flottent au milieu des eaux claires du lac; ce fait prouve évidemment que le surcroît de pesanteur spécifique dû aux matières terreuses que les premières tiennent en suspension, n'est pas même assez considérable pour les empêcher de flotter dans celles du lac, ce qui suppose que la quantité spécifique des matières terreuses auxquelles elles doivent leur couleur jaune est extrêmement faible.

Il est vrai cependant que la différence qui existe entre la température des eaux du Rhône et des eaux du lac, jointe au mouvement rapide dont les premières sont animées à leur entrée dans le lac, peut aider à concevoir pourquoi elles flottent

Eaux troubles
du Rhône
flottant sur
le lac de Genève.

longtemps à la surface avec les particules terreuses dont elles sont chargées; et d'ailleurs on s'étonnera moins de voir des eaux troubles flotter sur des eaux limpides en se rappelant ce que j'ai dit dans la sixième leçon¹ des distances étonnantes auxquelles le vent transporte la poussière et les cendres volcaniques.

On conçoit plus facilement encore une autre circonstance, qui montre aussi que les eaux des rivières ne renferment pas de très-grandes quantités de matières terreuses, et qui, au premier abord, semble même propre à donner prise au calcul : c'est que, lorsqu'elles entrent dans la mer, elles flottent quelque temps à sa surface. Quand elles s'y maintiennent assez longtemps pour que cet effet ne puisse être attribué à leur température ni à leur vitesse, on peut en conclure qu'elles sont en elles-mêmes plus légères que les eaux de la mer, ce qui détermine le *maximum* de la quantité spécifique de matières terreuses qu'elles peuvent contenir; car la pesanteur spécifique de l'eau de la mer étant de 1,028 environ, il faut que celle du mélange d'eau douce et de matières terreuses soit moindre que 1,028.

Limites
qu'on peut
assigner
à la quantité
spécifique
de matières
terreuses
contenue dans les
eaux troubles.

La pesanteur spécifique des particules terreuses et pierreuses en suspension pouvant être évaluée à 2,50, si l'on désigne par x le volume de ces matières suspendues dans l'eau qui donnerait au mélange une pesanteur spécifique de 1,028, on pourra déterminer x par l'équation

$$(1 - x) 1 + x. 2,50 = 1,028.$$

1. Voyez t. I.^{er}, p. 188.

Cette équation donne

$$x = \frac{0,028}{1,60} = \frac{1}{53,9} ;$$

de là on déduirait que le poids des matières terreuses serait $\frac{1}{21,1}$ du poids total de l'eau trouble; mais ce maximum-là est bien loin d'être atteint; car l'eau trouble qui flotte ainsi sur la mer a souvent une pesanteur spécifique notablement moindre que celle de l'eau de mer, quoiqu'elle soit peut-être déjà elle-même assez fortement salée.

On peut en prendre une idée par l'exemple suivant, que j'emprunte à l'excellent Manuel de géologie de M. de la Bèche. « Le capitaine Sabine rapporte que dans son voyage de Maranham à la Trinité, le 10 septembre 1821, le courant général marchant avec la vitesse considérable de 99 milles en 24 heures (plus de 4 milles ou de 6408 mètres à l'heure), il traversa de l'eau trouble par 5° 08' de latitude nord, et par 52° 48' 24" à l'ouest du méridien de Paris. Il considère cette eau comme étant celle de la rivière des Amazones ou *Maranon*, qui avait conservé son impulsion originaire jusqu'à 300 milles (556 kilomètres) de l'embouchure, ayant coulé sur les eaux de l'Océan en vertu de sa pesanteur spécifique moindre que la leur. La ligne de démarcation entre l'eau marine et l'eau trouble était très-distincte, et un grand nombre d'animaux marins gélatineux flottaient sur le bord de l'eau de rivière, près de la ligne de contact. La température de l'eau de l'Océan était de 27°, 27 centigr., et celle de l'eau de rivière de 72°, 66. La pesanteur spécifique de la première était

Exemple des eaux
de l'Amazone.

1,0262, et celle de la seconde 1,0204. D'après les mesures prises par le capitaine Sabine, la profondeur de l'eau trouble était comparativement peu considérable; elle n'atteignait pas 126 pieds anglais (38 mètres), tandis qu'on ne trouvait pas le fond de la mer à 105 fathoms (192 mètres),¹ »

Calcul
auquel il donne
lieu.

Dans cet exemple la pesanteur spécifique de l'eau trouble était seulement 1,0204, et en supposant que cette eau ne fût pas mélangée de parties salines, cela supposerait qu'elle renfermait $\frac{1}{7,3,5}$ de son volume ou $\frac{1}{29}$ de son poids de matières terreuses; mais si elle était déjà saumâtre, comme il est naturel de le présumer, la quantité de matières terreuses en suspension était nécessairement moins considérable.

Ce calcul conduit
à un résultat
hors de proportion
avec la réalité.

Il serait inutile de chercher à préciser davantage ces calculs, parce que les nombres limites auxquels ils nous conduiraient seraient encore hors de proportion avec la quantité spécifique de matières terreuses qui est réellement contenue dans les eaux troubles des rivières. Il suffit, pour en demeurer convaincu, de se rappeler une observation qui, quoique bien simple, est peut-être plus concluante encore que toutes les précédentes: c'est celle des marins, qui ont toujours remarqué qu'un vaisseau qui entre de la mer dans une rivière, enfonce davantage dans l'eau, sans établir à cet égard de distinction entre les rivières limpides et celles dont les eaux sont troubles. On peut également invoquer celle des nageurs, qui ne manquent jamais de

1. Manuel de géologie de M. de la Bèche, traduit en français par M. Brochant de Villiers, p.111.

remarquer qu'ils se soutiennent plus aisément dans l'eau de mer que dans l'eau douce, mais qui ne s'aperçoivent, sous ce rapport, d'aucune différence sensible entre l'eau de rivière trouble et l'eau de rivière limpide. Cette double observation prouve en effet que la pesanteur spécifique des eaux troubles des rivières diffère beaucoup moins de la pesanteur spécifique de l'eau pure qu'elle ne diffère de celle de l'eau de mer.

Les premiers auteurs qui ont fait des hypothèses sur la quantité spécifique de matières terreuses contenue dans les eaux troubles des rivières, ont proposé des nombres qui, quoique supérieurs à la vérité, étaient déjà cependant bien inférieurs à ceux que nous venons de trouver.

Hartsoecker a supposé que le Rhin, dans ses plus grandes crues, contient à Bonn $\frac{1}{100}$ de son volume de limon; ce qui est certainement fort exagéré.

Shaw a fait évaporer l'eau du Nil dans le temps des crues, et il a trouvé un résidu dont le volume était $\frac{1}{120}$ de celui de l'eau; mais Dolomieu paraît douter de l'exactitude de l'expérience¹; et d'ailleurs il reste à savoir sous quelle forme était le résidu auquel ce volume est attribué; s'il était à l'état de terre imbibée d'eau, à l'état de poussière sèche et incohérente, ou à l'état de terre sèche et fortement tassée.

Sir George Staunton a admis que l'eau du fleuve

1. Dolomieu, Mémoire sur la constitution physique de l'Égypte; Journal de physique, tome XLII, page 114.

Jaune de la Chine contient $\frac{1}{200}$ de son volume de limon.

Playfair, resserrant encore la limite, a cru que l'eau trouble des rivières pouvait contenir $\frac{1}{250}$ ou 0,004 de son volume de matières terreuses en suspension; c'est encore beaucoup plus qu'elle n'en contient réellement.

Toutes ces suppositions sont extrêmement vagues, parce qu'elles n'indiquent que le volume des matières terreuses en suspension, sans faire connaître la densité qu'on peut leur attribuer sous ce même volume. Il faudrait, pour avoir une donnée précise, connaître le poids des matières terreuses sèches que renferme un volume donné d'eau trouble.

L'hydrographe italien Manfredi a supposé que les eaux courantes, qui tombent dans la mer, renfermaient moyennement $\frac{1}{175}$ de leur poids de sédiments; nombre qui, comme tous ceux que nous venons de citer, est certainement encore trop grand, mais qui, cependant, n'équivaut guère en réalité qu'à la moitié de celui employé par Playfair; car, si on admet que les particules terreuses en suspension ont la densité de 2,50, qu'on peut regarder comme étant, en nombres ronds, la densité moyenne des roches les plus répandues, on trouve qu'elles forment les 0,002293, ou environ $\frac{1}{436}$, du volume de l'eau trouble.

Expériences
de M. Horner
sur le Rhin.

M. Léonard Horner a fait à Bonn, en 1833, des expériences précises sur la quantité spécifique de matières terreuses contenue dans l'eau du Rhin, et il a trouvé que, dans un pied cube de cette eau, il y avait, au mois d'août, 21 grains et $\frac{10}{100}$ de

matières terreuses, c'est-à-dire, un poids de ces matières égal à $\frac{1}{20736}$ de celui de l'eau trouble; pour le mois de novembre il a obtenu $\frac{1}{12509}$; en moyenne il a trouvé $\frac{1}{15625}$ en poids, ce qui équivaut en volume à $\frac{1}{39063}$ de matières terreuses, d'une densité supposée égale à 2,50.¹

Ces résultats peuvent être mis sous une forme plus commode à comparer avec d'autres du même genre au moyen de quelques règles de proportion et de l'équation : $p = (1 - x) 1 + x. 2,50$, dans laquelle p représente la pesanteur spécifique de l'eau trouble, x la quantité spécifique des matières terreuses en volume. La quantité spécifique des mêmes matières en poids se trouve alors exprimée par $\frac{x. 2,50}{p}$, en admettant, ainsi que nous l'avons déjà fait, que la pesanteur spécifique moyenne de leurs particules est égale à 2,50. On obtient de cette manière le tableau ci-dessous.

Expériences de M. Horner sur l'eau du Rhin.

	POIDS des MATIÈRES TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE DES MATIÈRES TERREUSES	
	par litre.	par mèt. cube.		en poids.	en volume.
1835.					
Août	0,0482	48,2	1,00002894	0,00004820	0,00001929
Novembre . . .	0,0799	79,9	1,00004797	0,00007989	0,00003198
Moyenne . . .	0,0640	64,0	1,00003840	0,00006400	0,00002560

M. Dupasquier et M. Lortet se sont occupés de déterminer la quantité de limon contenue à Lyon dans les eaux du Rhône pendant ses crues.

Expériences de
MM. Dupasquier
et Lortet
sur le Rhône.

1. Leonhard Horner, *Edimb. new phil. journ.*; janv. 1835.

Voici les résultats obtenus par ces deux habiles observateurs.

Limon contenu dans les eaux du Rhône à Lyon pendant la crue du mois de mars 1839. Résultats obtenus par M. Dupasquier.

	POIDS des MATIÈRES TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE DES MATIÈRES TERREUSES	
	par litre.	par mèt. cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Crue dans sa période d'ascension.....	0,630	630	1,000378	0,0006298	0,000252
Crue à son maximum.	0,980	980	1,000588	0,0009797	0,000392
Crue dans sa période décroissante.....	0,350	350	1,000210	0,0003499	0,000140

Limon contenu dans les eaux du Rhône à Lyon pendant la grande inondation du mois d'octobre 1841. Résultats obtenus par M. Lortet.

	POIDS des MATIÈRES TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE DES MATIÈRES TERREUSES	
	par litre.	par mèt. cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Le 10 octobre...	0,560	560	1,000336	0,0005598	0,000224
Le 20 octobre...	0,560	560	1,000336	0,0005598	0,000224
Le 26 octobre...	1,250	1250	1,000750	0,0002499	0,000500

L'état des eaux du Rhône est très-variable sous le rapport de la quantité spécifique de matières terreuses qu'elles tiennent en suspension. Quelquefois elles sont très-limpides; d'autres fois elles paraissent presque bourbeuses. M. Fournet, professeur de minéralogie et de géologie à la Faculté des sciences de Lyon, a eu l'heureuse idée de puiser tous les jours un demi-litre d'eau dans le Rhône, et de le filtrer. Il en a fait de même ensuite pour

la Saône. De cette manière il a obtenu les éléments les plus exacts parmi ceux que l'on possède sur un ordre de phénomènes très-digne d'intérêt et jusqu'ici très-négligé.

Voici le tableau des résultats obtenus par M. Fournet pendant les dix derniers mois de l'année 1843. Chaque jour M. Fournet a filtré un demi-litre d'eau du Rhône. A la fin de chaque mois il a pesé, après l'avoir calciné, le sédiment resté sur le filtre, en ayant soin de retrancher de chaque pesée le poids des cendres du filtre. La quantité d'eau filtrée journellement étant d'un demi-litre, on reconnaît aisément que, pour avoir, mois par mois, le poids de matières terreuses contenues dans un mètre cube d'eau du Rhône, il faut multiplier le résultat du mois entier par 2000, et le diviser par 30 ou par 31, suivant que le mois a 30 ou 31 jours.

Résultats mensuels
obtenus à Lyon
par M. Fournet.

Expériences faites par M. Fournet sur l'eau du Rhône.

1843.	NOMBRE DE JOURS par mois.	POIDS des MAT. TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE des matières terreuses	
		par mois.	par m. cube.		en poids.	en volume.
		gr.	gr.			
Mars.....	31	0,64	41,3	1,00002478	0,00004130	0,00001652
Avril.....	30	0,91	60,6	1,00003636	0,00006050	0,00002424
Mai.....	31	1,90	122,5	1,00007350	0,00012258	0,00004900
Juin.....	30	1,61	107,3	1,00006438	0,00010728	0,00004292
Juillet.....	31	2,01	129,6	1,00007776	0,00012958	0,00005184
Août.....	31	1,98	127,7	1,00007662	0,00012768	0,00005108
Septembre..	30	0,64	42,7	1,00002562	0,00004270	0,00001708
Octobre....	31	2,11	136,1	1,00008166	0,00013608	0,00005444
Novembre...	30	0,82	54,7	1,00003282	0,00005470	0,00002188
Décembre...	31	0,17	10,9	1,00000654	0,00001090	0,00000436

Je joins ici les résultats des expériences de M. Fournet sur les eaux du Rhône pendant l'année 1844, tels qu'ils sont consignés dans les Tableaux publiés par la *Commission hydrométrique de Lyon*.

Expériences faites par M. Fournet sur l'eau du Rhône.

1844.	POIDS des MAT. TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE des matières terreuses	
	par quinz. ^e	par m. cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Du 1 ^{er} au 15 janvier...	0,293	39,0	1,00002340	0,00003900	0,00001560
Du 16 au 31 janvier...	0,063	7,8	1,00000468	0,00000780	0,00000312
Du 1 ^{er} au 15 février...	0,483	64,4	1,00003864	0,00006439	0,00002576
Du 16 au 29 février...	1,563	223,2	1,00013392	0,00022317	0,00008928
Du 1 ^{er} au 15 mars.....	0,793	105,7	1,00006342	0,00010749	0,00004228
Du 16 au 31 mars.....	0,253	31,6	1,00001896	0,00003160	0,00001264
Du 1 ^{er} au 15 avril.....	0,243	32,4	1,00001944	0,00003240	0,00001296
Du 16 au 30 avril.....	0,373	49,7	1,00002982	0,00004970	0,00001988
Du 1 ^{er} au 15 mai.....	0,133	17,7	1,00001062	0,00001770	0,00000708
Du 16 au 31 mai.....	0,253	31,6	1,00001896	0,00003160	0,00001264
Du 1 ^{er} au 15 juin.....	0,373	49,7	1,00002982	0,00004970	0,00001988
Du 16 au 30 juin.....	0,923	123,0	1,00007380	0,00012298	0,00004920
Du 1 ^{er} au 15 juillet...	1,643	219,0	1,00013140	0,00021897	0,00008760
Du 16 au 31 juillet...	0,513	64,1	1,00003846	0,00006409	0,00002564
Du 1 ^{er} au 15 août.....	0,973	129,7	1,00007782	0,00012968	0,00005188
Du 16 au 31 août.....	0,823	102,9	1,00006174	0,00010288	0,00004116
Du 1 ^{er} au 15 septembre.	0,333	44,4	1,00002866	0,00004439	0,00001778
Du 16 au 30 septembre.	0,573	76,4	1,00004584	0,00007639	0,00003056
Du 1 ^{er} au 15 octobre...	0,603	80,4	1,00004824	0,00008039	0,00003216
Du 16 au 31 octobre...	1,113	139,1	1,00008346	0,00013909	0,00005564
Du 1 ^{er} au 15 novembre.	0,873	116,4	1,00006984	0,00011638	0,00004656
Du 16 au 30 novembre.	0,163	21,7	1,00001302	0,00002169	0,00000868
Du 1 ^{er} au 15 décembre.	0,153	20,4	1,00001224	0,00002039	0,00000816
Du 16 au 31 décembre.	0,243	30,3	1,00001818	0,00003029	0,00001212

J'ajoute, en outre, pour compléter deux années entières, les observations encore inédites que M. Fournet a faites sur les eaux du Rhône pendant les mois de janvier et de février 1845, et qu'il a bien voulu me communiquer.

Expériences faites par M. Fournet sur l'eau du Rhône.

1845.	POIDS des MAT. TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE DES MATIÈRES TERREUSES.	
	par quinz. ^e	par m. cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Du 1 ^{er} au 15 janvier.	0,163	21,7	1,00001302	0,00002170	0,00000868
Du 16 au 31 janvier.	0,423	52,8	1,00003168	0,00005279	0,00002112
Du 1 ^{er} au 15 février.	0,083	11,0	1,00000660	0,00001100	0,00000440
Du 16 au 28 février.	0,163	25,0	1,00001500	0,00002500	0,00001000

Enfin, je place encore ici les résultats des expériences que M. Fournet a faites en 1845 sur les eaux de la Saône à Lyon, concurremment avec celles qu'il exécutait sur celles du Rhône.

Expériences faites par M. Fournet sur l'eau de la Saône.

1844.	POIDS des MAT. TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE des matières terreuses	
	par quinz. ^e	par m. cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Du 1 ^{er} au 15 janvier...	0,383	51,0	1,00003060	0,00005100	0,00002040
Du 16 au 31 janvier...	0,238	29,1	1,00001746	0,00002909	0,00001164
Du 1 ^{er} au 15 février...	0,753	100,4	1,00006024	0,00010039	0,00004016
Du 16 au 29 février....	0,586	83,7	1,00005022	0,00008369	0,00003348
Du 1 ^{er} au 15 mars.....	0,793	105,7	1,00006342	0,00010569	0,00004228
Du 16 au 31 mars.....	0,506	63,2	1,00003792	0,00006319	0,00002528
Du 1 ^{er} au 15 avril.....	0,123	16,4	1,00000984	0,00001640	0,00000656
Du 16 au 30 avril.....	0,113	15,0	1,00000900	0,00001500	0,00000600
Du 1 ^{er} au 15 mai.....	0,093	12,4	1,00000744	0,00001240	0,00000496
Du 16 au 31 mai.....	0,083	10,3	1,00000618	0,00001030	0,00000412
Du 1 ^{er} au 15 juin.....	0,063	8,4	1,00000504	0,00000840	0,00000336
Du 16 au 30 juin.....	0,083	11,0	1,00000660	0,00001100	0,00000440
Du 1 ^{er} au 15 juillet....	0,133	17,7	1,00001062	0,00001769	0,00000708
Du 16 au 31 juillet....	0,183	22,8	1,00001368	0,00002280	0,00000912
Du 1 ^{er} au 15 août.....	0,143	19,0	1,00001140	0,00001900	0,00000760
Du 16 au 31 août.....	0,363	45,3	1,00002718	0,00004529	0,00001812
Du 1 ^{er} au 15 septembre.	0,133	17,7	1,00001062	0,00001769	0,00000708
Du 16 au 30 septembre.	0,482	64,2	1,00003852	0,00006419	0,00002568
Du 1 ^{er} au 15 octobre...	0,723	96,4	1,00005784	0,00009639	0,00003856
Du 16 au 31 octobre...	0,636	79,5	1,00004770	0,00007949	0,00003180
Du 1 ^{er} au 15 novembre.	0,753	100,4	1,00006024	0,00010039	0,00004016
Du 16 au 30 novembre.	0,343	45,7	1,00002742	0,00004570	0,00001828
Du 1 ^{er} au 15 décembre.	0,093	12,4	1,00000744	0,00001240	0,00000496
Du 16 au 31 décembre.	0,953	119,1	1,00007146	0,00011908	0,00004764

Ainsi qu'on devait naturellement s'y attendre, les moyennes des quinzaines successives sont très-inégales entre elles; mais elles font ressortir les effets des crues périodiques d'été du Rhône et des crues de l'automne, de l'hiver et du printemps pour la Saône. Celles qui donnent les plus fortes proportions de matières terreuses, en donnent cependant de beaucoup plus faibles que celles trouvées dans les expériences faites sur les eaux des grandes crues; et cela devait être, puisque chacune d'elles se

rapporte à une quinzaine entière, au lieu de se rapporter à un moment de crue.

Les poids consignés dans les tableaux ci-dessus sont ceux des produits du filtrage, non-seulement filtrés, mais calcinés et réduits par là aux seules particules terreuses qu'ils renferment; or, M. Fournet a remarqué que, en opérant ainsi, on fait abstraction d'un élément qui concourt cependant d'une manière assez importante aux phénomènes sédimentaires, savoir, de la matière organique dont les sédiments sont généralement chargés. Cette matière disparaît avec celle du filtre dans le grillage du résidu de la filtration, et ce grillage pour les sédiments de la Saône demandait souvent à M. Fournet une journée entière. Voici les résultats de quelques expériences qu'il a faites à ce sujet.

	gr.	Moyenne
2 grammes de sédiment brut de la Saône ont produit, dans diverses expériences, après la calcination	1,74 1,74 1,73	1,738
2 grammes de sédiment brut du Rhône ont produit	1,72 1,72 1,73	1,723

Il est remarquable, observe M. Fournet, que la calcination fasse perdre presque le même poids aux sédiments des deux rivières. En adoptant le résultat moyen 1,73, on voit qu'à 100 grammes de sédiment calciné correspondent 115,6 de sédiment brut, séché simplement à l'air. On voit par là que les eaux du Rhône et de la Saône contiennent réellement, en poids et surtout en volume, un peu plus de matières étrangères en suspension que ne

l'indiquent les nombres consignés dans les tableaux ci-dessus. Ces nombres indiquent seulement les quantités de matières terreuses en suspension, les seules qui entrent de toute nécessité et intégralement dans la composition des sédiments.

M. Ehrenberg a constaté dernièrement que l'eau du Gange contient 71 espèces d'animaux microscopiques, et que le Gange en transporte chaque année à la mer une quantité égale en volume à 7 ou 8 fois la plus grande des pyramides d'Égypte, et peut-être égale à 3 fois son poids. C'est environ, comme nous le verrons bientôt, un poids égal à $\frac{1}{20}$ de celui des matières terreuses que le Gange entraîne, et parmi lesquelles il faut encore tenir compte des carapaces des infusoires. En comparant ce résultat à ceux de M. Fournet, on voit que les eaux du Rhône et de la Saône, indépendamment des infusoires qu'elles contiennent sans doute aussi, doivent contenir encore des particules organiques mortes.

Le mélange de la matière organique tend nécessairement à diminuer la pesanteur spécifique du sédiment brut non calciné, et son état de division contribue en outre à rendre légères les masses séchées et non fortement tassées de ce sédiment.

Pour trouver la densité des masses de sédiment considérées dans cet état (densité bien différente de celle de leurs particules pierreuses), M. Fournet a rempli une capsule du sédiment sablonneux incohérent du Rhône, en a déterminé le tassement par de petits chocs et des vibrations, et a pesé le tout comparativement au poids de la même capsule pleine d'eau. Pour le sédiment argileux de la Saône,

il l'a délayé dans de l'eau qu'il a fait déposer dans la capsule, où il a laissé le sédiment se dessécher après l'avoir tassé avec la main. Il a trouvé ainsi :

Pesanteur spécifique du sédiment du Rhône, sec,
en masse. 1,44

Idem du sédiment de la Saône, sec, en masse. 1,43

Il est bon de remarquer que dans tous les résultats précédents il est fait abstraction des matières salines que les eaux des rivières tiennent en *dissolution*; matières dont la proportion dans les eaux de rivière, quoique généralement plus petite que dans celles de beaucoup de sources regardées comme très-pures, n'est cependant pas tout à fait négligeable, et surpasse même le plus souvent, dans les temps ordinaires, la quantité des matières terreuses en suspension. Les eaux de la Seine, au-dessus de Paris, contiennent environ 0,000162 de leur poids de matières salines dissoutes. Celles du Rhône, à Lyon, en renferment en moyenne environ 0,000182.

Il ne faut pas oublier non plus que les nombres que je viens de citer se rapportent au Rhône et à la Saône seulement. D'autres fleuves pourraient donner des résultats différents et des quantités spécifiques plus considérables de matières terreuses en suspension. D'après les expériences faites à la Nouvelle-Orléans par M. le D.^r Riddell, la moyenne proportion annuelle des sédiments dans les eaux du Mississipi est, en poids, $\frac{1}{1700}$ de celui de l'eau¹, et, d'après les expériences que M. Everest a faites à Ghazipur², la quantité spécifique de matières sédimentaires tenue

Résultats obtenus
à Ghazipur
sur
les eaux du Gange
par M. Everest.

1 Lyell, Lettre inédite.

2 *Idem*, *Principles of geology*; 6.^e édition, tome II, page 11.

en suspension dans le Gange pendant les crues de l'été, est, en poids, de $\frac{1}{428}$ de celui de l'eau. Ces deux résultats, calculés comme il a été dit ci-dessus, donnent le tableau suivant.

	POIDS des MAT. TERREUSES		PESANTEUR SPÉCIFIQUE de l'eau trouble.	QUANTITÉ SPÉCIFIQUE DES MATIÈRES TERREUSES	
	par litre.	par m.cube.		en poids.	en volume.
	gr.	gr.			
Moyenne annuelle du Mississipi à la Nouvelle-Orléans.	0,589	589	1,00035301	0,00058824	0,00023538
Crue du Gange à Ghazipur.	2,340	2340	1,00140317	0,00233886	0,00093545

Ces nombres sont considérables. Les premiers surpassent de beaucoup tous ceux que M. Fournet a obtenus pour représenter l'état moyen des eaux du Rhône ou de la Saône pendant un mois ou pendant une quinzaine, et même plusieurs de ceux obtenus pendant les crues du Rhône. Ceux relatifs au Gange surpassent tous ceux qui résultent des expériences faites dans les crues du Rhône; cependant ils ne sont pas doubles de ces derniers, qui, peut-être, ne présentent pas eux-mêmes le maximum de ce qu'on pourrait obtenir en faisant sur le Rhône des expériences longtemps continuées. D'ailleurs la moyenne de l'année pour le Gange serait moins considérable que les nombres que nous venons de citer, parce que ce fleuve n'est pas toujours également chargé de matières terreuses; et le Gange, dont aucun affluent ne s'épure en traversant des lacs tels que ceux de Genève, d'Annecy et du Bourget, peut, dans ses crues, se trouver plus chargé de sédiments que le Rhône dans les siennes; le Mississipi peut, par la même raison, être en moyenne plus chargé de sédiments que le Rhône, surtout dans l'état actuel

des choses, en raison des défrichements immenses qui s'opèrent dans son bassin. Ainsi les nombres que nous venons de rapporter n'ont rien d'incroyable; mais il est probable que, dans leurs genres respectifs, ils approchent du maximum.

On doit remarquer, cependant, que ces nombres restent bien au-dessous des suppositions les plus modérées faites avant les expériences exactes.

On doit remarquer, en outre, que la pesanteur spécifique de l'eau trouble du Gange, qui, d'après M. Everest, serait 1,00140317, se trouverait encore bien inférieure à la pesanteur spécifique moyenne de l'eau de mer, qu'on peut évaluer à 1,02800000. La pesanteur spécifique de l'eau de la Méditerranée est évaluée par M. Marcet à 1,02932, et celle de l'eau de l'océan Atlantique sous l'équateur à 1,02770. La différence de ces deux nombres est 0,00162, c'est-à-dire, qu'elle surpasse l'excès de la pesanteur spécifique de l'eau trouble du Gange sur celle de l'eau pure. Ainsi les rivières les plus troubles diffèrent moins de l'eau pure, sous le rapport de leur pesanteur spécifique, que les eaux salées de deux mers contiguës ne diffèrent quelquefois entre elles.

On peut même ajouter que, d'après les résultats qui précèdent, l'eau de rivière la plus trouble diffère moins de l'eau pure à la même température, sous le rapport de la pesanteur spécifique, que l'eau pure à 10° ne diffère de l'eau également pure à 15°. En effet, la dilatation de l'eau pure de 0° à 100° étant de $\frac{1}{23}$, sa dilatation pour 5° de 10 à 15° sera à peu près de $\frac{5}{2300}$, d'où il est aisé de déduire que, si on prend pour unité la pesanteur spécifique de l'eau

pure à 15°, celle de l'eau pure à 10° est représentée par 1,002177. Cela permet de concevoir aisément comment les eaux troubles du Rhône peuvent flotter sur les eaux limpides du lac de Genève.

On a calculé, d'après les expériences de M. Everest et d'après le jaugeage des eaux du Gange, que la quantité de matières terreuses charriée à la mer par ce fleuve pendant toute l'année, serait égale en poids à soixante fois la plus grande des pyramides d'Égypte, ou à la charge de 80 vaisseaux de 1400 tonneaux chacun¹. Ces nombres ont été cités comme propres à donner une grande idée de la puissance des phénomènes d'érosion et de sédimentation qui s'opèrent de nos jours; mais ils montrent seulement que, pour produire artificiellement des résultats égaux, il faudrait dépenser des sommes très-considérables; et ils prouvent en même temps que les effets annuels des plus grands fleuves sont très-petits, comparativement à la somme de ceux qui ont produit les formations sédimentaires. Que serait-ce, en effet, que 60 pyramides d'Égypte, comparées à la masse d'une de nos formations de sédiment?

Calculs
qu'on a basés
sur
cette expérience.

Les phénomènes d'érosion et de sédimentation dont le globe terrestre est aujourd'hui le théâtre, sont du nombre de ceux sur lesquels les travaux de l'homme peuvent exercer une influence considérable; que l'homme peut quelquefois maîtriser complètement. Ainsi que nous l'avons déjà remarqué, cela suffit pour faire sentir que dans l'ordre de la nature ces phénomènes sont fort petits. Lors même que des travaux inconsiderés leur ont communiqué

Petites
comparatives
des phénomènes
actuels
d'érosion et de
sédimentation.

1. Lyell, *Principles of geology*; 6.^e édit., tome II, page 80.

une activité extraordinaire, leurs effets sont encore d'une lenteur extrême. M. Lortet a calculé, d'après les résultats d'expériences rapportés ci-dessus et d'après les jaugeages des eaux de la Saône, que, si la masse des sédiments entraînés par cette rivière était enlevée d'une manière uniforme sur toute l'étendue du bassin, cette ablation équivaldrait annuellement à une couche de $\frac{2.4}{10000}$, ou à peu près $\frac{1}{42}$ de millimètre ; mais une grande partie des matières terreuses entraînées par les eaux provient des ravins, des berges des rivières, etc. Ce qui peut provenir des terrains peu inclinés n'en forme peut-être pas la moitié : on ne serait donc pas fondé à supposer que ceux-ci s'abaissent en moyenne de plus de $\frac{1}{80}$ de millimètre par an, même actuellement qu'ils sont généralement cultivés. L'ablation y était bien moindre encore lorsqu'ils étaient couverts de forêts, et, à cette époque, les pertes qu'ils pouvaient faire annuellement étaient compensées, au moins en partie, par la formation d'une certaine quantité d'humus. Si on supposait que les terrains peu inclinés se sont abaissés en moyenne, depuis 2000 ans, de $\frac{1}{100}$ de millimètre par an, cela ne ferait en tout que 20 millimètres ; quantité à peu près inappréciable, même par rapport aux parties les moins grossières des fondations des monuments druidiques. Nous avons vu précédemment que ces monuments paraissent, en effet, être restés exactement dans leur position originaires* relativement à la surface du sol. Le calcul cadre ici avec l'observation d'une manière satisfaisante. (Voir ce qui a été dit des monuments druidiques dans la 5.^e Leçon, t. I.^{er}, p. 145.)

*

TREIZIÈME LEÇON.

(27 janvier 1844.)

Du régime des rivières.

MESSIEURS,

Nous avons consacré plusieurs séances à l'étude des matières, le plus souvent incohérentes, qui forment la pellicule extérieure du globe terrestre, et il nous a été impossible de séparer l'étude de ces matières de la considération des causes qui agissent tous les jours sur la surface du sol. L'étude des sédiments que les rivières déposent et qui forment le sol des vallées, nous conduit à l'examen du régime des cours d'eau.

Dans la dernière Leçon, nous nous sommes occupés des torrents, de leurs ravages, de leurs dépôts. Les torrents se jettent dans les rivières, qui reçoivent leurs eaux, entraînant encore avec elles une partie des matières dont elles étaient chargées dans la première partie de leurs cours. Nous devons donc naturellement passer de l'étude des torrents à celle des rivières, d'autant plus que les phénomènes qui se passent dans les rivières ont, comme nous l'avons déjà remarqué, de nombreux rapports avec ceux des torrents.

L'étude
des torrents
conduit à celle des
rivières.

Il s'agit
d'appliquer les lois
de l'hydraulique
au régime et aux
effets des rivières.

Les circonstances que présente l'écoulement de l'eau dans les rivières ont été beaucoup plus étudiées que les effets des torrents. Leur étude fait partie de l'hydraulique; mais les savants qui ont créé cette branche de la mécanique, et qui sont parvenus à constater les lois suivant lesquelles les eaux coulent dans des canaux de diverses formes, ont laissé beaucoup à faire encore aux géographes et aux géologues, qui ont à suivre dans l'observation des rivières et de leurs lits les effets de ces mêmes lois. C'est une tâche considérable et que je ne pourrai qu'ébaucher. *

En nous bornant à ce qui est le plus directement en rapport avec les objets dont nous nous occupons, il y a dans le régime des rivières trois éléments principaux à considérer : la pente, la vitesse, la quantité d'eau débitée dans les différentes saisons de l'année, dans les différentes phases des cours d'eau.

Forme générale
du lit
des rivières.
Pente
le plus souvent
décroissante.

La pente des rivières est extrêmement variable; cependant on remarque en général, ainsi que je vous l'ai déjà indiqué, que cette pente va en diminuant depuis la source jusqu'à l'embouchure. Il y a des exceptions que je vous ai signalées; mais le plus ordinairement cela est vrai dans chacun des biefs successifs dans lesquels une rivière peut se partager. M. Girard a même essayé de prouver que la section longitudinale de la surface d'un cours d'eau dont le régime est permanent, doit être une *chaînette* ou une *courbe funiculaire*¹; courbe qui présente sa concavité vers le ciel et dont l'inclinaison va en

1. Girard, Essai sur le mouvement des eaux courantes, et mémoire sur la destination du canal de l'Ourcq, dans les Mémoires sur le canal de l'Ourcq, t. I.^{er}, p. 241 à 312, et p. 344.

diminuant par degrés. Sans doute la loi de cette courbe n'est pas toujours bien régulièrement observée; mais, sauf quelques endroits où il y a des ressauts, elle peut donner une idée du profil longitudinal du lit d'une rivière.

Il n'y a pas de limite supérieure pour la pente des cours d'eau; quelques-uns se précipitent en cascades du haut d'escarpements verticaux; d'autres forment des cataractes extrêmement abruptes, ou présentent des rapides très-inclinés. Il n'y a pas non plus précisément de limite inférieure; car, ainsi que les hydrauliciens de l'Italie l'avaient remarqué dès la fin du 17.^e siècle, les grands fleuves, avant d'entrer dans la mer, deviennent sensiblement horizontaux.¹

On peut dire cependant, en thèse générale, que les pentes des rivières sont beaucoup moindres que celles des torrents. Le régime fougueux de ces derniers tient à ce qu'ils ont une pente surabondante; dans les rivières la pente est souvent presque réduite au strict nécessaire.

Exemples de
pentes de
diverses rivières.

M. Forbes rappelle, à la fin de son Voyage dans les Alpes, que l'eau coule avec facilité sur une pente de 6 pouces par mille, c'est-à-dire, de

$\frac{1}{10000} = 0,0001$ par mètre, ou de..... $20'' \frac{2}{3}$,
et même, d'après Dubuat, sur une pente moindre.²

Le canal de l'Ourcq, construit de manière à ce que l'eau de cette rivière *coule* vers Paris, a reçu, sur une longueur de 96 000 mètres, une chute totale de $10,^m 14$, ce qui correspond à une pente moyenne de

1. Fontenelle, Éloge de Guglielmini.

2. Forbes, *Travels through the Alps*, p. 366.

0,^m0001056 par mètre, ou de 21'' $\frac{3}{4}$.¹

D'après M. l'ingénieur Elia Lombardini, les pentes des canaux navigables de la Lombardie sont quelquefois moindres encore.²

Beaucoup
de rivières
coulent
sur une pente de
0,0001 ou de 20''.

La pente de un sur dix mille, ou de 20'' en nombres ronds, est aussi à peu près celle d'un grand nombre de rivières : telles, par exemple, que la Seine aux environs de Paris; mais on pourrait citer beaucoup de grands fleuves qui coulent sur des pentes encore plus faibles. Je ne saurais mieux faire pour vous familiariser avec cet ordre de faits, si important non-seulement au point de vue de l'hydraulique, mais même au point de vue simplement géographique, que de vous citer des exemples de pentes mesurées sur diverses rivières.

Pentes
plus faibles encore
de quelques
grands fleuves.

La pente du Pô, dans les 30 derniers kilomètres de son cours, est de :

0,^m000033 par mètre, ou de 6'' $\frac{4}{5}$.³

La pente du Rhin, dans les dernières parties de son cours, est à peu près de

0,^m000039 par mètre, ou de 8''.

Dans un grand travail sur le bassin du Rhône et sur les projets de navigation qui se rattachent à ce fleuve, M. Vallée, inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, évalue la pente du Rhône, depuis Arles jusqu'à la barre du Rhône, à :

0,^m000053 par mètre⁴, ou à un peu moins de 11''.

1. Girard, Mémoires sur le canal de l'Ourcq, t. I.^{er}, p. 350.
2. Elia Lombardini, *Notizie naturali e civili su la Lombardia*; t. I.^{er}, p. 226.
3. *Idem, ibid.*, p. 204.
4. Vallée, Du Rhône et du lac de Genève, p. 18.

La pente du Rhône, calculée d'Arles au port de Bouc, est encore plus faible, et se réduit à :

0,^m000039 par mètre, ou à..... 8''.

Il paraît que la pente moyenne du Mississipi, depuis son confluent avec l'Ohio jusqu'à son embouchure dans le golfe du Mexique, est de

0,^m0000474 par mètre, ou de..... 9'' $\frac{3}{4}$.

Une pareille moyenne suppose nécessairement quelques pentes partielles plus faibles et probablement inférieures à 8''.

La pente de la Seine, depuis l'embouchure de l'Oise jusqu'au grand pont de pierre de Rouen, est de

0,^m000087 par mètre, ou de..... 19''.

Exemples
de pentes pris
dans
diverses rivières.

La vallée de la Seine, de Paris à Rouen, présente plusieurs rétrécissements et élargissements successifs qui la partagent en plusieurs biefs, présentant alternativement des augmentations et des diminutions de pente; la pente moyenne dans cet intervalle est de

0,^m000095 par mètre, ou de..... 19'' $\frac{1}{2}$.

La pente de la Seine, du pont d'Austerlitz au pont de la Tournelle (et elle est la même dans plusieurs autres points aux environs de Paris), est de

0,^m000109 par mètre, ou de..... 21''.

Dans Paris, comme il y a un grand nombre de ponts qui obstruent le cours de la Seine, il y a des exemples de pentes très-différentes, qui varient de

0,^m000019 par mètre, ou..... 4'',

à

0,^m001144 par mètre, ou..... 3' 56''.

Cette dernière pente est énorme pour un fleuve; mais elle n'existe que sur une petite étendue dans le voisinage du Pont-Neuf.

Le Pò a, du confluent du Panaro à la mer, une pente de

0,^m00006 par mètre, ou de 12'' $\frac{2}{5}$.

à

0,^m00011 par mètre, ou 22'' $\frac{2}{3}$.

Le Pò, entre les confluent de l'Ollio et de l'Adda, a une pente de

0,^m00015 par mètre, ou de 31'',

à

0,^m00025 par mètre, ou 51'' $\frac{1}{2}$.

Le Pò, entre les confluent du Tessin et de la Doire, a une pente de

0,^m00030 par mètre, ou de 1' 2'',

à

0,^m00050 par mètre¹, ou 1' 43''.

La pente du Rhin au point où il quitte le territoire français, près du confluent de la Lauter, est de

0,^m000389 par mètre, ou de 1' 21''.

Au point où il commence à former la frontière de la France au-dessous de Bâle, elle est plus forte de

0,^m000964 par mètre, ou de 3' 19''.

La pente moyenne du Rhin le long du territoire français, entre Bâle et le confluent de la Lauter, est de

0,^m000647 par mètre, ou de 2' 13''.

Cette moyenne est égale à la pente effective du Rhin près de Vieux-Brisach.

En face de Strasbourg, la pente du Rhin est de 0,^m00061 par mètre, ou de 2'.

1. Elia Lombardini, *Notizie naturali e civili su la Lombardia*; tome I.^{er}, p. 124.

D'après M. Vallée, la pente du Rhône à Tarascon, est de

0,^m000288 par mètre, ou de 59'' ^{$\frac{2}{5}$} .

La pente du Rhône à Avignon est de

0,^m000409 par mètre, ou de 1' 24''.

La pente moyenne du Rhône, de Lyon à Arles, est de

0,^m000553 par mètre, ou de 1' 54''.

De Lyon à Givors elle est de

0,^m000543 par mètre, ou de 1' 52''.

Et au parc, à l'endroit où finit la navigation, elle est de

0,^m000954 par mètre, ou de 3' 17''.

Ce n'est pas encore là la pente au delà de laquelle la navigation n'est plus possible; mais c'est celle du tronçon où s'arrête de fait la navigation.

La pente du Doubs aux environs de Besançon, est de

0,^m001000 par mètre, ou de 3' 26'',

et elle mérite d'être remarquée, parce que c'est la pente qu'on assigne comme la limite de celles des rivières navigables. Il y a peu de rivières qui puissent être navigables avec une pente plus considérable que celle-là. Beaucoup de rivières ont sans doute des pentes plus fortes; mais elles ne sont pas navigables: ou bien elles ont trop peu d'eau; ou bien, si elles en ont assez, la vitesse est tellement grande, que les eaux font des soubresauts qui rendent la navigation impossible, et permettent seulement de flotter les bois.

Limite supérieure
des pentes
des
rivières navigables.

M. de Prony, dans le projet qu'il a dressé pour le dessèchement des marais Pontins, propose de

Pentes
à donner aux
canaux
qui doivent débiter
de grands volumes
d'eau.

faire écouler toutes les eaux supérieures, autres que celles du torrent de Sermonetta, par un canal dont les pentes diminueraient à mesure que le volume d'eau augmenterait, de manière à conserver à l'eau une vitesse à peu près constante et qui, dans les crues, irait même légèrement en croissant. Les pentes successives devraient être, d'après le projet¹, de

0, ^m 0005035	par mètre, ou de	1' 43"
0, ^m 0004345	par mètre, ou de	1' 29"
0, ^m 0003806	par mètre, ou de	1' 18"
0, ^m 0003387	par mètre, ou de	1' 9"
0, ^m 0003008	par mètre, ou de	1' 2"
0, ^m 0002879	par mètre, ou de	59"

Il n'est pas même nécessaire que la section d'un canal soit considérable pour que l'eau y coule avec facilité sur une pente plus petite encore que toutes les précédentes; car l'aqueduc de Montpellier, dont la longueur est assez grande, et dont la cunette a seulement 0,^m305 de largeur, n'a qu'une pente de 0,^m00028 par mètre, ou de 57''³/₄.²

M. de Prony trouve beaucoup trop fortes, pour des canaux destinés à conduire dans les crues des masses d'eau de 100 à 200 mètres cubes par seconde, des pentes de

0, ^m 0021	par mètre, ou de	7' 13"
0, ^m 0018	par mètre, ou de	6' 11"

1. De Prony, Des marais Pontins, p. 392.

2. E. Dupont, Étude comparative de deux projets d'approvisionnement d'eau de la ville de Cette à l'aide de la rivière d'Hérault et de la fontaine d'Isanka, p. 72 à 75.

0,^m0015 par mètre, ou de 5' 9",
et même de

0,^m0014 par mètre, ou de 4' 48".

Toutes ces pentes feraient acquérir à des volumes d'eau aussi considérables que ceux dont il s'agit, des vitesses capables de dégrader les canaux.¹

En effet, les rivières dont les pentes sont comparables à celles que je viens de citer, sont ou très-petites ou très-rapides, et, dans ce dernier cas, elles coulent sur du gravier assez gros, toutes les parties plus ténues ayant été entraînées par suite de l'action érosive des eaux. On peut en juger par le tableau des valeurs numériques des pentes des divers cours, d'eau que j'ai consigné à la suite de mes recherches sur la structure et sur l'origine du mont Etna². Je me borne à en extraire ici les deux exemples suivants :

La pente de la Meurthe, de Raon-l'Étape à Lunéville, est de

0,^m00167 par mètre, ou de 5' 44".

Pentes
de
quelques rivières
très-rapides.

La pente de la Durance, depuis le pont de Bompas jusqu'à son embouchure dans le Rhône, est de 0,^m002102 par mètre, ou de 7' 19".

D'après M. Renou, membre de la commission scientifique de l'Algérie, les rivières de cette partie de l'Afrique ont généralement des pentes de $\frac{1}{400} = 0,^m025$ par mètre, ou de 8' 35"; aussi sont-elles toutes bien éloignées d'être navigables, et sont-elles déjà qualifiées de torrents.

1. De Prony, Des marais Pontins, p. 371.

2. Élie de Beaumont, Mémoires pour servir à une description géologique de la France; t. IV, p. 222.

Les pentes des rivières régulières ne dépassent pas $\frac{1}{500}$ ou $6' 52'' \frac{1}{2}$.

Ces pentes, quoique très-variées, sont toutes également insensibles à l'œil.

On voit par ces exemples, et sans qu'il soit nécessaire de les multiplier davantage, que les cours d'eau réguliers, les véritables rivières, ont généralement des pentes inférieures à $\frac{1}{500}$, ou à $0^m 002$ par mètre, c'est-à-dire, à $6' 52'' \frac{1}{2}$. Cette dernière pente est encore insensible à l'œil, qui ne saisit guère les pentes inférieures à $0^m 0029$ par mètre ou à $10'$. Mais, quoique invisibles, ces pentes n'en sont pas moins très-variées; car celle de $6' 52'' \frac{1}{2}$ est égale à plus de 60 fois celle de $6'' \frac{4}{5}$, sur laquelle coule le Pô dans les 30 derniers kilomètres de son cours.

De cette variété dans les pentes résulte en partie l'extrême variété que présente le régime de celles des rivières dont la pente est insensible à l'œil.

Pentes bien plus fortes des cours d'eau des pays de montagnes.

En dessus de la pente de $0^m 002$ par mètre, ou de $6' 52'' \frac{1}{2}$, les rivières prennent un cours torrentiel; cependant, dans les vallées des pays de montagnes, on leur conserve encore le nom de rivières, par comparaison avec les rivières torrentielles et les torrents dont les pentes sont encore plus considérables.

Limites des pentes sur lesquelles les eaux produisent divers effets.

On peut voir entre autres exemples, dans le tableau cité ci-dessus, que la pente de l'Isère sur le terre-plein du village de Tignes, avant le défilé qui aboutit à Brévières (Tarentaise), est de $0^m 00931$ par mètre, ou de $32'$

Les eaux de l'Isère, dont le lit est ici fort large, coulent rapidement en bondissant contre tous les obstacles.

La pente de la Möhl, en Carinthie, est de $0^m 017455$ par mètre, ou de 1° .

Aussi, bondit-elle sur toutes les pierres et sur les moindres inégalités que présente son lit : c'est une véritable cataracte.

Rivières.

Les cours d'eau auxquels on donne le nom de rivières dans les Hautes-Alpes ont, d'après M. Surell, une pente d'environ

0,^m015 par mètre, ou de 51' 40".

Celle des rivières torrentielles est de

Rivières
torrentielles.

0,^m020 par mètre, ou de 1° 8' 45".

Ainsi la Möhl, qui coule comme une véritable cataracte, est encore au-dessous, quant à sa pente, de ce qu'on appelle, dans les Hautes-Alpes, des rivières torrentielles. Les rivières torrentielles sont déjà en elles-mêmes de véritables torrents suivant l'acception vulgaire du mot; mais nous avons vu que, dans les Hautes-Alpes, on réserve le nom de torrents à des cours d'eau où il n'y a d'eau que pendant quelques jours de l'année et qui produisent alors des ravages considérables.

Les torrents commencent à acquérir la vitesse qui constitue leur puissance sur des pentes de 0,^m025 par mètre, ou de 1° 25' 55"; mais pour qu'ils produisent leurs plus grands ravages, leurs pentes doivent être au moins de

Torrents.

0,^m060 par mètre, ou de 3° 26' 1".

Elles vont jusqu'à

8 centimètres par mètre, ou 4° 34' 26".

C'est sur de pareilles pentes que se produisent ces vitesses étonnantes et ces mouvements désordonnés, qui lancent des blocs de rocher comme des projectiles.

Comparaison
de ces pentes
avec
celles observées
ou employées dans
les chemins de fer.

Il n'est pas sans intérêt de comparer les pentes des cours d'eau avec des pentes en rapport avec d'autres objets.

Les pentes des chemins de fer sont regardées comme assez modérées quand elles ne dépassent pas $0,^m005$ par mètre, ou $17' 11''$, c'est-à-dire lorsqu'elles ne sont pas plus de cinq fois aussi grandes que celles des rivières navigables. Cette pente est la plus faible de celles sur lesquelles les wagons se mettent en mouvement d'eux-mêmes. On a souvent proposé de se tenir toujours au-dessous; cependant on la dépasse très-souvent.

La pente du chemin de fer de Rive-de-Gier à Givors est de $0,^m0060$ par mètre, ou de $20' 38''$.

La pente de la rampe d'Étampes, sur le chemin de fer de Paris à Orléans, est de $0,^m0080$ par mètre, ou de $27' 30''$.

La pente maximum du chemin de fer de Liverpool à Manchester, est de $\frac{1}{96} = 0,^m0104$ par mètre, ou de $35' 46''$.

Ces pentes sont considérées comme assez considérables.

Celle du chemin de fer de Saint-Étienne à Rive-de-Gier, est de $0,^m0140$ par mètre, ou de $48' 07''$.

Ces dernières pentes sont généralement regardées comme trop fortes. On voit donc qu'on peut établir des chemins de fer sur des pentes dix fois plus grandes que celle où une rivière cesse d'être navigable; mais qu'on ne pourrait en établir le long du lit des torrents.

Les grandes routes admettent des pentes beaucoup plus considérables, et on pourrait en établir le long de la plupart des torrents sans qu'elles fussent trop rapides.

Dans les routes ordinaires.

La pente maximum admise pour les routes que l'on construit aujourd'hui, est de

0,^m05 par mètre, ou de 2° 58' 40".

Ainsi, une route est encore assez douce lorsqu'elle a une pente cinquante fois aussi grande que celle sur laquelle les rivières cessent d'être navigables, et double de celle sur laquelle les torrents commencent à produire de grands ravages. Aussi détourne-t-on les eaux pluviales à droite et à gauche des routes en pente, parce que, sur les pentes qu'on y tolère, un courant d'eau, s'il était un peu considérable, acquerrait une très-grande vitesse, et dégraderait le terrain avec une extrême énergie.

Je pourrais multiplier beaucoup plus ces exemples de pentes ; mais ceux que je viens de mettre sous vos yeux me paraissent suffire pour le moment. Vous en trouverez un plus grand nombre dans les tableaux que j'ai placés à la fin de mes recherches sur la structure et sur l'origine du mont Etna.¹

Nous allons nous occuper maintenant des vitesses que prennent les eaux sur les différentes pentes. D'après ce que nous avons vu précédemment, vous devez déjà vous attendre à ne pas trouver un rapport constant entre les pentes et les vitesses des rivières. En effet, la vitesse que prend un cours d'eau dépend non-seulement de sa pente, mais encore de la quantité

Vitesses des rivières.

Elles dépendent à la fois de la pente et du volume des eaux.

1. Mémoires pour servir à une description géologique de la France ; t. IV, p. 222 ; et Annales des mines, 3.^e série, t. X, p. 554.

d'eau qui y passe dans un temps donné. Une goutte d'eau peut s'écouler très-lentement sur un plan vertical; elle peut même y rester suspendue: mais si la quantité d'eau devient très-grande, la vitesse peut devenir considérable sur une pente encore assez faible.

C'est pour cela qu'une même rivière coule avec des vitesses très-différentes, en un point donné, dans les temps ordinaires et dans les crues.

Vitesses
de diverses rivières
dans différentes
circonstances.

Pour se faire une idée complètement exacte des rivières, il est bon de connaître les vitesses avec lesquelles elles coulent et les quantités d'eau qui y passent, qu'elles *mènent* ou qu'elles *débitent*, dans des circonstances diverses. Je vais mettre sous vos yeux quelques exemples.

La Seine.

On a trouvé, pour les vitesses à la surface de la Seine, aux environs de Paris, quand les eaux sont basses,

360 mètres par heure,	ou	0, ^m 10 par seconde.	
540	—	0, ^m 15	—
720	—	0, ^m 20	—
1800	—	0, ^m 50	—

Les trois premières vitesses sont pour ainsi dire des exceptions; elles ne s'observent que dans les endroits où le courant se meut avec une extrême lenteur. La vitesse la plus ordinaire est celle de 1800 mètres par heure, ou de 0,^m50 par seconde: ce serait la vitesse d'un bateau qu'on y abandonnerait au courant.

Ainsi, la Seine met généralement un peu plus de 2 heures pour faire une lieue; mais elle a souvent, aux environs de Paris, des vitesses de 2160 mètr. par heure, ou de 0,^m60 par seconde, et de 2340 — 0,^m65 —

Dans les crues la vitesse de la Seine, à Paris, est de 7 200 mètr. par heure, ou 2 mètr. par seconde,
à 10 800 — 3 —

D'après M. Dausse, ingénieur en chef des ponts et chaussées, la vitesse du Rhône, en étiage, à Lyon, est de

Le Rhône.

1440 mètres par heure, ou 0,^m40 par seconde;
1800 — 0,^m50 — jusqu'à
5400 — 1,^m50 — et

même plus.

Dans les grandes eaux la vitesse va jusqu'à 14 400 mètr. par heure, ou 4 m. par seconde, et même jusqu'à 18 000 mètres par heure, ou 5 mètres par seconde.

Le Rhin, en face de Strasbourg, a aussi une vitesse très-variable. Dans les basses eaux cette vitesse est de 5400 m. par heure, ou de 1,^m50 par seconde;

Le Rhin.

dans les eaux moyennes,

de 7666 m. par heure, ou de 2,^m13 —

et dans les grandes eaux,

de 10 260 m. par heure, ou de 2,^m85 —

La vitesse moyenne du Rhin, de Strasbourg à Cologne, est de

5556 mètres par heure, ou 1,^m54 par seconde.

La vitesse moyenne du Nil n'excède pas 3 milles, c'est-à-dire

Le Nil.

5556 mètres par heure, ou 1,^m54 par seconde : ainsi le Rhin et le Nil, deux fleuves si différents sous beaucoup d'autres rapports, ont à peu près une égale rapidité.

Celle du Gange est encore à peu près la même, et comme on navigue depuis très-longtemps sur ce fleuve, on doit la connaître assez exactement.

Le Gange.

La vitesse moyenne du Gange est d'un peu moins de 3 milles, c'est-à-dire de 5556 mètres à l'heure, ou de 1,^m54 par seconde.

Dans les crues, le Gange fait de 5 à 6 milles, ou 9260 à 11 112 mètres à l'heure, c'est-à-dire, 2,^m51 à 3,^m09 par seconde.

Dans quelques points particuliers il fait 7 à 8 milles, c'est-à-dire 12 964 à 14 816 mètres par heure, ou 3,^m60 à 4,^m11 par seconde.

Ainsi le Gange, dans ses crues, acquiert quelquefois une vitesse à peu près égale à celle que le Rhône atteint à Lyon dans ses propres crues.

Mississippi.

Le Mississippi, qui est sillonné par plusieurs centaines de bateaux à vapeur, est aujourd'hui l'un des fleuves dont la vitesse est la mieux connue, particulièrement dans la partie qui forme le tronc principal avant le commencement du Delta, entre l'embouchure de l'Ohio et celle de l'Arkansas. Dans cette partie de son cours, le Mississippi a, pendant les basses eaux, une vitesse moyenne de 40 à 50 milles par jour, ou de 3481 à 3858 mètres par heure, c'est-à-dire de 0,^m96 à 1,^m07 par seconde.

Dans son état ordinaire, ce fleuve fait de 60 à 70 milles par jour, c'est-à-dire 4630 à 5402 mètres par heure, ou 1,^m25 à 1,^m50 par seconde.

Dans les crues, la vitesse du Mississippi varie entre 90 et 100 milles par jour, ou entre 6945 et 7717 mètres par heure, c'est-à-dire entre 1,^m92 à 2,^m14 par seconde; ce fleuve n'atteint donc que la moitié environ de la vitesse maximum du Gange: c'est un fleuve beaucoup plus tranquille. Mais le Gange descend plus directement de très-hautes montagnes

que ne le fait même le Missouri, qui est l'affluent le plus impétueux du Mississipi.

En résumé, la vitesse de 1800 mètres par heure, ou de 0,^m50 par seconde, c'est-à-dire la vitesse que la Seine présente le plus habituellement aux environs de Paris, peut être considérée comme assez faible. Beaucoup de rivières ont une vitesse de 2160 m. par heure, ou de 0,^m60 par seconde, à 3600 m. — ou 1 mètre par seconde.

La vitesse est très-grande quand elle dépasse 7200 mètres par heure, ou 2 mètres par seconde : la vitesse moyenne ordinaire du Rhône, du Rhin et du Gange, qui sont des fleuves rapides, est d'environ 1,^m54 par seconde. Dans les grandes crues, la vitesse de ces fleuves va jusqu'à 14 400 mètres par heure, ou 4 mètres par seconde, et même pour le Rhône jusqu'à 18 000 mètres par heure, ou 5 mètres par seconde; vitesse qui est considérée comme torrentielle.

Comme les rivières qui atteignent ces vitesses extrêmes ont presque toujours, pendant l'étiage, des vitesses de plus de 1,^m50 par seconde, à moins qu'elles ne soient sujettes à manquer d'eau dans les sécheresses, auquel cas elles sortiraient de la classe des rivières régulières, on peut dire qu'il est très-rare que la vitesse d'une rivière soit plus que triplée par l'effet d'une crue. Nous verrons, en effet, que, pour qu'il en fût ainsi, il faudrait que la profondeur de l'eau dans la rivière fût décuplée dans le moment de la crue, ce qui est un taux d'accroissement fort rare pour les rivières qui ne sont pas sujettes à tarir.

La vitesse d'une rivière qui ne tarit jamais est rarement triplée dans les crues.

Vitesses
des
courants marins.

Les courants marins les plus ordinaires, dont on cite un grand nombre d'exemples, font ordinairement de 3600 m. par heure, ou 1 mètre par seconde, à 5800 — 1,^m611 —

Elles
sont comprises
dans des limites
peu différentes
de
celles des vitesses
des rivières.

Cette vitesse est suffisante pour exercer une influence notable sur la marche d'un navire, et par conséquent pour que les marins en tiennent compte. Mais il y a dans la mer des courants produits par les marées, et qui font jusqu'à 16 666 mètres par heure, ou 4,^m63 par seconde, et même 22 526 mètres par heure, ou 6,^m25 par seconde. Il y a donc dans la mer beaucoup de courants comparables à ceux des rivières ordinaires, et quelques courants aussi rapides que ceux des rivières les plus rapides dans leurs plus grandes crues. Ainsi le courant que produit la marée descendante dans le Raz de Sein, à l'extrémité de la Bretagne, est comparable par sa vitesse, par son aspect, par le bruit qu'il produit, à celui de la Durance dans ses crues les plus violentes. Toutefois ces courants marins très-rapides sont des exemples rares. On ne les observe que dans le voisinage des côtes, dans des parties où leur configuration donne naissance à de très-fortes marées et où la propagation peu rapide de ces marées place des points de la surface de la mer, peu éloignés les uns des autres, à des niveaux sensiblement différents. Les marées sont assez fortes dans la Manche et elles y pénètrent avec lenteur¹. De là il résulte, ainsi qu'on peut le vérifier dans

1. Voyez Berghaus, *Physikalischer Atlas; zweite Abtheilung, Hydrographie*, n.° 2.

l'excellent Annuaire de M. Chazallon¹, que la marée est déjà basse à l'île d'Ouessant lorsqu'elle est haute au Hâvre et aux Needles, dans l'île de Wight. Or, l'amplitude des marées, dans ces différents points, dépasse souvent sept mètres, et la distance de l'île d'Ouessant au Hâvre et aux Needles, en doublant le cap de la Hogue, est respectivement de 420 et de 358 kilomètres, dont la moyenne est de 389 kilomètres. On peut en conclure que suivant que la marée est haute ou basse à l'île d'Ouessant, la surface de la mer présente, de l'Océan vers la Manche ou de la Manche vers l'Océan, une pente *moyenne* de 7 mètres pour 389 000 mètres, ou de 0,^m000017904 par mètre, ou enfin de $5''\frac{3}{4}$. Cette pente moyenne serait très-faible pour une rivière, mais il faut remarquer que la pente de la surface de la mer, à un moment donné de la marée, n'est pas distribuée uniformément dans tout l'espace indiqué. Elle est toujours à peu près nulle aux points *maximum* et *minimum*, et il n'y a certainement rien d'exagéré à supposer qu'en certains points intermédiaires elle est double de la moyenne, c'est-à-dire de $7''\frac{1}{2}$: pente qui est déjà supérieure à celle que possède le Pô, ainsi que nous l'avons vu ci-dessus, dans les 30 derniers kilomètres de son cours. Il doit donc en résulter des courants, et même des courants rapides. En effet, la vitesse que prend un courant d'eau dépend, comme nous le verrons bientôt, non de l'inclinaison de son fond, mais de celle de sa surface.

1. Annuaire des marées des côtes de France, publié au dépôt de la marine par M. Chazallon.

Elle est aussi d'autant plus grande que la masse d'eau est plus considérable. Une mer dont la surface est inclinée de $7^{\frac{1}{2}}$, doit couler par conséquent avec une vitesse beaucoup plus grande que celle avec laquelle le Pô entre dans l'Adriatique, et on concevrait que cette vitesse dépassât dans certains cas celle des fleuves les plus rapides et même celle des torrents. Ces courants de la mer acquièrent d'autant plus facilement une grande vitesse qu'ils ne touchent le fond et les bords de la mer que dans un petit nombre d'endroits resserrés, et qu'ailleurs ils coulent en partie dans un lit formé par l'eau tranquille, qui ne donne lieu qu'à un frottement très-adouci. Leurs remous font naître ces tournoiemens redoutés des marins depuis un temps immémorial : *Carybde*, en Sicile, le *Corryvracken*, en Écosse, le *Malström*, en Norwège, etc.¹

Vitesses
des torrents
beaucoup
plus considérables.

La vitesse des torrents est très-difficile à mesurer; M. Surell l'évalue, dans un exemple qu'il a calculé, à environ 51 408 mètres par heure, ou 14,^m 28 par seconde. Cette vitesse diffère peu de celle des vents impétueux, qui est de 54 000 m. par heure, ou de 15 mètres par seconde. Cela permet de concevoir comment il est possible que les torrents produisent,

1. On pourrait se demander pourquoi des courants d'une vitesse supérieure à 5 ou 6 mètres par seconde se produisent si rarement sur la surface actuelle du globe, et seulement dans des localités peu étendues, où cette surface (sauf le cas des cascades et des cataractes) éprouve actuellement de grands changements. Je crois, et j'espère démontrer ultérieurement (leçons de l'année 1844 à 1845), qu'on ne peut faire à une pareille question d'autre réponse que celle-ci : *la surface actuelle du globe a été façonnée par les courants diluviens.*

par le seul effet de l'air qu'ils poussent devant eux, des effets analogues à ceux des grands vents, et fassent voler, par exemple, des ponts en bois, comme cela arrive quelquefois.

Il peut être curieux de comparer les vitesses des cours d'eau à des vitesses relatives à d'autres genres de phénomènes.

La vitesse de 1 mètre par seconde, qui est à peu près la moyenne des vitesses d'un grand nombre de rivières, est aussi, à peu près, celle d'un homme qui se promène tranquillement.

Comparaison
des vitesses des
cours d'eau
avec
d'autres genres de
vitesses.

Un homme qui marche d'un pas soutenu fait une lieue de 20 au degré, ou 5555 mètres par heure, c'est-à-dire 1,^m54 par seconde, c'est la vitesse d'une rivière rapide, comme le Rhône, le Rhin, le Gange.

La vitesse moyenne des malles-postes est de 16 à 20 kilom., c'est-à-dire 16 000 à 20 000 mètres à l'heure, ou de 4,^m44 à 5,^m83 par seconde. Ainsi, très-peu de rivières atteignent, même dans leurs crues, la vitesse des malles-postes, mais les torrents la dépassent de beaucoup.

Il est très-rare qu'un navire, même lorsqu'il peut s'aider à la fois des voiles et de la vapeur, parvienne à filer plus de 13 nœuds, c'est-à-dire à parcourir plus de 13 milles marins, ou de 24 076 mètres à l'heure, ou plus de 6,^m68 par seconde : ainsi la vitesse d'un navire dépasse rarement, de beaucoup, celle des courants marins les plus rapides.

La plus grande vitesse que l'on tolère officiellement sur les chemins de fer de France, est de 36 000 mètres à l'heure, ou de 10 mètres par seconde.

Ces dernières vitesses, quoique considérables en elles-mêmes, sont encore très-petites si on les compare à celles de certains mouvements naturels ou artificiels.

La vitesse du son dans l'air à 0° est de $331,^m_{12}$ par seconde.

On estime habituellement la vitesse des projectiles lancés par la poudre à 4 ou 500 mètres par seconde; dans des expériences récentes on n'a trouvé la vitesse d'un boulet de 24, au sortir de la pièce, que de 390 mètres par seconde, et on a cité dernièrement la vitesse de 745 mètres par seconde comme la plus grande que l'homme ait jamais pu imprimer à un projectile.

La vitesse d'un point de l'équateur dans le mouvement de rotation de la terre sur elle-même, est de 463 mètres par seconde.

La vitesse de translation de la terre dans son orbite autour du soleil est beaucoup plus grande et d'environ 32 000 mètres par seconde.

La vitesse de la lumière est de 308 080 000 de mètres par seconde, et celle de l'électricité paraît être au moins égale.

Variations
auxquelles les
rivières
sont sujettes.

Je vais maintenant donner des exemples de la manière d'être de différents cours d'eau dans diverses circonstances.

Étiage,
état moyen,
module,
grandes crues.

On a à considérer le débit des cours d'eau dans leur *étiage* (c'est-à-dire à l'époque où ils ont le moins d'eau possible), dans leur état moyen et dans leurs crues. Pour l'état moyen il y aurait encore à distinguer. On peut prendre la moyenne de toute la quantité d'eau qui passe dans une rivière pendant

l'année entière (c'est là ce que quelques hydrauliciens appellent son *module*), ou bien prendre le débit du cours d'eau dans son état le plus habituel et en faisant abstraction des grandes crues et des étiages très-bas.

La plupart des rivières conservent un peu d'eau pendant la saison de l'année où elles en ont le moins, et qui est celle de leur *étiage*. La plupart aussi sont sujettes à des crues; mais les diverses rivières diffèrent extrêmement les unes des autres quant à la variation que leur niveau éprouve de l'étiage aux grandes crues.

Certains cours d'eau sont presque invariables; tels sont ceux qui viennent de traverser de grands lacs. Ainsi les tributaires innombrables du Saint-Laurent assemblent leurs eaux dans les grands lacs du Canada, vastes réservoirs, où elles se reposent et s'épurent, et qui les rendent, claires et transparentes, au fleuve lui-même. Le niveau du Saint-Laurent a ainsi un *régulateur* assez vaste pour tenir ses eaux à une hauteur constante, et il reste presque entièrement sans crue et sans étiage¹. Les fleuves et les rivières qui sortent des grands lacs des Alpes, participent, quoique dans un degré moindre, à cette constance de régime.

Constance
des cours d'eau
qui sortent
de grands lacs.

Le Saint-Laurent.

D'autres cours d'eau, situés sous les mêmes climats, ont un régime d'une nature toute opposée, par suite de la configuration différente de leurs bassins, et surtout par suite de l'absence de ces

Variations
souvent énormes
des cours d'eau
privés
de régulateurs.

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; tome I.^{er}, page 46.

Crues
de l'Ohio.

lacs régulateurs dont nous venons de parler. Ainsi l'Ohio, dont le bassin confine sur une grande étendue à celui du fleuve Saint-Laurent, est, parmi les rivières connues, une de celles dont les crues sont les plus considérables. A la fonte des neiges il monte souvent de 15 mètres, et quelquefois beaucoup plus; en 1832, à Cincinnati, il dépassa de 20 mètres le niveau de l'étiage, pendant lequel, sur quelques points du haut de la vallée, il ne reste pas un mètre d'eau dans le chenal.

Crues
du Mississipi.

Les crues du haut Mississipi sont de 5 mètres; au-dessous du confluent de l'Ohio elles sont plus fortes, mais moins grandes cependant que celles de cette dernière rivière, à cause de la largeur de terrain sur laquelle le fleuve se répand. Immédiatement au-dessous du confluent elles s'élèvent à 13,^m73, mais bientôt elles se réduisent à une dizaine de mètres: dès Natchez, qui est aux approches du Delta, la hauteur des crues diminue; elle n'est que de 8 à 9 mètres au plus à Baton-Rouge, et de 4 à 5 mètres à la Nouvelle-Orléans.

Crues
du Nil.

Les crues du Nil, beaucoup plus célèbres que celles de l'Ohio et du Mississipi, sont cependant moins considérables. Dans la Haute-Égypte la crue ordinaire du Nil est de $7\frac{1}{2}$ à 9 mètres. Au Caire elle est de 7,^m419.

Crues des rivières
d'Europe.

Dans les régions tempérées de l'Europe, les crues des grands fleuves vont rarement au delà de 10 mètres, c'est-à-dire qu'elles ne sont que la moitié de celles de l'Ohio et environ les trois quarts de celles du Mississipi.

La Seine.

A Paris, où la présence d'une longue suite de

ponts rend les crues plus apparentes, la Seine s'éleva, au pont de la Tournelle, lors de l'inondation de mai 1836, au-dessus de l'étiage de 6, 40

Pendant l'inondation célèbre de 1802, de 7, 45

Pendant celle de 1740, de 7, 90

En amont de Paris les crues n'atteignent pas le même niveau. A Villeneuve-Saint-George et à Corbeil les crues ont suivi la loi suivante : 1836 5, 50

1802 5, 98

1740 6, 33

La Loire, lors de la grande crue de 1825, monta le 7 décembre, à Nevers, au-dessus de l'étiage de 5, 00

La Lo

En novembre 1790, époque de la plus forte crue dont on eut jusqu'ici gardé le souvenir, elle monta de 5, 25

Sur l'Allier, à Moulins, la crue du 12 novembre 1790 porta le niveau de la rivière au-dessus de l'étiage de 6, 35

Dans la crue désastreuse du mois d'octobre 1846, la Loire s'est élevée à Orléans et à Tours, au-dessus de l'étiage, d'environ 7, 00

La Garonne est de tous nos fleuves de France celui qui a les plus fortes crues. D'après un rapport de M. le marquis de Dalmatie sur le canal latéral de la Garonne (session de 1838), elle s'est élevée à Agen de¹ 9, 37

La Gar

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; tome I.^{er}, page 77.

Le Rhin.

La crue du Rhin est à Bâle, au-dessus de l'étiage,	
de	6, 73
Plus bas, à la prise d'eau du canal du	
Rhône au Rhin, par l'effet d'un resserrement	
de lit, elle est de	7, 08
A la limite des départements du Haut- et	
du Bas-Rhin elle est de	3, 70
A Rhinau, de	3, 40
et à Strasbourg, de	4, 08

Il est vrai que le Rhin traverse le lac de Constance, qui fait pour lui, comme le lac de Genève pour le Rhône, l'effet d'un régulateur, et tend à égaliser son régime.

Mais l'influence du lac de Constance et des autres lacs de la Suisse se trouve fortement atténuée dans la partie inférieure du cours du Rhin par la réception d'un grand nombre d'affluents; les crues y sont alors beaucoup plus sensibles. D'après l'excellent atlas de M. Berghaus, la plus grande crue connue et bien avérée du Rhin à Cologne, celle du 1.^{er} mars 1784, s'est élevée à 30 pieds 10 pouces de Prusse au-dessus du zéro de l'échelle, qui est lui-même supérieur de 1 pied $\frac{1}{2}$ au plus bas étiage connu, celui de 1826. La hauteur réelle de la crue a donc été de 29 pieds 4 pouces de Prusse, ou de 9,^m11.

Le Weser.

La plus grande crue du Weser dont on ait conservé le souvenir, celle du mois de février 1682, s'est élevée à 23 pieds 7 pouces de Prusse à l'échelle de Minden. Le zéro de cette échelle étant de 4 pouces au-dessous des plus basses eaux connues, qui sont celles des mois d'octobre 1834 et de novembre 1835,

la crue du Weser à Minden, en 1682, a été réellement de 23 pieds 3 pouces de Prusse, ou de 7,^m30.

La plus grande crue connue de l'Elbe, à Magdebourg, celle du 12 février 1655, s'est élevée à 19 pieds 6 pouces de Prusse de l'échelle hydrométrique de Magdebourg. Le zéro de cette échelle étant supérieur d'un pied au niveau des plus basses eaux connues, qui sont celles du mois de janvier 1833, la hauteur réelle de la crue de 1655 à Magdebourg peut être évaluée à 20 pieds 6 pouces de Prusse, ou à. 6,^m43.

L'Elb

La plus grande crue connue de l'Oder, celle du 28 avril 1785, s'est élevée à l'échelle hydrométrique de Custrin à 15 pieds 1 pouce de Prusse. Le zéro de l'échelle étant supérieur de 2 pouces environ au plus bas étiage connu, celui de 1824, la hauteur réelle de la crue a été de 15 pieds $\frac{1}{4}$ de Prusse, ou de. 4,^m79.

L'Ode

La plus grande crue connue de la Vistule, à Thorn, celle du 31 mars 1814, s'est élevée à 22 pieds 9 pouces de Prusse de l'échelle de Thorn. Le zéro de cette échelle étant de 9 pouces au-dessous des plus basses eaux connues, qui sont celles du mois de décembre 1834, la crue du 31 mars 1814 à Thorn peut être évaluée à 23 pieds 6 pouces de Prusse, ou à. 7,^m38

La Vist

La plus grande crue connue du Niémen, à Tilsit, celle du 13 avril 1829, s'est élevée à 22 pieds 5 pouces de Prusse de l'échelle de Tilsit. Le zéro de cette échelle étant de 17 pouces au-dessous des plus basses eaux connues, qui sont celles du mois de septembre 1826, la crue du Niémen à Tilsit,

Le Niém

le 13 avril 1829, peut être évaluée à 21 pieds de Prusse¹, ou à 6,^m59

Le Rhône.

A Lyon, dans les grandes crues d'octobre et de novembre 1840, les eaux du Rhône s'élevèrent au-dessus de l'étiage de 5,^m54

et celles de la Saône de 9,^m81

La petitesse comparative de la crue du Rhône résulte certainement en partie de l'action modératrice des lacs de Genève, d'Annecy et de Bourget. A Avignon, où l'action modératrice de ces lacs se fait moins sentir, parce que le fleuve a reçu alors beaucoup d'affluents, la grande crue du Rhône, en 1755, fut supérieure à l'étiage de 6,^m80

pendant les dix-neuf vingtièmes des crues

y sont encore de moins de 5, 50

Le Pô.

Le Pô a des crues de 8 à 10 mètres; elles sont plus élevées que celles du Nil, mais elles durent moins longtemps.

La crue du 18 octobre 1839 s'est élevée à Plaisance à 8,^m02 au-dessus du plus bas étiage connu, qui est celui du 22 avril 1834.

La crue du 8 novembre 1839 s'est élevée à Ostiglia à 9,^m68 au-dessus du plus bas étiage connu en ce point, qui est celui du mois de mai 1817. Ostiglia se trouve à 12 kilomètres environ au-dessous du confluent du Mincio, c'est-à-dire en un point où le Pô a reçu presque tous ses affluents. Ce point est celui où les crues sont en général les plus fortes. Plus bas elles sont de moins en moins élevées, jusqu'à l'embouchure, où elle sont toujours nulles, le Pô étant nécessairement de niveau avec la mer.

1. Berghaus, *Physikalischer Atlas; zweite Abtheilung, Hydrographie*, n.° 16.

Les exemples que nous venons de passer en revue montrent que, dans l'état présent de la surface du globe, les rivières, dans leurs plus grandes crues, ne s'élèvent que rarement à plus de 10 mètres au-dessus de leur étiage, et ne s'élèvent presque jamais à plus de 20 mètres au-dessus de ce niveau.

Occupons-nous maintenant des quantités d'eau qu'elles débitent dans leurs différents états.

On a eu pendant longtemps une idée exagérée de la quantité d'eau que les fleuves versent dans la mer. Le géographe Varenius, que Newton lui-même n'a pas dédaigné de commenter, donnait à cet égard des nombres presque fabuleux, et Guglielmini, au commencement du siècle dernier, croyait encore pouvoir calculer que le Danube jette dans le Pont-Euxin, en une minute, près de 42 millions de pieds cubiques bolonais d'eau¹, ce qui équivaldrait à environ 38 000 mètres cubes par seconde!

M. d'Aubuisson, dans son *Traité d'hydraulique*, dit qu'un courant d'eau prend place parmi les rivières lorsqu'il débite de 10 à 12 mètres cubes par seconde². L'Hérault, qui est déjà une assez grande rivière, ne débite à l'étiage, au moulin d'Agde, près de son embouchure, que 20 m. c. par seconde³; mais les principaux fleuves de France roulent en général dans leur état ordinaire 100 mètres cubes d'eau et plus par seconde.

Quantités d'eau
débitées
par les rivières
dans leurs divers
phases.

1. Fontenelle, *Éloge de Guglielmini*.
2. D'Aubuisson, *Traité d'hydraulique*, page 189.
3. E. Dupont, *Étude comparative de deux projets d'approvisionnement d'eau de la ville de Cette à l'aide de la rivière d'Hérault et de la source d'Isanka*, p. 11.

La Garonne.

La Garonne, à Toulouse, débite à l'étiage 80 mètres cubes d'eau environ par seconde, et 150 mètres cubes dans son état habituel.

La Seine.

La Seine, qui a une largeur de 130 mètres, débite à l'étiage 74, dans son état ordinaire 130, et dans les crues 1384 mètr. cub. d'eau par seconde. Le rapport entre les quantités d'eau débitées pendant l'étiage et pendant les crues est de 1 : 20, rapport qu'on retrouve dans un assez grand nombre de rivières.

La Seine débite habituellement 130 mètres cubes d'eau par seconde; mais si l'on prend le débit moyen de la Seine pendant toute l'année, en ayant égard aux crues, les crues ajoutent à elles seules dans le calcul une quantité considérable, quoiqu'elles ne durent pas très-longtemps. La Seine à Paris débite moyennement 22 000 000 de mètres cubes d'eau par jour, ou, pendant l'année entière, 8 035 500 000 mètres cubes, qui, divisés par le nombre de secondes que l'année renferme (31 557 600), donnent 254,^m 62 par seconde pour le débit moyen ou pour le *module* de la rivière.

D'après les résultats obtenus par M. Dausse, ingénieur en chef des ponts et chaussées, qui s'est livré à des recherches très-approfondies sur le régime des rivières, le bassin de la Seine et de ses affluents au-dessus de Paris présente une surface totale de 43 27 000 hectares, ou 43 270 kilomètres carrés. Il y tombe annuellement en moyenne une quantité d'eau équivalente à une couche de 0,^m 53. Les 8 035 500 000 mètres cubes d'eau qui passent annuellement sous le pont de la Concorde, étant répartis uniformément sur la même surface, ne formeraient qu'une couche

de 0,^m 1853; c'est à peu près le tiers de la quantité d'eau tombée. Les deux autres tiers doivent se dissiper par l'évaporation, l'infiltration, l'action de la végétation, etc.¹

La Loire, à Orléans, débite à l'étiage 30 mètres cubes d'eau par seconde; et dans ses plus bas étiages elle a même quelquefois été réduite à 24 mètres cubes d'eau par seconde; mais il faut observer que ces nombres ne se rapportent qu'aux eaux qui coulent à découvert dans le lit de la rivière, et qu'une certaine quantité d'eau, dérivée de la Loire et destinée à y rentrer, coule dans des canaux souterrains, dont l'un donne naissance au *Loiret*. Au-dessous d'Angers, dans son état moyen, la Loire débite 132 mètres cubes par seconde.

On a calculé que la quantité d'eau débitée par la Loire au-dessous d'Angers, dans ses grandes crues, est de 10 000 mètres cubes par seconde², ce qui donnerait le rapport de 1 : 75 entre le débit à l'étiage et le débit dans les grandes crues. Dans la crue extraordinaire du mois d'octobre 1846, elle débitait à Orléans, d'après l'estimation de M. Mary, ingénieur en chef des ponts et chaussées, 12 à 15 000 mètres cubes par seconde. D'après les nombres mentionnés ci-dessus, cela donnerait le rapport de 1 à 500 ou même à 625 entre le débit à l'étiage et le débit dans les plus grandes crues. Ce rapport diminuerait, sans doute, si l'on tenait compte de l'eau qui coule dans des canaux souterrains; mais il paraît

1. Dausse.... cité par M. Arago dans l'Annuaire du Bureau des longitudes pour 1835, page 196.

2. Lortet.

qu'à Roanne il serait plus grand encore que nous venons de dire, et de 1 : 1000 ; car, d'après M. Vallée, la Loire, dans la crue d'octobre 1846, débitait à Roanne 5000 mètres cubes par seconde, tandis qu'à l'étiage elle n'en débite que 5.

C'est cette extrême inégalité de débit qui fait dire aux mariniers que la Loire est une *très-mauvaise rivière*, une espèce de torrent. Il résulte en effet des données précédentes que la Loire ne doit pas toujours être navigable.

Une rivière, pour être naturellement navigable, doit déborder de 30 à 40 mètres cubes d'eau par seconde, sur une pente qui ne dépasse pas 0,^m001 par mètre ou 3' 26". Si elle a une pente plus considérable, elle ne sera pas navigable, même avec la quantité d'eau que je viens d'énoncer ; parce qu'elle sera trop rapide ; si elle a une pente moins grande, elle en sera d'autant plus facilement navigable ; et si la pente est extrêmement faible, elle pourra même être navigable avec un débit moindre.

D'autres rivières ont un régime tout contraire. La Somme, par exemple, dans son étiage, débite à Amiens, d'après M. Mary, ingénieur en chef des ponts et chaussées, 20 mètr. cub. d'eau par seconde ; dans ses crues elle en débite seulement 80. Ainsi le rapport entre le débit à l'étiage et le débit dans les crues n'est que de 1 à 4, ce qui tient à ce que la Somme est surtout alimentée par des sources qui tendent, comme les lacs, à diminuer les inégalités du débit.

Le Rhône, à Genève, dans les très-basses eaux, débite moyennement 150 mètres cubes par seconde.

Le débit du Rhône à Lyon, avant le point où il reçoit la Saône, varie, dans les eaux basses et moyennes, de 250 à 573 et à 600 m. c. par seconde. Ainsi le débit du Rhône est à peu près égal à quatre fois celui de la Garonne et à cinq fois celui de la Seine.

Un des résultats d'observation les plus propres à donner une idée du régime de chaque cours d'eau, est le rapport qui existe entre les quantités d'eau qu'il débite dans les plus basses et les plus hautes eaux. M. Vallée, inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, a réuni beaucoup de données de ce genre pour le Rhône et pour ses affluents dans son ouvrage intitulé : *Du Rhône et du lac de Genève*.

On calcule que dans les très-hautes eaux le lac laisse écouler 600 mètres cubes d'eau par seconde, et 150 dans les eaux les plus basses. Le rapport entre les quantités d'eau qui sortent du lac de Genève pendant les basses et les hautes eaux n'est que de 1 : 4, parce que les eaux s'accablent dans le lac, qui fait l'effet d'un régulateur, ainsi que nous l'avons déjà expliqué.

Le rapport entre les quantités d'eau débitées par le Rhône dans les basses et les hautes eaux va ensuite en augmentant à mesure qu'on approche de la mer, suivant la progression exprimée par les rapports 1 : 5, 1 : 21, 1 : 26. 1 : 28.

Si les cours d'eau grossissaient tous ensemble, il y aurait encore plus de différence entre les nombres qui représentent le débit du Rhône dans les basses et dans les hautes eaux; mais ce ne sont pas les plus grandes crues des diverses rivières affluentes qui

concourent aux plus hautes eaux du Rhône. Les plus basses eaux n'ont pas toujours lieu non plus en même temps pour le Rhône et pour ses divers affluents. Comme l'étiage ou l'époque des basses eaux de toutes les rivières n'arrive pas en même temps, le moment où le Rhône a le moins d'eau à Lyon n'est pas celui où il a le moins d'eau à la sortie du lac de Genève. Son débit à Genève dépend de la hauteur du lac et non des pluies ou des sécheresses passagères qui peuvent gonfler ou diminuer momentanément ses affluents : on peut l'estimer à 165 m. c. par seconde dans les moments de l'année où le Rhône est à l'étiage. Le Rhône ne concourt pas non plus aux crues qu'il éprouve à Lyon pour la quantité qui représente son débit maximum à Genève. Quand les eaux sont les plus hautes à Lyon, il sort du lac environ 200 mètres cubes par seconde.

L'Arve, dans les plus basses eaux, donne par seconde environ 30 mètres cubes, qu'on peut faire entrer dans l'étiage du Rhône. Dans les plus hautes eaux elle donne 600 mètres cubes; ainsi le rapport du débit de l'Arve dans les hautes eaux à son débit dans les basses eaux est de 1 : 20. Quand elle concourt aux plus hautes eaux du Rhône, elle y concourt pour 530 mètres cubes environ.

Rapports
entre les débits
du Rhône
et de ses affluents
dans les hautes et
les basses eaux.

Les autres affluents du Rhône donnent matière à des observations semblables. Les résultats de ces observations sont réunis dans le tableau suivant, que je tire de l'ouvrage déjà cité de M. Vallée. Le nombre k exprime pour chaque rivière le rapport entre les quantités d'eau qu'elle débite dans l'étiage et dans les plus hautes eaux.

DÉSIGNATION DES COURS D'EAU.	TRÈS-BASSES EAUX.		Nombre k.	TRÈS-HAUTES EAUX.	
	Pour chaque cours d'eau.	Pour l'étiage du Rhône.		Pour chaque cours d'eau.	Pour les grandes crues du Rhône.
<i>Le Rhône à Genève....</i>	150	165	(4)	600	200
L'Arve.....	30	30	20	600	530
La London et la Valserine	3	5	120	360	270
<i>Le Rhône au Parc.....</i>	»	200	(5)	»	1000
Les Usses, le Fier, le Séran, le Furan, le Guiers, la Bourbre et plusieurs autres cours d'eau....	10	18	180	1800	1400
L'Ain.....	12	17	240	2880	2600
<i>Le Rhône à Lyon.....</i>	»	235	(21)	»	5000
La Saône.....	70	85	50	3500	3000
L'Isère.....	45	56	20	900	700
L'Ozon, le Vaux, la Gère, la Varaise, le Rivet, le Bancel, la Galaure, la Viore, la Drôme, le Roubion, la Riaille, la Bère, la Louzou, le Lez, l'Aigues, l'Iséron, le Garon, le Mornantay, le Gier, le Limony, le Chamoison, l'Égoulet, la Coyet, le Day, l'Ouvesse, l'Escoutay, le Valchaud, l'Ardèche, la Cèse, et beaucoup d'autres petits cours d'eau.	36	60	100	3600	2500
La Louvèze.....	10	20	100	1000	800
<i>Le Rhône à Avignon...</i>	»	456	(26)	»	12000
La Durance.....	30	36	100	3000	1700
Le Gard et divers canaux et ruisseaux.....	4	8	100	400	300
<i>Le Rhône à son embouch.</i>	»	500	(28)	»	14000

1. Vallée, Du Rhône et du lac de Genève, page 95.

Les valeurs de k renfermées dans le tableau précédent semblent à l'abri du reproche d'exagération; car elles sont calculées indépendamment de certains cas extrêmes. Il paraît en effet qu'au moment des inondations extraordinaires de 1840, 1841 et 1842, il y avait beaucoup plus d'eau dans la Saône que le tableau n'en indique pour les plus grandes crues de cette rivière. On a évalué alors à 5000 mètres cubes par seconde la quantité pour laquelle la Saône est entrée dans les plus hautes eaux du Rhône.

Le Rhin.

Le Rhin, en face de Strasbourg,

	Par seconde.
débite dans les basses eaux	380 m. c.
dans son état le plus habituel.	956 —
et dans les hautes eaux.	4685 —

Le *module* du Rhin, c'est-à-dire son débit moyen pendant toute l'année, en tenant compte de l'étiage et des crues, est à Bâle de 941 —
à Kehl, en face de Strasbourg, de . . . 1084 —
à Lauterbourg, de. 1284 —
et près d'Emmerich, un peu avant la diramation qu'il éprouve en Hollande, de 1643 —

Son débit moyen est ainsi un peu moindre que celui du Pô.

Le Pô.

Le *module* du Pô, ou son débit moyen par seconde, à Ponte-Lagoscuro, près de Ferrare, dans la dernière partie de son cours, est de 1720 m. c. Dans les plus basses eaux pour lesquelles on ait des mesures, celles de 1817, il ne débitait que. 214 —
dans la grande crue de 1839 il a débité

jusqu'à * 5149 m. c.
le rapport est de 1 : 24.

Le *module* de l'Adda, ou son débit moyen par seconde, est de 186,^mc 85;
à l'étiage elle ne débite que 16

L'Adda.

et dans les plus grandes crues 800
le rapport est de 1 : 50¹. Ce rapport est singulier;
le rapport correspondant pour le Rhône est de 1 : 4;
mais les pluies sont sans doute plus abondantes et
plus générales dans la Valteline que dans le Valais, et
la surface du lac Léman étant beaucoup plus grande
que celle du lac de Côme, son influence pour régulariser le débit du Rhône est beaucoup plus efficace.

Le Nil, en Égypte, lorsqu'il est à son minimum, roule encore, d'après M. Le Père, 782 mètres cubes d'eau par seconde, et le rapport entre son débit dans l'étiage et son débit dans les crues est de 1 : 20.

Le Nil.

* Le Gange, dans la saison chaude, qui dure trois mois et qui est le temps des plus basses eaux, débite à Ghazipour, d'après M. Everest, 1019 mètres cubes d'eau par seconde; dans l'hiver, qui dure cinq mois et qui est à peu près la saison des eaux moyennes, il débite 2016 mètres cubes par seconde; dans les quatre mois de la saison des pluies le débit est de 13 993 mètres cubes par seconde², c'est-à-dire égal à celui du Rhône, à son embouchure, pendant ses grandes crues. Le rapport entre le débit minimum et le débit maximum serait donc de 1 : 13,73; mais il faut observer que les deux chiffres extrêmes

Le Gange.

1. Elia Lombardini, *Notizie naturali e civili su la Lombardia*, page 129.

2. Lyell, *Principles of geology*; 6.^e édit.; tome II, page 12.

que nous venons de donner sont les moyennes de deux saisons de quatre mois chacune. Le rapport entre le minimum absolu et le maximum absolu serait nécessairement plus considérable et dépasserait probablement celui de 1 : 20.

Le Mississipi.

D'après les calculs approximatifs de M. Darby, le Mississipi verserait au golfe du Mexique, en temps ordinaire, environ 31 000 000 de mètres cubes d'eau par heure, ou 8610 mètres cubes par seconde.

Le Saint-Laurent.

Le Saint-Laurent, d'après le même auteur, fournirait, indépendamment de ses deux plus puissants tributaires, le Saguenay et l'Ottowa, 47 170 000 mètres cubes d'eau par heure, ou 13 100 mètres cubes par seconde¹. Ce serait là son *module*, module supérieur à celui de tous les autres cours d'eau dont nous avons parlé. Quant au rapport entre son débit dans les basses eaux et dans les crues, il doit être encore moindre que pour le Rhône à sa sortie du lac de Genève, où il n'est cependant que de 1 : 4; car nous avons vu que le Saint-Laurent est le fleuve dont le débit est le plus constant.

Remarques
sur les variations
du
débit des rivières.

Les exemples que nous venons de passer en revue montrent que le rapport entre les quantités d'eau débitées par un même cours d'eau dans les plus basses eaux et dans les plus grandes crues, est très-variable. Pour la Seine à Paris et pour plusieurs autres rivières ce rapport est celui de 1 : 20; mais M. Vallée, qui désigne ce rapport par la lettre *k*, lui trouve dans le tableau ci-dessus des valeurs

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; tome I.^{er}, page 65.

égales à 4, 20, 21, 28, 100 à 180 et même à 240, et il paraît que dans la crue extraordinaire du mois d'octobre 1846 il s'est élevé pour la Loire à Orléans et à Roanne à près de 500, de 625 et même à 1000.

On voit, d'après tous ces exemples, que parmi les cours d'eau on peut distinguer deux classes très-différentes quant aux variations de leur débit; savoir, d'une part, les *rivières à régulateur*, telles que le Saint-Laurent à sa sortie du lac Ontario, le Rhône à sa sortie du lac de Genève, la Reuss à sa sortie du lac de Lucerne, la Limmat à sa sortie du lac de Zurich, le Rhin à sa sortie du lac de Constance, le Tessin à sa sortie du lac Majeur; et, d'autre part, les torrents dont le lit est à sec pendant une grande partie de l'année, comme les torrents des Hautes-Alpes. Pour les premières, le plus grand exemple de variation que nous ayons pu signaler est celui de l'Adda, pour laquelle le nombre k est égal à 50, et cet exemple paraît être une anomalie; pour les dernières, nous voyons le rapport s'élever jusqu'à 1000, et les torrents des Alpes donneraient même des nombres plus considérables encore pour les valeurs de k , parce que le plus souvent il ne s'y trouve pas d'eau, que d'autres fois il y en a une grande quantité, et que le rapport de zéro à une quantité quelconque est l'infini.

On
peut y distinguer
deux
classes opposées.

Cette grande disproportion entre les quantités d'eau qui coulent dans un même lit en différents temps de l'année, explique, par suite de la corrélation qui existe entre les pentes, les vitesses et les quantités d'eau dépensées par les rivières dans un temps donné, pourquoi la vitesse d'une même rivière,

dans un point déterminé de son cours, n'est pas constante.

Variations
dans la vitesse
d'une même
rivière
occasionnées par
celles de son débit.

En raison de cette différence souvent énorme entre les quantités d'eau que débitent les rivières dans leur étiage et dans leurs crues, il y a une différence considérable aussi, quoique beaucoup moindre, dans les vitesses qu'elles prennent suivant les états divers où elles se trouvent, et j'ai déjà cité pour quelques-unes d'entre elles des nombres qui varient dans le rapport de 1 à 3, à 4, et même à des nombres plus grands.

Pour bien concevoir la liaison qui existe entre ces deux ordres de faits avec lesquels j'ai cherché à vous familiariser d'abord par des exemples, il est nécessaire de commencer par se rendre compte de certaines circonstances du mouvement des eaux.

Du mouvement
des eaux
dans les rivières.

On s'était figuré autrefois que l'eau coulait plus vite dans le fond d'une rivière, ou bien vers le milieu de sa profondeur, qu'à sa surface¹ : c'était une erreur; on a reconnu, au contraire, qu'elle coule plus vite dans le voisinage de la surface. L'eau éprouve, en effet, contre les parois latérales et contre le fond une résistance qui, sans être précisément un frottement, y ressemble beaucoup et qui retarde son mouvement. Il se passe là quelque chose d'analogue à ce qui arriverait si plusieurs tuyaux étant emboîtés l'un dans l'autre, comme les tuyaux d'une lunette, on tirait le tuyau central. Ce tuyau irait plus vite que celui qui le toucherait immédiatement; le deuxième tuyau plus vite que le troisième,

1. Fontenelle, Éloge de Guglielmini.

et ainsi de suite; et cela à cause du frottement qu'éprouve chacun de ces tuyaux contre le tuyau qui le renferme. L'eau qui remplit un canal peut être considérée, jusqu'à un certain point, comme formant ainsi par ses diverses couches des espèces de tuyaux emboîtés successivement les uns dans les autres.

« La force de la pesanteur qui sollicite chaque molécule fluide, tend, dit M. de Prony, à accélérer continuellement la vitesse; mais l'expérience prouve que dans un courant dont le régime est établi (c'est-à-dire dont la marche est devenue permanente) la vitesse moyenne est constante : cet effet a lieu parce que l'action accélératrice de la pesanteur est contrebalancée à chaque instant par certaines résistances qu'il s'agit d'évaluer, et il faut se faire avant tout une idée exacte des causes auxquelles elles sont dues. Pour y parvenir, on part des deux faits suivants : 1.° *Les molécules d'eau adhèrent à presque tous les corps avec lesquels elles peuvent être en contact*; 2.° *elles adhèrent aussi entre elles*. Il résulte du premier fait que, si l'eau coule dans un tuyau ou sur un lit susceptible d'être mouillé, une lame ou couche de ce fluide s'attache à la matière qui compose ce tuyau ou dans laquelle ce lit est creusé; cette couche peut être ainsi regardée comme la véritable paroi qui renferme la masse fluide en mouvement. Par le second fait, la couche qui coule immédiatement sur la paroi fluide, a une tendance à s'y attacher qui retarde son mouvement naturel (celui qu'elle aurait en vertu de sa pesanteur relative); le retard de cette couche en produit néces-

Remarques
de M. de Prony

que les effets dont nous venons de parler sont très-petits, et que la plus grande vitesse se trouve bien près de la surface; car M. l'ingénieur Defontaine a conclu de ses observations sur le Rhin, qu'abstraction faite de l'action du vent, la plus grande vitesse est exactement à la superficie du courant¹. Dans tous les cas, le surcroît de vitesse qui paraît devoir exister à une petite profondeur au-dessous de la surface peut être négligé, et la vitesse à la surface même peut être prise, dans la pratique, pour la vitesse la plus grande.

Si l'on veut estimer la quantité d'eau qui coule dans une rivière, il faut avoir la section du lit de cette rivière, ainsi que la *vitesse moyenne*, et multiplier ces deux quantités l'une par l'autre; mais la vitesse de l'eau dans le milieu du courant à la surface, n'est pas la vitesse moyenne de la rivière.

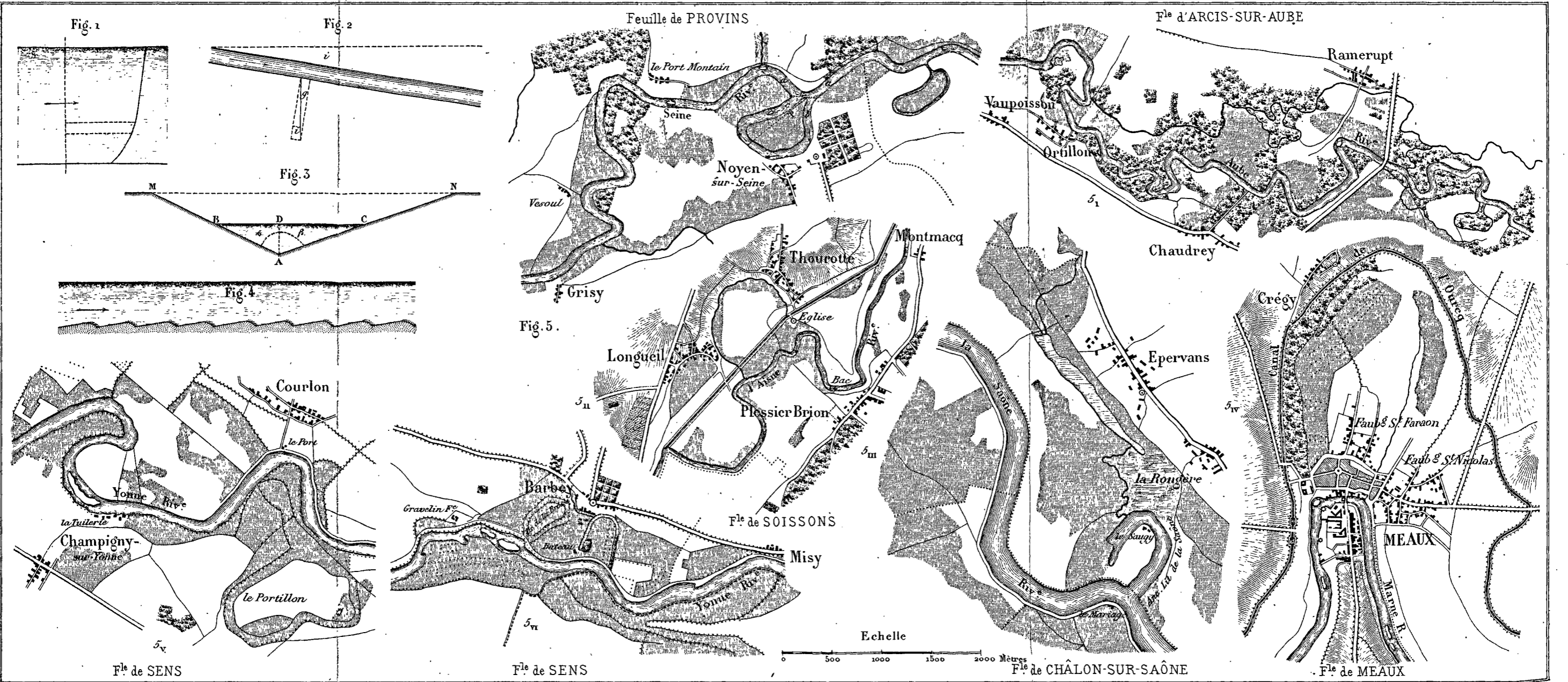
La vitesse diminue
quand
on s'approche des
bords et quand
on s'enfonce.

D'abord, ainsi que nous venons de le voir, à mesure qu'on s'enfonce au-dessous de la surface, on trouve des vitesses décroissantes, et de plus la vitesse superficielle au milieu de la rivière est plus grande qu'aux bords, parce que, près des bords, l'eau est retardée par le frottement des parois latérales en même temps que par celui du fond, de sorte qu'il y a à tenir compte du décroissement de la vitesse, en allant du milieu du courant vers les bords. Ce décroissement est très-variable, suivant les formes du lit : on ne peut en obtenir que des mesures approximatives.

La diminution de la vitesse, à partir de la sur-

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 176.

||



Gravé par Hautecœur, r. Bonaparte 82, Paris.

Publié par J.B. BAILLIÈRE et fils, à PARIS.

Litho. Becquet, r. des Noyers 37, Paris.

face, n'est pas d'abord très-sensible; elle le devient de plus en plus à mesure qu'on approche du fond. Les vitesses à différentes profondeurs peuvent être représentées, comme l'indique la fig. 1, pl. II, par les ordonnées horizontales d'une courbe assez peu différente d'une parabole ayant son axe vertical. Dans une rivière dont le régime est permanent, la vitesse au fond est presque toujours plus grande que la moitié de celle de la surface, et le filet, dont la vitesse propre est égale à la vitesse moyenne du courant, est placé à peu près vers les $\frac{3}{5}$ de la profondeur. Quelques hydrauliciens le placent aux $\frac{4}{5}$ de la profondeur: on n'est pas parfaitement d'accord sur ce point.

« Dubuat a conclu d'expériences nombreuses, mais qui, à la vérité, n'avaient été faites que dans des canaux en bois de peu de largeur, que le rapport entre la vitesse de la surface et celle du fond est d'autant plus grand que la vitesse est plus petite, et que ce rapport est entièrement indépendant de la profondeur: à la même vitesse de surface correspond toujours une même vitesse de fond. La différence des vitesses à la surface et au fond augmente quand la vitesse augmente. L'accroissement, qui est indépendant de la profondeur, paraît être proportionnel à la racine carrée de la vitesse.¹

Il a observé, de plus, que la vitesse moyenne est une moyenne proportionnelle arithmétique entre celle de la surface et celle du fond. Appelant u cette dernière, V celle à la surface et v la vitesse moyenne,

Expériences
de Dubuat.

1. Dubuat, Principes d'hydraulique; §§. 37, 49, 65.

il a exprimé le résultat de ses observations par les formules

$$u = (\sqrt{V} - 0,165)^2.$$

$$v = \frac{1}{2} (V + u) = (\sqrt{V} - 0,082)^2 + 0,00677.$$

Formule
de M. de Prony.

« M. de Prony, après avoir discuté les expériences de Dubuat, a cru plus convenable d'établir

$$v = V \frac{V + 2,372}{V + 3,153}.$$

« Le tableau ci-dessous indique les valeurs de v , correspondantes à quelques valeurs de V et données par cette formule :

V	v
0,25	0,77 V
0,50	0,79 V
1	0,81 V
1,50	0,83 V
2	0,85 V

« M. de Prony, prenant un terme moyen, a pensé que, dans la pratique (où on a le plus souvent à s'occuper de vitesses d'environ 1 mètre par seconde), on pouvait admettre $v = 0,8 V$, c'est-à-dire que, pour avoir la vitesse moyenne d'un courant d'eau, il suffirait de diminuer d'un cinquième celle de la surface. »¹

Le rapport $\frac{V + 2,37}{V + 3,15}$ de la vitesse moyenne v à la vitesse V à la surface, diminue à mesure que cette dernière diminue; mais pour $V = 0$ il se réduit seulement à 0,755, ou à environ $\frac{3}{4}$. D'après cela il paraît que dans un canal régulier la vitesse moyenne dans chaque verticale surpasse toujours les $\frac{3}{4}$ de la vitesse du point correspondant de la surface.

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 130.

Application
aux rivières.

Si on voulait appliquer à une rivière cette loi déterminée par des expériences faites dans des canaux d'une petite section, on pourrait craindre qu'elle ne donnât des résultats très-inexactes, le lit d'une rivière, moins régulier, surtout vers les bords, que celui d'un canal, devant opposer plus de résistance au mouvement des parties latérales, et rendre leurs vitesses plus différentes de celles du filet superficiel le plus rapide. Il paraît cependant que la grandeur même de la section favorise le mouvement des parties situées à quelque distance des parois; car l'expérience donne généralement pour la vitesse moyenne d'une rivière plus des $\frac{3}{4}$, et souvent plus des $\frac{80}{100}$ de la vitesse du filet le plus rapide¹. En multipliant la section par une vitesse égale aux $\frac{3}{4}$ de celle du filet le plus rapide, on aura rarement une quantité supérieure au débit réel de la rivière.

Lorsqu'on veut comparer entre elles les vitesses avec lesquelles l'eau coule dans des lits de différentes formes et diversement inclinés, on est obligé de tenir compte de plusieurs éléments que nous n'avons pas encore considérés.

Comparaison
entre les vitesses
avec lesquelles
l'eau coule
dans différents lits.

Le mouvement de l'eau dans les rivières est déterminé par la pesanteur, dont l'action a d'autant plus d'énergie que l'angle i formé par la surface du courant avec le plan horizontal est plus considérable. La seule inspection de la figure 2, pl. II, fera suffisamment comprendre que l'action de la pesanteur, dont l'intensité est représentée par g , sur une molécule du fluide, se décompose en deux

Influence
de la pente.

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 180.

autres, exprimées par $g \cos i$ et par $g \sin i$; que la première est détruite par la résistance du lit et que la seconde contribue seule au mouvement. On exprime ordinairement cette dernière par gp , en remplaçant, pour abrégé, $\sin i$ par p , qui représente la pente et qui est égal au quotient de la chute que présente le courant d'un point à un autre, divisée par la longueur de son développement dans l'intervalle des deux points. Souvent on prend pour mesure de la pente de la ligne qui réunit deux points la différence de leurs hauteurs divisée par la distance de leurs projections horizontales. Les deux mesures ne sont pas identiques; la première est le *sinus* et la seconde est la *tangente* de l'angle i ; mais toutes les fois que l'angle i est très-petit, la différence est, à peu près, insensible.

Influence
de la forme de la
section.

Après la pente, l'élément qui influe le plus sur la vitesse d'une rivière ou sur la force motrice effective qui agit sur elle, est le rapport entre l'aire de sa section et la partie du périmètre de cette section qui se trouve en contact avec le lit et qu'on appelle le *périmètre mouillé*.

Périmètre mouillé.

D'après ce que nous avons vu il y a un instant, des causes auxquelles tiennent les résistances qui rendent la vitesse moyenne constante, on conçoit aisément, suivant la remarque de M. de Prony, « que la perte absolue de force motrice devra, toutes choses égales d'ailleurs, être plus forte lorsque le développement de la paroi mouillée sera plus considérable, puisque c'est contre cette paroi que se fait la perte absolue dont nous parlons. Mais, d'une autre part, plus le filet doué du *maximum*

de vitesse sera éloigné du périmètre de la section transversale, et moins l'effet de la résistance à la paroi sera sensible dans l'étendue de la masse fluide, l'adhésion de molécule à molécule y conservant seule son effet entier. Il suit de là que l'expression de la vitesse moyenne doit renfermer, avec l'aire de la section transversale, la longueur du périmètre mouillé.

Si la section de la rivière était un demi-cercle d'un rayon r , sa section s aurait pour mesure $\frac{1}{2} \pi r^2$, et le *périmètre mouillé* c de la section aurait pour mesure πr . Le rapport de ces deux quantités serait

$$\frac{s}{c} = \frac{\frac{1}{2} \pi r^2}{\pi r} = \frac{1}{2} r.$$

Faisant abstraction du facteur $\frac{1}{2}$, qui se confond avec les autres coefficients des formules, Dubuat appelle cette quantité le *rayon moyen* de la section, et il emploie toujours sous la même dénomination la quantité $\frac{s}{c}$, lors même que cette section n'est pas un demi-cercle. On appelle aussi quelquefois le rapport $\frac{s}{c}$ la *profondeur hydraulique moyenne*.

Rayon moyen
ou
profondeur
hydraulique
moyenne.

La discussion d'un grand nombre d'expériences a appris que lorsque l'eau a acquis un mouvement uniforme, on a, entre la *vitesse moyenne* v et la pente p , l'équation

Équation
fondamentale
du mouvement
de l'eau
dans les canaux.

$$(1) \quad p = a \frac{c}{s} (v^2 + b v),$$

dans laquelle a et b sont des coefficients constants, qui doivent être déterminés par l'expérience.

M. Eytelwein, en suivant une marche indiquée par M. de Prony, mais en étendant ses observations sur 91 canaux ou rivières, dans lesquels la vitesse

a varié de $0,^{m}124$ à $2,^{m}42$ par seconde, et la section fluide de $0,014$ à 2604 mètres carrés, a trouvé $a = 0,00036554$ et $b = 0,06638$, ce qui donne pour l'équation fondamentale du mouvement de l'eau dans les canaux.

$$(2) p = 0,00036554 \frac{c}{s} (v^2 + 0,06638 v)$$

d'où l'on tire

$$(3) v = -0,0332 + \sqrt{2736 \frac{p s}{c} + 0,0011}$$

Expressions simplifiées de la vitesse et de la dépense.

Pour les grandes vitesses, de 1 mètre par seconde et au-dessus, comme on l'aperçoit dans la formule (2), la résistance est simplement proportionnelle à leur carré, et on a alors, avec une approximation suffisante¹,

$$(4) v = 51 \sqrt{\frac{p s}{c}};$$

la dépense du cours d'eau a en même temps pour mesure approximative

$$(5) Q = 51 s \sqrt{\frac{p s}{c}}.$$

La simplification n'est permise que lorsque la vitesse dépasse 1 mètre par seconde.

L'équation (4) se déduit presque directement de l'équation fondamentale en y négligeant la première puissance de v . Mais il ne faut jamais perdre de vue que cette simplification n'est permise qu'autant que v est un peu grand. Si v se réduisait à une fraction, par exemple à $\frac{1}{100}$, le terme en v , au lieu d'être négligeable par rapport au terme en v^2 , serait près de 7 fois plus grand que ce dernier, de manière que l'équation (2) donnerait approximativement

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 134.

$$(6) v = 0,000024264 \frac{p^s}{c}.$$

On doit se rappeler aussi que les coefficients qui entrent dans la formule fondamentale (2), et par suite ceux des formules simplifiées, sont relatifs à l'eau à *peu près pure*, et seraient différents pour un autre liquide, peut-être même pour de l'eau bourbeuse; il est douteux, en outre, que la formule fût en elle-même applicable à une masse visqueuse, par exemple, à une boue pâteuse qui se répandrait sur un plan incliné.

Les coefficients sont relatifs à l'eau à peu près pure.

Mais considérée dans les cas auxquels elle est applicable, cette formule exprime une loi de la plus grande importance pour toutes les considérations relatives aux rivières; c'est que, toutes choses égales, *plus une masse d'eau est grande, moins il lui faut de pente pour acquérir une vitesse donnée.*

Plus la masse d'eau est grande, et moins il lui faut de pente pour acquérir une vitesse donnée.

En effet, dans la formule fondamentale et dans les formules simplifiées qui s'en déduisent, la valeur de la vitesse moyenne v reste la même si le produit $\frac{p^s}{c}$ conserve lui-même une valeur constante. De là il résulte que les circonstances les plus importantes du mouvement de l'eau dans les rivières peuvent se prévoir par la discussion des changements que peut éprouver l'expression $\frac{p^s}{c}$.

On voit d'abord que la pente nécessaire pour produire une vitesse donnée est en raison inverse du rayon moyen de la section ou de la profondeur hydraulique moyenne, ce qui explique un phénomène très-connu, dont j'ai déjà parlé et sur lequel j'insisterai encore plus d'une fois : celui de l'accélération de la vitesse des rivières dans les moments de crue.

La pente requise pour une vitesse donnée est en raison inverse du rayon moyen de la section.

Cas où le profil
du lit
se réduit
un angle ouvert
par en haut.

Mais afin de mettre en évidence la partie la plus essentielle des résultats auxquels peut conduire la discussion de l'expression $\frac{ps}{c}$, réduisons la chose à sa plus simple expression, en supposant que le profil de fond d'une vallée ait la forme d'un angle ouvert par en haut, M A N, fig. 3, pl. II, et que l'eau de la rivière remplisse cet angle jusqu'à l'horizontale B C, dont la hauteur est variable. Appelons h la hauteur A D de l'eau au-dessus du point le plus bas du profil, et nommons α et β les angles B A D, C A D; nous aurons

$$A D = h, B D = h \operatorname{tang.} \alpha, C D = h \operatorname{tang.} \beta,$$

$$A B = \frac{h}{\cos. \alpha} \quad A C = \frac{h}{\cos. \beta},$$

et

$$s = \frac{1}{2} h^2 (\operatorname{tang.} \alpha + \operatorname{tang.} \beta), c = \frac{h}{\cos. \alpha} + \frac{h}{\cos. \beta},$$

d'où on conclut aisément

$$\frac{s}{c} = \frac{1}{2} h \frac{\operatorname{tang.} \alpha + \operatorname{tang.} \beta}{\frac{1}{\cos. \alpha} + \frac{1}{\cos. \beta}} = \frac{1}{2} h \frac{\sin. (\alpha + \beta)}{\cos. \alpha + \cos. \beta} = M h,$$

M étant un facteur constant.

Cette expression montre que dans le cas très-simple que nous considérons, le *rayon moyen* ou la *moyenne profondeur hydraulique* a une valeur proportionnelle à la plus grande profondeur de l'eau dans la rivière.

Dans la plupart des cas, le profil du fond d'une vallée a une forme beaucoup plus compliquée que celle que nous venons de supposer; mais cette complication n'empêche pas que très-souvent on n'ait encore approximativement $\frac{s}{c} = M h$. On aura alors avec la même approximation $\frac{ps}{c} = M p h$, et p étant

supposé constant, le produit $Mph = \frac{P^s}{c}$ sera lui-même sensiblement proportionnel à la plus grande profondeur de l'eau dans la rivière.

De là il résulte que, généralement parlant, lorsque la hauteur de l'eau dans une rivière se trouve doublée par une crue, cette rivière devient susceptible de couler avec sa vitesse ordinaire sur une pente moitié moindre que la sienne, et que sur sa propre pente sa vitesse s'accélère dans une proportion qu'il est aisé de déterminer.

La vitesse est alors généralement assez grande pour qu'on puisse la calculer sans erreur sensible par la formule (4), qui devient

$$v = 51 \sqrt{Mph} = m \sqrt{ph},$$

m étant une nouvelle constante. Cette expression simplifiée montre que sur une pente donnée, la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la plus grande profondeur de l'eau de la rivière. Si cette profondeur est doublée, la vitesse croîtra dans le rapport de 1 à $\sqrt{2} = 1,4142$; si la profondeur est quadruplée, la vitesse croîtra dans le rapport de 1 à 2; si la profondeur est décuplée, la vitesse croîtra dans le rapport de 1 à $\sqrt{10} = 3,1622$, etc. Par là on voit qu'une crue doit être énorme pour que la vitesse de la rivière soit triplée.

La vitesse croît beaucoup moins vite que la quantité d'eau débitée par seconde, laquelle est donnée par la formule (5), qui devient dans le cas actuel $Q = \frac{51}{2} (\text{tang. } \alpha + \text{tang. } \beta) h^2 m \sqrt{ph} = n \sqrt{ph^5}$, n étant une quantité constante, expression qui montre que la quantité d'eau débitée croît plus

Formes
très-simples qui
prennent alors
les formules.

vite que le carré de la profondeur, tandis que la vitesse croît seulement comme la racine carrée de cette même profondeur.

La vitesse, sans être constante, est l'élément le moins variable de l'état d'une rivière, ce qui fait qu'elle a réellement un régime à elle.

Une rivière où la hauteur de l'eau varie, ne peut avoir une vitesse constante. J'ai donné des nombres relatifs à des états donnés des rivières; mais il ne peut y avoir de nombres invariables pour une même rivière dans tous ses états. La formule (1), page 111, suffit pour en montrer l'impossibilité; mais la vitesse varie dans une proportion beaucoup moins considérable que la quantité d'eau débitée; et c'est même dans le régime d'une rivière l'élément le moins variable. Chaque rivière a ainsi, dans un point donné de son cours, une manière de couler qui lui est propre, dont elle ne s'éloigne que lentement et comme à regret, et qui lui donne une physionomie particulière et, comparativement, presque constante.

Rapports dans lesquels varient les différents éléments.

Pour voir dans quelles proportions relatives les divers éléments du régime d'une rivière varient simultanément, et pour comparer à cet égard les résultats du calcul à ceux de l'observation, reprenons nos formules approximatives, et, soient v et v' h et h' Q et Q' les vitesses, les profondeurs et les quantités d'eau débitées à deux époques différentes: les formules approximatives de la page 112 donnent

$$v = m\sqrt{ph} \quad v' = m\sqrt{ph'}$$

$$Q = n\sqrt{ph^5} \quad Q' = n\sqrt{ph'^5}$$

Appelons k , comme dans le tableau ci-dessus, p. 97, le rapport entre les quantités d'eau débitées par

seconde aux deux époques que nous considérons, et α le rapport entre les vitesses aux deux mêmes époques. On aura

$$Q' = k Q \quad v' = \alpha v$$

et d'après les équations précédentes

$$k = \sqrt{\left(\frac{h'}{h}\right)^5} \quad \alpha = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

$$\alpha^5 = k \quad \alpha = \sqrt[5]{k}$$

c'est-à-dire que le rapport des vitesses n'est que la racine cinquième du rapport des quantités d'eau débitées; ainsi, lorsque les quantités d'eau débitées varient comme 1 à 4, à 20, à 21, à 28, à 100, à 180, à 240, à 500, à 625 et même à 1000, les vitesses varient seulement comme 1 est à $\sqrt[5]{4} = 1,3195$, à $\sqrt[5]{20} = 1,8206$, à $\sqrt[5]{21} = 1,8384$, à $\sqrt[5]{28} = 1,9477$, à $\sqrt[5]{100} = 2,5119$, à $\sqrt[5]{180} = 2,8252$, à $\sqrt[5]{240} = 2,9925$, à $\sqrt[5]{500} = 3,4657$, à $\sqrt[5]{625} = 3,6239$, et à $\sqrt[5]{1000} = 3,9811$.

Vérification
dans des cas
particuliers.

Par conséquent la vitesse du Rhône, à sa sortie du lac de Genève, n'augmente que d'un tiers lorsque la quantité d'eau débitée augmente dans le rapport de 1 à 4. Cette circonstance est d'accord avec l'apparence de constance que présente à l'œil ce beau cours d'eau, et que présentent aussi à un degré plus ou moins marqué presque toutes les rivières qui sortent des autres grands lacs alpins.

Le Rhône
à sa sortie du lac
de Genève.

me à Lyon.

La quantité d'eau débitée par le Rhône à Lyon varie dans le rapport de 1 à 21, et, d'après ce qui précède, les vitesses moyennes, ou, ce qui revient au même, les vitesses du filet le plus rapide, qui, d'après ce que nous avons vu, p. 77, les surpassent d'un tiers, doivent y varier comme 1 à 1,8383; ainsi, la vitesse étant supposée de 1,^m50 environ dans l'étiage, elle doit être de $1,50 \times 1,8384 = 2,7576$ dans les crues. Ce résultat est sensiblement au-dessous de la vérité, puisque la vitesse du Rhône à Lyon dans les grandes crues est de 4 et même 5 mètres par seconde; mais il ne faut pas oublier que la formule dont nous nous servons pour les comparaisons actuelles n'est qu'approximative et ne tient pas compte des particularités de la forme du lit, puisqu'elle le suppose simplement triangulaire. Plusieurs causes peuvent en outre se réunir pour faire naître la divergence que nous remarquons : 1.^o le régime du Rhône à Lyon, dans l'étiage, est peu régulier, comme le témoignent les vitesses très-inégales indiquées à la page 77; cela tient aux irrégularités de son lit; si le lit était uniforme, la vitesse à l'étiage serait probablement plus grande; 2.^o le Rhône, comme tous les autres fleuves qui débordent, éprouve sur ses bords de nombreux obstacles, dus aux digues, aux arbres, etc., et il ne peut débiter la quantité d'eau mesurée qu'autant qu'il a acquis dans sa partie la plus rapide une vitesse un peu supérieure à celle donnée par le calcul; 3.^o et surtout la grande vitesse des eaux du Rhône à Lyon dans ses crues provient nécessairement en partie de celle des eaux de l'Ain, qui, dans les crues, forment plus de la moitié du

volume total, et qui débouchent du lit de cette rivière torrentielle avec une très-grande vitesse.

Pour l'Ain, où le nombre k est égal à 240, en lui supposant à l'étiage une vitesse de 1^m75 , on trouve pour les crues une vitesse de $5,2369$, ce qui ne doit pas être beaucoup au-dessous de la vérité.

L'Ain.

Cette vitesse des eaux de l'Ain introduite dans le calcul de la vitesse des eaux du Rhône à Lyon, donnerait environ 4 mètres par seconde, et on doit remarquer que la valeur $k = 21$, dans le tableau de M. Vallée, ne correspond peut-être pas aux plus grandes crues, à celles où la vitesse est de 5 mètres par seconde. M. d'Aubuisson dit que la vitesse du Rhône à Lyon est de 2 mètres dans les basses eaux, et de 4 mètres dans les crues; données avec lesquelles notre calcul se trouverait à peu près d'accord.

Pour la Durance, où le nombre k est égal à 100, en lui supposant à l'étiage une vitesse de 1^m75 , on trouve pour les grandes eaux une vitesse de 4^m3958 par seconde, ce qui n'est sans doute que peu au-dessous de la vérité.

La Durance.

Pour la Loire à Roanne, où le nombre k s'élève jusqu'à 1000, en lui supposant à l'étiage une vitesse de 1^m20 , on trouverait que dans la grande crue de 1846 la vitesse a dû être de 4^m7773 , ce qui ne paraît pas être trop en désaccord avec les phénomènes que la crue a présentés.

La Loire à Roanne.

A Orléans, le nombre k , dans cette même crue, paraît avoir été à peu près égal à 500, en ne tenant compte que des étiages où la Loire débite 30 m. c. par seconde. On peut supposer que dans ces étiages la vitesse est d'environ 0^m60 par seconde, et cela

La Loire à Orléans.

donne pour la vitesse maximum pendant la crue 2,^m079432 par seconde, ce qui paraît à peu près conforme aux circonstances observées.

Constance
approximative
de la vitesse d'une
même rivière
en différents points
de son cours.

Je vous ai fait remarquer que dans une rivière donnée, la pente décroît depuis la source jusqu'à l'embouchure. La vitesse est bien loin de décroître dans le même rapport. Si vous suivez un des affluents de la Seine depuis l'endroit où il devient navigable, c'est-à-dire depuis l'endroit où la pente peut être évaluée à 0,001, ou à 3'26'', jusqu'aux approches de la mer, où elle n'est pas d'un tiers de minute, le rapport des pentes sera de 10 à 1, et vous remarquerez cependant que les vitesses ne seront pas très-différentes. Si, par exemple, vous regardez couler l'Yonne à Auxerre et la Seine aux Andelys, vous reconnaîtrez que la différence de vitesse n'est pas très-sensible à l'œil.

Ces faits sont conformes aux principes d'hydraulique exprimés par les formules que nous avons posées ci-dessus. Dans un lit donné, plus la quantité d'eau débitée est grande, plus la vitesse est grande. Les équations $v = m \sqrt{ph}$, $Q = n \sqrt{ph^5}$, donnent

$$v = m \sqrt[5]{\frac{Qp^2}{n}}$$

ce qui montre que la vitesse reste la même si le produit Qp^2 reste constant, c'est-à-dire si la quantité d'eau débitée croît dans la même proportion que le carré de la pente diminue, si, par exemple, elle devient cent fois plus grande quand la pente se réduit au dixième.

Il est aisé de voir que d'après cette loi une rivière

où la vitesse est constante, quoique le volume des eaux croisse à mesure qu'elle avance, doit avoir une pente décroissante. Imaginons, par exemple, que la vitesse soit constante et que la quantité d'eau débitée croisse proportionnellement à la longueur x de la projection horizontale du lit, mesurée à partir d'un point donné, ce qui représente assez approximativement le régime de beaucoup de rivières, ou du moins de beaucoup de tronçons de rivières. On aura $Q = a + bx$, et $Qp^2 = (a + bx)p^2 = c$, a , b et c étant des constantes. En désignant par y l'altitude du point du lit qui correspond à la longueur x , on aura

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}}$$

et on trouvera par suite pour l'équation différentielle de la courbe du profil longitudinal

$$(a + bx) \frac{1}{1 + \frac{1}{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = c, \text{ ou } (a - c + bx) \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = c.$$

$\frac{dy}{dx}$ représentant la tangente de l'angle que la courbe forme au point xy avec l'axe des x qui est horizontal, si on désigne par T la valeur de cette tangente pour le point à partir duquel les longueurs x sont mesurées, on aura pour ce point $(a - c)T^2 = c$; d'où l'on tire $a - c = \frac{c}{T^2}$, ce qui permet d'écrire l'équation différentielle de la courbe du profil longitudinal

$$\text{sous la forme } (c + bT^2x) \frac{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}{T^2} = c.$$

Le profil longitudinal d'une rivière forme habituellement une courbe concave vers le ciel.

Cette équation montre clairement que la tangente $\frac{dy}{dx}$ de l'angle, que la surface de l'eau forme avec le plan horizontal, diminue constamment à mesure que la longueur x augmente, et qu'elle deviendrait tout à fait nulle si la longueur x devenait infinie. Le profil longitudinal de la rivière forme par conséquent une courbe dont la concavité est tournée vers le ciel, circonstance qui se vérifie avec une régularité à peu près géométrique dans toute portion de rivière où la vitesse est constante et où le volume des eaux croît à mesure qu'elle avance, et qui ne cesse d'exister que lorsque la vitesse change; par exemple lorsque le cours uniforme de la rivière est interrompu par des rapides où sa vitesse augmente.

Cette constance approximative de la vitesse n'a lieu que dans les eaux moyennes. Les affluents ont des étiages et des crues beaucoup plus prononcés que le tronc principal du fleuve, de sorte que, sauf quelques exceptions déjà signalées, le nombre k est plus grand pour les affluents que pour le tronc principal du fleuve. L'état du tronc principal étant toujours une moyenne entre les états des divers affluents, dans lesquels les étiages et les crues sont loin de coïncider exactement, les variations du débit et par suite les vitesses dues aux crues sont généralement plus considérables dans les affluents que dans le tronc principal, et d'autant plus considérables qu'on remonte plus près de leur source. Cela concourt à expliquer pourquoi, lorsqu'on suit un cours d'eau de sa source à son embouchure,

Dans les crues
la vitesse
va en décroissant
de la source vers
l'embouchure.

on voit diminuer graduellement la grosseur des cailloux qu'il roule dans ses crues.

Cette diminution graduelle de la vitesse et de la force du courant dans les crues peut même avoir lieu dans des parties de la rivière où les crues vont en augmentant de hauteur à mesure qu'on descend. Il suffit, pour cela, que le produit ph diminue à mesure qu'on descend; elle a lieu à plus forte raison lorsque la hauteur des crues diminue à mesure qu'on descend.

Le mouvement de l'eau dans les rivières est essentiellement déterminé par leur pente; mais il n'est pas impossible qu'une rivière *coule en remontant* pendant un certain espace, en vertu de la vitesse acquise précédemment par la masse de ses eaux.

En effet, pour chaque tranche transversale de la masse fluide, i étant l'inclinaison de la surface de la tranche, la force accélératrice sera la force relative de la gravité, $g \sin i$, moins la résistance du lit, qui, d'après les recherches des hydrauliciens, peut être exprimée par $A' c \left(\frac{Q^2}{s^3} + \frac{BQ}{s^2} \right)$, A' et B étant des constantes¹. La force accélératrice aura donc pour expression

$$g \sin i - A' c \left(\frac{Q^2}{s^3} + \frac{BQ}{s^2} \right).$$

« Tant que cette quantité sera positive, et elle le demeurera tant que le premier terme excédera le second, le mouvement sera accéléré; mais si celui-ci prédomine, le mouvement sera retardé. Il le sera à plus forte raison, si $\sin i$ devient négatif; et cela aurait lieu dans le cas où *la surface fluide serait*

Une rivière
peut couler
pendant quelque
temps
en contre-pente.

1. D'Aubuisson de Voisins, *loc. cit.*, page 166.

en contre-pente.» Dans ce dernier cas l'eau reviendrait nécessairement sur elle-même si la longueur de la contre-pente était indéfinie; mais si elle est assez courte pour que l'eau puisse arriver à son sommet sans avoir perdu toute sa vitesse, elle le franchira pour reprendre son cours suivant la pente qui existera au delà, de sorte que son profil longitudinal présentera une contre-pente permanente.

Le fond est bien plus souvent en contre-pente que la surface.

Les cas où une rivière poursuit ainsi pendant quelque temps son cours en remontant, sont généralement des exceptions assez rares, et la surface d'une eau courante est presque toujours inclinée dans le sens de son cours; mais ce qui n'est qu'une exception rare pour la surface d'une rivière, est beaucoup moins rare pour son fond, dont le profil longitudinal, à cause des variations de la profondeur, peut présenter des ondulations nombreuses et souvent considérables. L'effet du courant de la rivière tend quelquefois à faire disparaître ces ondulations en remplissant les creux et en abaissant les saillies; mais quelquefois il tend au contraire à les accroître ou à en faire naître de nouvelles en produisant des affouillements. Les principes d'hydraulique que nous avons étudiés nous permettront encore de nous rendre compte de ce phénomène.

Les inégalités du lit rendent le courant irrégulier et font naître des affouillements.

Nous avons vu précédemment, p. 107, que la vitesse au fond de la rivière est environ la moitié de la vitesse à la surface et les $\frac{5}{8}$ de la vitesse moyenne dans la verticale que l'on considère. Cela a lieu lorsque la rivière présente pendant un long intervalle une section sensiblement constante; mais si la section change de forme, si elle devient moins profonde,

les filets inférieurs ne peuvent continuer leur route qu'en se rapprochant des filets supérieurs; de là un mélange qui tend à donner aux filets d'eau en contact avec le fond la vitesse moyenne du courant; vitesse notablement plus grande que celle dont sont habituellement animés les filets du fond. Un obstacle passager, tel qu'un banc d'herbe, suffit pour produire ce résultat, qui détermine une érosion du fond, formé de matières déposées sous l'influence d'une vitesse moins grande, et la cavité creusée est elle-même une nouvelle cause de mélange et par conséquent d'érosion. Ces changements de forme de lit mettent aussi quelquefois les filets supérieurs dans le cas de descendre au fond de la rivière, qu'ils attaquent avec leur vitesse maximum, tandis qu'il avait été déposé sous des eaux animées seulement d'une vitesse moitié moindre. De là ces tourbillons qui surprennent si souvent les nageurs trop hardis, et qui les entraînent, malgré leur force et leur adresse, dans des gouffres profonds. On donne en effet le nom de gouffres aux cavités souvent très-considérables qui sont creusées de cette manière.

C'est par la même raison que les eaux affouillent en amont des piles des ponts, et cet affouillement amène souvent un dépôt en arrière; d'autres fois, en sortant des arches d'un pont, une rivière affouille par l'effet du mélange des eaux supérieures et inférieures, opéré au passage même des arches.

Ce même effet se produit toutes les fois que l'eau rencontre une grosse pierre ou un obstacle quelconque. Regardez une plage lorsque la mer s'est

retirée : s'il y a un gros caillou, ce caillou est toujours entouré de flaques d'eau qui doivent leur origine aux effets des remous.

Influence
des
inégalités du fond
sur la surface.

Les inégalités du fond n'ont pas seulement pour effet de déranger l'ordre habituel des divers filets d'un courant, elles influent aussi sur la forme de la surface; «elles se reproduisent en quelque sorte à la superficie du courant. Par exemple, qu'un banc de cailloux, étroit et épais, soit déposé transversalement ou en écharpe sur le lit d'un fleuve, le fluide le franchira en vertu de sa vitesse acquise; à la rencontre du banc, sa surface se relèvera considérablement, et de suite, après, elle redescendra, de sorte que, dans cette partie, elle présentera un exhaussement pareil à une forte ondulation; mais son élévation au-dessus du plan général de la superficie du fleuve, sera plus petite que celle du banc au-dessus du plan général du fond.»¹

Le filet d'eau
le plus rapide
forme au milieu
du courant
le sommet d'une
légère
proéminence.

Indépendamment de ces irrégularités accidentelles, les courants d'eau en présentent généralement une autre bien remarquable, quoique moins apparente. Nous avons vu précédemment qu'un certain filet situé très-près de la surface a une vitesse supérieure à celle de tous les autres. Ce filet répond en général à la partie la plus profonde du lit; mais, ce qui est plus singulier, il forme en même temps, au milieu du courant, le sommet d'une légère proéminence. «La section transversale de la surface d'une rivière présente une courbe convexe, dont le sommet correspond au fil de l'eau; à partir de ce

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 167.

point, de plus grandes vitesses, le niveau baisse de part et d'autre jusqu'aux bords, et il baisse d'une quantité tantôt égale, tantôt inégale vers chacun d'eux. Plus la vitesse des différentes parties du courant est grande, et plus leur élévation respective est considérable." ¹

Les formules approximatives que nous avons posées ci-dessus, pages 116 et 117, permettent de se rendre raison d'un autre phénomène, qui a frappé beaucoup d'observateurs. Quand deux cours d'eau à peu près égaux se réunissent, ils en forment un nouveau, qui ne paraît pas beaucoup plus grand que chacun des deux premiers en particulier; il est bien loin d'être double en largeur, et sa section, dont la figure est souvent à peu près semblable aux sections des deux premiers, n'est même pas double de chacune d'elles. Les sections étant à peu près semblables, leurs surfaces sont comme les carrés de leurs largeurs. Or, aussitôt que la profondeur devient plus grande, la vitesse augmente; la section n'a donc pas besoin d'être doublée pour que toute l'eau soit dépensée, en supposant que la pente reste la même. Il arrive même ordinairement que la pente devient un peu plus faible; mais, en raison de l'augmentation de la profondeur, la vitesse se maintient, ou même augmente encore légèrement, et toute l'eau se trouve débitée sans que la surface de la section soit doublée. La quantité d'eau débitée par chacune des deux rivières au-dessus du confluent étant $Q = n\sqrt{ph^5}$,

Deux rivières égales, en se réunissant, en forment ordinairement une nouvelle, dont la largeur n'est pas double

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 168.

cette quantité au-dessous du confluent, si le profil du lit conserve la même forme et change seulement de grandeur, sera $Q' = n \sqrt{p' h'^5}$, en appelant p' la pente et h' la profondeur au-dessous du confluent, et on aura,

$$Q' = n \sqrt{p' h'^5} = 2 Q = 2 n \sqrt{p h^5}$$

ou bien

$$\sqrt{p' h'^5} = 2 \sqrt{p h^5} \quad p' h'^5 = 4 p h^5.$$

Si la pente au-dessous du confluent reste la même qu'au-dessus, on aura $p' = p$, et l'équation se réduira à

$$h'^5 = 4 h^5 \quad h' = h \sqrt[5]{4} = 1,3195 h$$

d'où l'on voit que les dimensions du profil au-dessous du confluent ne devront pas être augmentées tout à fait d'un tiers. Si la pente au-dessous du confluent était moindre qu'au-dessus, on aurait

$$h' = h \sqrt[5]{4 \frac{p}{p'}} = 1,3195 h \sqrt[5]{\frac{p}{p'}}$$

et il faudrait que la diminution de la pente fût très-forte pour que les dimensions du lit inférieur fussent augmentées de moitié.

Variations
dans les
dimensions du lit
qui accompagnent
les variations
de la pente.

Les mêmes formules peuvent également servir à analyser cet autre fait très-connu, que les rivières où existent alternativement des parties plus ou moins rapides, ainsi que cela a lieu très-fréquemment, ont une plus grande section et sont généralement beaucoup plus larges dans les parties moins inclinées, où elles présentent quelquefois des espèces de lacs. Soient en effet p , h , v et Q la pente, la profondeur, la vitesse et le débit par seconde de la rivière dans le point supérieur le moins rapide,

p', h', v', Q' les quantités analogues dans le point inférieur le plus rapide; on aura

$$\begin{aligned} v &= m \sqrt{p h}, \quad Q = n \sqrt{p h^5}, \\ v' &= m \sqrt{p' h'}, \quad Q' = n \sqrt{p' h'^5}, \\ Q' &= Q. \end{aligned}$$

La combinaison de ces équations donnera

$$\begin{aligned} \frac{p}{p'} \left(\frac{h}{h'}\right)^5 &= 1 & \left(\frac{v}{v'}\right)^2 &= \frac{p}{p'} \frac{h}{h'}, \\ \frac{h}{h'} &= \sqrt[5]{\frac{p'}{p}} & \left(\frac{h}{h'}\right)^4 &= \frac{p}{p'} \frac{h}{h'}, \\ \frac{v}{v'} &= \left(\frac{h'}{h}\right)^2 = \sqrt[5]{\left(\frac{p}{p'}\right)^2}. \end{aligned}$$

Ainsi, au point inférieur, où la pente est plus grande, la vitesse sera plus grande aussi; la profondeur sera au contraire moindre; et par conséquent la surface de la rivière sera moins large si, comme les formules le supposent, sa section reste constamment semblable à elle-même; mais les vitesses, aux deux points dont il s'agit, seront moins inégales que les pentes, et les profondeurs seront moins inégales que les vitesses, et surtout beaucoup moins inégales que les pentes. Cette dernière conclusion semblerait contraire, au premier abord, au fait bien connu de l'élargissement que présentent généralement les rivières dans les parties les moins inclinées et les plus lentes de leur cours; mais il est à remarquer que les parties des rivières où ces variations se présentent, sont celles où il est le plus rare que la section du lit conserve la même forme, ainsi qu'on l'a supposé dans l'établissement des formules: ordinairement les pentes rapides se trouvent dans des étranglements, où le lit est plus encaissé et plus

profond; les pentes plus douces, dans des parties où le lit est plus évasé. Il faudrait par conséquent tenir compte des modifications que le courant éprouve en passant d'un lit large dans un lit étroit, et d'autres phénomènes compliqués; mais cela conduirait à des questions d'hydraulique beaucoup plus élevées que celles auxquelles se rapportent nos formules approximatives.

Changements de régime qui surviendraient si la même quantité d'eau passait dans une rivière en moins de temps.

Ces formules ne peuvent être appliquées sans crainte d'erreurs qu'à des cas extrêmement simples. Elles suffisent, par exemple, pour montrer que si toute l'eau qui passe dans une rivière en quelques jours ou en quelques mois était réunie de manière à y passer en quelques heures, elle aurait une vitesse de beaucoup supérieure à la vitesse ordinaire de la même rivière; d'où il résulte qu'une crue produite par une *quantité d'eau donnée* sera d'autant plus désastreuse qu'elle durera moins longtemps.

En effet, nous avons trouvé page 120 la formule $v = m \sqrt[5]{\frac{Qp^2}{n}}$, dans laquelle Q exprime la quantité d'eau débitée en une seconde. Si l'on suppose que le temps employé à débiter la même quantité d'eau diminue, qu'il devient, par exemple, cent fois moins grand, Q deviendra cent fois plus considérable, et la vitesse croîtra dans le rapport de 1 à $\sqrt[5]{100} =$

La force avec laquelle l'eau choque les obstacles est à peu près proportionnelle au carré de sa vitesse.

2,51185. Une pareille augmentation de vitesse occasionnerait des effets très-considérables; car la force avec laquelle l'eau choque les objets qui s'opposent à son cours peut être regardée comme à peu près proportionnelle au carré de sa vitesse; d'où il suit

que de l'eau animée d'une vitesse comme 2,51185, agirait avec une violence 6,30957 fois aussi grande que de l'eau animée d'une vitesse comme 1.

L'effet serait plus marqué encore si on imaginait que toute la quantité d'eau qui coule dans une rivière pendant l'année vint à y passer en un jour, ce qui supposerait le temps réduit dans le rapport de 365,25 à 1. Dans ce cas, la vitesse croîtrait dans

le rapport de 1 à $\sqrt[5]{365,25} = 3,2547$, et la violence de l'action exercée par la rivière sur son fond et sur ses rives croîtrait dans le rapport de 1 à 10,593 : elle serait plus que décuplée.

La formule $v = m \sqrt[5]{\frac{Q p^2}{u}}$ n'est qu'une transformation de celle-ci $v = m \sqrt{p h}$, où l'on voit que la vitesse ne variant que comme la racine carrée de la profondeur, ses variations sont beaucoup moins sensibles que celles de la hauteur de l'eau dans la rivière. Mais cette dernière fait voir en même temps que le carré de la vitesse, qui exprime à peu près l'action que l'eau exerce contre les obstacles qu'elle rencontre, est proportionnel à la hauteur de l'eau, d'où il résulte qu'une crue qui décuple la hauteur de l'eau, décuple aussi la puissance dont nous parlons.

Quand même la rivière ne coulerait avec ce surcroît de puissance que pendant quelques instants, ce peu d'instants suffirait pour renverser et entraîner une foule d'obstacles qu'elle aurait respectés éternellement avec sa vitesse et sa force ordinaires. C'est dans ces moments de crue, généralement assez courts, que les rivières produisent de grands changements

Les effets des crues sont à peu près proportionnels à la profondeur qu'elles donnent à la rivière.

Comparaison
avec les
écluses de chasse.

dans leurs lits et dans leurs vallées. Les *écluses de chasse*, dont on se sert pour creuser l'entrée des ports, réalisent, jusqu'à un certain point, un phénomène de ce genre.

Je ferai remarquer encore que la pente p , qui entre dans la formule $v = m \sqrt{ph}$, est celle de la surface du liquide, de sorte que, si la crue était assez forte pour que cette pente en fût augmentée, la force de destruction en serait augmentée dans la même proportion. Cette augmentation de pente s'observe quelquefois, notamment dans la tête de la crue; mais les formules de l'hydraulique ne s'appliquent pas exactement à ce point, et les effets singuliers qui s'y observent sortent peut-être de la sphère du calcul.

Effets funestes
du déboisement
des montagnes.

Les considérations précédentes expliquent comment, en déboisant différentes contrées, on a rendu infiniment plus désastreuses les crues des rivières qui y prennent naissance. La même quantité d'eau arrive avec beaucoup plus de simultanéité dans la partie du lit des rivières où des ravages peuvent avoir lieu. Pour les prévenir en grande partie, il suffirait de reboiser les flancs des montagnes, et de retarder par là le cours d'une partie des eaux qui y tombent.

Crues
dont l'industrie
sait profiter.

Les crues ne sont pas toujours des désastres : il y en a dont l'industrie sait profiter. Telles sont les crues de la Loire, dont on tire parti pour faire flotter d'Andrezieux à Roanne les bateaux qui transportent à Paris la houille de Saint-Étienne. Au moyen d'écluses, ou même d'étangs de retenue, on produit dans une foule de vallées des crues factices

Crues artificielles.

pour le flottage des bois. C'est par ce moyen qu'on fait arriver jusqu'à l'Yonne une grande partie des bois du Morvan, destinés au chauffage de Paris.

Pour flotter ainsi du bois, il faut que la crue artificielle dure un certain temps; mais s'il s'agissait de dévaster une vallée, par exemple dans un pays ennemi, il suffirait d'un flot passager, et on devrait chercher à l'obtenir le plus élevé possible. Il suffirait de produire une vague passagère, qui parcourût une vallée dans sa longueur, et le moyen de la rendre aussi désastreuse que possible, avec une quantité d'eau déterminée, serait de la rendre la plus courte possible. En pareil cas la durée du courant importe infiniment moins que sa violence dans les premiers moments, et c'est même le premier flot qui produit le plus d'effet, de même que dans une inondation de torrent c'est le premier flot qui produit les effets les plus étonnants.

Crues offensives.

Comment on les rendrait le plus désastreuses possible.

Ces remarques font naturellement concevoir que pour produire dans une vallée une véritable débâcle, il ne faudrait pas une quantité d'eau extrêmement considérable; il suffirait de celle qui pourrait être contenue au point de départ dans une petite longueur de la vallée, et qui la remplirait jusqu'à ses bords. Cette masse d'eau, livrée à elle-même, parcourrait la vallée entière comme une vague immense. Malheureusement les formules de l'hydraulique, toutes adaptées aux mouvements permanents, ne s'appliquent pas à ces mouvements passagers.

Comment de grandes débâcles ont pu être produites.

Mais, calculables ou non, ces considérations éclairent, ainsi que nous le verrons plus tard, de hautes spéculations de géologie théorique, auxquelles

les formules que nous avons posées peuvent fournir chacune leur contingent de lumières. D'après la formule :

$$v = m \sqrt[5]{\frac{Q P^2}{n}}$$

Une rivière gonflée devient capable des mêmes effets qu'une rivière dont la pente est rapide.

la pente d'une rivière peut diminuer dans la proportion dans laquelle augmente la racine carrée de la quantité d'eau débitée en une seconde, sans que la vitesse change. Dans le cas où la quantité d'eau débitée par seconde serait ainsi augmentée dans le rapport de 1 à 365,25, la rivière pourrait conserver sa vitesse sur une pente réduite dans le rapport de 1 à $\sqrt[5]{365,25}$, ou de 1 à 19,112, et elle serait capable de pousser sur une pente de 19'' $\frac{1}{2}$, qui est celle de la Seine entre Paris et Rouen, des galets qu'elle ne pousse dans son état habituel que sur la pente de 6' 13'', pente plus grande que celle de la Meurthe entre Raon-l'Étape et Lunéville, et presque égale à celle de la Durance près de son embouchure dans le Rhône.

Ces considérations serviront à l'explication des phénomènes cratiques.

Cela peut concourir à expliquer comment des rivières à pentes très-faibles qui même dans leurs crues actuelles n'entraînent que des sables et des graviers, présentent sur leurs bords de gros galets et même des *blocs erratiques*.

QUATORZIÈME LEÇON.

(30 janvier 1844.)

Formation des dépôts de matières meubles dans les vallées.

MESSIEURS,

Indépendamment de l'intérêt qu'elles présentent au géologue sous une foule de rapports, les études auxquelles nous venons de nous livrer sur les cours d'eau, ont eu pour objet de nous mettre à même de bien concevoir l'action qu'ils exercent comme agents de déblai et de remblai.

Action
des cours d'eau
considérés
comme agents
de déblais et de
remblais.

Un des effets des eaux courantes est de détacher des parties plus ou moins grosses des rochers et des masses meubles qui constituent l'écorce terrestre, de les entraîner et enfin de les déposer. Nous nous sommes déjà occupés des Deltas où s'opèrent une partie de ces dépôts; nous allons examiner sous ce point de vue les rivières ordinaires. Nous reviendrons ensuite aux torrents que nous avons déjà étudiés. Je chercherai à vous donner ainsi une idée complète, quoique très-abrégée, de cette partie jusqu'ici fort négligée de la science, qu'on pourrait appeler *l'histoire naturelle des cours d'eau*.

Nous avons déjà vu que le cours d'un torrent, considéré sous ce point de vue, se divise en trois parties : le bassin de réception, le cône de déjection et la partie intermédiaire.

Le lit d'une rivière régulière est généralement susceptible d'une division analogue, bien qu'elle y soit moins tranchée, et on peut même souvent le considérer dans son ensemble comme un intermédiaire entre les torrents qui alimentent la rivière et les parties extrêmes de son cours, où, en approchant de son embouchure, elle n'a presque plus de pente et forme un Delta, qu'on peut regarder comme son cône de déjection.

Mais dans l'intervalle la rivière éprouve généralement, sous le rapport de son volume et sous celui de sa pente, de nombreuses variations, qui changent sa manière d'agir relativement aux sédiments. Il se trouve des parties où son cours s'accélère et où la rivière tend à creuser son lit, d'autres où son cours se ralentit et où la rivière dépose. Elle dépose aussi dans ses débordements sur les parties basses de ses rives; mais son effet le plus habituel est d'entraîner des sédiments, soit en les faisant glisser sur son fond, soit en les tenant en suspension.

L'action des rivières est en rapport avec la nature des roches de leur bassin.

Les effets des rivières sous ces divers rapports dépendent en partie de la nature des roches qui constituent leur bassin. Il est toutefois à remarquer que « la pesanteur spécifique des roches et matières pierreuses, ne variant que de 2,2 à 2,7, sera sans effet notable, abstraction faite de quelques parcelles métalliques et de quelques pierres particulières : ce sera ainsi le volume qui influera le plus sur la distance

à laquelle les roches et leurs débris seront portés. Aussi et en général, lorsqu'on descend une grande vallée, on trouve d'abord, à peu de distance de son origine, dans le lit du torrent ou de la rivière qui en occupe le fond, des quartiers anguleux de rochers; puis, et successivement, des blocs arrondis de plus en plus petits, des cailloux roulés, des graviers, et finalement on n'a plus guère que des sables et des terres¹.» Nous avons vu précédemment, page 122, comment les lois de l'hydraulique, appliquées aux crues expliquent cette diminution progressive.

Les matières
entraînées
diminuent
graduellement
de grosseur.

«C'est surtout dans les plaines et les larges vallées, dont le sol est comme meuble, que les rivières établissent réellement un lit dont les dimensions sont en rapport avec la nature de ce sol, comme avec la vitesse et le volume de leurs eaux. Si le terrain n'a pas une ténacité proportionnée à cette vitesse et à ce volume, il cèdera à l'action des eaux, elles en approfondiront et surtout elles en élargiront le lit. Si, au contraire, la profondeur ou la largeur était trop grande, le fleuve réduirait ces dimensions, en déposant sur son fond ou sur un de ses bords les pierres et terres qu'il charrie dans ses crues.

«Quand il s'est établi un rapport convenable, que le lit contient toute l'eau que mène la rivière dans les grandes crues sans en être attaqué, il y a *stabilité*, et le régime de la rivière est établi. La vitesse du régime est en rapport avec l'espèce, ou plutôt avec *la grosseur* des substances qui forment le

Comment il finit
par s'établir
un lit stable.

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 160.

lit.^{»1} Les plus grandes crues de la rivière ne peuvent alors changer son lit, parce que la vitesse dont elle est animée dans ses crues est en rapport avec la grosseur des substances qui forment le lit.

Dubuat a fait des expériences qui malheureusement n'ont pas encore été répétées assez en grand, sur la grosseur des particules terreuses et pierreuses qu'un cours d'eau peut entraîner lorsqu'il est animé d'une vitesse déterminée. Il se servait d'un canal en bois, qu'il inclinait de manière à donner à l'eau une certaine vitesse. Sur le fond il mettait différentes substances, et il inclinait le canal jusqu'à ce que ces substances fussent entraînées. Il a trouvé ainsi que :

Grosueur
des matières
entraînées
en rapport avec
la vitesse.

Expériences
de Dubuat.

	Par seconde.	Par heure.
L'argile propre à bâtir est entraînée par un courant d'eau qui a une vitesse de	0,08 ^m	288 ^m
Le sable fin	0,16	576
Le gravier gros comme des pois	0,19	694
Le gravier gros comme des fèves	0,32	1152
Les galets d'un pouce de diamètre	0,65	2340
Les galets gros comme des œufs de poule	1,00	3600

Il faut remarquer que la vitesse dont il s'agit ici est celle de l'eau qui agit sur les diverses matières. Pour qu'une rivière ait cette vitesse au fond, il faut qu'elle ait une vitesse à peu près double à la surface. Ainsi, pour entraîner des galets gros comme des œufs de poule, il faudrait qu'une rivière eût à la surface une vitesse de 2 mètres par seconde, ou

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 162.

de 7200 mètres par heure, ce qui serait déjà une vitesse considérable. La Seine, aux environs de Paris, comme nous l'avons vu précédemment, p. 77, ne dépasse guère cette vitesse, aussi n'entraîne-t-elle que bien rarement des galets plus gros que des œufs.

Les effets dont il vient d'être question, ont aussi été reconnus dans des expériences faites en grand.

« Une pente de 0,00027, ou de $55''\frac{3}{4}$, dans un canal qui conduit 75 mètres cubes d'eau par seconde, peut engendrer, dit M. de Prony, une vitesse moyenne de plus d'un mètre par seconde, si la section transversale est profilée convenablement... , et il est bien démontré par l'expérience qu'avec une vitesse beaucoup moindre que celle d'un mètre, les eaux entraînent le sable fin et le limon dont elles peuvent être chargées, sans les laisser déposer : la longueur du canal ne change absolument rien à ce phénomène, pourvu que la vitesse se conserve la même; car l'eau trouble, arrivée à un point quelconque du lit, se trouve dans le même cas où elle était à l'origine de ce lit, et le maintien de la cause entraîne celui de l'effet. »¹

Dans les travaux hydrauliques on évite avec soin toutes les dispositions de canaux qui permettraient aux eaux d'acquérir, même momentanément, une vitesse un peu considérable. Dans son grand projet de travaux pour l'assainissement des marais Pontins, M. de Prony a mis tous ses soins à prévenir ce résultat, dont il a fait sentir les

1. De Prony, Des marais Pontins, page 357.

dangers. Il a cherché à donner aux canaux de dérivation des pentes telles que les eaux, lorsqu'elles les rempliraient dans les crues, eussent une vitesse moyenne peu supérieure à 1 mètre par seconde; vitesse qui est suffisante pour que l'eau ne dépose pas les matières terreuses qu'elle tient en suspension, mais qui n'est pas assez grande pour lui permettre de produire des érosions dans la paroi du lit. Il a gradué les pentes en raison du volume d'eau croissant, de manière à ce que la vitesse, au lieu de diminuer en descendant, aille, dans les crues, en croissant légèrement, et à ce que l'eau arrive à la mer sans érosion de la paroi du lit et en même temps sans dépôt. Là où les pentes naturelles auraient été trop fortes, il a partagé le canal en plusieurs biefs, séparés par des chutes intermédiaires, accompagnées de piscines dans lesquelles se déposent les pierres ou gros graviers entraînés dans le canal. Il a pensé que pour les parties des canaux destinées à conduire dans les crues de 100 à 200 mètres cubes d'eau par seconde, des pentes de 0,^m0014, 0,^m0015, 0,^m0018 et 0,^m0021 seraient beaucoup trop fortes. La moindre de ces pentes comporterait une vitesse de plus de 2 mètres par seconde, et un canal ainsi disposé ne serait, dit-il, qu'un torrent artificiel substitué à un torrent naturel. Une pente de 0,0005 serait même encore trop forte pour le tronc principal, et il a proposé des pentes qui, lorsque le volume d'eau augmente de 11 à 114 mètres cubes par seconde, varient de 0,0006107 à 0,0002500.¹

1. De Prony, Des marais Pontins, p. 371 à 428.

Il n'est pas nécessaire qu'un canal ait une très-grande section pour que cette dernière pente soit suffisante; car l'expérience prouve qu'on peut se borner à donner à un canal de 0,^m44 de largeur une pente de 0,^m00025 par mètre.

La cunette de l'aqueduc de Montpellier a 0,^m305 de largeur et une pente de 0,^m00028 par mètre.¹

Les règles pratiques admises pour la construction de pareils canaux sont à peu près conformes aux résultats des expériences de Dubuat, interprétés comme nous l'avons fait ci-dessus.

Pour les canaux à fond de sable, on admet que l'eau ne peut pas prendre, sans les dégrader, une vitesse moyenne supérieure à 0,^m305, ce qui correspond à une vitesse de 0,^m190 dans le fond.

Pour les canaux à fond d'argile, la vitesse qui ne doit pas être dépassée est de 0,^m152², vitesse moyenne qui correspond à celle de 0,^m095 dans le fond.

Il était intéressant d'observer la manière dont s'opère l'entraînement du sable par l'eau. Dubuat, dans le cours de ses expériences, a fait étendre une couche de sable sur le fond de son canal, et il y a fait couler de l'eau avec une vitesse de 0,^m30 par seconde, ou de 1080 mètres à l'heure, par conséquent avec une vitesse plus que suffisante pour l'entraîner. Il a trouvé qu'au bout de quelque temps la surface de ce sable présentait une suite d'ondulations formant des

1. E. Dupont, Étude comparative de deux projets d'approvisionnement d'eau de la ville de Cette, à l'aide de la rivière d'Hérault et de la fontaine d'Isauka, p. 72 à 75.

2. *Idem*, p. 19.

sillons transversaux, comme l'indique la figure 4, pl. II. Les pentes que présentait le sable vers l'amont étaient très-douces; les grains de sable, poussés par le courant, montaient sur la pente ascendante de la première ondulation, puis, arrivés à l'extrémité, ils s'éboulèrent pour monter bientôt après sur la seconde ondulation, et ainsi de suite. Le sable mettait une demi-heure à franchir un sillon, de manière que ces grains de sable faisaient environ $0,^{m}25$ par 24 heures; leur vitesse était la millième partie de celle du courant.¹

Entraînement
du sable
par les rivières,
analogue
à la formation
des dunes.

Le mode de transport auquel sont soumis les grains de sable qui cheminent ainsi sur le fond de la rivière, est analogue à celui qui élève le sable sur les dunes, où il est dû à l'action du vent, ainsi que nous l'avons vu dans la sixième leçon, tome I.^{er}, page 196; seulement sur les dunes le phénomène se produit plus rapidement.

Matières ténues
que
les eaux troubles
tiennent
en suspension.

Outre les matières que les eaux font glisser sur leur fond, elles en tiennent *en suspension* des quantités variables. Tout le monde sait que les rivières se troublent dans les crues, et que la perte de leur limpidité résulte de ce que de nombreuses particules terreuses, entraînées par leur mouvement, y flottent alors à peu près comme la poussière flotte dans l'air. Ainsi que nous l'avons déjà vu ci-dessus, page 59, on n'a encore que des données très-imparfaites sur la quantité spécifique de matières terreuses qui se trouvent ainsi mélangées à l'eau des rivières dans diverses circonstances; mais cette quantité est

1. Dubuat, Principes d'hydraulique, §. 396.

généralement inférieure à $\frac{24}{100000}$, en poids et à $\frac{10}{100000}$, en volume, de l'eau trouble.

Les matières terreuses que l'eau des rivières peut tenir en suspension, quoique toujours très-fines, ont cependant des degrés de ténuité très-différents. Par suite de ces différences, elles se déposent plus ou moins vite lorsque l'eau perd sa vitesse soit en partie, soit en totalité. On a songé à Bordeaux, il y a quelques années, à clarifier par le repos les eaux de la Garonne pour les rendre constamment potables. On a établi pour cela des bassins d'une assez grande capacité. Les expériences que M. Leupold y a exécutés, et les calculs qu'il a faits, ont montré que l'eau de la Garonne, en temps de crue ou de *souberne*, ne serait pas encore revenue à sa limpidité après dix jours d'un repos absolu. Au commencement, il est vrai, les plus grosses matières se déposent très-vite, mais les plus fines descendent avec une lenteur désolante.¹

Elles se déposent très-lentement.

Les remarques précédentes, jointes à l'étude que nous avons faite du mouvement de l'eau dans les rivières, nous permettront de concevoir aisément comment les alluvions se déposent.

Comment les alluvions se déposent.

Les dépressions de la surface du globe, auxquelles on donne en général le nom de vallées, ont, comme les plaines, des formes plus ou moins accidentées; mais entre autres accidents les vallées présentent souvent un fond plat, ou qui, du moins, paraît tel à l'œil; le lit de la rivière, entaillé dans ce fond

Beaucoup de vallées ont un fond plat.

1. Arago, Rapport sur le filtrage. — Annales de chimie et de physique; tome 65, page 433.

plat, se trouve placé soit au milieu, soit d'un côté, soit de l'autre : c'est une chose très-variable.

Une rivière dépose peu dans la partie la plus profonde de son lit.

Conformément aux principes d'hydraulique, le filet le plus rapide du courant d'une rivière répond à la partie la plus profonde de son lit. Là elle ne dépose pas, ou du moins les dépôts qui ont pu se faire dans cette position pendant les basses eaux sont entraînés et déplacés dans les crues. Mais lorsque la rivière déborde, elle couvre ses rives de sédiments.

Elle couvre ses rives de sédiments.

Le fond plat des vallées est généralement disposé de telle manière que la rivière, à moins qu'elle ne soit bordée de digues, le couvre à peu près en entier dans ses grandes crues. Le Nil, qui a une crue moyenne de 7,^m419; le Gange, qui en a une de 10 mètres, et le Mississipi, qui en a une de 13,^m73, sont sujets à des débordements annuels. Le fond plat de leur vallée, ou une grande partie de ce fond, forme alors une sorte de grand lac, où l'eau coule presque partout, mais avec des vitesses très-inégales.

Comment elle les y entraîne et les y dépose.

D'abord les eaux, sortant du lit avec une assez grande vitesse acquise, poussent sur les rives des sables et des graviers. Elles perdent bientôt une partie de leur vitesse dans ces courants latéraux qui n'ont que peu de profondeur : elles abandonnent alors tout ce qu'elles ont entraîné, et la diminution de la vitesse fait que les parties les plus grossières parmi celles qui sont tenues en suspension, se déposent également près des rives. Si les eaux trouvent à s'étendre au loin dans la vallée, elles ne charrient avec elles que les particules les plus ténues, qui se déposent lentement et en petite

quantité, jusqu'au moment où les eaux deviennent tout à fait stagnantes.

Deux éléments déterminent la quantité de matière déposée en chaque point : la hauteur de l'eau et sa vitesse. La quantité de sédiments, que la couche d'eau trouble renferme, dépend de son épaisseur. Si l'eau conserve une vitesse considérable, le dépôt n'a pas lieu; si elle éprouve un simple ralentissement, elle ne dépose que les parties les plus grosses de ses troubles; si elle devient complètement stationnaire, tout se dépose à la longue et exhausse le sol.

*Nature et forme
du dépôt qu'elle
produit.*

Les rivières d'un cours lent et régulier transportent surtout du sable fin et du limon. On voit souvent le terrain coupé abruptement sur le bord des rivières, et alors on y aperçoit des couches superposées, formées par les inondations successives : ces couches sont en général à peu près horizontales; elles le sont moins exactement pendant que la surface générale du dépôt qui ne peut jamais dépasser le niveau maximum des crues.

Cette condition n'assujettit pas la surface générale du dépôt à être elle-même rigoureusement horizontale. Le résultat des phénomènes que nous venons de décrire, est, au contraire, que les rives s'élèvent plus que les parties basses situées à une certaine distance. Lorsque la rivière sort de son lit, elle produit des dépôts plus épais vers ses bords qu'à une certaine distance; ces bords présenteront donc à la longue, de chaque côté de la rivière, si son lit est au milieu de la vallée, comme une sorte de digue naturelle, et il restera derrière cette digue des marais, des flaques d'eau. On remarque en effet que le fond d'une vallée

Le dépôt
s'élève davantage
sur les bords
de la rivière
qu'à une certaine
distance.

remplie d'alluvions est en général plus élevé sur les rives mêmes de la rivière qu'au pied des coteaux qui forment les flancs de la vallée. Souvent ces derniers sont bordés par des étangs, alimentés par des sources qui sourdent au pied des coteaux, ou dont les eaux proviennent, par voie d'infiltration, des parties supérieures de la rivière, ainsi que M. Dufrenoy l'a constaté dernièrement pour la source du Loiret, près d'Orléans¹. Dans la vallée du Mississipi, les rives du fleuve étant plus élevées que le terrain situé à une certaine distance, il y a entre les premières et les coteaux voisins un intervalle rempli par de vastes marais ou par des lacs peu profonds.

Le pied des coteaux est aussi bordé très-fréquemment, surtout dans les contrées septentrionales, par des tourbières, qui remplacent des nappes d'eau où elles ont pris naissance, tandis que les rives mêmes de la rivière sont formés par des dépôts terreux ou graveleux, dont la hauteur atteint à peu près celle des plus hautes eaux dans les crues ordinaires. Dans la vallée de la Seine, aux environs de Paris, la hauteur moyenne des crues au-dessus de l'étiage moyen est de 4,^m42², et celle des berges de la rivière au-dessus du même niveau, est d'environ 4 mètres. Pour la Saône, la hauteur des berges est de 4 mètres; pour la Meuse de 2 mètres; pour la Somme de 1 mètre.³

Distinction
entre le lit mineur
et le lit majeur.

La manière dont les alluvions se déposent, contribue beaucoup à la netteté avec laquelle le fond d'une vallée se divise généralement en deux cavités,

1. Dufrenoy, Bull. de la Soc. géolog. de France; 2.^e série, t. IV.

2. Dausse, Statistique des variations du niveau de la Seine.

3. Bravais, *Patria*, colonne 114.

emboîtées pour ainsi dire l'une dans l'autre, et qu'on peut appeler le *lit mineur* et le *lit majeur* de la rivière, en donnant à chacune de ces expressions la plus grande extension possible. La première est le lit proprement dit, le lit habituel de la rivière, celui où elle coule toujours et dont elle ne sort que dans les grandes crues. Le lit majeur comprend toute la partie du fond de la vallée que les eaux de la rivière couvrent lorsqu'elle déborde. Ces deux lits sont ordinairement rendus encore plus distincts par les arbres qui bordent en grand nombre le lit mineur, et qu'on entretient même avec soin, afin que leurs racines concourent à en prévenir la dégradation. Le fond du lit majeur est ordinairement occupé par des prairies, qui sont à peu près au niveau des crues ordinaires, mais que les eaux couvrent dans les grandes crues. M. de Prony et d'autres hydrauliciens ont imité cette disposition naturelle dans le profil des canaux destinés à donner écoulement aux eaux pluviales, qu'ils ont composés de deux fosses, dont l'une, étroite, appelée *cunette* et destinée aux eaux ordinaires, est placée au fond d'une fosse beaucoup plus large, destinée à permettre l'écoulement des eaux des crues, sans les obliger de s'élever à une trop grande hauteur.

Cette disposition si habituelle des vallées tend à diminuer l'exactitude des formules approximatives que nous avons construites dans la dernière séance, en supposant que le profil du fond de la vallée était formé simplement par deux lignes droites, convergentes vers le bas, et analogue à celui d'une *noue* de toiture dont la ligne de fond ne s'éloignerait

Netteté
de leur séparation.

Cette disposition
met en défaut
les formules
approximatives
établies
précédemment.

que faiblement de l'horizontale; mais nous avons visé bien plus à la simplicité qu'à la rigueur dans la recherche de ces formules expéditives. Les mouvements que prennent les eaux débordées, en dehors du lit mineur, ne se prêteraient d'ailleurs à aucun calcul général et simple.

On peut rendre le dépôt des alluvions très-rapide à une certaine distance de la rivière, dans les parties de la vallée dont le sol est resté plus bas que les bords mêmes du lit; il suffit d'y diriger des eaux troubles par un canal assez profond et assez incliné pour qu'elles y conservent toute leur vitesse, et de les faire séjourner dans l'espace bas auquel le canal aboutit. C'est l'opération qu'on nomme *colmattage*, et dont nous avons déjà mentionné l'efficacité. On produit ainsi artificiellement un phénomène analogue à la formation des deltas, et souvent des phénomènes semblables se produisent d'eux-mêmes par la divagation naturelle des eaux des crues.

Colmattage.

Analogie
de ses effets
avec la formation
des deltas.

Dépôts
qui se forment
dans
toutes les parties
du lit
où la vitesse
est diminuée.

Ce n'est pas seulement sur ses rives et dans les endroits peu profonds que la rivière perd assez de sa vitesse pour opérer des dépôts; elle en produit aussi dans les endroits abrités de son lit, ou, pour mieux dire, dans tous les endroits de ce lit où un obstacle diminue sa vitesse. Ainsi il se forme des dépôts derrière les piles des ponts; il s'en produit au milieu des herbes et des joncs qui obstruent souvent le fond des rivières, et un banc d'herbe devient à la longue un banc de vase; il s'en produit en amont d'un barrage, qui oblige l'eau à ralentir son cours avant de le franchir.

Au contraire, tout ce qui rend le mouvement de l'eau plus vif au fond de la rivière, l'empêche de déposer, et lui donne même, comme nous l'avons déjà remarqué, la puissance de creuser, de produire des *affouillements*. En aval d'un barrage, près des piles d'un pont, près d'une grosse pierre, les eaux entament ordinairement le lit en vertu de cette loi. Suivant les circonstances et le mode de tourbillonnement qu'elle produira dans l'eau, une grosse pierre fera naître un affouillement en amont ou en aval, et un dépôt du côté opposé. Au-dessous d'un moulin ou d'un déversoir, le lit d'une rivière est généralement affouillé, plus creux; il y reste une mare, quand on met la rivière à sec.

Affouillements qui s'opèrent dans les points où la vitesse au fond est augmentée.

Points où ils ont lieu de préférence.

Au surplus, tous ces effets, qui sont très-sensibles dans les premières années, lorsqu'on modifie d'une manière quelconque le lit d'une rivière, atteignent promptement une limite dont ils ne s'écartent ensuite que très-lentement. On en a la preuve dans la fixité presque complète du niveau général des vallées, dont je vous ai cité précédemment dans la 5.^e leçon, tome I.^{er}, page 143, des témoins irrécusables.

Ces effets atteignent promptement une limite presque fixe.

Cette fixité générale n'est cependant pas telle que la rivière dans ses crues n'y produise quelquefois, même en dehors de son lit ou par le déplacement de ce lit, des changements locaux plus ou moins importants. Les vallées, considérées dans leur ensemble, ont été mises à l'épreuve des courants diluviens, et les rivières actuelles ne peuvent y produire que de très-faibles changements; mais *le fond plat* de ces vallées, remblayé par ces mêmes rivières, n'est

Les rivières, dans leurs grandes inondations, sont cependant capables de déplacer leurs dépôts antérieurs.

pas à l'épreuve de leurs grandes inondations, qui peuvent atteindre et déplacer ce que les inondations précédentes ont déposé.

Elles
ont une action
plus efficace
pour changer leur
direction
que pour changer
le niveau
de leur fond.

Il faut surtout remarquer que si l'action d'une rivière est presque nulle pour changer le niveau général de son fond, il n'en est pas de même de celle qu'elle exerce pour changer sa direction. « Toutes choses égales d'ailleurs, les berges du lit d'une rivière résistent moins que le fond à l'action de ses eaux, et il est plus large que profond. Indépendamment de cette action, les berges sont soumises à celle de la pesanteur, laquelle concourt à produire l'éboulement des substances qui les composent, tandis que cette même force, pressant les matières du lit sur celles qui sont au-dessous, pression qui accroît le frottement, rend leur déplacement plus difficile. En outre, lorsque les masses du terrain de transport qui constitue les berges viennent à s'ébouler, l'eau dans laquelle elles tombent les désagrège; elle emporte les parties terreuses, et les pierres, graviers et sables, qui y étaient mêlés, demeurent au fond et ils en augmentent la stabilité par leur plus grande résistance. Ainsi, le lit des rivières sera d'autant plus large comparativement à sa profondeur, que le terrain est plus meuble et en même temps plus caillouteux. »¹

Les rivières ont le plus souvent un cours plus ou moins curviligne, et généralement ce cours est beaucoup moins rectiligne que la vallée elle-même. Les rivières *serpentent* si généralement que, dans les

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 163.

cartes géographiques, on a pris l'habitude de ne jamais tracer une rivière sans la faire serpenter.

Les rivières ont donc évidemment une disposition naturelle à serpenter : cette propension est en effet inhérente au mouvement des eaux. Les eaux tendent à se mouvoir en ligne droite; au milieu des sinuosités successives que présente souvent le cours d'une rivière, *le fil de l'eau*, ou le filet doué de la plus grande vitesse, va choquer alternativement l'une et l'autre rive, et on dit assez habituellement qu'il s'y réfléchit, ou que les deux rives se le renvoient alternativement. Cette manière de s'exprimer n'est pas complètement exacte. L'eau n'étant pas un fluide élastique, ne se réfléchit pas après le choc. Le courant, après avoir choqué une rive, tend à la suivre si elle est rectiligne, et il la suit encore plus exactement si elle est concave, auquel cas il éprouve à chaque pas un petit choc qui le dévie. Mais lorsque la rive cesse d'être concave, pour devenir convexe, le courant, en vertu de sa tendance à se mouvoir toujours en ligne droite, s'en éloigne suivant la dernière tangente de la partie concave, et va bientôt choquer la rive opposée, à l'égard de laquelle il se conduit suivant les mêmes lois.

Les serpentements des rivières, si capricieux en apparence, résultent donc en principe de la tendance du courant à suivre la ligne droite. La fig. 5, pl. II, suffit pour faire comprendre cette espèce de paradoxe : le courant vient choquer toutes les parties concaves des berges et y déterminer des éboulements. En dégradant continuellement la rive concave, il en augmente graduellement la courbure, et de là

Tendance
des rivières à
serpenter.

Mécanisme
par lequel elles
produisent leurs
méandres.

ces *méandres*, si habituels aux cours d'eau qui parcourent des plaines alluviales, et dont ils travaillent sans cesse à augmenter la courbure.

En agissant inégalement sur ses deux rives, une rivière finit non-seulement par déplacer son lit, mais aussi par en augmenter le développement en le rendant sinueux, et par là elle change un peu son niveau, quoique toujours entre des limites assez étroites, géologiquement parlant.

En donnant
à leur lit une
forme serpentine,
les
rivières l'allongent
et tendent à
élever leur niveau.

«Lorsqu'une rivière coule dans une vaste plaine, dont le sol est peu incliné, la fraction de la gravité $g \sin i$ (page 123), qui meut la masse fluide, est petite; cette masse a moins de force pour vaincre les obstacles qui s'opposent à la direction qu'elle tend à prendre, direction qui est la ligne de plus grande pente du plan sur lequel se fait l'écoulement. Le moindre obstacle, un peu de dureté ou de ténacité, par exemple, dans le terrain qui se trouve sur cette direction, portera la rivière à en dévier. Elle se jettera tantôt d'un côté, tantôt d'un autre; son cours présentera des divagations, des détours continuels, lesquels, augmentant la longueur du lit sur une même pente absolue, diminueront la pente relative et par suite la vitesse. La masse fluide s'écoulant moins vite, sa largeur et sa hauteur augmenteront, et il pourra en résulter des inondations et des dommages, qu'on n'aurait pas eus si la direction du lit se fût continuée en ligne droite.»

Généralement, les effets de ce genre n'ont eu que peu d'efficacité pour changer d'une manière permanente le niveau des vallées, puisque nous voyons les rivières continuer à passer sous des

ponts sous lesquels elles passaient du temps des Romains.

« Quelquefois, lorsque le cours d'eau n'est pas considérable, et que la nature ainsi que la disposition du terrain le permettent, on entreprend de redresser son lit.¹ » Il ne serait pas aussi facile de redresser les écarts d'un grand fleuve; mais souvent il se rectifie lui-même par la simple continuation de l'action même qui l'a rendu sinueux, c'est-à-dire en coupant les isthmes qui séparent les méandres.

Ces effets
se limitent
d'eux-mêmes.

La fig. 5, pl. II, montre, en effet, comment l'augmentation progressive de la courbure des méandres finit par les rapprocher, par les unir, par les faire disparaître, en les remplaçant par des îles. L'intervalle entre deux courbures, *ab*, *cd*, aminci par degrés, finit par être coupé; il y a alors une sorte de débâcle, un déversement latéral, que les hydrauliciens d'Italie désignent par le nom de *salto*², et il se forme une île. Telle est l'origine d'une partie des *îles* que présentent les rivières; telle est aussi l'origine des *morts-bras* remplis d'eau stagnante, qu'on observe dans un grand nombre de vallées.

Coupure
des méandres.

Production
des îles, des
morts-bras.

L'étude des terrains d'alluvion qui accompagnent la plupart des rivières, éclairciront ce que je viens d'indiquer. La Seine, la Moselle, la Garonne, le Rhône, en approchant de la Camargue, en offrent des exemples frappants. Il en est de même du Rhin dans la partie où ses eaux ralentissent leur cours, entre Mannheim et Mayence, avant de se préci-

Exemples fournis
par
diverses rivières.

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 164.

2. Elia Lombardini, *Sistema idraulico del Po*, page 12.

piter à travers le Taunus par le défilé du Bingerloch.

Mais le mécanisme par lequel les rivières changent de position dans l'étendue du fond plat créé par leurs alluvions mêmes, ne peut pas se déployer d'une manière également efficace dans toutes les vallées. Les rivières qui serpentent le plus sont généralement celles qui coulent au milieu des terrains d'alluvions. Il y a des vallées dans lesquelles les pentes des deux berges de la vallée arrivent jusqu'à la rivière; alors celle-ci ne serpente pas aussi facilement, et elle est généralement bien moins sinueuse qu'une rivière qui coule sur un fond plat.

Les rivières qui serpentent le plus sont celles qui coulent au milieu des alluvions.

Les rives concaves sont plus abruptes et la rivière y est plus profonde.

Dans une rivière qui serpente, il y a toujours un côté plus profond que l'autre. La tendance des eaux à se mouvoir en ligne droite, fait que le courant se porte constamment sur la rive concave; «il y exerce son action destructive, et y donne lieu à une grande profondeur, tandis que les dépôts et atterrissements se font au pied de la berge opposée.¹» La rivière sape continuellement une de ses rives; elle fait ébouler les terres, ce qui rend la rive abrupte, et non-seulement elles les entraîne, mais elle creuse même le lit au pied de l'escarpement qu'elle a fait naître. La rive convexe, dont le courant tend sans cesse à s'écarter, se trouve dans le même cas que si elle était protégée par un abri; elle a une pente douce, et c'est là que les dépôts d'alluvion se déposent de préférence.

Les rives convexes sont en pente douce; c'est là que les alluvions se déposent.

1. D'Aubuisson de Voisins, Traité d'hydraulique, page 165.

L'action érosive que le courant exerce sur les rives qu'il vient choquer et raser, tient surtout à ce que, dans l'état ordinaire, les rives ne sont en contact qu'avec de l'eau animée d'une faible vitesse, tandis que lorsque le courant s'y porte, elles sont frottées par de l'eau animée de la vitesse *maximum* de la rivière.

Nous avons déjà vu, page 125, comment l'eau attaque le fond de la rivière, et y creuse des gouffres lorsque la vitesse y devient plus grande qu'elle ne l'est ordinairement, ce qui a lieu quelquefois par une sorte de serpentement dans le plan vertical. Le serpentement horizontal dont nous analysons les résultats, donne lieu à des effets analogues.

Mais les sinuosités que peut présenter le cours d'une rivière, ne sont pas les seules causes qui déterminent le courant à se porter tantôt vers une rive, tantôt vers l'autre, et à les dégrader. Ces serpentements sont aussi déterminés par les obstacles et par les irrégularités que la rivière fait naître dans le fond de son lit, soit en y produisant des dépôts de vase ou de sable pendant les eaux basses ou moyennes, soit en le dégradant pendant les hautes eaux. Ces irrégularités dévient souvent le courant et le portent, soit vers une rive, soit vers l'autre. Une rivière qu'on fait couler librement dans un canal rectiligne et d'une section uniforme, finit presque toujours par y serpenter, et sa profondeur y devient irrégulière.

Causes diverses
qui peuvent
déterminer
le courant
à se porter
tantôt
vers une rive,
tantôt
vers l'autre.

Les rivières navigables, ainsi que l'a remarqué un de nos plus habiles ingénieurs, M. Dausse, présentent en général, en basses eaux, indépendam-

ment des grandes divisions de pentes et de caractères différents que nous y avons déjà signalées, une alternative de longs biefs où la vitesse est très-faible et la profondeur suffisante pour la navigation, et de *maigres* en hauts-fonds, ordinairement de peu d'étendue, sur lesquels l'eau est rapide et en même temps peu profonde. A moins que les rivières ne charrient abondamment (comme la Loire, dont le fond de sable aride est presque aussi variable que la surface de ses eaux, et comme le Rhin, le Rhône, la Durance et autres rivières torrentielles), la place, sinon la forme de ces hauts-fonds, est fixe. Lorsque le courant passe d'une rive à l'autre, il se forme toujours un haut-fond au point d'inflexion : cela se conçoit parfaitement d'après ce que nous avons vu précédemment. On comprend également que ce haut-fond soit d'autant plus prononcé en général, que le passage du courant d'une rive à l'autre est plus brusque.

Hauts-fonds
qui se forment
aux points
où le courant
se porte
vers l'une ou
l'autre rive.

Gués.

Quelles que soient au surplus les causes qui produisent les hauts-fonds, c'est là que se trouvent les *gués*, où on voit si souvent des cavaliers, des voitures et même des armées traverser les rivières sans se servir de ponts ni de bateaux. Les moins profonds ne présentent pas plus de 0,^m40, 0,^m30 et même 0,^m25 en basses eaux, pour la plupart de nos rivières, et 0,^m60 à 0,^m80 ou 1 mètre pour les principales. ¹

Relation intime
entre la forme
du fond
de la vallée
et le régime de la
rivière.

Les transports de matières terreuses, les déblais et les remblais successifs par lesquels chaque rivière

1. Dausse, Projet de barrages à Grands-Pertuis, présenté à l'Académie des sciences en 1836.

a façonné le fond de sa vallée, ont nécessairement donné à ce fond une forme dépendante du régime de la rivière; de telle sorte que le régime de la rivière étant connu, on pourrait prévoir la forme que présentera le fond de sa vallée, et que de l'examen du fond de la vallée on pourrait conclure aussi, et peut-être plus sûrement encore, le régime de la rivière.

L'étude de quelques vallées et des rivières qui les parcourent, nous permettra bientôt de vérifier la justesse de cette remarque; mais nous ne pourrions y parvenir complètement sans nous être rendu un compte plus détaillé, que nous ne l'avons encore fait, de ce qui caractérise le régime de chaque rivière, et de ce qui les différencie, sous ce rapport, les unes des autres.

Cette branche de l'hydraulique n'est parvenue que récemment à un état satisfaisant, dont on est surtout redevable aux travaux de M. Dausse, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

On a pensé, pendant longtemps, qu'on avait des notions suffisantes sur une rivière lorsqu'on connaissait les données que je vous ai déjà présentées pour un grand nombre d'entre elles: les hauteurs de ses crues; celles de ses eaux les plus basses ou de ses plus bas étiages; celles de ses eaux moyennes. Le célèbre astronome Lalande, dans un *Mémoire sur les variations du niveau de la Seine*, imprimé parmi ceux de l'Académie des sciences pour 1788, définissait la hauteur moyenne d'une rivière, celle qui, multipliée par le nombre des jours de l'année, donne un produit égal à celui de toutes les hauteurs journalières multipliées chacune par un jour.

Nécessité
d'étudier plus
complètement
le régime des
rivières.

Recherches
de M. Dausse.

Il a introduit
dans l'étude des
rivières
une
notion nouvelle,
celle de la *tenué*.

On croyait, faute d'une étude assez attentive, que cette hauteur était celle à laquelle la rivière se tenait le plus souvent. M. Dausse ayant réuni et discuté, pour la Seine d'abord¹ et ensuite pour nos autres rivières, les observations hydrométriques, faites par ordre de l'administration, et dont on n'avait pas encore tiré tout le parti possible, a été conduit à en déduire une notion toute nouvelle et inconnue avant lui, celle de la *tenué* ou du nombre de jours que la rivière se tient, année moyenne, à chacune des hauteurs auxquelles elle peut couler entre ses plus basses eaux et ses plus grandes crues.

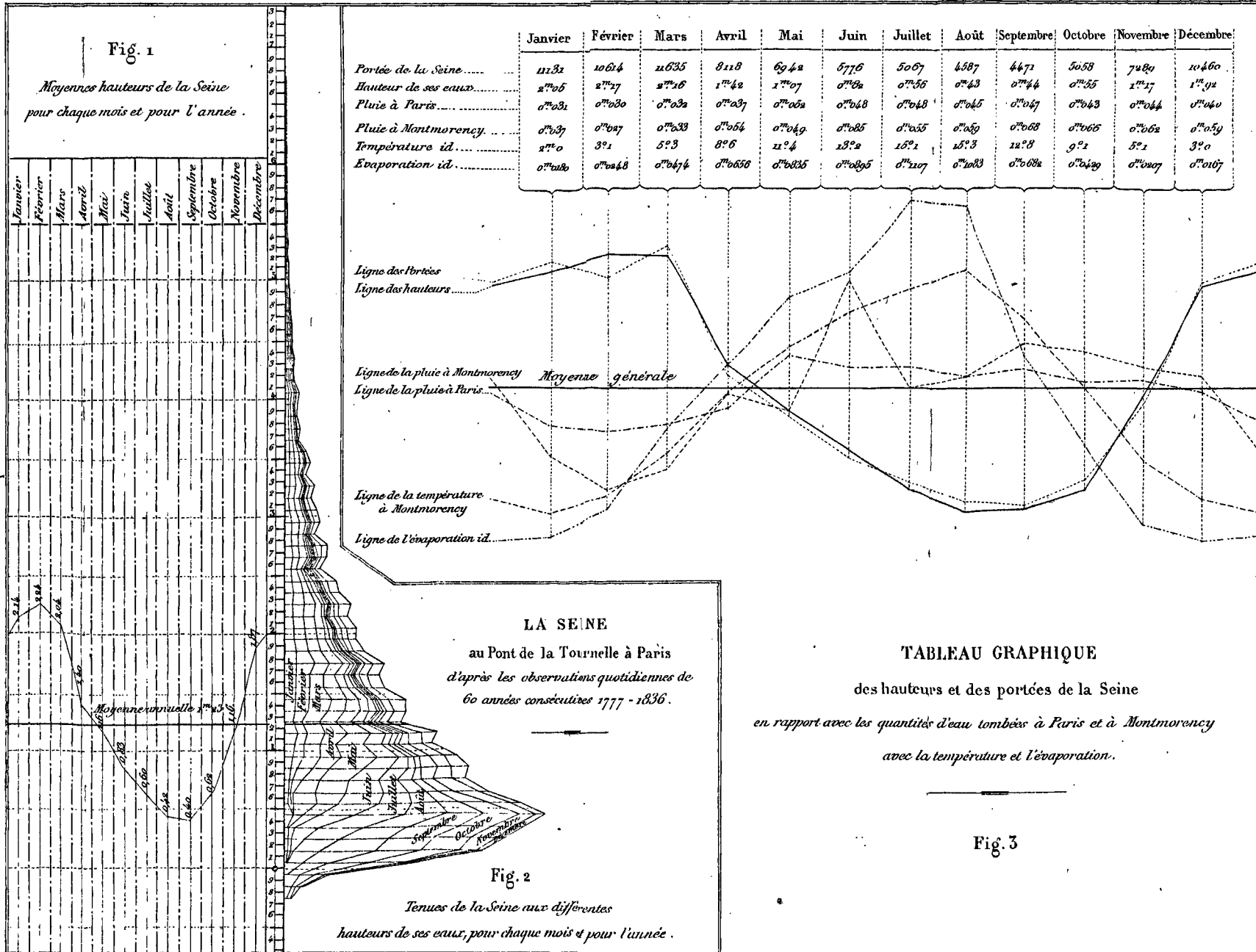
Aperçu général
de ses travaux.

Pour chaque lieu d'observation, M. Dausse a formé : 1.° Un tableau des hauteurs moyennes mensuelles et annuelles des eaux; 2.° un tableau de leurs *tenués* moyennes de décimètre en décimètre, pour chaque mois et pour l'année; et pour mettre facilement en œuvre ces divers éléments, il a eu recours à des constructions graphiques, dont les figures 1 et 2 des planches III et IV, que M. Dausse a bien voulu me permettre de copier en les réduisant, suffiront pour donner une idée.

Courbe
des hauteurs de la
rivière.

Il a d'abord tracé, pour chaque lieu d'observation, une courbe dont les ordonnées, qui représentent les hauteurs moyennes des mois, sont séparés par des intervalles qui représentent les durées des douze mois. Cette *courbe des hauteurs de la rivière*, à la station que l'on considère, s'élève et s'abaisse alternativement au-dessus et au-dessous de la ligne

1. Dausse, Mémoire adressé à feu M. le baron de Prony, le 13 juillet 1828, pour être remis à l'Académie des sciences. — Ce mémoire a été présenté à l'Académie le 19 juillet 1830.



Croquis par Kautz, n Bonaparte 82, Paris.

Publié par J. B. BAILLIÈRE et fils.

Lith. Boquet, r. des Mages 37, Paris.

horizontale qui répond à la hauteur moyenne, de manière à ce que ses élévations au-dessus de cette ligne et ses abaissements au-dessous d'elle, déterminent des aires égales. On voit sur-le-champ, à l'inspection de cette courbe dont l'idée, au reste, n'est pas nouvelle, quels sont les mois, les saisons, pendant lesquels la rivière se maintient au-dessus ou au-dessous des eaux moyennes.

Mais cette courbe, qui n'est construite que d'après des moyennes mensuelles, dont le calcul efface déjà une grande partie des variations du niveau de la rivière, ne donne pas une idée complète des oscillations du niveau des eaux. On conçoit, en effet, que, si dans les oscillations qui fournissent la hauteur moyenne de chaque mois, la rivière se rapprochait très-souvent d'un certain niveau, ce niveau qui disparaît dans les moyennes mensuelles, serait très-important à connaître. Aussi, en discutant la marche des variations de la hauteur, M. Dausse a bientôt reconnu que la grandeur des oscillations du niveau de l'eau autour de la position moyenne, ne donne qu'une idée imparfaite du régime de la rivière; il ne suffit même pas de connaître la hauteur moyenne de la rivière à une certaine époque de l'année, il faut encore savoir pendant combien de jours de l'année elle se maintient à chaque niveau. C'est en faisant intervenir ainsi le temps, la durée, que M. Dausse a été conduit à la considération d'un *élément nouveau*, la *tenue*.

La *tenue* d'une rivière, à une certaine hauteur, est le nombre de jours de l'année moyenne, pendant lesquels la rivière se trouve à cette hauteur

Ce qu'elle laisse
à désirer
pour
la connaissance
du régime
de la rivière.

Tenue.

Tenue
de chaque mois.

ou s'en rapproche beaucoup. La tenue d'un mois à une certaine hauteur de l'échelle hydrométrique, est le nombre de jours de ce mois pendant lesquels la rivière se maintient, année moyenne, à cette

Tenue de l'année.

hauteur. La tenue de l'année, à la même hauteur, est la somme des tenues des 12 mois dont elle se compose.

Remarques
au sujet
de la tenue.

Toute rivière croît et décroît sans cesse, ne s'arrêtant jamais à aucun état tout à fait fixe. Parmi ces états constamment divers, il y en a qui reviennent plus souvent et qui persistent plus longtemps que les autres. Il y a un état particulier où l'on voit plus souvent la rivière qu'à tout autre. L'état journalier de la rivière pendant une année pourrait, de même que son état mensuel moyen, être représenté par une courbe; mais cette courbe présenterait une multitude d'oscillations autour de la moyenne de l'année à laquelle elle se rapporterait, une multitude de points minima et maxima, correspondant aux jours de l'année auxquels elle aurait commencé à croître ou à décroître. Sur le plan de cette courbe on pourrait tracer, depuis les plus basses eaux jusqu'aux plus hautes, des lignes de niveau équidistantes et très-rapprochées. Le temps pendant lequel la surface de la rivière aurait été comprise entre deux quelconques de ces lignes, serait représenté par la longueur des projections des arcs de la courbe des variations journalières, compris eux-mêmes entre ces lignes. L'intervalle pour lequel la somme de ces projections se trouverait la plus grande, serait celui dans lequel la surface de la rivière serait revenue le plus souvent, qui correspondrait à son état le plus

habituel pendant l'année qu'on aurait considéré.

C'est d'après ces notions, appliquées non à une année en particulier, mais à toute la série des années pour lesquelles il avait des observations journalières, que M. Dausse a formé le tableau des *tenues* moyennes des mois et de l'année dans chaque station.

Tableau
des tenues

Il a rendu ces derniers résultats sensibles par une construction graphique, dont la figure 2, pl. III, et la figure 2, pl. IV, suffiront pour donner une idée. M. Dausse trace, comme l'indiquent ces figures, une ligne verticale, divisée en décimètres depuis les plus basses jusqu'aux plus hautes eaux; il mène par un des points de division une horizontale, sur laquelle il porte, à la suite l'une de l'autre, les tenues moyennes des mois pour la hauteur correspondante. Il fait la même chose pour les autres points de division; il joint de proche en proche les extrémités de toutes les lignes horizontales, et il a la *courbe des tenues de l'année*. Joignant ensuite les points de division correspondants des horizontales, il obtient d'autres courbes, dont les distances respectives représentent les *tenues des différents mois*.

Courbe
des tenues

En examinant ces courbes et en les comparant à celle qui représente la marche graduelle des hauteurs mensuelles, on acquiert une idée complète des oscillations du niveau d'une rivière.

Une des choses qui font le mieux ressortir l'exactitude de cette manière d'analyser les phénomènes que présentent les rivières, c'est la similitude des résultats qu'on obtient lorsqu'on y soumet des rivières différentes, considérées dans des circonstances

comparables entre elles. M. Dausse a construit les courbes qui représentent, pour les mêmes séries d'années, les hauteurs mensuelles et les tenues de la Seine à Paris et celles de la Loire à Amboise et à Saumur. Les deux rivières ont dû éprouver chaque année les effets de phénomènes météorologiques généralement analogues, et les courbes qui représentent leurs variations, construites à la même échelle sur une même feuille de papier, se suivent les unes les autres avec une persistance frappante. Les variations du niveau de la Saône ont aussi de grands rapports dans des séries d'années correspondantes avec les variations du niveau de la Seine.

La courbe
des
tenues annuelles
présente souvent
plusieurs
renflements.

Pour beaucoup de rivières, la courbe des tenues annuelles présente plusieurs renflements, ce qui indique plusieurs tenues maxima, à différentes hauteurs, ou plusieurs niveaux auxquels la rivière revient avec une sorte de prédilection. Lorsqu'il en est ainsi, l'une des tenues maxima correspond ordinairement à des eaux très-basses, et une autre à des eaux plus voisines de la hauteur moyenne. Deux de ces tenues maxima sont quelquefois sensiblement égales entre elles; mais nous n'avons pas besoin d'entrer dans la discussion de ces cas particuliers.

Il y a
presque toujours
une tenue
plus longue que
toutes les autres,
qui est l'état
le plus habituel
de la rivière.

Le fait général important c'est que pour la plupart des rivières il existe une tenue plus longue que toutes les autres. Cette *plus longue tenue* indique l'état le plus habituel de la rivière, sinon son état le plus naturel.

La
plus longue tenue
peut être

Le niveau de la plus longue tenue peut être, suivant la nature des rivières, en eaux basses ou

en eaux moyennes; il peut être inférieur, égal ou même supérieur au niveau moyen : pour la Seine, par exemple, et en général pour la plupart des rivières, il est en eaux basses. Pour la Seine, il correspond à la cote 0,^m45 de l'échelle hydrométrique du pont de la Tournelle, tandis que le niveau moyen correspond à la cote 1,^m23; c'est-à-dire que le niveau de la plus grande tenue est moins des $\frac{2}{5}$ de celui de la hauteur moyenne.

Dans les courbes tracées comme nous l'avons dit ci-dessus, on voit se peindre aux yeux, pour ainsi dire, la courte durée des hautes eaux et des étiages très-bas, les limites dans lesquelles il est prudent de renfermer la navigation, la hauteur à laquelle il est convenable d'établir les ports de déchargement, les chemins de halage et autres ouvrages d'art qui n'ont pas besoin d'être insubmersibles. La hauteur de la plus longue tenue est plus importante que la hauteur moyenne pour la navigation, qui a besoin de connaître la hauteur à laquelle la rivière revient un plus grand nombre de fois dans l'année, et sur laquelle elle a le plus droit de compter.

La combinaison des deux éléments essentiels, la tenue et la hauteur correspondante, a conduit M. Dausse à des résultats inattendus pour les rivières qu'il a étudiées. Cet habile ingénieur a montré qu'elles sont bien meilleures pour la navigation qu'on ne le suppose généralement; que les ressources qu'elles nous offrent à cet égard doivent être employées directement, et qu'il ne faut plus se laisser entraîner sans réserve par ces paroles célèbres et trop souvent ré-

en eaux basse
ou
en eaux moyennes

Importance
du niveau de la
plus longue tenue
pour la navigation
et pour
les constructions
hydrauliques.

Le
régime des rivières
est plus favorable
à la navigation
qu'on ne le pense
généralement.

Fausseté de l'idée
de Brinkley,
que les rivières
ont été faites
pour alimenter les
canaux.

pétées de l'ingénieur anglais Brinkley, que *les rivières ont été faites pour alimenter les canaux.*

Influence
du niveau de la
plus longue tenue
sur tout le régime
de la vallée.

Les résultats obtenus par M. Dausse relativement aux tenues des rivières, n'intéressent pas seulement la navigation : le niveau de la plus longue tenue est celui auquel se coordonnent d'eux-mêmes une grande partie des phénomènes qui dépendent de la hauteur des eaux de chaque rivière, et sa détermination est importante non-seulement pour les constructions, mais encore pour la culture et la mise en valeur de chaque vallée.

Comment
la végétation s'y
coordonne.

Nous avons vu précédemment, dans la huitième leçon (tome I.^{er}, pag. 283 et 288), que sur les rivages de la Zélande des prairies submersibles occupent toutes les alluvions que les hautes marées ne couvrent pas assez fréquemment et assez longtemps pour y détruire la végétation aérienne. On conçoit que sur les bords d'une rivière les prairies s'étendront par les mêmes motifs jusqu'à un niveau peu supérieur à celui de la plus longue tenue; que la végétation aquatique du fond de la rivière s'élèvera aussi de son côté à peu près jusqu'au niveau de la plus longue tenue. Près de ce niveau il y aura une zone d'un caractère incertain, qui n'appartiendra ni au domaine de la végétation aérienne, ni à celui de la végétation aquatique; c'est celle qui correspond, de part et d'autre du niveau de la plus longue tenue, aux oscillations les plus fréquentes du niveau de la rivière. Cette zone est plus ou moins élevée, suivant le régime de la rivière, et nous verrons bientôt que sous ce rapport les diverses rivières présentent entre elles des différences capitales.

La partie du lit d'une rivière, qui appartient complètement au domaine de la végétation aquatique, est soumise à des conditions toutes particulières. C'est celle dans laquelle des bancs de vase s'accumulent à la faveur des abris, que les plantes aquatiques y font naître. Plus cette région est considérable, plus la rivière, toutes choses égales, est sujette à être obstruée tant par les herbes que par les vases.

Influence
de la végétation
aquatique
sur le dépôt de la
vase.

Les différences remarquables que les rivières présentent entre elles, sous le rapport de leurs tenues à diverses hauteurs, dépendent beaucoup moins de leurs pentes et de la nature des terrains qu'elles traversent, que du climat de leur bassin. La hauteur d'une rivière se règle à chaque instant d'après la quantité d'eau qu'elle a à débiter. Cette eau provient des pluies ou des neiges que le bassin a reçues, et la rivière débite à chaque instant toute la partie de ces eaux que l'évaporation n'a pas dissipée et qui n'est pas retenue par la végétation, par l'imbibition du sol et par les neiges non encore fondues. Considérées de ce point de vue général, les rivières sont des *hydromètres naturels*, dont les indications sont probablement destinées à jouer un jour un rôle important dans la météorologie. « Dans les variations de la hauteur d'une rivière, se résumant le climat et l'état de la surface terrestre, tels qu'ils sont dans toute l'étendue à la fois de leurs bassins. Les phénomènes que présentent ces variations sont ainsi, à ceux que révèlent les observations locales de la météorologie, ce que l'intégrale est à l'élément différentiel et même à l'élément de

Rapport
entre la tenue
des rivières
à
différents niveaux
et le climat
de leur bassin.

l'élément; et plus nos climats sont compliqués, plus l'appréciation de ces effets intégraux est capitale pour parvenir à distinguer, à caractériser, à définir ces climats, ces rivières, ces bassins. »¹

Importance
de
la détermination
des tenues
pour la mesure
de
la quantité d'eau
débitée
par une rivière.

Les résultats auxquels M. Dausse est parvenu sur les tenues des différentes rivières à diverses hauteurs, et sur les époques de l'année auxquelles ces tenues correspondent, fournissent déjà des remarques fort curieuses relativement aux questions que je viens de rappeler; mais en outre ils fournissent des mesures de plusieurs des effets intégraux dont je viens de parler, parce qu'ils donnent les moyens de calculer exactement, ce qu'il était impossible de faire auparavant, les volumes d'eau que débite une rivière, soit pendant toute l'année, soit pendant qu'elle se tient entre telles et telles limites de hauteur, pendant qu'elle est chargée de troubles, etc.

Débit par seconde
à une hauteur
donnée,
ou
portée élémentaire.

« M. Dausse appelle *portée* d'une rivière, le volume d'eau qu'elle débite. Sa portée par seconde est son débit pendant une seconde, sa portée intégrale par année est son débit pendant l'année. Il est clair que la portée par seconde, ou *portée élémentaire* dépend de la hauteur des eaux de la rivière au point de son cours où on la jauge, et que cette hauteur, variant sans cesse, la portée par année ou par mois, ou par crue, doit se calculer comme une intégrale. De là l'expression *portée intégrale*. »²

*
Portée intégrale.

La portée par seconde d'une rivière est égale au produit de sa vitesse moyenne par sa section. Sa

1. Dausse, Essai sur la statist. des principales rivières de France.

2. Dausse, De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau; Annales des ponts et chaussées, 1842.

vitesse moyenne est donnée comme nous l'avons vu ci-dessus, p. 112, par la formule

$$v = -0,0332 + \sqrt{2736 \frac{p s}{c} + 0,0011}.$$

En supposant à la section la forme la plus simple, c'est-à-dire celle d'un rectangle, et en nommant l la base horizontale de ce rectangle, et h sa hauteur ou la hauteur actuelle de l'eau au-dessus du fond, on a pour la mesure de la section $s = l h$, pour celle du périmètre mouillé $c = l + 2 h$, et pour celle de la portée par seconde

$$v s = l h \left\{ -0,0332 + \sqrt{2736 \frac{p l h}{l + 2 h} + 0,0011} \right\}$$

Expression
mathématique
de la portée
élémentaire.

Si la hauteur h de la rivière à une époque quelconque, t est exprimée, comme nous l'avons déjà supposé par une courbe dont l'équation serait

$$h = f(t),$$

la portée intégrale pendant le temps t aura pour expression

$$\int l f(t) \left\{ -0,0332 + \sqrt{2736 \frac{p l f(t)}{l + 2 f(t)} + 0,0011} \right\} dt.$$

De la portée
intégrale.

Mais en donnant cette expression générale, qui a du moins l'avantage d'exprimer d'une manière précise de l'objet du calcul, M. Dausse fait remarquer que la fonction $f(t)$ ne peut jamais être obtenue sous une forme assez simple, pour que l'intégrale puisse être calculée commodément. Il faut donc recourir, pour obtenir la valeur de la portée intégrale, à une méthode d'approximation. Or, la notion des tenues en fournit une très-simple, car si l'on multiplie le temps pendant lequel la surface de la rivière demeure, année moyenne, entre les divisions

Calcul
approximatif
de la
portée intégrale.

de chacun des décimètres successifs de l'échelle hydrométrique où on l'a observée, par les portées élémentaires qui correspondent à la hauteur du milieu de chacun de ces décimètres, et qu'on fasse la somme de tous ces produits, on a ainsi, avec une approximation très-suffisante, la portée intégrale cherchée. Nous verrons ci-après le tableau dressé par M. Dausse, des résultats de ce calcul appliqué à la Seine pour chaque hauteur et pour l'année entière.

Détermination
du *module*
d'une rivière.

La connaissance de la portée intégrale d'une rivière pendant l'année entière conduit immédiatement à celle de son *module*, c'est-à-dire de la quantité d'eau qu'elle débiterait par seconde, si elle n'éprouvait pas de variations dans son niveau et qu'elle débitât la quantité d'eau qu'elle débite année moyenne, en coulant toujours exactement à la même hauteur. On obtient le module en divisant la portée intégrale de l'année par 31 557 600, nombre des secondes dont l'année se compose.

Hauteur
à laquelle une
rivière devrait
couler
pour débiter une
quantité d'eau
égale
à son *module*.

La hauteur à laquelle la rivière devrait couler pour débiter une quantité d'eau égale à son module, n'est pas la hauteur moyenne. Il est aisé de comprendre qu'elle doit être un peu plus élevée que la hauteur moyenne, parce que plus la hauteur de la rivière est grande, plus la vitesse et le débit sont considérables relativement à la hauteur. En effet, pour la Seine, la hauteur moyenne annuelle, à l'échelle hydrométrique du pont de la Tournelle, est, d'après les recherches de M. Dausse, de 1^m23, tandis que la hauteur qui correspond au débit moyen ou au module, est de 1^m31. Ces deux hauteurs différentes l'une de l'autre, diffèrent aussi de

la hauteur de la plus longue tenue, qui pour la Seine est, d'après M. Dausse, de 0,^m45.

Ces trois hauteurs, la *hauteur de la plus longue tenue*, la *hauteur moyenne* et la *hauteur du débit moyen* changent de rapport d'une rivière à une autre, et ce changement de rapport est une conséquence et une manifestation de la diversité de leurs régimes.

La hauteur de la plus longue tenue, la hauteur moyenne, et la hauteur du débit moyen, sont généralement différentes.

M. Dausse s'est occupé de la détermination de ces hauteurs et particulièrement de celle de la plus longue tenue, qui est la plus utile à connaître, et il en a fait l'objet d'un grand travail intitulé : *Essai sur la statistique des principales rivières de France*, auquel l'Académie des sciences a décerné, dans sa séance du 13 juillet 1840, le prix de statistique fondé par M. de Monthyon.¹

Objet général des travaux de M. Dausse.

Les observations comparées avec une rare sagacité et avec une patience également admirable par cet habile ingénieur, sont celles qui ont été recueillies par les soins de l'Administration :

Données qu'il a élaborées.

	années.
Sur la Seine, à Paris,	pendant 60
Sur la Somme, à Picquigny,	— 15
Sur la Loire, à Digoin,	— 20
— — à Amboise,	— 22
— — à Saumur,	— 15
Sur la Garonne, à Toulouse,	— 28
Sur le Rhône, à Genève,	— 20
— — à Lyon,	— 12
Sur la Saône, à Saint-Symphorien,	— 18

1. Le travail de M. Dausse était composé de cinq Mémoires, présentés successivement à l'Académie en 1830, 1831, 1832, 1833 et 1839.

	années.
Sur la Saône, à Châlons,	pendant 22
— — à Lyon,	— 12
Sur le Doubs, à Dôle,	— 22
Sur le Rhin, à Bâle,	— 26
— — à Kehl,	— 26
— — à Lauterbourg,	— 10
Sur la Meuse, à Mézières,	— 7
— — à Liège,	— 10
Sur le Tarn, à Moissac,	— 5
Sur le Lot, à Cahors,	— 5
Sur le Maine, à Angers,	— 3
Sur l'Isère, à Grenoble,	— 2
	<hr style="width: 10%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> 360

En tout 360 années d'observations, exécutées dans 23 stations différentes, sur 13 grandes rivières.

M. Dausse a fait aussi, d'après le même plan, le dépouillement des deux années d'observations hydrométriques, faites sur le Nil, au Caire, pendant l'expédition de l'armée française en Égypte, de 1799 à 1801.

Il s'est également occupé des fleuves de l'Italie.

Il distingue
dans les rivières
deux types
principaux.

Quel que soit l'intérêt qui s'attache à des résultats établis sur d'aussi larges bases, il nous est impossible de les suivre dans tous leurs détails : mais au milieu des nombreuses différences individuelles que M. Dausse a constatées entre les rivières qu'il a comparées, il a su distinguer deux types principaux :

Rivières
qui proviennent
de plateaux ou de
collines
peu élevés.

1.° Celui des rivières qui proviennent de plateaux ou de collines peu élevés au-dessus des mers, ou non susceptibles de conserver longtemps des neiges. Celles-ci sont les plus nombreuses, et la Seine en présente un des exemples les plus réguliers.

2.^o Celui des rivières alpines, qui reçoivent pendant toute l'année et surtout en été, les eaux provenant de la fusion des neiges accumulées dans les montagnes. Le Rhône, à Lyon, en offre un excellent exemple.

Rivières alpines

Nous nous bornerons à faire connaître les conclusions principales, auxquelles M. Dausse a été conduit, d'une part pour la Seine, à Paris, et de l'autre pour le Rhône, à Lyon, et pour les autres rivières alpines.

La Seine, à Paris, a un *état de plus grande tenue* très-remarquable, qui, ainsi que nous l'avons déjà dit, correspond, non pas à la hauteur moyenne de ses eaux, comme Lalande l'avait exprimé dans son Mémoire imprimé parmi ceux de l'Académie des sciences pour 1788, mais seulement aux $\frac{2}{5}$ de cette hauteur mesurée, à partir de 0 de l'hydromètre du Pont de la Tournelle.

La Seine à Paris

La plus longue tenue de la Seine correspond à la hauteur de 0,^m45, mesurée à cet hydromètre; la hauteur moyenne à 1,^m23 de la même échelle.

Hauteur de la plus longue tenue.

Ces nombres ne peuvent être déduits avec exactitude, que d'observations longtemps continuées.

La moyenne hauteur de la Seine, à l'hydromètre du pont de la Tournelle, pour les 24 dernières années du 18.^o siècle, est, d'après M. Dausse, de 1,^m21, pour le quart de siècle suivant 1,^m29, pour les 49 années 1777—1825, de 1,^m25, et pour les 60 années 1777—1836 de 1,^m23. On voit par là que 60 années d'observations sont à peine suffisantes pour obtenir une moyenne invariable, et on peut ajouter que les eaux les plus hautes et les étiages les plus bas

de la Seine sont antérieurs à 1777, et séparés par de longs intervalles. Cependant on voit aussi par les calculs de M. Dausse, qu'un quart de siècle d'observations donne déjà des moyennes très-approchées de la vérité, et auquel il ne manque plus, pour ainsi dire, que le dernier degré de l'exactitude, degré qui, en toutes choses, est très-long à atteindre.

La Seine s'écarte quelquefois beaucoup de sa hauteur moyenne et de celle de sa plus longue tenue ; mais elle ne se tient jamais que pendant très-peu de temps aux niveaux extrêmes, surtout au niveau des grandes crues, qui sont toujours très-passagères.

La plus grande
crue connue.

La plus grande crue connue de la Seine est celle du 11 juillet 1615¹, qui s'est élevée à l'échelle hydrométrique du pont de la Tournelle à 9^m04.

Le plus bas étiage
connu.

Le plus bas étiage de la Seine dont on ait conservé le souvenir, est celui du 6 janvier 1767, où elle était au même hydromètre à — 0,27.

Amplitude totale
de ses
oscillations.

La différence entre ces deux niveaux, c'est-à-dire l'amplitude totale des oscillations de la Seine, est de 9^m31, amplitude qui doit paraître considérable si on considère qu'elle est égale à plus du tiers de la hauteur *o* de l'échelle du pont de la Tournelle au dessus du niveau de la mer, hauteur qui est d'environ 25 mètres.

La crue et l'étiage extraordinaires que nous venons de rapprocher ont été des anomalies singulières, et pour en être convaincu, il suffit de remarquer que la crue est arrivée en juillet et l'étiage en janvier. La courbe tracée d'après M. Dausse, fig. 1,

*
1. Delile, Histoire de l'Académie pour 1720.

planche III, pour représenter les variations des crues de la Seine, annonce que ses crues et ses étiages ont lieu généralement dans d'autres mois.

En effet, les grandes crues de la Seine ont été observées dans les 7 mois compris de novembre à mai et de beaucoup fréquemment en janvier; mais les crues moins fréquentes des autres mois sont souvent plus grandes que celles de janvier. Le mois pendant lequel la Seine s'est tenue moyennement le plus haut, dans le cours des 49 années de 1777 à 1825, a été février; janvier, mars et décembre viennent après sous ce rapport; mais le mois pour lequel la moyenne des maxima mensuels est la plus grande, est janvier, et c'est aussi celui pour lequel cette moyenne des maxima diffère le plus de celle des minima, c'est-à-dire le mois des plus grandes oscillations de la rivière, précisément parce que c'est celui où les plus grandes eaux annuelles qui sont toujours très-passagères, comme toutes les crues quelconques arrivent ordinairement. ¹

L'étiage a été observé dans les 8 mois compris de juin à janvier, le plus fréquemment en septembre, qui est le mois où la moyenne des étiages est la plus basse, et qui peut être appelé le mois d'étiage.

La fig. 1, pl. III, fait connaître plusieurs autres propriétés de la Seine.

Les époques de ses plus rapides transitions d'un niveau moyen élevé à un niveau moyen inférieur et réciproquement, tombent moyennement dans la dernière quinzaine de novembre et de mars à avril.

1. Dausse, Statistique des variations du niveau de la Seine (1831), p. 6.

Ce niveau a, au contraire, le plus de fixité d'août à septembre.

C'est ordinairement d'avril à mai que la rivière se tient le plus près de sa hauteur moyenne; il est remarquable que ce soit aussi à peu près l'époque de l'année où la température atmosphérique approche le plus de sa valeur moyenne.

La Seine ne se tient que 41 jours, année moyenne, hors des limites où la navigation est possible.

Quoique la Seine éprouve quelquefois plusieurs crues ou plusieurs étiages par année, il est rare qu'elle se tienne longtemps de suite à un niveau très-éloigné de celui de sa plus longue tenue; car M. Dausse a montré que la Seine, au-dessous de Paris, n'est réellement que 41 jours, année moyenne, en dehors des limites entre lesquelles elle est réputée navigable, de sorte que la navigation y chôme, année moyenne, moins longtemps que dans les canaux¹, où la durée moyenne du chômage est de 50 jours.

Débit de la Seine en basses eaux, en hautes eaux.

La Seine qui a sous le pont de la Concorde, à Paris, un débouché libre de 127 mètres de largeur, débite dans ses plus basses eaux 74 mètres cubes, et dans ses plus hautes eaux 1384 mètres cubes par seconde, c'est-à-dire à peu près vingt fois plus dans le second cas que dans le premier.²

A la hauteur de sa plus longue tenue.

A son état de plus longue tenue, qui correspond à la hauteur de 0^m 45 à l'échelle du pont de la Tourne-elle, la Seine débite 145 mètres cubes par seconde.

Débit moyen ou module de la Seine.

D'après les calculs de M. Dausse, le débit moyen ou module de la Seine est de 250 mètres cubes par

1. Dausse, Statistique des variations du niveau de la Seine à Paris (1831), p. 12.

2. Dausse, Mémoire sur la Seine, du 13 juillet 1828, cité par M. Arago, dans l'Annuaire du Bureau des longitudes pour 1835.

seconde, et correspond à l'hydromètre du pont de la Tournelle à une hauteur d'eau de 1,^m31, un peu plus forte que la moyenne hauteur annuelle, qui est de 1,^m23, hauteur à laquelle correspond un débit d'environ 239 mètres cubes par seconde. Le débit moyen donne en un jour 21 561 195 mètres cubes, et en un an 7 875 226 512 mètres cubes.

Hauteur
de la rivière
à laquelle
il correspond.

Pour les 49 années comprises de 1777 à 1825, la hauteur de la crue moyenne de la Seine a été de 4,^m54, la portée qui correspond à cette hauteur, est de 723,^m25 par seconde.

Les crues de la Seine sont tellement passagères, qu'elles ont moins d'influence que les étiages sur la quantité d'eau qu'elle porte à la mer, dans une année déterminée. En effet, il résulte des calculs de M. Dausse, que les années où la Seine a porté le moins et même le plus d'eau à la mer, sont celles des plus bas et plus hauts étiages; mais non pas que celles où ce tribut a été le plus grand, soient les années des plus grandes crues.¹

Les
crues de la Seine
sont passagères;
elles influent
moins que les
étiages
sur le débit total
de l'année.

Le tableau suivant est extrait d'un tableau beaucoup plus étendu, qui fait partie du grand travail de M. Dausse, *Sur la statistique des principales rivières de France*, et qui indique les portées de la Seine par seconde, pour les hauteurs qui correspondent au milieu de chaque décimètre de l'échelle hydro-métrique du pont de la Tournelle, ainsi que les portées intégrales pendant les différents mois de l'année et pendant l'année entière.

Tableau
des
portées intégrales
de la Seine
pour chaque mois
et pour
l'année entière.

1. Dausse, *Statistique des variations du niveau de la Seine*, 5 décembre 1831, p. 3.

TABLEAU

des tenues et des portées de la Seine pour chaque décimètre de l'échelle du pont de la Tournelle.¹

Échelle hydrométrique du pont de la Tournelle.		Portée par seconde, correspondant au milieu de chaque décimètre numéroté à l'échelle.		Tenue moyenne pour chaque décimètre, exprimée en jours et fractions de jour.		Produit de la portée par seconde par la tenue exprimée en secondes.			
6 ^m	8	1062 m ^c	0.033	3027974 m ^c	3 ^m	529 m ^c	2.635	120434256 m ^c	
	7	1047	0.033	2985206		2	513	2.566	113733331
	6	1031	0.033	2939587		1	499	2.366	102006778
	5	1015	0.067	5875632		9	484	2.334	97602278
	4	1001	0.100	8648640		8	469	2.832	114757171
	3	985	0.067	5701968		7	454	3.333	130738925
	2	971	0.066	5537030		6	440	3.567	135603072
	1	957	0.133	10997079		5	425	3.965	145594800
	9	941	0.033	2682979		4	411	4.533	160968643
	8	925	0.033	2637360		3	397	5.300	181794240
5 ^m	8	910	0.099	7783776	3	382	5.566	183704717	
	7	896	0.133	10296115	2	368	5.099	162123725	
	6	880	0.200	15206400	1	352	7.701	234208973	
	5	864	0.066	4926874	9	339	7.167	209918563	
	4	849	0.201	14744074	8	324	7.934	222101222	
	3	833	0.167	12019190	7	310	9.333	249975072	
	2	814	0.366	25740634	6	296	9.432	241217741	
	1	801	0.333	23045731	5	282	9.766	237946637	
	9	788	0.301	20493043	4	268	11.100	257022720	
	8	774	0.567	37917331	3	255	10.634	234288288	
4 ^m	8	760	0.599	39332736	2	242	12.632	264119962	
	7	741	0.767	49105181	1	229	13.766	272368570	
	6	725	0.700	43848000	9	217	14.733	276226070	
	5	708	0.566	34622899	8	204	14.566	256734490	
	4	692	1.133	67740710	7	192	15.067	249943450	
	3	675	0.599	34933680	6	180	16.933	263342016	
	2	658	1.033	58727290	5	169	18.234	266245574	
	1	652	1.266	71317325	4	157	18.367	249144682	
	9	637	0.866	47661869	3	145	22.533	282293424	
	8	621	1.334	71574970	2	135	17.666	20.56224	
3 ^m	7	605	0.934	48822048	1	125	20.601	222490800	
	6	591	1.266	64644998	9	114	20.867	205531603	
	5	575	1.933	96031440	8	104	15.767	141675955	
	4	559	1.867	90171619	7	94	5.467	44400787	
	3	543	1.899	89091965	6	85	1.100	8078400	
	2				5				
Totaux..		365.256	7875226512 m ^c						

1. Le lecteur remarquera que ce tableau est formé de deux moitiés, qui doivent être placées par la pensée l'une au-dessous de l'autre.

Le tableau précédent n'est qu'un extrait de celui que M. Dausse a calculé. Le tableau complet contient mois par mois la portée de la Seine pour chaque hauteur, ce qui donne une idée beaucoup plus exacte de son régime. Je regrette que l'étendue de ce tableau ne me permette pas de l'insérer ici, mais il y a lieu d'espérer qu'il sera publié prochainement avec tout l'ensemble des travaux de M. Dausse.

De pareils travaux sont susceptibles d'une multitude d'applications utiles.

On sait que la Seine est généralement limpide en eaux basses et trouble dans les crues. A chaque hauteur elle contient une certaine quantité moyenne de matières terreuses en suspension, qui pourrait être déterminée par une série d'expériences semblables à celles que M. Fournet a faites à Lyon pour le Rhône et pour la Saône, et dont les résultats ont été consignés ci-dessus, page 53. Si ces moyennes étaient connues, on pourrait, à l'aide du tableau précédent, calculer la quantité totale de troubles que la Seine porte annuellement à la mer. On peut espérer que dans peu d'années, ce calcul aura été fait pour toutes nos rivières principales. Ce sera un moyen précieux d'investigation, précieux par les découvertes qu'il fera faire et par les exagérations dont il fera justice.

Comment on pourra calculer la quantité de matières terreuses que la Seine porte à la mer.

Le bassin de la Seine et de ses affluents au-dessus de Paris présente une surface totale de 4 437 475 hectares ou de 44 375 kilomètres carrés. Il y tombe annuellement, en moyenne, une quantité d'eau atmosphérique équivalente à une couche de 0,^m53. Les 7 875 226 512 mètres cubes d'eau qui passent

Superficie du bassin de la Seine.

Quantité d'eau pluviale qui y tombe.

Un tiers seulement
de cette eau
s'écoule par la
Seine.

annuellement sous le pont de la Concorde, étant répartis uniformément sur la même surface, formeraient une couche de 0,^m177, c'est-à-dire équivalente au tiers seulement de la quantité d'eau tombée. Les deux autres tiers doivent se dissiper par l'évaporation, par l'infiltration, par l'action de la végétation, etc.¹

La relation
entre la quantité
d'eau pluviale
et la quantité
d'eau écoulée,
varie
avec les saisons.

Il tombe plus d'eau à Paris dans la belle saison que dans la mauvaise; mais néanmoins la Seine est beaucoup plus haute dans la dernière saison que dans la première. Cette opposition s'explique par l'évaporation qui dépend essentiellement de la température des mois et aussi, entre autres choses, de leur sérénité.

Ces relations sont mises en évidence par la fig. 3, pl. III, qui représente les moyennes hauteurs de la Seine, mois par mois, d'après les observations journalières faites à l'hydromètre du pont de la Tournelle pendant les 30 années 1807 à 1836, les portées de la Seine qui en résultent, les quantités de pluie tombées, mois par mois, sur la terrasse de l'Observatoire dans le même intervalle, ainsi que les quantités de pluie tombées, les températures et l'évaporation observées à Montmorency, par le père Cotte, pendant les 40 années, 1765 à 1804.

Différence
entre l'état actuel
de la Seine
et
celui dans lequel
elle se trouvait
pendant la période
gallo-romaine.

Tout ce qui vient d'être dit, se rapporte à notre Seine actuelle, portant à la mer les eaux d'un pays généralement cultivé. Mais la Seine antique, portant à la mer les eaux des forêts qui couvraient les Gaules, avait un autre régime, régime beaucoup plus constant, comme on peut le prévoir d'après les

1. Dausse, De la pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau : Annales des ponts et chaussées; 1842.

remarques que nous ont déjà fournies les cours d'eau de l'Italie et ceux du Nouveau-Monde. On s'en convaincra aisément par la citation suivante, tirée par M. Dausse du *Misopogon* de l'empereur Julien, qui avait été, de 335 à 361, gouverneur des Gaules.

«*Ego olim eram in hibernis apud caram Lutetiam (sic enim Galli Parisiorum oppidum appellant), quæ insula est non magna, in fluvio sita, qui eam omni ex parte cingit. Pontes sublicii utrinque ad eam ferunt; raroque fluvius minuitur ac crescit; sed qualis æstate, talis esse solet hyeme. Aquam præbet jucundissimam volenti bibere; nam, cum insulam habitent, ibi maxime eos aquari necesse est.*»

Telle était la Seine au 4.^e siècle. Pour la Seine de nos jours, épuisée en été, gonflée en hiver, souvent et longtemps trouble, elle nous présente des oscillations dont les hautes eaux excèdent parfois l'étiage de 7, 8 et même de 9 mètres.¹

Le second des deux types principaux auquel M. Dausse rapporte les rivières de France, comprend surtout les *rivières alpines*.

Rivières alpines.

Le Rhône alimenté comme la Seine par les eaux pluviales, reçoit encore, pendant une partie de l'année, des eaux produites par la fonte des neiges qui couvrent les Alpes. L'époque ordinaire de ses plus hautes eaux moyennes coïncide à peu près avec celle des plus basses eaux de la Seine ou de la Saône, ou la devance un peu, et l'époque des plus basses eaux du Rhône coïncide avec celle des plus hautes eaux moyennes des deux autres rivières. Cette double

Remarques générales sur leur alimentation et leur régime.

1. Dausse, De la pluie, etc.

opposition distingue essentiellement les rivières alpines de celles qui proviennent de plateaux ou de collines peu élevées.

Différences
entre leur régime
et celui des
rivières ordinaires.

Mais la différence des deux régimes entraîne encore cette conséquence que les plus longues tenues des deux classes de rivières ont lieu à des époques peu différentes. Pour les rivières qui proviennent de plateaux ou de collines peu élevées, le niveau de la plus longue tenue est en *basses eaux* et s'observe surtout en été. Mais il est en eaux plus ou moins basses, suivant la nature des rivières, plus basses pour la Saône que pour la Seine. Cependant la courbe des tenues de la Saône présente plusieurs renflements, et cette rivière est un peu moins éloignée que la Seine d'un genre intermédiaire qu'on pourrait appeler demi-alpin, par l'effet des affluents qu'elle reçoit des Vosges et du Jura, principalement du Doubs.¹

Pour les rivières alpines, le niveau de la plus longue tenue est en *eaux moyennes* plus ou moins hautes, suivant les rivières, et pour elles cette plus grande tenue est très-longue. Ce niveau s'observe ordinairement en été.

Une analyse complète du phénomène montre qu'une rivière alpine doit être susceptible de deux états stables, l'un en été, produit par la fonte des neiges, le second en hiver, lequel peut devenir comparable à l'autre et même plus marqué. Et ces deux états stables sont séparés par des états très-oscillatoires dans les saisons du printemps et de l'automne,

1. Dausse, Mémoire sur les variations particulières et comparées du niveau de la Seine, de la Saône, du Rhône, de l'Isère, de la Loire et du Nil.

au lieu que les rivières des plaines ne présentent qu'un état stable, toujours en été ou au commencement de l'automne, et véritablement qu'un état de plus grande instabilité en oscillation, en hiver.¹

L'époque des plus basses eaux du Rhône tombe vers la fin des grands froids ou au cœur de l'hiver; mais indépendamment de l'étiage principal d'hiver, le Rhône et les rivières alpines présentent souvent un étiage secondaire, analogue à celui des autres rivières, entre la fonte des neiges et le retour des pluies d'automne.²

Variations
du
niveau du Rhône
à Lyon.

Pour le Rhône de 1826 à 1831, les mois où la hauteur moyenne de l'eau a été la plus grande, se sont présentés dans l'ordre suivant : septembre, août, juillet. Les mois où la hauteur moyenne de l'eau a été la moindre, ont été janvier et février³.

Les plus grandes crues bien connues du Rhône à Lyon sont celle du 17 février 1812, qui s'éleva à 5,^m22 au-dessus de l'étiage, et celle de novembre 1840, qui s'éleva à 5,^m50. Ce nombre exprime la plus grande amplitude des oscillations du niveau du Rhône, à Lyon, où cette amplitude est cependant accrue à proportion du resserrement du lit du fleuve et de l'obstacle que les ponts mettent à son cours. Elle est moindre que celle des oscillations de la Saône, qui, d'après la crue de 1794, a été de 7,^m804, et d'après l'étiage d'octobre 1832, comparé à la crue de novembre 1840, de 10,^m10 : la faiblesse comparative des crues du Rhône à Lyon tient en grande

1. Dausse, Mémoire sur les variations, etc.

2. *Idem.* — 3. *Idem.* — 4. *Idem.*

partie à l'influence régulatrice du lac de Genève.¹

La moyenne hauteur mensuelle du Rhône est supérieure à sa moyenne annuelle 1,^m20 pendant huit mois, tandis que pour la Seine, cela n'a lieu que pendant cinq mois. M. Dausse croit pouvoir conclure de là que la courbe des moyennes variations mensuelles du Rhône est réellement plus longtemps supérieure qu'inférieure à son niveau moyen, et conséquemment qu'elle s'abaisse plus au-dessous qu'elle ne s'élève au-dessus, ou qu'elle est plus aplatie au-dessus et plus arquée en dessous de ce niveau moyen, propriétés qui mettent encore ce fleuve en opposition avec la Seine². L'examen de la courbe des moyennes hauteurs mensuelles du Rhône et de la courbe de ses tenues, fig. 1 et 2, pl. IV, complétera ce que les notions que je viens de donner sur son régime ont de trop abrégé.

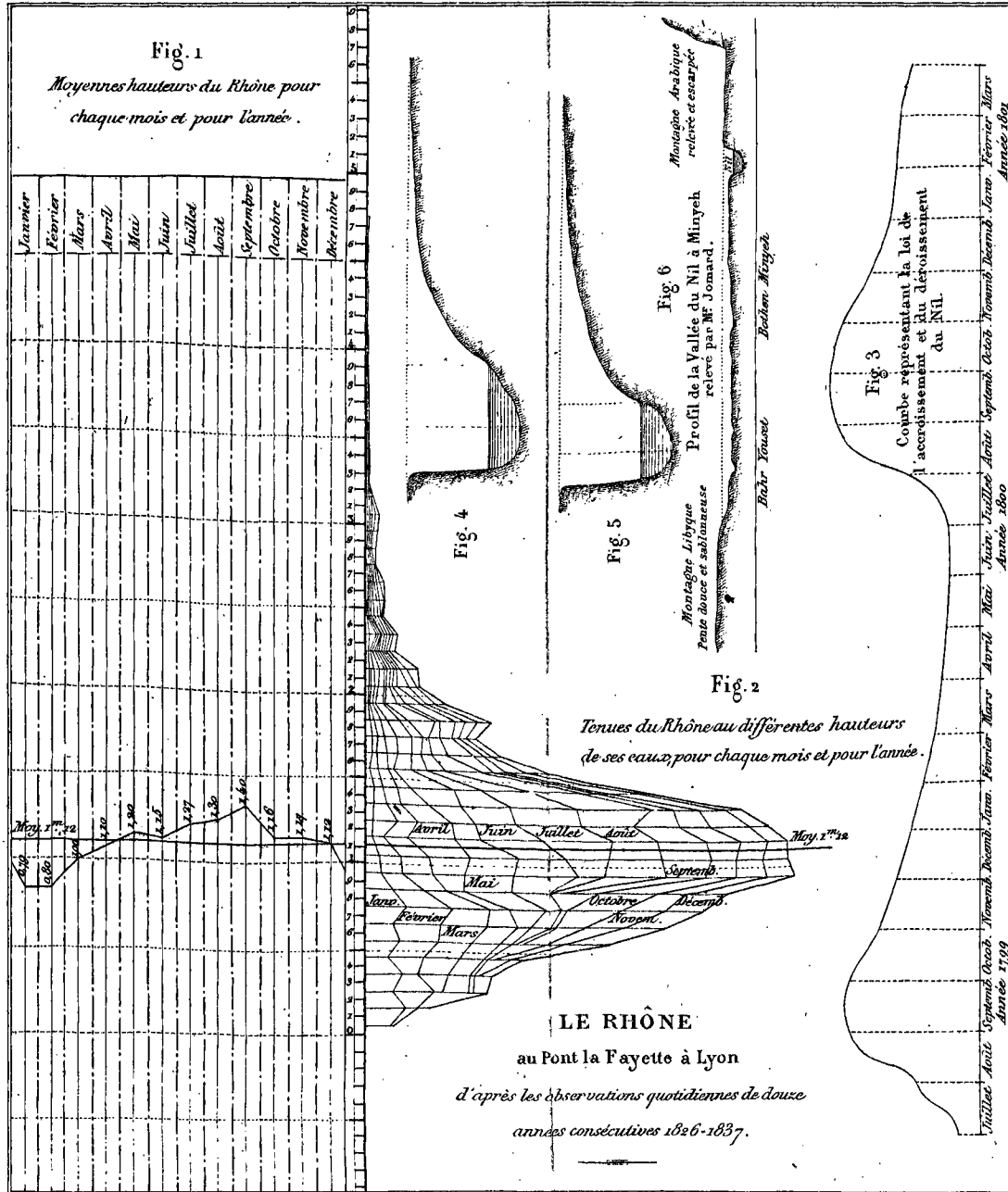
Sa
plus longue tenue
est très-prononcée.

Ces courbes feront concevoir que la plus longue tenue du Rhône est plus prononcée que ne le sont celles de la Seine et de la Saône, et qu'il doit demeurer plus longtemps que la Seine et surtout que la Saône à un niveau rapproché de celui de sa plus longue tenue³. On comprendra aisément aussi que, par suite de cette double propriété des rivières alpines, d'avoir leur plus grande tenue très-longue et à un niveau élevé, elles seraient beaucoup plus propres à la navigation que les autres rivières, si elles n'étaient pas généralement plus rapides.

Débit du Rhône
à Lyon.

M. Dausse a trouvé 225 mètres cubes pour le débit du Rhône, à Lyon, le 19 janvier 1829; le fleuve

1. Bravais, *Patria*, col. 110 et 112.
2. Dausse, Mémoire sur les variations, etc.
3. *Idem*.



Publié par J. B. BAILLIÈRE et fils, à PARIS.

était à $+ 0,^m 11$ à l'hydromètre de la rive droite du pont Lafayette, c'est-à-dire en eaux très-basses; la vitesse du fil de l'eau était de $1,^m 43$ par seconde. En eaux moyennes, le débit du Rhône à Lyon est d'environ 650 mètres cubes par seconde.

Nous avons vu, ci-dessus, p. 97, que M. Vallée attribue au Rhône, à Lyon, un débit de 235 mètres cubes par seconde pendant l'étiage, et de 5000 mètres cubes dans les grandes crues, ce qui donne le rapport de 1 à 21, pour le débit dans ces deux cas extrêmes; mais on a calculé que pendant la grande crue du 12 février 1815 le débit du Rhône à Lyon s'est élevé à 5800 mètres cubes, et pendant celle de 1840, à 6000 mètres cubes par seconde¹. Ces nombres sont beaucoup plus grands que les nombres correspondants relatifs à la Seine. Cependant, d'après M. Dausse, la portée intégrale annuelle du Rhône est seulement un peu plus que double de celle de la Seine.

Je regrette de ne pouvoir donner ici, pour le Rhône, comme je l'ai fait pour la Seine, le tableau de ses portées intégrales aux diverses hauteurs de l'échelle hydrométrique et pour l'année entière.

Nous avons cité les recherches de M. Dausse, sur la quantité d'eau de pluie tombée dans le bassin de la Seine, comparée à la quantité d'eau que débite cette rivière. Il s'est occupé de les généraliser, en appliquant les mêmes méthodes à la détermination du volume des eaux courantes à la surface de l'Europe. La solution de cette question conduit à une foule de résultats *intégraux*, par lesquels seulement

1. Bravais, *Patria*, colonne 111.

on peut espérer de défalquer les mille et une complications secondaires de nos climats, et de découvrir leurs grandes lois. C'est ainsi, par exemple, que la différence de la portée intégrale du Rhône, à Lyon, à celle de la Seine, à Paris, en prouve une à elle seule d'emblée et intégralement : je veux dire la loi de l'accroissement de la quantité de pluie avec l'élévation des lieux." M. Dausse, que nous avons cité précédemment, a cherché à établir cette loi dans son mémoire sur la pluie, mais par une voie inverse, et il la regarde comme plus sujette à discussion.

Comparativement
à la grandeur de
son bassin
le Rhône à Lyon
écoule près de
5 fois autant d'eau
que la Seine.

« En effet, bien que le bassin du Rhône, en amont de Lyon, soit moins de la moitié de celui de la Seine, en amont de Paris; j'ai trouvé, dit M. Dausse, que la portée intégrale du premier fleuve était cependant plus qu'une double de celle du second, et conséquemment qu'à bassin égal, le rapport des portées serait presque celui de 1 à 5. A la vérité, la déclivité du sol étant plus grande dans le bassin du Rhône que dans le bassin de la Seine, l'évaporation réduit moins dans l'un que dans l'autre le tribut que la pluie apporte jusqu'à leur issue; mais cette inégalité défalquée, la preuve indiquée demeure encore manifeste, et partant aussi la cause essentielle de la beauté et de la fraîcheur de la végétation en Suisse, et la cause pour laquelle les défrichements ne réduiront jamais cette contrée à une condition aussi fâcheuse, qu'ils le font dans les contrées moins élevées, etc." ¹

Conséquences
de ce fait
relativement
au climat alpin.

Aspect des
rivières alpines.

Indépendamment de la belle couleur bleue que présentent si habituellement les eaux qui sortent des lacs, les rivières alpines offrent généralement un

1. Dausse, Essai sur la statistique des principales rivières de France.

aspect particulier dont tous les voyageurs sont frappés, sans réussir toujours à l'analyser. Excepté à leur sortie des lacs, leurs rives présentent rarement des berges coupées à pic, mais des grèves couvertes de galets plus ou moins gros¹; ce qui tient à la grande vitesse dont leurs eaux sont animées, surtout dans les crues. Elles ne sont que très-peu encombrées de plantes aquatiques; ce qui provient de ce que ces plantes végètent difficilement en dessous d'une hauteur d'eau de 1^m60, hauteur qui est souvent dépassée par ces rivières pendant leur tenue, maximum d'été, qui tombe précisément dans la saison où la végétation de ces plantes devrait être la plus active. Ces plantes ne pourraient croître que sur les grèves caillouteuses qui bordent la rivière, grèves dont le sol leur est peu favorable et où leurs germes sont détruits chaque année par les gelées de l'hiver et les sécheresses du printemps. La basse température des eaux qui sortent des glaciers est aussi un obstacle à la végétation des plantes aquatiques.

Le Rhin et tous ses affluents principaux traversant des lacs, ce fleuve doit offrir à Bâle et à Strasbourg, dans ses variations et ses tenues, à peu près les mêmes phénomènes que le Rhône à Lyon, mais plus en grand, puisqu'il reçoit les eaux d'une beaucoup plus grande partie des Alpes. Le Rhin qui débite à Bâle environ 330 mètr. cub. d'eau par seconde, et à Kehl, vis-à-vis Strasbourg, 380 mètres cubes, à l'étiage, peut être considéré comme le principal type des rivières alpines de France.²

Remarques
sur le Rhin.

1. Bravais, *Patria*, col. 114.

2. Dausse, Mémoire sur les variations, etc.

Les rivières alpines qui ne traversent pas de lacs, présentent dans leur régime quelques particularités un peu différentes de celles qui en traversent. Le régime alpin y est à quelques égards plus prononcé et en quelque sorte plus pur. Les rivières qui traversent des lacs, comme la plupart de celles de la Suisse et quelques-unes de celles de la Lombardie, présentent réellement un régime mixte, résultant de la combinaison du véritable régime alpin avec celui qui est propre aux *rivières à régulateurs*. Le Pô, au-dessus de Pavie, l'Adige, l'Inn, auraient été les véritables types du régime alpin que j'aurais désiré pouvoir citer. La Durance et l'Isère en offrent encore des exemples.

Dans les rivières qui traversent des lacs le régime alpin est altéré.

Rivières qui le présentent dans toute sa pureté.

Particularités du régime de l'Isère.

« Dans les années qui commencent par des hivers presque sans neiges, l'Isère a son état de plus longue tenue en hiver et par des eaux très-basses, susceptibles même de cesser presque de varier pendant fort longtemps. Pour un grand nombre des torrents des Alpes, cet état d'étiage si soutenu est souvent l'état de siccité absolue. « Il est probable que l'Isère, à l'état à peu près fixe dont nous venons de parler, voisin peut-être d'une véritable limite d'étiage, est principalement alimentée par la fonte des glaciers de la Tarentaise et de la Maurienne, résultant de l'action incessante de la chaleur centrale, c'est-à-dire par celle de toutes les espèces de sources proprement dites, qui est sûrement la plus pérenne et la plus invariable. »¹

Il ne faut pas oublier que la longue tenue hivernale

1. Dausse, Mémoire sur les variations, etc.

dont nous venons de parler se rapporte à des années où il a peu neigé en hiver. La moyenne d'un grand nombre d'années consécutives donnerait probablement pour l'Isère, comme pour les autres rivières alpines, une très-longue tenue d'été en eaux moyennes.

Les rivières alpines perdent peu à peu leur caractère alpin, en s'éloignant des neiges éternelles, auxquelles elles le doivent, parce que la proportion des eaux pluviales y augmente graduellement. Même dans les points où le caractère alpin de ces rivières est le plus prononcé, les eaux pluviales y jouent quelquefois un rôle prépondérant. Les rivières alpines se rapprochent alors des rivières ordinaires; aussi remarque-t-on que les crues du Rhône, lorsqu'elles proviennent de grandes pluies, comme cela est arrivé dans les mois de septembre des années 1829, 1830 et 1831, coïncident ordinairement avec des crues correspondantes de la Saône, de la Loire et de la Seine¹. En octobre 1846, la coïncidence a encore eu lieu, mais elle a été moins marquée.

Le Rhône, à Beaucaire, près du terme de son cours, est transformé en une rivière du genre de la Seine. On peut en dire autant du Rhin à Cologne, et il doit en être de même du Danube à son embouchure dans la mer Noire et peut-être bien avant.

Les rivières des régions boréales, couvertes de neiges pendant une partie considérable de l'année, ont un régime qui se rapproche de celui des rivières alpines; mais, à prendre la chose d'une manière

Les rivières alpines perdent leur caractère en s'éloignant des montagnes.

Le Rhône, à Beaucaire, est transformé en une rivière du genre de la Seine,

Caractère alpin des rivières des régions boréales.

1. Dausse, Mémoire sur les variations, etc.

Le régime
de la plupart des
grands fleuves
se rapproche
de celui de la Seine.

générale, les rivières alpines sont des exceptions, et le plus grand nombre des rivières et surtout des grands fleuves, ont un régime qui se rapproche de celui de la Seine.

Le Nil.

Tel est, par exemple, le Nil dont l'état le plus habituel, l'état de la plus longue tenue, arrive en basses eaux.

Avantages
qu'il présente pour
ce genre d'étude.

Au point de vue qui intéresse le plus directement la géologie, au point de vue du dépôt des alluvions, il n'y a peut-être pas de fleuve plus intéressant à étudier que le Nil. Le dépôt des alluvions y est d'autant plus facile à étudier qu'il s'y opère dans des proportions exagérées, de manière à mettre en défaut la règle générale de la permanence du niveau des vallées. En Égypte, des monuments de 3000 ans, joints aux travaux et aux habitudes séculaires d'une population qui tire son existence de son fleuve, fournissent des ressources toutes particulières pour étudier les phénomènes qu'il produit.

Son origine.

Le Nil est formé, dans la partie supérieure de la vallée qu'il arrose, par la réunion de deux grandes rivières, le *Bahr-el-azrek* (*fleuve bleu*) et le *Bahr-el-abiad* (*fleuve blanc*): le premier vient de l' Abyssinie, et l'autre de montagnes encore à peu près inconnues.

Il est privé
d'affluents sur
une très-grande
longueur.

Le Nil reçoit plus bas, près de Damer en Nubie, une autre rivière, l'*Atbarah*; mais il est remarquable que ce soit son dernier affluent, et que ce fleuve, depuis le confluent de l'*Atbarah* jusqu'à son embouchure, dans une longueur de plus de 2000 kilomètres, n'en reçoive plus aucun autre; c'est une configuration extraordinaire.

La Nubie et l'Égypte, que le Nil traverse pour se rendre à la mer, sont des contrées où il ne pleut presque jamais, et où la sécheresse de l'air rend l'évaporation très-active. Les sources y sont peu nombreuses; et de là il résulte que le Nil conserve dans ce long trajet un volume à peu près uniforme. Au lieu d'augmenter vers son embouchure, comme la plupart des autres fleuves, il irait plutôt en diminuant. Cette circonstance, jointe à la régularité de ses crues, en fait pour ainsi dire une rivière modèle, qu'on peut étudier comme un type à la fois élémentaire et classique.

Cette circonstance simplifie son régime.

Réduite à un tronc unique depuis le confluent de l'Atbarah, la vallée du Nil descend en formant de vastes replis au milieu des déserts, et s'avance ainsi, sous le nom de *Nubie*, jusqu'au 24.° parallèle boréal, où commence l'*Égypte*.

Remarques sur la vallée du Nil.

« A la hauteur de l'île de *Philæ*, le Nil coule dans une gorge étroite, bordée sur chaque rive par des rochers de granite. Ces rochers traversent le fleuve à un demi-myriamètre environ au-dessus de la ville de Syène (*As-Souan*); et c'est en franchissant cette espèce de barrage qu'il forme la dernière de ses cataractes, au-dessous de laquelle il coule encore pendant l'espace d'une heure sur un sol granitique entre des îles et des rochers sans nombre, qui entravent et embarrassent son lit; mais arrivé entre Syène et Éléphantine, lieux célèbres dans l'antiquité, situés à l'opposite l'un de l'autre, le cours du Nil redevient libre : la vallée, plus régulière, prend alors le nom d'*Égypte*, et traverse ensuite comme un long ruban de verdure

Entrée du Nil en Égypte.

les déserts qui s'étendent depuis le tropique jusqu'à la Méditerranée.¹

La
partie habitable
de l'Égypte
se réduit à la vallée
du Nil.

Dans ses limites naturelles, l'Égypte proprement dite, c'est-à-dire le pays cultivable, n'est qu'une simple vallée, où coulent les eaux du Nil et qui sépare deux vastes contrées complètement stériles. « Environnée de toutes parts de déserts privés d'eau douce, l'Égypte n'est habitable que parce qu'elle sert en quelque sorte de lit (majeur) à la partie inférieure du cours du Nil. Sa longueur, depuis l'île de *Philæ* jusqu'aux grandes pyramides (près du Caire), entre les 24.^o et 30.^o degrés de latitude, est d'environ 860 kilomètres, en suivant les sinuosités du fleuve.² » Elle présente environ 2 100 000 hectares (ou 21 000 kilomètres carrés) de terrains cultivables.³ M. Russegger n'évalue la surface cultivable de la Haute-Égypte qu'à 16 333 kilomètres carrés.³

Son étendue.

Sa constitution
géologique.

Toute la vallée de l'Égypte, à l'exception du Delta, est encaissée entre deux chaînes de montagnes médiocrement élevées, non-seulement incultes dans toute leur étendue, mais absolument nues depuis leur base jusqu'à leur sommet. La chaîne orientale ou *arabique* est une chaîne de montagnes régulière présentant un axe de roches cristallines, flanqué

1. De Rozière, De la constitution physique de l'Égypte. — Description de l'Égypte, ou Recueil des observations et des recherches qui ont été faites en Égypte pendant l'expédition de l'armée française : Histoire naturelle; tome II, p. 434.

2. Girard, Observations sur la vallée d'Égypte et sur l'exhaussement séculaire du sol qui la recouvre. — Description de l'Égypte : Histoire naturelle; tome II, p. 346.

3. J. Russegger, *Reisen in Europa, Asien und Afrika*; t. II, p. 270.

de dépôts sédimentaires. La chaîne occidentale ou *libyque* n'est autre chose que la tranche escarpée du plateau des déserts de la Libye. Le pied de la chaîne arabique, sans former la tranche d'un plateau, se termine aussi du côté de la vallée du Nil par une ligne d'escarpements¹. La largeur de la vallée, resserrée entre ces deux chaînes, comme entre deux murailles, est peu considérable; mais vers son extrémité septentrionale, à 150 kilomètres environ de la Méditerranée, elle s'élargit subitement, et se termine par une grande plaine triangulaire que le Nil enveloppe, se divisant en plusieurs branches principales, jadis au nombre de sept.²

Depuis leur extrémité septentrionale jusqu'à 100 kilomètres de la cataracte, à la hauteur d'Esné, les deux chaînes latérales sont l'une et l'autre de formation secondaire et de nature calcaire. Au delà d'Esné, elles sont composées d'un grès sablonneux, légèrement micacé, de nuances variées, tendre, facile à tailler, et principalement employé dans la construction des anciens édifices de la Thébàide. Ce n'est que vers Syène, une heure avant d'arriver à la cataracte, que paraissent, sur les bords de la vallée, les terrains primitifs et ces montagnes granitiques si renommées par la beauté des roches qui les composent, par la grandeur des blocs qui ont fourni ces temples monolithes, ces obélisques,

1. J. Russegger, *Reisen in Europa, Asien und Afrika*; t. II; p. 272; et Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 784.

2. De Rozière, *loc. cit.*, tome II, p. 434.

ces statues colossales, et tant d'autres objets qui décoraient les édifices de l'Égypte ancienne, et sont encore l'ornement de bien des édifices célèbres de l'Asie et de l'Europe.¹

D'après les mesures barométriques de M. Russegger la chute entière de la dernière cataracte, de Phylæ à Assuan, sur une longueur d'un mille géographique et demi, de 15 au degré (11,111 mètres), n'excède pas 80 pieds de Paris² ou 26 mètres, ce qui donne une pente de 0,^m0234 par mètre ou 1° 20' 26"; pente peu différente de celle de l'Arve, dans la vallée de Chamouni près du village d'Argentière. On voit par là que les cataractes du Nil sont de simples rapides, et on cesse d'être surpris qu'on puisse les descendre en bateau et que les enfants du pays s'amuse à les descendre à la nage.

«L'île d'Éléphantine, située vis-à-vis de Syène, est un atterrissement qui s'est élevé à l'abri des derniers blocs de granit que l'on rencontre dans le lit du Nil, en descendant de la Nubie : ainsi l'Égypte semble commencer, en quelque sorte, où finit le sol granitique³." Cette petite île couverte de palmiers et d'une magnifique verdure, contraste de la manière la plus agréable avec les rochers granitiques noirs et pelés des cataractes. Les Arabes l'ont souvent comparée à une émeraude; les anciens Égyptiens l'appelaient l'*Île sainte d'Osiris*.

Sa largeur.

L'Égypte proprement dite, c'est-à-dire le terrain

1. De Rozière, *loc. cit.*, p. 437.

2. J. Russegger, *Reisen in Europa, Asien und Afrika*; t. II, p. 277.

3. Girard, *loc. cit.*, p. 343.

cultivable, se réduit réellement aux atterrissements qui bordent, sur des largeurs inégales mais généralement peu considérables, les deux rives du fleuve. « Le Nil, dit M. de Rozière, ne coule point dans la Saïd (Haute-Égypte) à des intervalles égaux des deux chaînes latérales, surtout dans l'étendue de la région calcaire. On ne saurait s'écarter beaucoup de la vérité en évaluant à 4000 mètr. la largeur moyenne de la bande de terrain cultivé située sur la rive droite du fleuve, et à 10 000 mètres environ celle de la rive gauche. M. le duc de Raguse, qui a remonté le Nil jusqu'à Thèbes en 1834, porte même plus loin l'inégalité des deux rives, car il dit que la Haute-Égypte fertile est pour les trois quarts au moins placée sur la rive gauche du fleuve¹. Cette disposition est analogue, mais en sens contraire, à celle que nous avons reconnue précédemment dans le Delta (10.^e leçon, t. I.^{er}, p. 424), où l'antiquité de l'ancienne bouche canopique du Nil et la prépondérance actuelle de la branche de Rosette indiquent une tendance naturelle du fleuve à se porter vers l'ouest, c'est-à-dire à raser le pied du prolongement de la chaîne libyque. Une tendance si manifeste du Nil à se porter vers l'un des côtés de sa vallée mérite d'être remarquée, et nous chercherons plus tard à en découvrir la cause. Nous nous bornerons à remarquer pour le moment que, si aux 14 000 mètres qui représentent la largeur totale des deux bandes de terrain cultivé qui bordent le Nil, on ajoute une largeur de 1000 à 1200 mètres pour le lit du fleuve

Le Nil la divise
en deux bandes
de
largeurs inégales.

1. Voyage du duc de Raguse; t. IV, p. 31.

dans ses basses eaux, et pour certaines bandes purement sablonneuses dont il est fréquemment bordé, on aura, pour l'ouverture moyenne de la vallée dans la région calcaire, environ 15 000 mètres.

« Entre les montagnes de grès, cette largeur moyenne est d'environ 4000 mètres, ou d'un peu moins d'une lieue; mais dans les parties les plus resserrées l'Égypte n'a, ainsi que dans la région granitique, que la largeur nécessaire pour le passage du fleuve, et pour deux étroites lisières de terrain cultivable qui bordent les deux rives; enfin ces lisières disparaissent elles-mêmes quelquefois, et les eaux du Nil bordent le pied des montagnes. »¹

Resserments
qu'elle présente.

Dans la Haute-Égypte, au-dessus de Thèbes, d'Esné et d'Edfou, les contre-forts de la chaîne arabique et de la chaîne libyque se rapprochent de manière à réduire la vallée du Nil, au défilé de Djébel-Selséléh, à une largeur de 120 klafter (environ 250 mètres). Le fleuve se précipite rapidement à travers cette crevasse; cependant il n'y cesse pas d'être navigable et les bateaux qui le remontent jusqu'à Syène, y passent journellement à la voile; les escarpements qui le bordent sont formés d'un grès à grain facile à tailler, qui a fourni une grande partie des matériaux des monuments de la Haute-Égypte. « Les carrières de Silsilis (Djébel-Selséléh) m'ont vivement intéressé, dit M. Champollion;... là mes yeux, fatigués de tant de sculptures du temps des Ptolémées et des Romains, ont revu avec délices des bas-reliefs pha-

1. De Rozière, *loc. cit.*, p. 436.

raoniques. Ces carrières sont très-riches en inscriptions de la 18.^e dynastie. Il y existe de petites chapelles creusées dans le roc par Aménophis-Memnon, Horus, Rhamsès-le-grand, Rhamsès son fils, Rhamsès-Meïamoun, Mandonei...¹ Trois de ces chapelles ornées de sculptures sont creusées dans le rocher de la rive gauche, immédiatement au-dessus du niveau actuel du fleuve², et indépendamment de l'intérêt qu'elles présentent pour l'histoire des Pharaons, elles montrent aux géologues combien le Nil, malgré la rapidité que le resserrement lui fait acquérir, agit peu sur les parois de son lit.

Ce défilé facile à garder et même à fermer, bordé de rochers incultes et déserts, semble avoir été à une certaine époque la frontière de l'Égypte et de la Nubie. Dans les pauvres villages des environs on entend souvent les sons pleins et arrondis de la langue berbère remplacer les intonations gutturales de l'arabe. «Le nom de *Djébel-Selséléh* ou de *Hadjar-Selséléh* signifie, dit M. Russegger, la montagne ou la pierre du tremblement de terre. Minutoli et beaucoup d'autres auteurs (entre autres Champollion) écrivent *Silsili*, ce qui doit signifier montagne ou pierre de la chaîne. Le premier nom ferait allusion à une grande catastrophe naturelle, le second à une ancienne fermeture de ce resserrement du Nil au moyen d'une chaîne...»³

1. Champollion, *Lettres écrites d'Égypte*, p. 40.

2. J. Russegger, *Reisen in Europa, Asien und Afrika*; t. II, p. 183.

3. *Idem*, p. 180.

Le Nil en parcourant le reste de l'Égypte baigne encore plus d'une fois le pied des rochers qui forment l'encaissement de sa vallée. Le dernier exemple de ce phénomène s'observe entre Miniéh et Beni-Soueyf, où le Nil vient raser le pied d'un contre-fort de la chaîne arabique, appelé *montagne des oiseaux*. « C'est, dit M. le duc de Raguse, un rocher à pic qui borde la rive droite du fleuve. Son élévation est de plusieurs centaines de pieds. D'innombrables ouvertures servent de retraite à une très-grande quantité d'oiseaux de différentes espèces.... Un couvent de pauvres moines cophtes est établi à sa sommité.... d'où deux escaliers conduisent au bord du fleuve. Ce sont les deux seuls points abordables de ce côté, car la rive droite forme un immense mur à pic.... C'est à ce point du Nil que l'on commence à rencontrer des crocodiles. Jamais ou presque jamais il n'en vient plus bas, et leur nombre s'accroît à mesure que l'on remonte le fleuve. »¹

Le Nil a dans l'intérieur de l'Égypte, sans compter les îles qui le divisent et l'élargissent fréquemment, une largeur moyenne d'environ 600 à 700 mètres au maximum, c'est-à-dire, à peu près quatre fois la largeur de la Seine à Paris. Cette largeur augmente quelquefois de manière à donner au fleuve l'aspect d'un lac; mais elle se réduit considérablement dans les endroits où le Nil est gêné par les contre-forts des deux chaînes qui bordent sa vallée. Indépendamment du resserrement de Djébel-Selséléh il en existe plusieurs autres. En remontant de

1. Voyage du duc de Raguse; t. IV, p. 44.

Minieh à Mānfalout, dit M. le duc de Raguse, nous passâmes au-dessous de la montagne d'Afulfeda ; en cet endroit le Nil est extrêmement étroit, sa largeur est au plus de 150 toises (300 mètres). C'est un lieu renommé par la quantité de crocodiles qu'on y rencontre.

Le Nil n'est pas très-profond et les vaisseaux le remontent difficilement ; il est bien rare que des vaisseaux de 60 tonneaux puissent remonter jusqu'à la première cataracte. On a été obligé de construire exprès, et en lui donnant un faible tirant d'eau, le bâtiment qui a été chercher près de Thèbes l'obélisque de Louqsor, qui l'a pris sur les lieux et l'a transporté jusques aux quais de Paris, près de la place de la Concorde. Il est peu profond.

La vitesse ordinaire du Nil, comme nous l'avons déjà dit, n'excède pas 5556 mètres par heure, ou 1,^m54 par seconde ; mais dans des circonstances particulières, et notamment dans les crues, elle s'éloigne quelquefois de cette moyenne. Lors d'un jaugeage que M. Girard a exécuté à Manfalout, dans la Haute-Égypte, au-dessous de Siout et de Thèbes, la vitesse superficielle du courant au fil de l'eau (le 27 mars 1799, les eaux étant presque basses), était de 0,^m75 par seconde, ce qui supposait une vitesse moyenne de 0,^m60 environ. La largeur du fleuve au niveau de l'eau était de 678 mètres, et sa section vive de 1129 mètres superficiels, lesquels, multipliés par la vitesse de 0,^m60, donnaient une dépense de 678 mètres cubes par seconde. Un autre jaugeage, fait à Siout, a donné 679 mètres. Sa vitesse.

Son débit
dans les basses
et dans
es hautes eaux.

Dans les hautes eaux, la vitesse moyenne à Manfalout est, d'après M. Girard, de 1,^m971, et le débit par seconde, dans le lit du fleuve, 10 247 mètres cubes; c'est quinze fois autant que dans les basses eaux, et, sans les pertes occasionnées dans la crue par les dérivations, ce serait vingt fois autant.¹

D'après les formules de la page 117, le rapport des vitesses en basses eaux et en hautes eaux aurait

dû être de 1 à $\sqrt[5]{15} = 1,7188$; et si la vitesse moyenne était de 0,^m60 dans les basses eaux, elle aurait dû être de 1,^m0313 dans les hautes eaux. M. Girard admet une vitesse moyenne bien plus grande dans les hautes eaux; mais il suppose que dans les hautes eaux la pente à Manfalout est devenue beaucoup plus grande que dans les basses eaux, cas auquel nos formules ne s'appliquent pas. La supposition de M. Girard pourrait bien elle-même ne pas être complètement exacte.

Sa pente.

La pente du Nil n'est pas encore bien connue. Nous avons vu précédemment (10.^e leçon, t. I.^{er}, p. 474) que, d'après les évaluations de M. Gratien Le Père, sa pente au-dessous du Caire ne serait que de $4'' + \frac{2}{10}$ dans les basses eaux et de $10'' + \frac{8}{10}$ dans les plus grandes crues, tandis que M. de Rozière se borne à admettre que dans la partie inférieure de son cours la pente du Nil n'excède guère un pied par lieue (de 25 au degré), ce qui répond à $15''$. Il existe plus d'incertitude encore sur la pente du Nil depuis Syène jusqu'au Caire. D'après M. Wallace

1. Girard, *loc. cit.*, p. 134.

cité par M. Newbold¹ la pente de l'Égypte depuis la première cataracte jusqu'à la Méditerranée ne serait que de 2 pouces par mille anglais, c'est-à-dire de 2 sur 63360 ou de $0,^m000031566$ par mètre ou enfin de $6'' + \frac{1}{2}$, mais un peu au-dessous d'Assouan, elle serait de 7 pouces par mille, c'est-à-dire de 7 sur 63360, ou de $22'' \frac{3}{4}$. Ces deux évaluations sont probablement au-dessous de la vérité. D'après les mesures barométriques de M. Russegger la chute totale du Nil de Syène au Caire serait de 282 pieds de Paris², ou de $91,^m60$, ce qui, pour un développement de 860 kilomètres, donnerait une pente de $0,^m0001065$ par mètre, ou de $22''$, non pour la pente un peu au-dessous de Syène, mais pour la pente moyenne de Syène au Caire. D'après M. le duc de Raguse la chute du Nil d'Abou-Girgè à Beni-Soueyf, serait de 6 mètres dans une longueur de 6 lieues, ou d'environ 3 pieds par lieue³. En admettant que M. le duc de Raguse ait employé la même lieue que M. de Rozière avait employée pour évaluer la pente du Nil au-dessous du Caire (voir la 10.^e leçon, t. I.^{er}, p. 475), la pente serait à Beni-Soueyf trois fois aussi forte que celle attribuée par M. de Rozière au Nil dans le Delta, c'est-à-dire de $0,^m000219267$ ou de $45''$. Je présume que cette dernière évaluation est supérieure à la pente moyenne du Caire à Syène, et surtout du Caire à Beni-Soueyf, qui n'est pas très-éloigné du Caire. La Seine de

1. Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 783.

2. Russegger, *loc. cit.*, t. II, p. 271.

3. Voyage de M. le duc de Raguse; t. IV, p. 43.

Paris à Rouen a une pente d'environ $0,^m000092$ par mètre ou de $19''$. Elle débite à l'étiage le plus bas 74 mètres cubes d'eau par seconde, et 85 mètres cubes par seconde en eaux très-basses encore, quoique moins exceptionnelles (voir ci-dessus, p. 174 et 176). Le Nil en eaux très-basses, sans être à son minimum, débite à Manfalout 678 mètres cubes par seconde. La formule approximative de la page 120 permet de calculer, d'après ces données jointes à celles déjà consignées ci-dessus, quelle doit être la pente du Nil à Manfalout en eaux basses. Si l'on désigne par v , Q et p la vitesse, le débit et la pente de la Seine, par v' , Q' et p' les mêmes quantités relatives au Nil, et si on suppose que les quantités m et n soient les mêmes pour les deux fleuves on aura

$$v = m \sqrt[5]{\frac{Q p^2}{n}} \quad v' = m \sqrt[5]{\frac{Q' p'^2}{n}}$$

d'où l'on tirera

$$\frac{v'}{v} = \sqrt[5]{\frac{Q' p'^2}{Q p^2}},$$

et

$$p' = p \sqrt[5]{\frac{Q}{Q'} \left(\frac{v'}{v}\right)^5}.$$

La vitesse v' du Nil à Manfalout étant lors du jaugeage de 75 mètres par seconde, et celle de la Seine aux environs de Paris, étant dans les basses eaux, ainsi que nous l'avons déjà vu p. 76, de $0,^m50$ par seconde, cette formule se réduit à

$$p' = p \sqrt[5]{\frac{85}{678} \left(\frac{0,75}{0,50}\right)^5} = p \cdot 0,975714;$$

et en faisant $p = 0,000092$, elle donne

$$p' = 0,000089766,$$

ce qui correspond en mesures angulaires à $18'' + \frac{1}{2}$. Cette valeur diffère peu de la pente moyenne indiquée par M. Russegger, qui est de $22''$. Elle est un peu moindre et il est naturel qu'il en soit ainsi, parce que Manfalout est plus près du Caire que de Syène. Le calcul que nous venons de faire tend donc à faire présumer que l'évaluation de M. Russegger s'écarte peu de la vérité, c'est-à-dire que *la pente moyenne du Nil dans la Haute-Égypte est peu différente de la pente moyenne de la Seine aux environs de Paris.*

S'il en est ainsi, la vitesse du Nil dans ses diverses phases doit surpasser la vitesse de la Seine dans les phases correspondantes, à cause de la quantité comparativement plus grande de son débit. En supposant m et n les mêmes de part et d'autre, et $p = p'$, les formules ci-dessus donnent

Sa vitesse.

$$v' = v \sqrt[5]{\frac{Q'}{Q}} = v \sqrt[5]{\frac{678}{85}} = v. 1,5148,$$

c'est-à-dire que dans les phases correspondantes la vitesse du Nil doit être égale à environ une fois et demie celle de la Seine. En basses eaux, comme nous l'avons vu ci-dessus, p. 76, la vitesse de la Seine est de $0,^m50$ par seconde, celle du Nil doit être de $0,^m75$. La vitesse moyenne du Nil n'excède pas $1,^m54$ qui correspondent pour la Seine à 1 mètre environ, vitesse que cette rivière ne dépasse guère que dans les crues.

On voit d'après tous ces rapprochements que le Nil, sans avoir une pente très-considérable, doit être rangé parmi les fleuves rapides. Il a d'autant

Le Nil
à les allures
d'un fleuve rapide.

plus les propriétés d'un fleuve rapide, que, bien que son niveau de plus longue tenue se trouve en basses eaux, il débite, en hautes eaux dans ses crues annuelles, une plus grande fraction de sa portée intégrale annuelle, qu'une foule d'autres rivières et surtout que la Seine.

Il serpente peu.

Cela pourrait se lire en quelque sorte sur la carte, particulièrement sur les belles cartes de l'Égypte, levées pendant l'expédition de l'armée française, et publiées au dépôt de la guerre, sous la direction du colonel Jacquotin. On y voit que le Nil serpente très-peu; sa vallée de Syène au Caire présente de larges ondulations, mais dans la vallée ainsi tracée, le Nil forme très-peu de replis qu'on puisse attribuer au caprice de ses eaux. On y voit des îles nombreuses, toutes allongées dans le sens de son cours, dont M. Russegger évalue les surfaces réunies à 1097 kilomètres carrés¹, mais presque jamais de *coupures* ni de *morts-bras*. On a d'ailleurs la preuve du peu de serpentements que le Nil présente dans toute la Haute-Égypte jusqu'au Caire, si l'on remarque que dans cet intervalle qui occupe 6° sur le méridien, c'est-à-dire un arc de 666,666 mètres : le cours du Nil, en suivant toutes ses sinuosités, n'a que 860 mètres de développement. La différence résulte presque en entier des larges replis de la vallée considérée dans son ensemble. Il en est tout autrement dans le Delta où, comme nous l'avons vu (10.^e leçon, t. I.^{er}, p. 414), du sommet du Delta (*Batn-el-Baqarah*) aux *Boghaz* de

1. J. Russegger, ouvrage cité, t. II, p. 271.

Rosette et de Damiette il y a en ligne droite 140 kilomètres seulement, tandis qu'en suivant les sinuosités des deux branches principales du Nil, qui y aboutissent, on leur trouve de 230 à 240 kilomètres. Il résulte évidemment de là que dans toute la Haute-Égypte le Nil tend à obéir à une forte impulsion qui le précipite vers la mer par la ligne la plus courte, et qui résulte de la grande vitesse dont il est animé dans sa crue périodique annuelle.

La crue du Nil a une renommée classique. Tout le monde sait que, malgré l'extrême sécheresse de son climat, l'Égypte est très-fertile, et qu'elle est fécondée par la crue du Nil. Cette crue s'opère constamment de la même manière depuis 3000 ans; ce qui montre que, pendant cette longue période, les circonstances physiques sont restées sensiblement les mêmes dans le vaste bassin en partie inconnu, dont le Nil conduit les eaux à la mer.

La crue se manifeste en Nubie dès le mois d'avril; mais elle éprouve, en Égypte, un retard de deux mois, dû sans doute à ce que les premières parties de la crue sont absorbées avant d'atteindre l'Égypte, par les terres, qui sont très-sèches au moment où elle commence à se faire sentir.

Vers le solstice d'été on commence à s'apercevoir de la crue du Nil au-dessous de la dernière cataracte. Elle devient sensible au Caire dans les premiers jours de juillet, et vers le 15 août le fleuve est à peu près arrivé à la moitié de sa plus grande hauteur, qu'il atteint ordinairement du 20 au 30 septembre. Parvenu à cet état, il reste dans une sorte d'équilibre pendant environ quinze jours, après

Ses crues.

Leur marche en Égypte.

lesquels il commence à décroître beaucoup plus lentement qu'il ne s'était accru. A cette époque l'Égypte est complètement inondée. Au 10 de novembre le Nil est descendu de la moitié de la hauteur à laquelle il s'était élevé. La crue véritable finit en novembre; mais le fleuve baisse encore jusqu'au 20 du mois de mai de l'année suivante¹. La figure 3, planche IV, extraite de l'une des planches de la Description de l'Égypte, représente la loi assez régulière que suit, d'après M. Girard, l'accroissement et le décroissement des eaux du Nil. Cette courbe n'est qu'une représentation graphique des observations hydro-métriques régulières exécutées au Caire pendant l'expédition de l'armée française, de 1799 à 1801. M. Dausse, en discutant ces observations par les méthodes qui lui sont propres, a construit les courbes des *tenues* du Nil, et il a trouvé que pour ce fleuve comme pour la Seine la plus longue tenue se rapporte à un niveau bien inférieur à celui des eaux moyennes. Il a eu lieu en 1800 à 2,^m05 du nilomètre du Caire, la moyenne hauteur générale pour cette année étant 4,^m889.²

Leur hauteur.

Ces données, résultant de deux années seulement d'observations, ne peuvent encore être qu'approximatives; car la hauteur de la crue du Nil varie d'une année à l'autre, ainsi qu'on l'a reconnu de temps immémorial par ses effets, comme cause fertilisante, qui varient en même temps.

1. Girard, *loc. cit.*, page 351.

2. Dausse, Mémoire sur les variations particulières et comparées de la Seine, de la Saône, du Rhône, de l'Isère, de la Loire et du Nil.

«La hauteur des crues du Nil, dans les inondations médiocres ou suffisantes, est aujourd'hui d'environ douze coudées de 20 pouces (0,^m54) chacune, c'est-à-dire de 6,^m48. Dans les crues abondantes, les eaux s'élèvent jusqu'à quatorze coudées et demie (7,^m83). Quand elles dépassent ce terme, elles deviennent bientôt un fléau au lieu d'être un bienfait, à cause du temps que les eaux mettent à se retirer, et à mesure qu'elles s'approchent de seize coudées (8,^m64), les récoltes deviennent de plus en plus mauvaises. Il est presque sans exemple que la crue effective monte à seize coudées et demie (8,^m91).»¹

«On peut évaluer la crue moyenne du Nil au Caire à 7,^m419, hauteur qui équivaut à treize coudées et dix-sept doigts de la colonne du Meqyâs (du Caire), et à quatorze coudées du nilomètre d'Éléphantine.»²

«Les eaux de l'inondation sont distribuées sur la surface de l'Égypte au moyen de canaux et de digues, et la vallée de la haute Égypte présente, lors de l'inondation, une suite d'étangs ou de petits lacs disposés par échelons les uns au-dessus des autres, de manière que la pente du fleuve, entre deux points donnés, se trouve, sur ses deux rives, distribuée par gradins³.» Les digues sont si multipliées, dit M. le duc de Raguse, que dans la seule province de Beni-Soueyf il y en a onze parallèles entre elles, sans compter les digues secondaires qui servent à des usages particuliers et locaux.⁴

Distribution
des eaux des crues
sur la surface
de l'Égypte.

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 477.

2. Girard, *loc. cit.*, page 352.

3. Girard, *loc. cit.*, page 352.

4. Voyage du duc de Raguse, t. IV, p. 34.

« Dans la basse Égypte les grands canaux, dérivés des deux branches de Rosette et de Damiette, alimentent à leur tour des déviations secondaires, dont les eaux sont soutenues par des digues qui traversent la campagne dans tous les sens, en allant d'un village à l'autre; chacun d'eux s'élève au-dessus de ces digues, comme une espèce de monticule qu'accroissent annuellement les dépôts d'immondices et de décombres que les Égyptiens sont dans l'usage d'accumuler autour de leurs habitations. »¹

Dans la Haute-Égypte des digues, des tertres factices, exhaussant les villes et les hameaux, les soustraient aux inondations, dont on trouve la hauteur de plus en plus grande à mesure qu'on avance vers le sud. Les maisons sont élevées de 30 pieds (9^m 75) au-dessus de la plaine.²

Le décroissement des eaux du Nil continue en Égypte, ainsi que nous l'avons déjà vu, jusqu'en mai, et même, quoique d'une manière beaucoup moins sensible, jusqu'au solstice d'été; les eaux commencent alors à s'élever de nouveau; elles conservent d'abord leur limpidité, mais deux ou trois jours après le premier mouvement de la crue les eaux se troublent, se colorent presque subitement, et les progrès de l'inondation deviennent de plus en plus rapides. Pendant toute la durée du débordement, elles présentent une couleur rougeâtre qu'elles ne perdent que peu à peu, à mesure qu'elles rentrent dans leur lit; elles redeviennent enfin aussi limpides

Nil n'est jamais
parfaitement
limpide.

1. Girard, *loc. cit.*, page 353.
2. De Rozière, *loc. cit.*, p. 442.

que puissent l'être les eaux du Nil, qui ne le sont jamais parfaitement¹. Quand elles sont le plus claires, en avril et mai, elles ont encore une teinte nuageuse.

La coloration qu'elles offrent pendant l'inondation est due au sable et au limon dont elles sont chargées. Lorsqu'elles débordent, elles ont une couleur d'un rouge sale, qu'on suppose provenir de l'argile rouge apportée par le Bahr-el-azrek; car le Bahr-el-abiad charrie seulement une argile blanchâtre très-fine. « Cependant M. Russegger et M. Newbold pensent que le limon que contiennent les eaux du Nil en chaque point de l'Égypte, ne vient pas en totalité des parties supérieures de son cours, mais que les eaux l'enlèvent en partie aux terrains sur lesquels elles coulent; d'où il résulte que sa nature varie avec la composition des formations que le Nil traverse. Au-dessus de Thèbes, lorsque le Nil vient de traverser les formations de granit et de grès de la Nubie et de la partie méridionale de l'Égypte, le limon contient plus de silice et moins de matière calcaire ou argileuse que dans les environs du Caire et dans le Delta, où le Nil arrive après avoir parcouru une longue vallée à flancs calcaires. Le Nil délaye et entraîne aussi dans chaque crue une partie du limon qu'il a déposé les années précédentes. »

Le dépôt varie en texture et en composition suivant la situation des points où il se dépose, par rapport au lit principal du fleuve et suivant la force du courant². Le sable est rarement entraîné à une

Matières
qu'il charrie

Dépôts
qu'il forme

1. Girard, *loc. cit.*, page 351.

2. Newbold, ouvrage cité, t. III, p. 790.

Limon.

grande distance des bords du fleuve, mais les eaux rouges et bourbeuses qui couvrent alors toute la plaine, tiennent en suspension une matière principalement argileuse, qu'elles laissent déposer dans tous les endroits où leur vitesse se trouve ralentie, c'est-à-dire, successivement sur toute la surface de l'Égypte, excepté dans le canal qui forme le lit ordinaire du fleuve¹. Ce limon ne se dépose cependant pas en général dans un état de pureté parfaite, presque toujours il est mélangé avec une certaine proportion du sable quartzeux du désert, que le vent entraîne sur la surface de l'Égypte, ainsi que nous l'avons déjà vu dans la 6.^e leçon, t. I.^{er}, p. 189. Ce sable quartzeux est répandu dans l'atmosphère de l'Égypte d'une manière si habituelle et en si grande abondance qu'il a fait douter pendant longtemps que les machines à vapeur pussent y être mises en activité², et il incommodé quelquefois les voyageurs qui remontent le Nil, au point de les obliger à chercher un refuge dans les cabines de leurs bateaux³. Il est difficile, dit M. le duc de Raguse, de se faire une idée de l'aspect que présente alors l'atmosphère; une énorme quantité de poussière impalpable l'obscurcit, gêne la respiration et pénètre avec violence dans les yeux."⁴

Sable.

« Le Nil charrie aussi, pendant les débordements, une quantité considérable de sable quartzeux⁵. Ce

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 465.

2. Voyage du duc de Raguse, t. IV, p. 213.

3. J. Russegger, *loc. cit.*, t. II, p. 98.

4. Voyage du duc de Raguse, t. IV, p. 123.

5. De Rozière, *loc. cit.*, page 466.

sont toujours les sables les plus grossiers qui se déposent les premiers.¹

« On trouve dans le Nil des galets aplatis de 2 ou 3 centimètres de longueur : ce sont des débris de roches primitives, des variétés nombreuses de granites, de gneiss, de jades, de cornéennes, de trapps, de pétrosilex ou eurites : on y remarque aussi de petits galets de quartz. Ces fragments, assez communs dans le lit du Nil vers la partie supérieure du Saïd (Haute-Égypte); et beaucoup plus rares dans la partie moyenne, ne se rencontrent presque jamais dans sa partie inférieure, où le courant n'a pas la force de les entraîner : ils sont quelquefois noyés dans le sable quartzeux qui constitue principalement le fond du fleuve.»²

Graviers.

« Les rives du Nil forment des plages sablonneuses toutes les fois qu'elles offrent une pente très-adoucie. Entre Syène et l'île de Philæ, et probablement au-dessus de cette île, les bords du Nil sont couverts de sables de la même nature que ceux dont le fond de son lit est composé. On y remarque les particules de mica, et les lamelles ferrugineuses attirables à l'aimant que l'on retrouve à ses embouchures; le fleuve les y entraîne lors de ses crues, après avoir détruit les bancs qui se forment dans son lit pendant la saison des basses eaux³. » « La partie la plus grossière des matières, que le Nil emporte, tombe au fond du fleuve et exhausse son lit; une autre partie est très-irrégulièrement étendue sur

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 467.

2. *Idem*, page 475.

3. Girard, *loc. cit.*, page 396.

les terres voisines; le reste est entraîné jusqu'à la mer, où il concourt à produire l'allongement du Delta. Ce sable n'est que charrié et roulé par le courant; le limon, au contraire, est dans un véritable état de suspension.»¹

Épaisseur
des
dépôts de limon
qu'il a formés
sur ses rives.

Ce limon, en se déposant sur les rives pendant les crues, les a exhaussées par degrés; il est presque toujours escarpé ou taillé en degrés sur une des rives². Au-dessus du Caire, les berges du Nil, bien plus élevées que dans le Delta, montrent souvent le limon à découvert sur une hauteur de 20 pieds. M. Newbold a même mesuré sur les bords du Nil, dans la Haute-Égypte, des escarpements de limon qui avaient jusqu'à 40 pieds anglais (12 mètres). D'après lui leur hauteur ordinaire dans l'Égypte moyenne est de 30 pieds (9 mètres) et à la pointe du Delta (*Batn-el-Baquarah*) de 18 pieds (5^m 49).³

Profil
de ses berges.

A Manfalout, dans la Haute-Égypte, au-dessous de Siout et de Thèbes, les talus des berges du Nil sont souvent inclinés de deux fois leur hauteur; mais les deux berges du Nil présentent dans le même profil transversal des inclinaisons différentes, comme on le remarque dans celles de tous les autres fleuves, toutes les fois que le courant ne se dirige point en ligne droite ou n'est point encaissé entre des parois solides.

Lorsque les mesures rapportées ci-dessus ont été exécutées à Syout, la rive gauche était la plus

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 468.

2. *Idem*, page 442.

3. Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 790.

abrupte, parce que le courant s'y portait, et cependant le talus de sa berge avait encore 25 mètres de base sur 9 de hauteur : c'est une inclinaison d'environ trois mètres de base sur un de hauteur (et plus exactement de 0,^m36 par mètre ou de 19° 47' 56"). L'inclinaison de la rive opposée était beaucoup plus douce, parce que les matières charriées par le courant se déposaient sur cette rive, en prenant le talus convenable à leur degré de ténuité ; ainsi les sables les plus pesants formaient la base de ce talus sous l'inclinaison la plus forte ; les sables, plus légers, étaient placés au-dessus, sous une inclinaison moindre ; enfin le limon proprement dit formait la crête de la berge et se raccordait horizontalement avec le terrain de la plaine. Le profil de cette berge formait, comme on le voit figures 4 et 5, planche IV, une courbe convexe dont la pente totale vers le Nil était de 10 mètres, sur un développement de 640 ; c'est une inclinaison réduite de 0,^m015625 par mètre (0° 53' 42" $\frac{2}{3}$) ; rampe extrêmement douce et l'une des moindres que l'on soit dans l'usage de donner aux grands chemins." ¹

Forme
de la section
transversale
de sa vallée.

Les nivellements donnent partout, pour la section transversale du sol de la vallée du Nil, une courbe légèrement convexe, ayant dans sa partie supérieure, c'est-à-dire dans son milieu, une échancrure profonde, où le Nil est renfermé pendant ses basses eaux. M. le duc de Raguse, en remontant le Nil au mois de novembre 1834, a été frappé à partir de Beni-Soueyf, de la surélévation des rives du Nil,

Le sol
est plus élevé sur
ses bords mêmes
qu'à une certaine
distance.

1. Girard, *loc. cit.* ; page 356.

qui lui parut de plus en plus remarquable, à mesure qu'il avança vers Thèbes « A compter de Beni-Soueyf, dit-il, la rive du Nil est tellement élevée que jamais l'inondation ne peut l'atteindre. Le bord forme un plateau continu parallèle au fleuve, dont la largeur est de mille toises environ. Ensuite le terrain s'abaisse et forme une pente régulière qui continue jusqu'au pied de la chaîne libyque. »

Effets
remarquables
qui en résultent.

« On conçoit la cause de cette disposition du terrain : elle est le résultat des dépôts du fleuve... Les eaux du Nil ne peuvent plus être répandues sur cette partie élevée que par des moyens artificiels. La hauteur des eaux, quelle qu'elle soit, ne dispense pas de les employer, seulement elle en favorise les effets.... On a dû faire, perpendiculairement au fleuve, de larges canaux pour que les eaux puissent se répandre sur les terrains situés à un niveau inférieur. Mais comme ces terrains ont une double inclinaison, vers l'ouest et vers le nord, conformément à la pente générale du fleuve, il a fallu construire des digues transversales dans toute la largeur de la vallée, pour soutenir les eaux, leur donner le temps de pénétrer dans la terre, et suspendre ou ralentir leur cours, sans quoi, par leur masse rapide, elles creuseraient des lits momentanés et bouleverseraient les champs au lieu de les fertiliser. »

« Les digues sont appuyées, d'un côté, à la partie élevée des rives du fleuve, où elles viennent à zéro ; elles sont plus hautes à mesure qu'elles s'en éloignent ; et du côté opposé elles se terminent à la chaîne libyque. Des ouvertures préparées d'avance donnent passage aux eaux d'un bassin dans un

autre, quand leur séjour dans le premier n'est plus utile."

« Les effets que j'ai décrits des exhaussements par les débordements, dit encore M. le duc de Raguse, sont si constants que les bords du canal de Joseph, qui a un cours de 36 lieues, sont, dans tout leur développement, plus hauts que les inondations, et ne sont arrosés que par des moyens artificiels, comme le bord correspondant du Nil; de manière que dans cette partie il y a deux plans opposés, qui se rencontrent dans l'intervalle, et dont la ligne d'intersection forme un bas-fond auquel les habitants donnent le nom de *Bahr-Bashen*, ou canal du milieu. Les digues transversales s'appuient alors à l'ouest au canal de Joseph, au lieu de s'appuyer à la chaîne libyque. »¹

De cette disposition générale du terrain, qui est d'accord avec les circonstances géologiques de sa formation, il résulte, dit M. de Rozière, que, dès que le fleuve s'élève tant soit peu au-dessus du niveau de ses berges, il peut submerger la totalité de la surface convexe dont elles forment le sommet, c'est-à-dire la totalité du pays cultivable. Ainsi, l'Égypte n'est rien de plus que la vallée du Nil; elle n'est même rigoureusement que le lit (majeur) du fleuve; lit qu'il remplit et occupe en entier, chaque année, à l'époque de sa plus grande élévation. Là où ses eaux ne peuvent atteindre, ce n'est plus l'Égypte, c'est le désert : la limite est tranchée nettement; c'est un sol absolument différent². En élevant par degrés le sol allu-

Le sol cultivable
de l'Égypte
n'est que le
lit majeur du Nil.

1. Voyage du duc de Raguse, t. IV, p. 33.

2. De Rozière, *loc. cit.*, page 441.

Il s'étend
graduellement
aux dépens
des déserts qui le
bordent.

vial de la vallée, le Nil lui donne continuellement une nouvelle extension aux dépens du désert dont il recouvre le sol stérile de son limon. Le terrain cultivable s'agrandit ainsi lentement. Il est vrai que les sables poussés par le vent en couvrent quelques parties, ce qui en diminue l'étendue; mais il paraît que les accroissements l'emportent sur les diminutions, et Sir G. Wilkinson pense que le nombre de milles carrés de terre cultivable est plus grand à présent en Égypte qu'à aucune époque antérieure.¹

Plages
sablonneuses
stériles, que le Nil
a formées
sur ses bords.

Dans l'intérieur même de l'Égypte, les seuls terrains fertiles sont ceux que le Nil a recouverts de son limon : les plages sablonneuses qu'il a formées en quelques points sur ses bords sont stériles.

Couches de sable
qui alternent
avec le limon,
surtout vers la base
du dépôt.

Dans le sol cultivable de l'Égypte, formé par les dépôts du Nil, « la proportion du sable et du limon est variable; il y a, en moyenne $\frac{1}{12}$ de limon et $\frac{5}{12}$ de sable². Mais les couches de sable qui alternent avec celles de limon, deviennent de plus en plus abondantes dans la profondeur, et l'on finit quelquefois par ne plus trouver qu'un sable pur, ou mélangé d'un quart ou d'un cinquième de limon.»³

Emplois divers
du limon du Nil.

Le limon du Nil fournit de temps immémorial à tous les besoins des habitants de l'Égypte; ils le cultivent et ils en construisent des habitations qui, sous un climat sans pluie, suffisent pour les abriter. Les carrières de granite et de grès n'ont été exploitées que pour les monuments religieux et pour les

1. Sir G. Wilkinson, *Journal of the roy. geogr. Soc. of London*; t. IX, p. 432.

2. de Rozière, *loc. cit.*, page 467.

3. *Idem*, page 469.

palais des rois. Dans l'antiquité, comme de nos jours, le peuple habitait des huttes bâties en limon. On a réédifié plusieurs fois des *maisons en terre* sur l'ancien emplacement de Memphis, occupé aujourd'hui par un bois de palmiers dont le sol inégal laisse percer çà et là des débris de grands monuments et de statues colossales¹. On bâtit aussi des maisons avec des *briques séchées au soleil*.²

En examinant les bases des monuments et des statues environnés par le limon du Nil, on a pu se rendre compte approximativement de l'exhaussement moyen que le sol de l'Égypte éprouve annuellement par l'effet du dépôt de ce limon.

Épaisseur
moyenne annuelle
des
dépôts de limon
formés par le Nil.

Pendant l'expédition d'Égypte, M. Girard avait calculé que le sol de la vallée du Nil s'élève d'environ 126 millimètres par siècle, ce qui fait 1,^m26 dans l'espace de 1000 ans, et par conséquent 2,^m52 depuis l'époque des Ptolémées.

«A Karnak et à Louqsor, sur l'emplacement de l'ancienne Thèbes, il y a environ 6 mètres de différence entre le niveau actuel de la vallée et celui de sa surface, lorsqu'elle fut couverte par le remblai sur lequel les édifices ont été construits : à raison de 0^m,126 par siècle, cela ferait remonter le commencement de ce remblai à 4760 ans avant les observations de M. Girard, ou à 2960 ans avant notre ère³.» Mais les différents voyageurs ne sont pas tous d'accord sur le taux précis de l'exhaussement annuel.

1. Champollion, *Lettres écrites d'Égypte*, page 18.

2. De Rozière, *loc. cit.*, pages 555 et 556.

3. Girard, *loc. cit.*, page 389.

M. de Rozière, qui a fait partie, comme M. Girard, de l'expédition d'Égypte, a admis un taux un peu plus rapide pour l'accumulation des sédiments. D'après lui on ne peut évaluer l'exhaussement séculaire de la vallée du Nil, près du Caire, à moins de 5 pouces $\frac{2}{3}$ ($153^{\text{mm}},40$), ni à plus de 6 pouces et $\frac{1}{2}$ ($175^{\text{mm}},96$)¹. Il ajoute que « les édifices anciens paraissent confirmer de même un exhaussement d'environ 6 pouces par siècle ($162^{\text{mm}},42$) pour toute la Haute-Égypte. »²

Elle
n'est pas la même
dans
toutes les parties
de l'Égypte.

Sir Gardner Wilkinson a conclu de ses propres mesures que dans les environs d'Éléphantine le sol a été couvert depuis 1700 ans de 9 pieds anglais ($2^{\text{m}},743$), à Thèbes de 7 pieds ($2^{\text{m}},134$), au Caire et à Héliopolis de 5 pieds 10 pouces ($1^{\text{m}},778$)³, ce qui revient à $1^{\text{mm}},613$, $1^{\text{mm}},255$ et $1^{\text{mm}},045$ par an, évaluations dont la moyenne $1^{\text{mm}},304$ diffère bien peu de celle de M. Girard, qui était $1^{\text{mm}},26$. M. Russegger est porté à réduire cette élévation à 1 millimètre par an.⁴

Près des bouches du Nil le sol a été élevé d'une quantité beaucoup moins sensible, à cause de la plus grande étendue et de la moindre hauteur de l'inondation.

Ces évaluations ne peuvent au reste faire connaître que les moyennes des dépôts annuels définitivement accumulés pendant un grand nombre

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 493.

2. *Idem*, page 496.

3. J. Gardner Wilkinson, *Journal of the royal geographical Society of London*; t. IX, p. 432.

4. J. Russegger, *loc. cit.*, t. II, p. 172.

d'années. D'après M. Newbold, l'épaisseur initiale du lit déposé annuellement varie, dans un point donné, d'un pouce à quelques lignes, et la partie supérieure est généralement moins dense que l'inférieure. Chaque lit peut se séparer de celui qui est au-dessous et de celui qui est au-dessus. Mais chaque dépôt annuel ne concourt pas à l'élévation du sol de la vallée pour une quantité égale à son épaisseur initiale. Le dépôt d'une année est souvent enlevé par la crue de l'année suivante, soit en totalité, soit en partie; le vent peut de même l'enlever en totalité ou en partie à l'état de poussière. M. Newbold, en jugeant d'après l'épaisseur des lits de dépôt annuels, dont il a compté plus de 900 dans les flancs escarpés du lit du Nil, conclut, qu'en masse, l'élévation moyenne produite par les dépôts annuels, n'a pas varié pendant les mille dernières années.¹

Elle paraît être restée constante en chaque point depuis très-longtemps.

Le régime du Nil est resté sensiblement le même depuis l'antiquité la plus reculée. « Autrefois, comme à présent, la navigation s'est faite librement, à toutes les époques de l'année, par les mêmes sortes de barques qui sont en usage depuis un temps immémorial. »

Le régime du Nil n'a pas varié depuis l'antiquité.

Le fond du Nil s'élève, mais le sol de ses rives s'élève à peu près de la même quantité, d'où résulte que l'Égypte n'est pas plus inondée qu'elle ne l'était autrefois. « Depuis Hérodote jusqu'à la conquête des Arabes il n'y eut dans les crues du Nil aucun accroissement, et depuis l'époque des califes elles n'ont

1. Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 791.

pas changé davantage. Les crues effectives du Nil sont donc invariables en moyenne, bien que les indications des nilomètres varient de siècle en siècle, par suite de l'exhaussement du sol (dans lequel leur base est fondée) et de quelques autres circonstances. »

Son fond s'est élevé
de la même
quantité
que ses rives.

Ainsi, il paraît que depuis le voyage d'Hérodote le lit du Nil s'est toujours exhaussé à peu près dans le même rapport que la plaine¹; car M. Girard fait parfaitement sentir que le régime du Nil et la marche des inondations n'ayant pas changé depuis Hérodote, il faut que le fond du lit et les berges se soient élevées de quantités égales; que l'exhaussement moyen du sol de l'Égypte doit être exactement le même que l'exhaussement moyen du lit du fleuve.²

On pourrait être tenté d'en conclure aussi que l'élévation doit avoir été exactement la même dans toute l'Égypte, au moins jusqu'à l'entrée du Delta; mais il faut remarquer, que quelques mètres de plus ou de moins, répartis sur toute la pente du Nil, depuis Syène jusqu'au Caire, ne peuvent y produire d'effet sensible, et que l'inégalité qu'on peut supposer dans l'exhaussement du sol de la vallée à Éléphantine et au Caire depuis 3000 ans, ne s'élève pas plus haut que cela.

D'après les observations de M. Girard sur le nilomètre de l'île d'Éléphantine, le fond du Nil paraît s'y être élevé de 2,^m11 en 1600 ans; ce qui donne 0,^m132 d'exhaussement par siècle.

1. De Rozière, *loc. cit.*, page 474.

2. Girard, *loc. cit.*, page 383.

D'après le nilomètre de l'île de Roudah, près du Caire, qu'on appelle le Meqyâs, et qui a été bâti pour la dernière fois au milieu du 9.^e siècle par le calife El-Motaonakel, l'exhaussement a été de 1^m,149 en 950 ans, ou de 0,^m120 par siècle.

La moyenne est 0,^m126, comme celle de l'élévation du sol sur les rives du fleuve.

La partie cultivable de l'Égypte étant uniquement celle que le Nil couvre chaque année, et dont le sol est formé par ses dépôts, il est très-exact de dire, comme les prêtres de Memphis l'ont dit à Hérodote, que l'Égypte est un *présent du Nil*. Mais cette vérité a été exagérée par les personnes qui ont cru devoir en conclure que le sol entier de l'Égypte a été produit par le Nil : les prêtres de Memphis eux-mêmes paraissent avoir associé à la vérité quelques traditions fabuleuses, lorsqu'ils ont dit qu'originellement les eaux de la mer occupaient toute la vallée du Nil jusqu'à Thèbes.

Rennel pense que la configuration et la composition des terres basses de ce pays ne permettent pas de douter que la mer n'ait battu, à une certaine époque, le pied des rochers sur lesquels s'élèvent les pyramides de Memphis (de Gyseh), dont la base actuelle est baignée par l'inondation du Nil à 70 à 80 pieds anglais (21,^m54 à 24,^m38) au-dessus de la Méditerranée, (hauteur qui est peut-être un peu exagérée).¹

L'examen du Delta nous a en effet porté à conclure (10.^e leçon, t. I.^{er}, p. 405) qu'il a été formé par

1. Rennel, cité par M. Lyell dans ses *Principles of geology*; 7.^e édition, en un volume in-8.^o (1847), page 260.

Le sol cultivable de l'Égypte est un présent du Nil.

Il n'en résulte pas que le sol entier de l'Égypte ait été formé par le Nil.

Discussions à ce sujet.

Origine du Delta.

le comblement de lagunes littorales, dont les lacs Menzaléh, Bourlos, d'Edkou, Madiéh et Maréotis sont encore des restes, et qui avaient été séparées de la Méditerranée, dès les premiers siècles de la période géologique actuelle, par la formation du cordon littoral d'Aboukir à El-Arisch et au delà.

Ces lagunes qui baignaient les dernières proéminences de la chaîne libyque, à l'ouest et au sud du lac Maréotis, pouvaient battre aussi au sud-est du Caire le pied du Gebel-el-Mokattan, et même pénétrer dans la vallée du Nil jusqu'à l'emplacement où fut depuis Memphis et peut-être même au delà. Mais cette extension est déjà hypothétique. Ce qui est certain, c'est que les lagunes dont le Delta a pris la place n'ont pu être que très-peu profondes; elles devaient avoir pour fond le prolongement de la plaine, faiblement inclinée au nord-ouest, que forme le désert qui s'étend de l'isthme de Suez au bord du Delta actuel.

Le Nil, dans le Delta, a déposé dans le voisinage de ses deux branches principales environ 10 mètres de limon; à l'extrémité de l'espace que l'inondation couvre habituellement, il en a déposé environ 2 mètres; dans les endroits que l'inondation n'atteint que rarement et pendant un temps assez court, il en a déposé une quantité moins grande encore. Le sol du Delta s'est ainsi formé par le limon du Nil, superposé de sable du désert. Ce désert qui forme le sous-sol du Delta est une grande plaine de sable, quelquefois mêlé de cailloux, complètement différent des dépôts du Nil, et la petitesse de la distance verticale à laquelle la surface de ce dépôt arénacé

se trouve au-dessous du niveau de la Méditerranée, est attestée par l'existence du cordon littoral qui s'est formé *de prime abord* sur le contour extérieur actuel du lac Menzaléh et du lac Bourlos. Sa formation n'aurait pu avoir lieu si la mer avait été très-profonde.

Dans de pareilles conditions on conçoit aisément la formation du Delta par le comblement d'une lagune qui aurait pu s'étendre même au delà de Memphis; et si les idées que je viens de rappeler avaient existé de son temps dans la science, Rennel n'aurait probablement pas dit que, lorsque nous essayons de rapporter nos idées en arrière jusqu'à la période reculée où les premiers fondements du Delta ont été posés, nous nous perdons dans la contemplation d'un si vaste intervalle de temps.

Il n'est pas difficile non plus de concevoir la formation de l'étroite plaine alluviale où le Nil coule dans la Haute-Égypte; mais l'explication demande quelques développements à cause des fables et des idées fantastiques qu'elle est destinée à remplacer.

Origine
de la
plaine alluviale
du Nil.

«Hérodote observe que la contrée autour de Memphis semblerait avoir été un bras de mer rempli graduellement par le Nil, de la même manière que le Méandre, l'Achelaüs et d'autres rivières ont formé des deltas. Par conséquent, dit-il, l'Égypte, comme la mer Rouge, était, à une certaine époque, une *baie longue et étroite*, et les deux golfes étaient séparés par une simple langue de terre, la chaîne arabique. Si le Nil, ajoute-t-il, pouvait parvenir à se faire jour vers le golfe arabe, il pourrait le combler de sédiments en 20 000 ans, ou peut-être

Idees d'Hérodote.

en 10 000. Et pourquoi le Nil, ajoute-t-il, n'aurait-il pas rempli de limon un golfe encore plus grand dans l'espace de temps qui s'est écoulé avant notre époque? »¹

Elles
sont exagérées.

Ce que Hérodote disait, beaucoup de personnes l'ont répété depuis, sans remarquer tout ce que ce premier aperçu renferme d'exagération ; d'abord exagération dans la comparaison de la vallée du Nil avec la mer Rouge. Certes, un système dans lequel on met en parallèle la vallée du Nil, qui a environ 15 000 mètres de largeur, avec la mer Rouge qui, à la hauteur seulement de Cosseir, en a plus de 150 000, ne peut être bien sérieux, et si Hérodote s'en est accommodé à une époque où la géographie et la géologie étaient si loin d'être ce qu'elles sont aujourd'hui, ce n'est pas une raison pour répéter sans examen de pareilles assertions.

Les eaux de la mer
ne peuvent pas
s'être étendues
originellement
jusqu'à Thèbes.

Que les lagunes littorales originaires se soient étendues jusqu'à Memphis et même un peu au delà, on peut parfaitement le concevoir, mais qu'elles se soient étendues jusqu'à Thèbes, c'est ce que les prêtres de Memphis n'ont certainement pu apprendre par la tradition. Ils ont trouvé naturel de le supposer, d'après l'horizontalité apparente du fond de la vallée, parce qu'ils ont fait abstraction d'une pente qui est insensible à l'œil ; cédant en cela, au reste, à la même illusion que beaucoup de géologues qui croient voir un lac comblé dans chaque élargissement de vallée, sans s'apercevoir

1. Hérodote, Euterpe XI, cité par M. Lyell, *Principles*; t. I.^{er}, p. 439.

que les deux extrémités de ce prétendu comblement sont à des niveaux très-différents.

Lorsqu'on dit que cette vallée a dû être un bras de mer qui remontait jusqu'aux cataractes, on fait de même abstraction de la pente. Le Nil a sans doute augmenté cette pente, et il l'augmente tous les ans; mais dans l'origine il devait toujours y avoir une certaine pente pour que les eaux pussent couler. Dans une vallée longue et étroite les eaux ne pouvaient s'échapper vers la mer Méditerranée qu'au moyen d'une pente sensible. Les eaux des marées ne peuvent entrer dans la Manche et en sortir, ainsi que nous l'avons calculé ci-dessus, page 81, qu'en prenant une pente de $3''\frac{3}{4}$, ou même de $7''\frac{1}{2}$, c'est-à-dire égale au tiers de la pente moyenne actuelle du Nil.

On sera surtout convaincu qu'une pente a dû exister dès l'origine, si on observe que dans plusieurs endroits, situés bien au-dessous des cataractes, et notamment au défilé de *Gebel-Selséléh*, le Nil, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus, coule entre des rochers qui réduisent son lit actuel à la moitié de sa largeur ordinaire. A raison d'une pente de 0,0001 par mètre (22'' environ), et d'un développement de 800 kilomètres seulement pour la partie du cours du fleuve située au-dessous de la dernière de ces gorges, le Nil doit y couler actuellement à une hauteur d'environ 80 mètres. Or, les parois de ces gorges sont loin d'être perpendiculaires; à une profondeur de 80 mètres au-dessous du niveau actuel des eaux, leur largeur de 300 mètres doit être devenue ou nulle ou très-petite, et il serait

de toute impossibilité que les eaux du Nil pussent les franchir sans y former des cataractes. Il est donc certain que les eaux de la mer Méditerranée actuelle n'ont jamais remonté au-dessus de la dernière de ces gorges; et il est évident que si jamais elles en avaient atteint le pied, cette gorge aurait été le siège d'une cataracte plus élevée peut-être que la *cataracte si célèbre de Syène*, dont la hauteur est de 26 mètres, et que celle même de *Niagara*, qui en a 50.

Il est de plus infiniment probable que là où le Nil vient baigner le pied des escarpements des chaînes qui le bordent, comme à la montagne d'Afulfeda et à celle des oiseaux, il présenterait au moins des rapides, si le terrain de transport, qui constitue le fond plat actuel de la vallée, était enlevé jusqu'au niveau de la mer. Or les prêtres de Memphis, en parlant à Hérodote d'un bras de mer qui aurait été navigable jusqu'à Thèbes, n'ont fait mention *ni de rapides ni de cataractes* qui auraient existé originairement, mais que le temps aurait fait disparaître, et ils ont prouvé seulement qu'ils parlaient de choses qu'ils ne savaient pas, et que du temps des Pharaons on bâtissait déjà des systèmes sur l'action longtemps continuée des causes actuelles; ce qui n'est pas en soi-même fort étonnant, puisque Zoroastre et d'autres auteurs plus anciens encore en ont faits sur les soulèvements des montagnes.¹

1. Voyez Fragments géologiques extraits de Stenon, de Kaswini, de Strabon et de Boun-Dehesch. Annales des sciences naturelles, t. XXV, p. 337 (1832).

Quel était donc l'état de la vallée de l'Égypte, lorsque le Nil y a déposé son premier lit annuel de limon? Les observations de M. Newbold et de M. Russegger permettent de s'en former une idée très-simple.

État probable
de la
vallée de l'Égypte
lorsque le Nil
y a commencé
ses dépôts.

La surface des vallées de la chaîne arabique est en grande partie couverte, dit M. Newbold, de détritits des roches voisines et de cailloux roulés transportés de loin, qui reposent souvent sur des terrasses et des collines à une hauteur considérable au-dessus du thalweg. Dans la vallée de Cosséir, près de la mer Rouge, le gravier se compose de cailloux de roches plutoniques et cristallines dérivées de l'intérieur du pays; mais près des montagnes, ou à l'ouest du gisement originaire de chacune de ces roches, on n'en trouve que peu de galets, ce qui prouve d'après M. Newbold que les courants auxquels est dû leur transport, se dirigeaient vers l'est. Cet habile géologue rapporte encore au même groupe (*drift*) les détritits qui reposent sur le plateau élevé du désert de Libye près de Denderah, détritits dont tous les éléments se composent de roches plutoniques et métamorphiques, roulées et transportées de loin, mêlées avec d'autres qui proviennent des formations adjacentes¹. M. Russegger distingue également le diluvium et l'alluvium parmi les formations qui constituent le sol de la vallée du Nil dans la Haute-Égypte. Il rapporte au diluvium le sable caillouteux du désert libyque,

1. Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 783 et 789.

c'est-à-dire celui dont est couvert le plateau qui présente sa tranche dans la chaîne libyque, sable dans lequel il signale des galets d'agathè, de jaspe, etc.¹, et où on trouve aussi des fragments de bois silicifiés. Les sables salés et les graviers qui forment les déserts d'Égypte et de Libye, ont paru à M. Newbold devoir provenir de la dégradation d'une formation de grès, riche en bois silicifiés, dont on voit un très-beau gisement au Gebel-Ahmar (mont rouge), entre le Caire et Suez. Indépendamment des fragments de bois silicifiés, des agathes, des jaspes, etc.... (cailloux d'Égypte), qu'ils contiennent généralement, les sables et les graviers se ressentent dans chaque partie des déserts de la nature des roches du voisinage immédiat², circonstance qui montre que les matériaux dont ils se composent n'ont pas été charriés en totalité de l'Abyssinie, et proviennent de la dégradation de la surface entière des contrées voisines du Nil.

Ce dépôt arénacé qui constitue le sol fondamental de l'Égypte n'est pas dénué d'une certaine ressemblance avec la *geest* du nord de l'Allemagne et avec le dépôt caillouteux de la *crau* en Provence. Il me paraît très-probable qu'avant les premiers dépôts du limon du Nil la vallée de l'Égypte, comme celles de la chaîne arabique et comme beaucoup de celles de l'Europe, présentait des terrasses diluviennes à plusieurs étages différents. L'une d'elles,

1. J. Russegger, *Reisen in Europa, Asien und Afrika*; t. II, p. 275.

2. Newbold, *Proceedings of the geological Society of London*; t. III, p. 789.

comparable à celle qui couronne tous les coteaux de la Gascogne, et dont les landes de Bordeaux sont le prolongement, forme le désert de Libye. Une terrasse inférieure formait le fond de la vallée d'Égypte et se raccordait au-dessous du Caire avec le désert qui s'étend vers l'isthme de Suez. Cette terrasse inférieure a reçu les premiers dépôts limoneux du Nil, qui l'ont bientôt cachée complètement, mais qui ne paraissent pas avoir acquis en aucun point une bien grande épaisseur. Le fait même que dans la Haute-Égypte les dépôts limoneux alternent dans leur partie inférieure avec des couches de sable plus nombreuses que dans leur partie supérieure, tend à prouver que le Nil a coulé à l'origine au milieu d'une plaine sablonneuse, qui a fini par disparaître sous ses alluvions; un simple sondage pourrait faire connaître sur quelle épaisseur ils l'ont recouverte; mais il me paraît peu probable qu'elle y soit ensevelie à une très-grande profondeur; qu'à Thèbes, par exemple, l'épaisseur du dépôt de limon soit égale à la moitié ou même au tiers de la hauteur du sol actuel de la vallée au-dessus de la Méditerranée. En effet, s'il en était ainsi, le Nil aurait eu dans les premiers temps une pente beaucoup plus faible qu'aujourd'hui, et il aurait dû avoir alors dans la Haute-Égypte, comme aujourd'hui au commencement du Delta, un cours serpentant; il aurait dû avoir des coupures, des mort-bras, etc.; il aurait dû aller saper les bases de la chaîne arabique et de la chaîne libyque en mille endroits qu'il ne touche plus de nos jours. Or, quoique les dépôts postérieurs de limon aient dû rendre moins

sensibles les traces de ces anciennes sinuosités, il est peu croyable qu'ils les aient effacées complètement, si jamais elles ont existé; et comme on n'en aperçoit aucune trace sur les belles cartes de l'atlas d'Égypte, qui montrent si clairement dans le Delta les anciennes branches du Nil aujourd'hui abandonnées, je suis très-porté à conclure que le Nil, dans la Haute-Égypte, n'a jamais eu un cours beaucoup plus serpentant qu'aujourd'hui, et que par conséquent sa pente initiale était peu différente de sa pente actuelle.

En résumé, je crois que dans la vallée du Nil, comme dans nos vallées européennes, et particulièrement dans celle de la Seine aux environs de Paris, les dépôts de la période actuelle n'ont fait que combler et *ragréer* les inégalités d'un grand *dépôt erratique*, dont l'origine est contemporaine de celle de la vallée elle-même.

Le Gange.

Je vous ai déjà signalé les analogies que le Gange présente avec le Nil. Ce fleuve produit dans les plaines du Bengale des effets analogues à ceux que le Nil produit en Égypte. Il les fertilise de même par le limon qu'il y dépose dans ses débordements périodiques, qui couvrent de vastes espaces.

Ses crues ressemblent à celles du Nil, mais elles sont un peu moins régulières.

D'après ces analogies, le Gange a été souvent appelé le Nil de l'Indoustan. Il y a cependant des différences entre les deux fleuves. Le Nil a une crue plus régulière, plus simple que toutes les autres rivières. Le phénomène n'est pas aussi calme et aussi régulier dans le Bengale qu'en Égypte, parce que le Gange ne vient pas d'aussi loin que le Nil, et ne reçoit pas ses eaux de montagnes situées au

centre même de la zone torride. Il en reçoit une partie de l'Himalaya : elles proviennent de la fonte des neiges, dont cette chaîne de montagnes se couvre en hiver jusqu'à un niveau assez bas, et des pluies qui commencent à y tomber avant le mois d'avril; une autre partie provient des grandes pluies qui tombent dans les plaines mêmes du Bengale et qui renforcent beaucoup l'inondation.

Le Gange et les autres rivières du Bengale commencent à croître à la fin d'avril, un peu plus tôt que le Nil en Égypte. A la fin de juillet toutes les parties du Bengale contiguës au Gange et au Brahmapoutra sont envahies par les eaux. Les cartes détaillées du Bengale représentent les parties qui demeurent le plus longtemps couvertes.

Époque
à laquelle elles
ont lieu.

Les eaux s'élèvent de quantités plus ou moins grandes dans les diverses parties de la vallée; l'élévation est peu considérable dans le voisinage de la mer. Dans les Sunderbunds l'influence de l'inondation sur la hauteur des eaux est très-faible ou nulle. A Luchipoor, à environ 10 milles de la mer, elles s'élèvent de 1,^m83; à Dana, de 4,^m27; à Custée, de 10,^m14; à Jellingley, au sommet du Delta, de 10,^m44. Dans le reste du cours du Gange elles s'élèvent à peu près de la même quantité, qui surpasse d'un tiers environ la hauteur de la crue du Nil.

Leur hauteur.

L'inondation continue à croître jusque vers le 15 août; elle décroît ensuite et est à peu près terminée, comme celle du Nil, à la fin de novembre. Les eaux diminuent encore jusqu'au mois d'avril, qui est la saison des plus basses eaux.

A partir de la fin d'octobre, quand les pluies ont

cessé, les eaux restées sur les terres basses s'évaporent, et le sol se trouve engraisé par le limon qu'elles y ont déposé. On n'a pas été aussi heureux pour le Gange que pour le Nil dans les travaux qu'on a faits pour l'utiliser. On a été conduit au Bengale depuis des siècles à établir des digues pour préserver certains terrains de l'inondation. On a entouré de digues beaucoup d'alluvions du Gange, comme on l'a fait pour celles du Rhône au-dessus de la Camargue, et par là on les a privées de leur engrais naturel et exposées à de désastreuses irruptions des eaux débordées. Il est arrivé, comme dans le midi de la France, en Italie, en Hollande, que les terrains extérieurs aux digues se sont élevés, que le fond du Gange s'est aussi élevé, de manière que les digues sont constamment menacées d'être dépassées et rompues, et qu'il faut les élever sans cesse. Le danger augmentant d'année en année, on a mis sérieusement en question si l'on conserverait ou si l'on supprimerait ces digues; mais jusqu'ici on a trouvé qu'au point où en sont les choses il vaut encore mieux les conserver.

Digues du Gange.

Leurs effets.

Leur premier établissement a peut-être été une faute.

Action violente que le Gange exerce sur ses rives.

Le Gange, plus fougueux que le Nil, agit avec violence sur ses rives, et y produit quelquefois des dégradations considérables. Ici, comme ailleurs, les rives sont ordinairement abruptes dans les points où le fleuve les ronge, et en pente douce du côté opposé. Quand le Gange est gonflé, la force du courant démolit quelquefois les berges, formées de matières incohérentes et molles, avec une telle rapidité, qu'on a vu disparaître un demi-hectare de terrain en moins d'une demi-heure. On cite une

localité sur ses bords, où quarante milles carrés de terrain (25 600 acres ou 10 360 hectares) ont été emportés en peu d'années.¹

Le Gange délaye les terres meubles, qu'il démolit avec tant de facilité, et le limon qui en résulte, joint à celui dont sont chargées, dès leur point de départ, les eaux qu'il reçoit des montagnes, le rendent extrêmement bourbeux dans la saison des crues. Il paraît même d'après les nombres que nous avons cités ci-dessus, page 59, qu'il contient à cette époque une plus grande quantité de matières terreuses en suspension qu'aucune des rivières sur lesquelles on a pu faire jusqu'ici des expériences très-exactes. M. Lyell remarque à ce sujet, avec sa justesse ordinaire, que les eaux qui alimentent ce fleuve coulent des montagnes les plus élevées de la terre, et qu'elles ne se clarifient pas par leur passage dans des lacs profonds, comme le font celles du Rhin dans le lac de Constance, et celles du Rhône dans le lac de Genève.²

Le Mississipi peut aussi être cité comme un des fleuves qui produisent les alluvions les plus remarquables. Son régime a de grands rapports avec celui du Nil et avec celui du Gange; mais il diffère du Nil en un point essentiel : c'est qu'il reçoit de nombreux affluents, dont plusieurs surpassent les plus grands fleuves de l'Europe. Il forme presque sous ce rapport l'extrême opposé; mais cet immense cours d'eau, dont les bords sont généralement très-plats,

Ses eaux contiennent une proportion très-considérable de matières terreuses en suspension.

Le Mississipi.

Ses crues.

1. Lyell, *Principles of geology*, 7.^e édit., en un seul volume in-8.^o (1847), p. 263.

2. *Idem, ibid.*, p. 265.

n'en est pas moins sujet à déborder, et le Bas-Mississipi a des inondations périodiques comme celles du Nil. Seulement on y distingue deux crues : la première, qui est la moins considérable, a lieu dans le commencement de janvier ; ensuite les eaux redeviennent basses et la grande inondation commence en avril, comme la crue du Gange.

Elles ont plusieurs phases qui correspondent aux crues des divers affluents.

Ces inondations ont plusieurs phases, parce que les grandes rivières qui alimentent le tronc principal n'éprouvent pas toutes leur crue en même temps. La vallée du Mississipi étant dirigée du nord au sud, et occupant l'espace de 19° de latitude, les fontes de neiges qui le gonflent au printemps doivent avoir lieu progressivement, en commençant par les pays les plus voisins de l'embouchure ; circonstance avantageuse, en ce qu'elle met le lit du fleuve à l'abri d'une invasion trop générale. C'est la rivière Rouge qui, la première, effectue sa crue. Puis vient l'Arkansas, qui est suivie de près par l'Ohio et le Haut-Mississipi. Le Missouri apporte son tribut le dernier.

Circonstances qui diminuent la hauteur de la crue et en augmentent la durée.

La direction des vallées de ces vastes affluents tendant aussi plus ou moins vers le sud, le dégel y marche de même en général par degrés de bas en haut, ce qui contribue à modérer l'inondation, mais aussi à la prolonger. De tous ces grands réservoirs, ceux qui opèrent le plus exactement à des époques fixes, sont l'Ohio et l'Arkansas. Ils grossissent presque constamment à la fin de février ou au commencement de mars, quelquefois cependant en janvier. La rivière Rouge déborde en février : quand la gelée n'est pas intense dans la

Époques des crues des affluents et de celle du fleuve principal.

Cordillère et à sa base, cet affluent roule beaucoup d'eau pendant tout l'hiver. Le Haut-Mississipi fait sa débâcle en mars. En juin ou juillet les eaux y sont fort réduites; mais alors le dégel s'étant étendu aux climats du nord et au cœur de la chaîne des montagnes rocheuses, le Missouri relève le niveau du fleuve¹. La crue de ce dernier, qui résulte de la combinaison de toutes les autres, atteint son maximum à Natchez, à 645 kilomètres de l'embouchure, dans la première semaine de juin, et à la Nouvelle-Orléans dans la première semaine de juillet.

Ainsi que nous l'avons déjà remarqué pour le Nil, le Gange et le Pô, la hauteur de la crue diminue en approchant de l'embouchure, à cause de la facilité avec laquelle les eaux s'écoulent dans la mer, dont le niveau peut être considéré comme invariable. Près de la mer, l'élévation ne dépasse pas 1 mètre; à la Nouvelle-Orléans, à 176 kilomètres de l'embouchure, elle dépasse rarement 3,^m66; à Baton-Rouge, 220 kilomètres plus haut, elle est ordinairement de 7,^m62. Au fort Adams elle est de 13,^m73; c'est la hauteur générale de la crue jusqu'à l'embouchure de l'Ohio.

Hauteur de la crue
du Mississipi
en
différents points.

Nous avons vu dans la leçon précédente (p. 86) que les crues de l'Ohio lui-même sont plus fortes encore. A la fonte des neiges cette rivière monte souvent de 15 mètres, et en 1832, à Cincinnati, elle dépassa de 20 mètres le niveau de l'étiage, pendant lequel, sur quelques points du haut de la

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; t. I.^{er}, p. 74.

Chaque crue
du tronc principal
est la prolongation
de celle
d'un affluent.

vallée, il ne reste pas un mètre d'eau dans le che-
nal. Les crues des différents affluents ayant lieu à
des époques différentes, chaque crue ou chaque
recrudescence de la crue du tronc principal est
la prolongation de celle de l'un des grands affluents.
On voit par l'exemple de l'Ohio que la crue, com-
mencée dans l'affluent, et continuée dans le tronc
principal du fleuve, va en diminuant de hauteur,
à mesure qu'elle approche de la mer, c'est-à-dire
à mesure qu'elle s'étend en largeur et en longueur.

Influence des crues
sur la pente.

On remarquera encore que de l'embouchure de
l'Ohio au fort Adams la pente du Mississipi n'est
pas changée dans les crues, puisque la hauteur des
crues est sensiblement la même dans ces deux points
déjà fort éloignés. Il n'en est plus ainsi en appro-
chant de l'embouchure. De la Nouvelle-Orléans
à la mer la crue donne une augmentation de pente
de 3,^m66 pour 176 000 mètres, c'est-à-dire de
0,^m0000208 par mètre ou de 4'' $\frac{1}{3}$. De Bâton-Rouge
à la Nouvelle-Orléans l'augmentation de pente est
de 3,96 pour 220,000 mètres, c'est-à-dire de 0,^m000018
par mètre ou de 3'' $\frac{3}{4}$. On voit qu'elle est déjà un
peu moindre, et à mesure qu'on remonterait, on
la trouverait généralement de plus en plus petite,
jusqu'à ce qu'elle devint tout à fait nulle.

Ses eaux
sont rarement
limpides
dans
la partie inférieure
de son cours.

Les eaux du Mississipi sont habituellement trou-
bles, comme celles du Nil; lorsqu'elles arrivent à la
mer, elles sont même très-limoneuses dans la saison
des crues. Dans le moment actuel, le bassin du
Mississipi se trouve un peu dans le cas où se trouvait
le bassin du Pô pendant le moyen âge. On défriche
des terres immenses dans la partie supérieure du

bassin traversé par ce fleuve et par ses affluents; cependant les matières boueuses que le fleuve transporte ne viennent pas en totalité du défrichement; car il entraîne beaucoup de grands arbres que les eaux ne peuvent déraciner qu'en faisant ébouler leurs berges.

Les eaux du Mississipi proprement dit, celles de l'Ohio et de plusieurs autres de ses affluents sont limpides par elles-mêmes dans la belle saison. Mais les eaux du Missouri, qui est sans doute alimenté par les glaciers des montagnes rocheuses, sont troubles en été, comme celles de toutes les rivières qui sortent des glaciers, comme celles de l'Isère, de l'Arve et du Rhône lui-même, avant son entrée dans le lac de Genève. Elles sont assez abondantes pour troubler complètement les eaux du Mississipi au-dessous de leur confluent.

Le Mississipi a une très-grande section; cependant il n'atteint pas la largeur qu'on pourrait lui supposer par comparaison avec nos fleuves d'Europe. Sa largeur moyenne, depuis l'embouchure de l'Ohio jusqu'à la Nouvelle-Orléans, est d'environ 900 mètres; à la Nouvelle-Orléans elle est d'un peu moins d'un demi-mille (800 mètres); elle est rarement de plus de 1500 mètres, même lorsqu'il s'y trouve des îles, qui y sont très-fréquentes. En quelques points seulement elle est de 2000 à 3000 mètres. Hors de la saison des inondations, ses rives ne s'écartent au delà de la limite ordinaire que par accident, lorsque, ayant déplacé le chenal par une coupure profonde, le fleuve a laissé des eaux stagnantes dans son ancien lit, là où, auparavant, il décrivait un coude.

Largeur
du Missis

Elle augmente peu
par l'introduction
des affluents,
mais sa profondeur
s'accroît un peu.

« Le plus souvent, après sa jonction avec l'Ohio, il m'a paru, dit M. Michel Chevalier, n'avoir que 800 à 1 000 mètres. Les puissants affluents dont il se grossit presque à chaque pas, n'y changent rien. Au-dessus des chutes de Saint-Antoine il a près de 800 mètres; il a 1 000 mètres au moment où il se mêle au Missouri. Celui-ci arrive alors avec une largeur de 800 mètres. L'Ohio, qui a 1 000 mètres, disparaît dans le fleuve sans le gonfler en apparence. Le Saint-François, le White-River, l'Arkansas et la rivière Rouge viennent successivement s'y englober sans que sa nappe d'eau s'étende sensiblement¹. M. Lyell, qui a exploré lui-même le Mississipi en 1845, donne des évaluations tout à fait semblables, et en fait l'objet de remarques analogues. A partir de son embouchure, à Balize, on peut remonter le Mississipi en bateau à vapeur l'espace de 2 000 milles (3 200 kilom.) sans presque apercevoir aucune différence dans sa largeur. Mais, si la largeur reste à peu près constante, sa profondeur va toujours croissant, et nous avons vu précédemment, page 127, comment les lois de l'hydraulique expliquent dans ce cas la constance presque exacte de la largeur, en tenant compte d'une certaine augmentation de la profondeur.

Profondeur
du Mississipi
en
différents points
de son cours.

Les étiages extrêmes laissent 1,^m80 de profondeur au Mississipi jusqu'au confluent du Missouri, et 1,^m50 à l'Ohio, au-dessous de Louisville. A partir du confluent du Missouri, en remontant, jusqu'aux

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; t. I.^{er}, p. 73.

rapides des Moines, le Mississippi n'a jamais moins de 1,^m20 d'eau dans le chenal¹." Au-dessous du confluent de l'Ohio la profondeur du Mississippi devient plus grande. Dans l'état ordinaire elle varie généralement entre 27 et 37 mètres. On doit remarquer pourtant qu'entre le confluent de l'Ohio et celui de la rivière Saint-François, il y a des points, en petit nombre à la vérité, où pendant les plus basses eaux il est difficile de trouver une passe pour les plus grands bateaux à vapeur. A la Nouvelle-Orléans la profondeur varie beaucoup d'un point à un autre; en quelques points elle est énorme pour un fleuve; la plus grande profondeur connue est dans les hautes eaux de 168 pieds anglais (51 mètres).²

Indépendamment de la loi d'hydraulique que nous venons de rappeler, loi dont l'application ne perd rien, pour cela, de sa justesse, la largeur presque constante et la profondeur graduellement croissante que présente le lit du Mississippi au-dessous du confluent du Missouri, s'expliquent très-simplement. Le lit du fleuve est surtout façonné par l'action de l'eau dans les crues. Or, comme les grandes crues des affluents sont rarement simultanées, une crue du tronc principal n'est ordinairement que la prolongation de la crue de l'un des affluents. Dans ce cas, la quantité d'eau qui doit être débitée par le tronc principal n'est que peu supérieure à celle qu'amène l'affluent gonflé. Il suffit donc que le lit du tronc principal ait la même largeur que celui de l'affluent

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édit., p. 209.

2. *Idem*, p. 210.

et une profondeur un peu plus grande, capable de compenser la diminution de la pente et de la vitesse. Ce lit, d'une largeur presque constante jusqu'à la mer, présente, dans les eaux basses et moyennes, une profondeur d'eau de plus en plus grande, à mesure qu'en approchant de la mer, le nombre des affluents augmente; mais dans une crue due à un affluent, à l'Ohio, par exemple, la différence de profondeur, dans les différentes parties de ce lit d'une largeur constante, devient beaucoup moins sensible, parce que la crue diminue de hauteur à mesure qu'on approche de la mer. Pendant la crue, le fleuve, dont le niveau est inégalement relevé, débite dans tous les points de son cours des quantités d'eau beaucoup moins différentes les unes des autres que dans les basses eaux. A mesure qu'il descend, le gonflement produit par la crue s'étend en largeur par l'effet du débordement: il s'étend aussi en longueur, et il ne serait pas impossible que lorsqu'une crue de l'Ohio arrive à la Nouvelle-Orléans, le débit par seconde, à la Nouvelle-Orléans, dans le tronc principal du fleuve, fut moindre qu'il n'était dans l'Ohio. On conçoit donc aisément comment le lit du Mississipi n'augmente presque pas en largeur, mais augmente en profondeur au-dessous de l'étiage, en approchant de la mer.

La vitesse de l'eau, lorsqu'elle est basse, est de 64 à 80 kilom. par jour, ou de 0,^m74 à 0,^m93 par seconde; la vitesse moyenne, de 96 à 113 kilom. par jour, ou de 1,^m11 à 1,^m31 par seconde, et dans les crues, de 135 à 160 kilom. par jour, ou de 1,^m56 à 1,^m85 par seconde: cette dernière vitesse se soutient

jusqu'au confluent de l'Arkansas. Plus bas, en approchant du Delta, la vitesse devient moins grande et moins différente d'une saison à l'autre. D'après M. Forshey, la vitesse moyenne du courant du Mississippi à la surface, lorsque les eaux ont leur hauteur moyenne, c'est-à-dire lorsqu'elles sont à 8 pieds anglais ($2^m,44$) au-dessous de leur hauteur maximum, est de 2 milles et demi à l'heure ($1^m,12$ par seconde). Il conclut de ses observations que la vitesse moyenne annuelle à la surface est de 1 mille 88 par heure ($0^m,84$ par seconde), et qu'elle peut être estimée à 1 mille et demi ($0^m,67$ par seconde) pour la masse générale des eaux.¹

La grosseur des matières que charrie le Mississippi diminue graduellement à mesure que les eaux qu'il roule s'éloignent de leur point de départ, comme cela arrive généralement dans tous les fleuves, ainsi que nous l'avons remarqué ci-dessus, page 122. « Jusqu'à 300 kilomètres au-dessous de sa réunion avec le Missouri, le Mississippi coule sur les cailloux que lui a apportés cet impétueux tributaire. Plus bas ce sont des graviers et des sables. Au-dessous de Natchez on ne trouve plus dans son lit qu'un mélange de vase et de sable blanc réduit en poudre presque impalpable.

D'après une série d'expériences faites à la Nouvelle-Orléans par M. le D.^r Riddell, la proportion moyenne annuelle de la matière sédimentaire dans le Mississippi, par rapport à l'eau, est de $\frac{1}{1245} = 0,0008032$ en poids² et $\frac{1}{3000}$ environ en volume,

Nature
des matières qui
forment son fond.

Proportion
des
matières terreuses
que
ses eaux tiennent
en suspension.

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édit., p. 210.

2. Lyell, *Athenæum*, n.^o 987 (26 septembre 1846).

ou pour mieux dire 0,0003213, en supposant aux particules terreuses en suspension une pesanteur spécifique moyenne de 2,50, ce qui suppose que la pesanteur spécifique moyenne de l'eau trouble est de 1,00048195. Ces résultats s'intercalent entre les extrêmes de ceux qui ont été trouvés à Lyon par diverses expériences (voir ci-dessus, p. 52 et 59). Ils sont supérieurs à ceux trouvés sur le Rhin par M. Léonhard Horner, mais inférieurs à ceux trouvés sur le Gange par M. Everest.

Longueur
et largeur
de la
plaine alluviale
du Mississipi.

« La partie du Mississipi située au-dessous du confluent du Missouri n'a, en ligne droite, qu'un peu moins de 1000 kilom. de longueur; mais en suivant le cours du fleuve elle en a 1700. Le fleuve alors roule, en serpentant, ses eaux mêlées de la boue dont le Missouri l'a encombré, au milieu d'une plaine marécageuse, dont la largeur varie de 40 à 130 kilomètres. La plaine unie qui constitue le fond de la vallée du Mississipi depuis le cap Girardeau, dans l'État du Missouri, au-dessus du confluent de l'Ohio jusqu'à la diramation de l'Atchafalaya, où commence proprement le Delta, présente le même caractère alluvial et marécageux que le Delta lui-même. D'après M. Forshey, sa superficie est d'environ 17 200 milles carrés (44 546 kilomètres carrés), et par conséquent elle est plus étendue que le Delta, dont la superficie n'est, d'après le même savant, que de 14 000 milles carrés (36 259 kilomètres carrés)¹. La largeur de cette plaine de l'est

1. Cette évaluation surpasse de près d'un cinquième celle que nous avons donnée implicitement à la page 499 du 1.^{er} volume, en disant que le Delta du Mississipi surpasse celui du Nil dans le

à l'ouest, est très-variable : près de son extrémité septentrionale, à l'embouchure de l'Ohio, elle est de 50 milles (80 kilomètres); à Memphis, de 30 milles (48 kilomètres); à l'embouchure du White-river elle est de 80 milles (129 kilomètres); plus au sud elle se rétrécit de nouveau, et elle a à Grand-Golfe 33 milles (53 kilomètres).

Le Delta et la plaine alluviale, dont il est la prolongation, s'élèvent, à partir de la mer, suivant une pente si douce, qu'au confluent de l'Ohio, à une distance de 800 milles (1287 kilomètres) de l'embouchure, suivant les sinuosités de la rivière, l'élévation au-dessus du golfe du Mexique n'est que de 200 pieds (61 mètres¹): cela suppose au Mississipi, au-dessous du confluent de l'Ohio, une pente moyenne de 0,000474 ou de $9''\frac{3}{4}$, pente extrêmement faible, qui n'est que la moitié de celle de la Seine de Paris à Rouen, et environ les quatre neuvièmes de celle du Nil, depuis le pied de la dernière cataracte jusqu'au Caire. Ce n'est qu'en raison de la grandeur de sa section et particulièrement de sa profondeur, qui va en croissant à mesure que sa pente diminue en approchant de la mer, que le fleuve peut conserver jusqu'à son embouchure une vitesse assez notable.

rapport de 4 à 3, après avoir dit un peu avant, page 410, que la surface totale des terres cultivables de la Basse-Égypte est de 22 194 kilomètres carrés. Les limites du Delta du Mississipi, en y comprenant toutes les terres submersibles auxquelles il se rattache, ne sont pas assez bien définies pour que cette différence doive surprendre.

2. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édition, p. 216.

Cette plaine alluviale n'est elle-même qu'une légère dépression au milieu de la plaine immense qui occupe tout le centre de l'Amérique du nord. Cependant ses bords sont distinctement marqués, surtout du côté de l'est, comme l'indique, pour sa partie inférieure voisine du sommet du Delta, la planche IX du tome I.^{er}, page 497. D'après M. Lyell, l'encaissement de la vallée est profond de plus de 100 pieds anglais (30 mètres) au-dessous des plateaux marécageux eux-mêmes qui la bordent.¹

Sees limites;
nps formés par
ses bords:
Bluff.

Les terrains qui limitent la plaine basse du Mississipi et servent de barrière à l'inondation, s'avancent quelquefois jusqu'au bord même du fleuve, et forment des collines, ou pour mieux dire des plateaux, appelés *bluffs*, sur lesquels sont constamment bâtis des villages, tels que New-Madrid, Randolph, Memphis, qui, malgré leur situation élevée, sont fort malsains, et dont les habitants sont exposés aux miasmes plus encore que ceux qui disputent la plaine aux crocodiles. Ces *bluffs* sont très-clairsemés; c'est à peine si de cent en cent lieues on les voit élever leur tête au-dessus d'un océan de bois et de marais. Ils cessent même entièrement sur la rive gauche à Bâton-Rouge, en Louisiane, à 210 kilomètres au-dessus de la Nouvelle-Orléans. Ils disparaissent bien plus tôt sur la rive droite, ou, pour mieux dire, ils y existent à peine au-dessous du confluent de l'Ohio. Le Mississipi rase souvent le pied des *bluffs* de la rive gauche, et tout annonce qu'il a, comme le Nil, une tendance bien prononcée à se porter de préférence vers sa rive orientale.

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édit., p. 211.

A partir des limites septentrionales de l'état de Kentucky, jusqu'à Bâton-Rouge, où ils finissent, les *bluffs* se composent de formations très-modernes, dont la plus ancienne est *éocène*, et dont la plus moderne est un *limon* rempli de coquilles fluviatiles et terrestres, toutes d'espèces actuellement existantes. Ces coquilles récentes sont associées à des ossements de *mastodontes*, d'*éléphants*, de *mylodons* et autres quadrupèdes d'espèces perdues¹. Le *limon des bluffs* du Mississipi rappelle naturellement le *limon pampéen* ou *tosca*, qui, d'après les observations de M. d'Orbigny², forme de Buénos-Ayres à San-Pedro les falaises du Rio de la Plata et du Parana et l'argile rouge ferrugineuse, qui, dans les états du sud de l'Union de l'Amérique du Nord, et particulièrement dans la Floride, forme les bonnes terres à coton, et dont l'épaisseur atteint quelquefois jusqu'à 65 mètres³. Il rappelle aussi le *lœss* du Rhin; tout conduit à penser qu'il fait partie du terrain erratique, dont il est le dernier terme.

Mais les *bluffs* ne sont dans la vallée que des accidents. Tout le long du fleuve, depuis l'embouchure jusqu'à l'Ohio, on ne trouve en général qu'une terre submersible, toujours à demi noyée, mais cependant bien boisée, où se rencontrent de loin en loin des établissements (*settlements*) composés de

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édition, p. 110.

2. Rapport sur un Mémoire de M. Alcide d'Orbigny. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences; t. XVII (1845), p. 394.

3. Rapport sur un Mémoire de M. F. de Castelnau. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences; t. XVI (1843), p. 535.

quelques cabanes, servant d'abri aux bûcherons qui fournissent du bois aux bateaux à vapeur.

Le sol
est plus élevé
sur les rives mêmes
du fleuve
qu'à une certaine
distance.

Dans son immense monotonie cette plaine n'est cependant pas uniformément marécageuse, et elle présente d'une manière très-marquée ce phénomène d'une plus grande élévation sur les berges mêmes du fleuve qu'à une certaine distance, dont nous avons déjà reconnu les causes (p. 145). Les rives mêmes sont à sec dans les temps ordinaires, mais à une certaine distance du fleuve on trouve, particulièrement sur sa rive droite, de grands espaces inondés ou marécageux. Il en est de même le long des principaux affluents. Dans les plaines alluviales de ces rivières, le terrain s'incline, comme un glacis naturel, vers le pied des escarpements qui bordent l'ensemble de la vallée, et, durant les inondations ordinaires, les parties les plus élevées des rives forment comme des langues de terre, larges de 2 milles environ (3200 mètres), qui s'élèvent d'un côté au-dessus de la rivière, et de l'autre au-dessus des terres basses inondées, qu'elles dominent d'environ 15 pieds anglais (4,^m57).¹

Étangs et marais
qui se forment
entre
les rives du fleuve
et les
bords de la vallée.

Il résulte de cette disposition du terrain qu'« avant que la crue ne soit complète et que le fleuve n'ait dépassé ses bords, ou immédiatement après l'inondation, lorsqu'il rentre dans son lit, il est flanqué à droite et à gauche de deux étangs, qui le suivent parallèlement jusqu'à la mer; même aux époques de sécheresse de vastes espaces restent humides et marécageux. »²

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édit.; p.

2. Michel Chevalier, *Des voies de communication aux États-Unis*; t. I.^{er}, p. 75.

» Le Mississippi est compris entre des bords sablonneux assez bas, de 4 à 10 mètres, taillés à pic, qu'il ronge çà et là pour déposer des atterrissements ailleurs¹.» Les affluents, comme le fleuve lui-même, dégradent fortement leurs rives et font ébouler leurs berges couvertes de forêts. On en trouve la preuve dans cette immense quantité de troncs d'arbres qui sont entraînés à la mer, et qui souvent s'accumulent dans les *bayous* et les *morts-bras* en forme de radeaux immenses (*rafts*), ou demeurent au milieu du courant comme des dards (*snags*), contre lesquels les navires et les bateaux à vapeur vont souvent crever leur carène.

C'est surtout après la saison des inondations, lorsque ces rivières rentrent dans leur lit, qu'elles agissent avec une grande puissance sur les matières terreuses de leurs berges, ramollies par le séjour des eaux. Plusieurs acres de terrain sont quelquefois entraînées à la fois, et les îles dont le cours du fleuve est semé ne sont pas moins sujettes que ses rives à être dégradées par le courant. Souvent de grandes portions d'îles, lentement accumulées, disparaissent en un instant. «Il y a quelques années, dit le capitaine Basil Hall, lorsqu'on a levé le cours du Mississippi, on a fait le dénombrement exact de ses îles depuis le confluent du Missouri jusqu'à la mer. Mais chaque saison produit de telles révolutions, non-seulement dans le nombre, mais aussi dans la grandeur et la situation de ces îles, que le

Berges dégradées
par
l'action des eaux.

Les îles sont
exposées
aux mêmes causes
de destruction.

1. Michel Chevalier, Des voies de communication aux États-Unis; t. I.^{er}, p. 73.

catalogue est devenu tout à fait fautif. Ici de grandes îles ont été complètement délayées et entraînées; ailleurs, des îles se sont réunies plusieurs ensemble, ou se sont attachées à la rive voisine; ou, pour mieux dire, les intervalles ont été remplis par des milliers de troncs d'arbres flottés, cimentés ensemble par du limon et du gravier.¹

Méandres
du Mississipi.

En même temps qu'il diminue le nombre des îles existantes de son lit, le Mississipi en fait naître de nouvelles, soit en exhaussant par degrés des bancs de sable ou de limon, soit en détachant de la terre ferme certaines parties de ses rives. Dans la grande plaine alluviale qu'il parcourt avant d'entrer dans son Delta, et même dans la partie supérieure du Delta, le Mississipi serpente en *méandres* immenses et d'une étonnante régularité. Il ronge ses rives concaves, il en augmente la courbure, et les méandres finissent par se joindre et par disparaître, ainsi que je vous l'ai expliqué précédemment. On cite un point, nommé la Grande coupure (*grand cut off*), où les vaisseaux, par l'effet de la rupture d'un méandre, atteignent aujourd'hui par un trajet d'un mille seulement un point qu'ils ne pouvaient gagner autrefois qu'après un voyage de 20 milles.¹

Le fleuve les coupe
et
les fait disparaître.

La rupture d'un *méandre* produit d'abord une île, mais si le méandre rompu est très-étendu, l'île, très-grande elle-même, se réunit ordinairement à l'une des rives. Aussitôt que le fleuve s'est ouvert ainsi un nouveau passage beaucoup moins long que

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édit., p. 211.

son ancien cours, il s'y précipite, et bientôt des bancs de sable et de vase se forment aux deux points de jonction du lit raccourci avec l'ancienne sinuosité, qui se trouve par là séparée du lit principal par une berge continue formée de limon et couverte d'arbres. La courbure abandonnée devient alors un lac semi-circulaire d'eau limpide, habité par de grandes orphies (*gar-fish*), par des alligators et par des essaims d'oiseaux sauvages, auxquels les bateaux à vapeur font désertier presque entièrement le lit principal.

Lacs
formés par les
méandres
abandonnés.

La vallée du Mississippi présente, sur une vaste échelle, de nombreux exemples de la fréquente répétition du même fait. Les méandres abandonnés y constituent des lacs en forme de fer à cheval, dont les deux extrémités se rapprochent du cours actuel du fleuve, et qui sont encore autant de témoignages des déplacements fréquents que le courant principal a éprouvé dans les siècles passés¹. Chacun d'eux a un grand nombre de milles de développement, et un demi-mille (800 mètres), ou même plus, de largeur. Ces anciens lits abandonnés (*morts-bras*) du Mississippi sont bordés, comme le fleuve lui-même, de berges élevées de 15 pieds (4^m57) au-dessus des terrains bas environnants.

Il est important de remarquer que les méandres ne sont pas également grands ni également nombreux dans toutes les parties du cours du Mississippi. Ils sont surtout très-nombreux et très-développés un peu au-dessus de la naissance du Delta. Dans les 320 kilom. qui précèdent l'embouchure et qui commencent un

Les méandres
sont surtout très-
nombreux
un peu au-dessus
de la naissance
du Delta.

1. Lyell, *Athenæum*, n.° 987 (26 septembre 1846).

En approchant de son embouchure le fleuve devient moins sinueux.

Explication de ce phénomène.

peu au-dessous de Bâton-Rouge, le cours du fleuve est beaucoup moins sinueux qu'il ne l'est plus haut, car il n'y a plus dans cet espace qu'un seul méandre appelé *English turn*. La plus grande rectilignité du lit dans cette partie est attribuée par M. Forshey à la plus grande ténacité de ses rives, qui dans cette région sont plus argileuses¹. Je soupçonne toutefois que cette cause n'est pas la seule, ni même la principale, car le Mississipi n'est pas le seul fleuve qui soit plus rectiligne à son entrée dans la mer qu'à une certaine distance au-dessus de son embouchure. Le Gange, le Pô, le Rhône et beaucoup d'autres cours d'eau, grands et petits, présentent le même phénomène. Je présume que ce phénomène est dû surtout aux changements qu'éprouve la pente, au moment des crues, à peu de distance de la mer. Nous avons vu en effet que pour le Mississipi la pente ordinaire est augmentée dans les crues entre la Nouvelle-Orléans et la mer de $4''\frac{1}{3}$, et entre Bâton-Rouge et la Nouvelle-Orléans de $3''\frac{3}{4}$. Or, la pente moyenne générale du Mississipi, depuis le confluent de l'Ohio jusqu'à la mer, étant seulement de $9''\frac{3}{4}$, et cette pente n'étant probablement pas répartie uniformément, mais plus forte en général près du confluent de l'Ohio, qu'à peu de distance de la mer, on voit qu'une augmentation de 3 à 4'', dans la pente de la partie voisine de la mer, doit y être très-sensible; la pente doit, par ce seul fait, se trouver augmentée dans les crues de moitié en sus de sa valeur ordinaire, et ce résultat est d'autant plus efficace pour

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édition, p. 211.

empêcher l'encombrement du lit, qu'il est aidé par le mouvement intermittent des marées, qui, dans certains instants, rend la pente plus grande encore. Nous avons vu dans la leçon précédente, p. 131, que la vitesse moyenne de l'eau, dans une rivière dont la section conserve sensiblement la même forme, peut être représentée par la formule

$$v = m \sqrt[5]{\frac{Qp^2}{n}}$$

Lorsque le Mississipi est gonflé par la crue de l'un de ses affluents, de l'Ohio, par exemple, le débit Q n'y augmente que faiblement depuis l'embouchure de l'Ohio jusqu'à la mer, et comme p va en diminuant pendant un long espace, Qp^2 va aussi en diminuant, et par suite v diminue graduellement à mesure qu'on descend dans l'espace correspondant. Mais en approchant de la mer, la valeur de p , qui est propre aux crues, commence à augmenter, sans que Q diminue bien sensiblement; car les bayous n'enlèvent au courant principal qu'une petite partie de la masse d'eau qui s'y précipite. Dès lors v va en augmentant.

Tant que v va en diminuant pendant les crues, il doit se déposer des matières limoneuses dans le lit du fleuve; ces dépôts limoneux s'attachent surtout aux rives convexes et basses, et rejettent le courant vers les rives concaves, ce qui tend à augmenter les méandres. Il y a surtout un point particulièrement favorable aux dépôts de limon: c'est la partie du lit qui se trouve vers la pointe du Delta, et qui a été privée d'une partie de sa pente par la formation

même du Delta; c'est là, en effet, que les méandres sont le plus multipliés. Plus bas la vitesse dans les crues va en augmentant à mesure qu'on descend, les dépôts limoneux n'ont plus lieu, et les méandres cessent presque complètement; mais il y a plus encore, car le surcroît de pente dû à la crue ne se distribue pas d'une manière uniforme entre Bâton-Rouge et la Nouvelle-Orléans, ni entre la Nouvelle-Orléans et la mer, ainsi que nous l'avons supposé. La chute s'opère en grande partie dans un petit espace, où il se produit un rapide momentané, doué d'une grande puissance pour nettoyer le lit du fleuve et pour le creuser. Ce rapide se déplace suivant les circonstances de la marée et celles de la crue elle-même, et cela aide à concevoir non-seulement la rectilignité, mais aussi la grande profondeur du Bas-Mississippi.

Remarques
sur l'origine des
méandres.

Le Nil est soumis, comme les autres fleuves, à la loi dont nous venons de parler; car on n'y observe de *méandres* un peu prononcés que dans le voisinage de la pointe du Delta. Au-dessus du Caire, dans la Haute-Égypte, il est trop rapide pour que des dépôts de limon puissent s'accumuler dans son lit, et par suite il ne s'y forme pas de méandres.

Une autre cause concourt encore, dans le Mississipi surtout, à favoriser la formation des *méandres* au-dessus de la pointe du Delta et à l'empêcher plus bas. Dans le Delta, toutes les eaux qui débordent par-dessus les rives élevées du fleuve forment des *bayous* qui coulent directement à la mer. Plus haut, ces eaux extravasées tendent à rentrer dans le fleuve, après avoir gonflé momentanément les étangs qui

accompagnent latéralement le Mississipi. De là une sorte de mouvement de lacet, qui doit à la longue engendrer des méandres. Lorsque les étangs qui accompagnent latéralement le fleuve sont gonflés par la crue, ils tendent à se mettre de niveau dans toute leur longueur. Plus bas que le fleuve vers l'amont, ils sont bientôt plus élevés que lui vers l'aval. Ils lui rendent alors à l'aval ce qu'ils en ont reçu à l'amont : de là un mouvement transversal, alternatif, qui n'a besoin que de creuser pour devenir un méandre. Dans le Delta, les étangs latéraux versent directement à la mer, vers l'aval, ce qu'ils ont reçu du fleuve à l'amont. Alors il n'y a plus de mouvement alternatif.

Le Mississipi, en déplaçant son cours par les variations de ses *méandres*, enlève dans une seule saison ce qu'il avait déposé dans une longue suite d'années, et les dépôts qu'il opère aujourd'hui avec lenteur, sont destinés à être balayés à leur tour avec violence et rapidité. Le Mississipi en minant constamment ses rives, empêche qu'il ne s'établisse de grandes villes de commerce sur ses bords, et est cause du singulier contraste qu'on remarque entre la richesse et la splendeur de plus de 800 beaux *steamers*, qui sillonnent son cours, et dont plusieurs pourraient être appelés des palais flottants, et la plate et monotone solitude des terres incultes qui s'étendent sur des centaines de milles des deux côtés de la ligne navigable.

Mais ce régime instable, si peu favorable au développement de la civilisation, n'est pas un obstacle à celui de la végétation, et les parties les plus ma-

Changements
qui se sont opérés
dans la vallée
du Mississipi.

Forêts
qui ont été
ensevelies
sous ses alluvions.

réçageuses de la vallée du Mississipi sont, comme nous l'avons déjà vu, magnifiquement boisées. L'observation montre qu'elles ont dû l'être pour ainsi dire de tous temps. Lorsque les eaux sont basses, on observe dans les berges verticales du fleuve, à des centaines de milles au-dessus du sommet du Delta, des pieds d'arbres (*stumps*) ensevelis avec leurs racines dans leur position naturelle. On en voit quelquefois trois rangs (*tiers*), l'un au-dessus de l'autre, ce qui montre que le fleuve, dans ses déplacements successifs, s'est ouvert en ce point un canal à travers d'anciens marécages, où des arbres avaient crû et où des matières alluviales s'étaient lentement accumulées. Une grande excavation, profonde de 18 pieds (5,^m 49), faite à la Nouvelle-Orléans dans l'établissement d'éclairage par le gaz, et à laquelle on travaillait encore en mars 1846, montre qu'une grande partie du sol de cette localité se compose d'argile fine et de limon, contenant d'innombrables troncs d'arbres ensablés à différents niveaux, quelques-uns couchés, les autres dans une position verticale, avec leurs racines attachées à leur pied. Cela conduit à supposer qu'il a existé autrefois dans cet endroit des marais d'eau douce peuplés d'arbres, sur lesquels le sédiment du Mississipi se répandait pendant les inondations, de manière à élever le niveau du terrain. Comme le terrain dans lequel on a ouvert l'excavation est élevé actuellement de 9 pieds au-dessus de la mer, ceux de ces arbres verticaux qui se trouvent au niveau le plus bas sont placés à 9 pieds au-dessous du niveau actuel de la mer, et ils indiquent clairement que la région

où ils ont crû s'est enfoncée tout au moins de cette quantité au-dessous de son niveau primitif. M. Lyell, à qui sont dues ces curieuses observations¹, que je me félicite de pouvoir encore introduire ici, regarde l'enfoncement dont il s'agit comme lié à l'existence des tremblements de terre qui agitent quelquefois la vallée du Mississipi et cite même de nombreux exemples de forêts dont le sol a été submergé par l'effet des grands tremblements de terre de 1811 et 1812 et dont les arbres, quoique morts, sont encore debout au milieu des eaux². Il est probable, en effet, que quelque circonstance particulière doit avoir mis le limon dans le cas de s'accumuler autour des arbres dont nous venons de parler, plus rapidement qu'il ne le fait en général dans toute la vallée. Ces troncs d'arbres verticaux, ensevelis dans le limon, rappellent naturellement les obélisques de l'Égypte, dont les bases sont couvertes par le limon du Nil. Or, en Égypte le limon se dépose sur les bases des anciens monuments à raison d'environ 1,^m26 par an, ou 1,^m26 en mille ans; mais tout annonce que le limon du Mississipi est moins abondant que celui du Nil: il aurait donc fallu plus de mille ans pour couvrir ceux de ces arbres dont les troncs conservent seulement 1,^m26 ou 4 pieds de hauteur. Pendant tout ce temps le tronc aurait dû rester debout dans un marais sujet à être envahi par les inondations d'un grand fleuve, ce qui paraît assez difficile à admettre.

Ces phénomènes ont sans doute été en rapport avec les dénivellations produites par les tremblements de terre,

1. Lyell, *Athenæum*, n.º 987 (26 septembre 1846).

2. Lyell, *Principles of geology*, 7.^e édition, p. 215.

Grande épaisseur
des remblais
que
présente la vallée
du Mississipi.

Le fond plat de la vallée du Mississipi étant très-large, de 33 à 130 kilomètres, on conçoit que la masse des matières de remblai qui le constituent, doit être en beaucoup de points d'une très-grande épaisseur, surtout dans le Delta qui est plus large encore que les parties les plus larges de la vallée. Il paraît en effet que des sondages de 600 pieds anglais (183 mètres) exécutés près du lac de Pontchartrain, au nord de la Nouvelle-Orléans, n'ont pas complètement traversé les dépôts incohérents de sable et de limon¹. Il est à regretter que, dans l'examen des produits du sondage, on n'ait pas distingué les dépôts du fleuve actuel du *limon des bluffs* déposé à l'époque des *mylodons* et des *éléphants*, ni des dépôts sédimentaires que les actions lentes d'une période distincte de la nôtre peuvent avoir accumulés dans la même dépression; mais cette distinction est peut-être fort difficile à faire dans les matières rapportées par la sonde. Il faudrait cependant que cette distinction fût très-nette et très-clairement indiquée pour contre-balancer une induction qui me paraît se présenter ici avec une grande évidence. Tout porte à croire, en effet, que le lac de Pontchartrain fait partie intégrante de la ceinture de lagunes littorales qui s'est formée au commencement de la période actuelle sur la circonférence originaire du golfe de Mexique (voyez leçon 7.^o et 12.^o, t. I.^{er}, p. 242, 246, 501, 514). Or, il est évident que les dépôts meubles traversés par un sondage de 183 mètres, exécuté sur les bords d'une

A
quelles formations
géologiques
doit-on
les rapporter?

Remarques
sur ce sujet.

1. Lyell, *Principles of geology*; 7.^e édition, p. 218.

lagune de cette espèce, doivent nécessairement appartenir en grande partie aux dépôts sédimentaires opérés tranquillement pendant une période antérieure à celle où nous vivons, ou bien au *limon des bluffs*, qui me paraît faire partie du terrain erratique.

Je suis arrivé précédemment à des conclusions tout à fait analogues pour le Gange (11.^o leçon, t. I.^{er}, p. 495) et pour le Nil (ci-dessus, p. 227).

Mais en même temps que les vallées de ces trois grands fleuves, le Nil, le Gange et le Mississipi, ont ce trait de commun entre elles et avec la plupart des vallées, les trois fleuves eux-mêmes embrassent dans la variété de leurs régimes la plupart des circonstances que nous présentent dans le dépôt de leurs sédiments les autres fleuves compris dans la première des deux grandes classes distinguées par M. Dausse; ceux qui sont plutôt comparables à la Seine qu'aux rivières alpines (voyez ci-dessus, p. 187). Les phénomènes y sont seulement plus rapides et plus tranchés que dans un grand nombre de fleuves ou de rivières de dimensions moindres et sujets à des crues moins considérables et moins régulières. La comparaison des déblais et des remblais produits par ces différents cours d'eau offrira un puissant intérêt lorsque leurs régimes auront été analysés suivant la méthode dont M. Dausse a enrichi la science. Privés encore en grande partie de ce puissant secours, et obligés de nous borner à la comparaison brute des déblais et des remblais produits par ces différents fleuves et des traits les plus élémentaires de leurs régimes respectifs, nous pouvons cependant reconnaître dans ceux d'Europe les effets

de lois analogues à celles que nous venons de voir se manifester plus en grand dans leurs puissants rivaux d'outre-mer.

Le Rhône et le Rhin, en leur qualité de fleuves rapides, présentent plusieurs traits de ressemblance avec le Nil, malgré les différences essentielles qui existent entre leur régime alpin et celui du Nil. Dans les parties de leur cours où leur régime alpin est le moins altéré, et où leur vitesse est la plus grande, ils s'écartent plus encore que le Nil lui-même des allures du Mississipi. Comme le Nil dans la Haute-Égypte, ils se font remarquer par l'absence des méandres ; mais leurs îles nombreuses, au lieu d'être formées seulement de sables, le sont souvent de gros gravier. Le Rhône, dont la vitesse reste considérable jusqu'à son embouchure, n'arrive pas tout à fait au régime serpentant que le Nil présente à l'entrée du Delta. Le Rhin, dont la pente décroît plus vite que celle du Rhône, dépasse sous ce rapport les dernières allures du Nil et arrive à celles du Mississipi. Dans la seule partie de son cours comprise entre Bâle et Mayence, il rappelle successivement ces deux grands fleuves. Sa vitesse moyenne, ainsi que nous l'avons vu (13.^e leçon, ci-dessus, page 77) est à peu près celle du Nil, mais elle est beaucoup moins uniforme. De Bâle à Lauterbourg, le Rhin, plus rapide encore que le Nil, bien loin de s'arrêter à serpenter, se précipite directement suivant la ligne de plus grande pente de la plaine qu'il parcourt. La pente locale est assez forte pour le ramener presque immédiatement à sa direction normale, lorsqu'il tend à en sortir. L'effet de ses caprices

est restreint à la production de ces îles innombrables qui figurent sur toutes les cartes détaillées. Elles sont beaucoup plus nombreuses que celles du Nil, probablement parce que le Rhin, plus impétueux à Bâle que le Nil en aucun point de l'Égypte, entraîne beaucoup de gravier, lequel donne naissance à des îles plus résistantes et plus durables que celles dont les sables et le limon charriés par le Nil peuvent encombrer son cours.

Au-dessous de Lauterbourg, vers Spire, Manthelm et jusqu'à Mayence, le Rhin prend une physionomie tout autre : il a beaucoup des allures du Mississipi, dont il imite les vastes et nombreux *méandres*, aussi bien que les *coupures* et les *morts-bras*. Sa pente est devenue beaucoup plus faible qu'à la hauteur de Brisach et de Strasbourg, et sa vitesse moyenne, moindre dans cette partie que la vitesse moyenne du Nil, diffère peu de celle du Mississipi. Cette vitesse assez grande encore est simplement une vitesse acquise, que la pente locale n'augmente plus, qu'elle laisse au contraire s'affaiblir, et qu'elle cesse presque entièrement de diriger. Les causes qui tendent à faire serpenter le courant ne rencontrent plus que de faibles obstacles; de là ces *méandres* qui se déploient sur toutes les cartes d'une échelle suffisante.

Régime du Rhin
au-dessous
de Lauterbourg et
ses méandres.

Le Rhône, le Pô, le Danube nous fourniraient le sujet de remarques analogues, et il ne faudrait que descendre à des détails d'une étendue plus restreinte pour trouver l'occasion d'en faire de semblables dans les vallées de la Moselle, de la Seine, de la Loire, de la Somme, de l'Orne et même dans celles de cours d'eau beaucoup moins considérables.

Observations
analogues
auxquelles
beaucoup d'autres
rivières pourraient
donner lieu.

Remarques
comparatives
sur les méandres
de
diverses rivières.

Les méandres de ces diverses rivières, dont la pl. II représente quelques exemples (fig. 5, 5_I, 5_{II}, 5_{III}... 5_{VII}), ressemblent d'une manière frappante, de même que ceux des plus faibles ruisseaux, aux vastes méandres du Mississipi; mais ils en reproduisent les formes sur une échelle réduite et proportionnée, en quelque sorte, aux dimensions des cours d'eau auxquels ils appartiennent. Quelques remarques comparatives sur le même sujet termineront ces observations beaucoup trop longues, quoique bien incomplètes, sur les effets des eaux courantes.

Les effets que les eaux livrées à elles-mêmes produisent sur la surface du globe dérivent de la vitesse qu'elles acquièrent, et cette vitesse dépend à la fois de leur pente et de leur volume, qui sont les deux bases fondamentales d'après lesquelles se règle le mouvement de l'eau. Ces deux éléments varient, non-seulement d'un cours d'eau à un autre, mais, dans un même cours d'eau, d'une partie à l'autre de son lit.

Nous avons déjà remarqué plusieurs fois (voyez ci-dessus, p. 64, 122, 136, 156) que le lit d'une rivière se partage généralement en plusieurs biefs ou tronçons, dans chacun desquels la pente va graduellement en diminuant, de manière que la section longitudinale de la surface de la rivière donne une courbe dont la concavité est tournée vers le ciel. Dans chacun de ces tronçons la vitesse de la rivière approche souvent d'être constante (p. 122) : il est rare cependant que sa constance soit absolue. Souvent le mouvement de l'eau est accéléré sur les premières pentes, qui sont les plus fortes, et il est

retardé sur les dernières, qui sont les plus faibles. Dans l'intervalle il existe un point où la vitesse est à son maximum, et où le mouvement n'est ni accéléré ni retardé, c'est celui où l'action de la pesanteur, qui tend à accélérer le mouvement de l'eau, se trouve exactement contre-balancé par la résistance que l'eau éprouve en se mouvant dans son lit. L'action de la pesanteur, diminuant à mesure que la pente s'affaiblit, et la résistance allant en croissant à mesure que la vitesse augmente, il est rare que l'eau parvienne à l'extrémité d'un tronçon dans lequel la pente décroît progressivement sans qu'il se rencontre un point où la compensation, dont nous venons de parler, a lieu. Il suffit, en effet, pour que cette compensation s'opère, que la vitesse, graduellement croissante de l'eau, devienne égale à celle qu'elle prendrait, si la pente du point auquel elle est parvenue se continuait indéfiniment sans aucun changement, soit dans cette pente elle-même, soit dans la forme du lit, soit dans le débit de la rivière.

En effet, nous avons vu ci-dessus, page 123, que la force accélératrice qui agit sur l'eau en mouvement dans une rivière a pour expression

$$g \sin i - A'c \left(\frac{Q^2}{s^3} + \frac{BQ}{s^2} \right);$$

le mouvement cesse de s'accélérer au point où cette expression devient nulle. Si nous appelons w la vitesse effective de la rivière au point que nous cherchons, et si nous remplaçons $\sin i$ par p , et Q par sw , nous aurons pour déterminer ce point, l'équation

Point
où la vitesse est
à son maximum
et
où le mouvement
n'est plus accéléré
et n'est pas encore
retardé.

$$gp - A'c \left(\frac{w^2}{s} + \frac{Bw}{s} \right) = 0, \quad (1)$$

que nous pourrions écrire ainsi :

$$gp \left(1 - \frac{c}{ps} \cdot \frac{A'}{g} (w^2 + Bw) \right) = 0;$$

ou en remarquant que gp n'est pas seul :

$$1 - \frac{c}{ps} \frac{A'}{g} (w^2 + Bw) = 0;$$

ou encore, en observant que les coefficients $\frac{A'}{g}$ et B ne sont autre chose que les coefficients a et b , dont nous avons donné les valeurs ci-dessus, page 112,

$$1 - a \frac{c}{ps} (w^2 + bw) = 0;$$

ou enfin

$$p = a \frac{c}{s} (w^2 + bw), \quad (2)$$

équation qui n'est autre chose que l'équation (2) de la page 112 dans laquelle v est remplacé par w .

C'est celui où la vitesse effective de la rivière se trouve égale à celle qu'elle prendrait sur la pente qui y existe.

Le point cherché est donc celui où la vitesse effective de l'eau peut être substituée à celle que la rivière prendrait d'elle-même avec son débit effectif actuel sur la pente qui existe en ce même point, si cette pente était prolongée indéfiniment, c'est-à-dire, que c'est le point où la première vitesse est devenue égale à la seconde.

En amont de ce point la vitesse effective est plus petite que celle qui correspond à la pente qu'elle parcourt; de là l'accélération du mouvement, et de là aussi la puissance de la pente pour diriger le mouvement de l'eau.

En aval du même point, si la pente continue encore à décroître, la vitesse de la rivière est plus grande que celle qui est relative à la pente qu'elle parcourt; elle a un excédant de vitesse que la pente ne peut plus entretenir ni diriger; son mouvement est retardé; les matières qu'elle transporte tendent à se déposer, et le moindre obstacle suffit pour la dévier de sa direction; là commence le domaine spécial des alluvions et des méandres.

Là commence
le domaine spéci
des alluvions
et
des méandres.

En amont du point où il devient retardé, le mouvement de l'eau, sans cesse accéléré est, jusqu'à un certain point, gouverné par la pente; si quelque obstacle l'affaiblit un instant, la pente le rétablit; si quelque obstacle détourne l'eau de la direction normale, la pente l'y ramène presque aussitôt. L'eau suit avec une fidélité remarquable la ligne de plus grande pente; elle n'a pas le pouvoir de s'en écarter d'une manière tant soit peu durable.

Plus bas, sur une pente plus faible, cet état de choses s'altère; l'eau demeure longtemps animée d'une vitesse acquise que la pente locale ne tend plus à lui restituer et qu'elle n'est plus suffisante pour gouverner; c'est comme une activité surabondante, qui n'a plus d'autre loi que ses propres caprices ou ceux de causes fortuites; si quelque obstacle la détourne de la direction que suit la pente de la vallée, elle pourra se mouvoir longtemps dans une direction transversale avant de revenir à la direction normale. On conçoit combien un pareil état de choses est favorable à la production des *méandres*; aussi remarque-t-on que les méandres existent surtout dans la partie inférieure

et la moins déclive de chacun des tronçons dans lesquels une vallée se partage ordinairement, et qu'ils ne sont jamais plus nombreux et plus développés que dans les parties presque horizontales précédées de parties rapides.

Dans ces parties leur production est favorisée par deux causes, qui dérivent elles-mêmes de l'affaiblissement de la vitesse. Cet affaiblissement détermine, comme nous l'avons déjà remarqué, le dépôt des matières que les eaux tiennent en suspension, de celles mêmes qu'elles ne font qu'entraîner, et il en résulte des bancs de sable ou de vase, qui gênent le mouvement de l'eau et le dévient de sa direction naturelle pour le diriger contre les berges. Les berges elles-mêmes sont formées de matières d'alluvion déposées dans les crues, et elles sont plus élevées que n'est le sol alluvial de la vallée à une certaine distance de la rivière, ce qui favorise, ainsi que nous l'avons déjà vu, les excursions latérales de ses eaux.

Ce point se déplace
quand
le débit varie;
il descend
quand la rivière
augmente.

Il est à remarquer que le point où le mouvement des eaux devient retardé, n'a pas, dans un lit donné, une position invariable; il se déplace lorsque le débit de la rivière vient à varier. En effet, les obstacles que l'action du lit oppose au mouvement de l'eau sont d'autant moins efficaces que la quantité d'eau est plus grande. Ils cesseraient de produire un retard sensible si la quantité d'eau devenait infinie. Un filet d'eau qui se meut sur une pente continuellement décroissante et raccordée à sa partie inférieure avec un plan horizontal, rencontre toujours un point où son mouvement cesse de s'accélérer et devient retardé; car sur une pente

infiniment petite sa vitesse deviendrait bientôt infiniment petite elle-même, et sur une pente tout à fait nulle elle finirait par s'éteindre. Mais si une masse d'eau d'une grandeur *infinie* descendait la même pente, sa vitesse continuerait à s'accroître tant qu'elle descendrait, et, arrivée sur le plan horizontal, elle continuerait à s'y mouvoir uniformément avec la vitesse acquise au bas de la pente. On voit par là que le point où le mouvement de la rivière devient retardé, doit se déplacer quand la rivière augmente. Il se rencontre d'autant plus bas, que la rivière est plus gonflée.

De là il résulte que les alluvions commencent à se déposer pendant les eaux basses dans un point plus rapproché de la source que celui où elles commencent à se déposer dans les hautes eaux. Les alluvions qui se déposent dans l'intervalle de ces deux points, sont généralement destinées à être balayées dans les crues. Les alluvions n'ont donc de fixité qu'en aval du point où commence le mouvement retardé dans les plus grandes crues.

Si la pente de la rivière est presque uniforme, le point où les alluvions deviennent fixes peut être très-éloigné de celui où elles commencent à se déposer dans les basses eaux. Par la même raison, le point où les alluvions commencent à se fixer dans le lit de la rivière d'une manière permanente, peut être très-éloigné de celui où les alluvions dans les grandes crues se déposent sur les rives. Les eaux débordées qui coulent sur la surface de la plaine alluviale dans laquelle le lit est creusé, sont à peu près dans les mêmes conditions que

Mobilité
des alluvions
près du point où
la vitesse
de la rivière
commence à se
ralentir.

Elles
ne se fixent dans
le lit que bien
au-dessous
du point où elles
se répandent
sur les rives.

celles qui coulent dans le lit même pendant les basses eaux. Elles commencent à déposer des alluvions dans un point de la vallée bien supérieur à celui où le fleuve, gonflé par la crue et rendu plus rapide, en dépose dans son lit. Cela explique comment le Nil et beaucoup d'autres fleuves couvrent d'alluvions, pendant leurs crues, des parties très-étendues de leur vallée, où, pendant ces mêmes crues, ils creusent leur lit au lieu de l'encombrer.

Les effets
des rivières sont
analogues
à ceux des torrents,
quoique plus
faibles et moins
caractérisés.

Ces derniers effets rappellent ceux des torrents, et en général, pour voir les phénomènes de transport produits par les crues poussées à l'extrême, nous n'aurions qu'à revenir aux torrents, en les considérant surtout dans la partie où ils déposent, dans leur lit de déjection. Les effets qui s'observent dans tous les cours d'eau sont analogues à ceux que produisent les torrents; mais dans ces derniers les phénomènes s'accomplissent avec plus de rapidité et se dessinent plus fortement.

Les rivières diffèrent à la fois des torrents par la petitesse de leur pente et par la moins grande inconstance de leur débit. Dans les torrents où il n'y a d'eau que dans les crues, il est de toute évidence que c'est dans les crues qu'ils façonnent leur lit. Dans les rivières, où la différence entre les hautes et les basses eaux est beaucoup moins grande, on ne peut pas prononcer la même chose d'une manière aussi absolue.

Les rivières
façonnent surtout
leur lit et leur
vallée
pendant leurs
crues.

Les rivières, dans les basses eaux, ne sont pas complètement sans action sur leur lit. Il est certain, cependant, que c'est dans les crues qu'elles produisent les plus grands effets; il est même évident

que le régime de la vallée est coordonné aux plus grandes crues, à celles qui n'ont lieu qu'à de longs intervalles. Les crues plus faibles, et surtout les eaux moyennes et les basses eaux, ne font que retoucher légèrement ce que les très-grandes crues ont disposé. Elles peuvent cependant produire des effets assez notables dans le lit mineur, en y creusant des gouffres et en continuant l'érosion des rives concaves et par conséquent le développement des *méandres*; mais les méandres n'ont un peu de stabilité, et par conséquent n'ont un grand développement, que là où le mouvement est retardé même dans les grandes crues.

Les rivières sujettes à de grandes crues et à des crues de longue durée, comme le Nil par exemple, façonnent surtout leur lit et leurs rives pendant les grandes eaux. De là il résulte que, pour ces rivières, le régime serpentant ne commence qu'au point où le mouvement devient retardé dans les crues, point qui est situé bien loin au-dessous de celui où pendant les inondations elles couvrent leurs rives de limon.

Une foule de rivières offrent des applications de ces remarques.

Applications
de ces remarques
à diverses rivières.

Le Rhône et la Loire n'ont presque pas de méandres; ces deux fleuves conservent des pentes rapides jusqu'à peu de distance de la mer, et l'approche de l'embouchure est par elle-même, comme nous l'avons remarqué ci-dessus, page 248, en parlant du Mississipi, un obstacle à la production des méandres.

Le Rhône et la
Loire.

Le Rhône, vers la fin de son cours, aux environs

d'Avignon et de Beaucaire, a une tendance manifeste à serpenter; cependant il n'est pas parvenu à constituer des méandres bien caractérisés, et il tombe sous l'influence de l'embouchure avant d'avoir contracté le régime serpentant.

Le Pô.

Le Pô devient sinueux au-dessous de Casale, c'est-à-dire lorsqu'il s'éloigne des collines du Piémont; il présente de nombreux méandres dans la partie moyenne de son cours, entre Casale et Ferrare, surtout aux environs de Pavie, de Plaisance et de Crémone. Le dernier de ceux qu'on peut considérer comme bien prononcés se trouve un peu en aval d'Ostiglia; plus bas, l'influence de l'embouchure met un obstacle à leur production.

Le Rhin.

Le Rhin, comme nous l'avons déjà vu, présente des méandres très-remarquables entre Lauterbourg et Mayence, dans la partie peu déclive de son cours qui succède aux pentes rapides sur lesquelles il coule le long de la frontière française. Les méandres cessent à Mayence, aux approches du *Bingerloch*, où le Rhin se précipite de nouveau dans un lit rapide, et qui produit à cet égard les effets d'une embouchure.

La Moselle.

La Moselle devient sinieuse entre Nancy et Metz au-dessous des pentes rapides, que cette rivière et la Meurthe, qui s'y jette, présentent à leur sortie des Vosges.

La Seine.

La Seine serpente en méandres infinis dans la portion de vallée, d'une pente incertaine, qu'elle suit depuis le confluent de l'Aube jusqu'à Montereau. Plus haut, son cours et celui de l'Aube sont très-inclinés. Son régime change, et son cours redevient rapide au-dessous de Montereau, lorsqu'après avoir reçu

l'Yonne et le Loing, elle entre dans le défilé où elle traverse le calcaire siliceux, couronné par le grès de Fontainebleau.

On pourrait citer un grand nombre d'exemples du même fait.

D'autres exemples, qu'on pourrait prendre pour des exceptions, viennent confirmer cette règle.

Depuis son confluent avec le Doubs, à Verdun-sur-Saône jusqu'à Lyon, où elle se jette dans le Rhône, la Saône est une rivière remarquable par le petit nombre et le peu d'étendue des méandres qu'on y observe, et cette circonstance est une de celles qui concourent le plus efficacement à en faire une excellente ligne de navigation ; ce qui y court encore, c'est que son lit n'est que peu obstrué par des bancs de sable et des îles. On pourrait s'étonner qu'il en soit ainsi d'une rivière qui parcourt une grande plaine alluviale, remarquablement unie, avec une lenteur devenue presque proverbiale : (*Lentissimus arar*, suivant l'expression de César). Mais ce fait s'explique de lui-même, lorsqu'on remarque que la Saône arrive à Verdun-sur-Saône avec une vitesse très-faible, et déjà presque en harmonie avec la faiblesse de sa pente entre Verdun et Lyon ; elle n'a pas à dépenser, comme les autres rivières dont nous venons de parler, un excédant de vitesse précédemment acquis ; elle a, au contraire, à acquérir un petit surcroît de vitesse, de sorte qu'elle éprouve, dans l'intervalle de Verdun et Lyon, une légère accélération, effet essentiellement contraire au dépôt des alluvions dans le lit de la rivière. Ces circonstances se trahissent d'elles-

mêmes par le tracé des cours de la Saône et du Doubs sur toutes les cartes suffisamment détaillées. On y voit que la Saône, de Pontœilier à Verdun, et le Doubs, de Dôle à Verdun, qui se trouve au confluent des deux rivières, coulent dans des vallées larges à fond plat, où elles forment chacune plusieurs méandres des mieux caractérisés : c'est pour chacune d'elles la dernière partie du dernier tronçon de leur cours. Il est naturel que des méandres s'y déploient d'une manière plus ou moins capricieuse.

Mais en se confondant ensemble sous les murs de Verdun, ces deux rivières, dont les régimes sont différents, mais dont les modules, les pentes et les vitesses moyennes, à leur point extrême, approchent de l'égalité, donnent naissance à une nouvelle rivière qui, bien que portant le nom de Saône, diffère essentiellement de la Saône supérieure.

Elle a un débit à peu près double de celui de la Saône supérieure, et probablement une pente peu différente des dernières pentes de la Saône supérieure et du Doubs. D'après ce que nous avons vu ci-dessus, p. 127, sa largeur doit surpasser à peu près d'un tiers celle de chacune de ces deux dernières; mais, la vitesse qui lui serait naturelle, est un peu plus grande que celle qui, sur cette même pente, serait naturelle aux deux autres. Celles-ci, en approchant du confluent, semblent avoir déjà perdu, en grande partie, l'excédant de vitesse qu'elles ont dû posséder l'une et l'autre un peu plus haut; car les méandres cessent presque complètement à une certaine distance au-dessus du confluent. Il paraît donc

que, généralement les eaux de la Saône et celle du Doubs, au moment où elles se réunissent à Verdun, ont une vitesse plutôt inférieure que supérieure à celle que doit prendre sur la pente qu'elles parcourent la masse d'eau qui résulte de leur réunion : ainsi, toute stagnation y est impossible; et comme, à partir de Verdun, la pente de la Saône ne diminue jamais que faiblement, et augmente au contraire quelquefois en même temps que le volume de ses eaux s'accroît de celui d'un grand nombre de petits affluents et de sources nombreuses, on conçoit que cette rivière arrive jusqu'à son confluent avec le Rhône, d'un mouvement plutôt accéléré que retardé, et par conséquent sans avoir en aucun point une tendance marquée à encombrer son lit ni à serpenter.

Une autre circonstance qui concourt encore au même effet, c'est que la Saône se jette dans le Rhône, fleuve plus rapide et d'une hauteur moins variable qu'elle-même, à l'issue d'un défilé, où sa pente augmente et où son cours s'accélère. Le défilé de Pierre-Encise sur la Saône, comme celui du Bingerloch sur le Rhin, produit un effet analogue à celui d'une embouchure dans la mer.

Il n'en est pas de même de tous les confluent, et lorsqu'une petite rivière se jette dans une grande, l'effet du confluent est souvent d'y déterminer des méandres. C'est ainsi que la Loue serpente avant de se jeter dans le Doubs au-dessous de Dôle; que la Seille serpente avant de se jeter dans la Saône au-dessous de Tournus; que le Guier serpente entre le pont de Beauvoisin et Saint-Genix, avant de se jeter dans le Rhône, etc. Cela tient à ce que la

Méandres
des affluents de la
Saône.

grande rivière a élevé ses bords par ses alluvions plus qu'elle n'a élevé le sol de la vallée à une certaine distance; d'où il résulte que la petite rivière devrait *remonter* en pente pour entrer dans la grande, si elle n'avait elle-même remblayé un peu sa vallée, de manière à rendre à son cours une pente légère. Mais cette pente ainsi restaurée, est souvent très-faible et bien inférieure à celle qui conserverait au petit volume d'eau de l'affluent la vitesse qu'il possède dans les parties supérieures de son cours : de là un excédant de vitesse, un mouvement retardé, les conditions les plus propres à engendrer des méandres.

Analogie générale
dans les formes de
tous les méandres.

Ainsi que nous l'avons déjà remarqué, les méandres de tous les cours d'eau ont des formes analogues entre elles. Ceux des ruisseaux que nous voyons serpenter dans les prairies d'une foule de petites vallées rappellent, par leurs contours, ceux des plus grands fleuves ; mais ils sont beaucoup plus petits. Il existe une relation manifeste entre les rayons de leurs courbures et le volume de leurs eaux. Il suffira de consigner ici quelques nombres pour mettre cette relation en évidence.

Relation
entre les rayons de
leurs courbures
et le volume des
eaux de la rivière.

J'appellerai *corde* d'un méandre, comme l'indique la fig. 5, pl. II, la ligne qui joint les deux courbures opposées qui tendent à se rapprocher, et *flèche* du méandre la ligne la plus longue qu'on puisse mener du milieu de la corde au point du contour qui s'en éloigne le plus.

Grandeurs
des méandres de
diverses rivières.

Les méandres du Mississipi ont quelquefois, comme nous l'avons vu ci-dessus, 20 milles de développement.

Leur flèche dépasse souvent 11 000 mètres.

Les méandres du Rhin, entre Lauterbourg et Mayence, ont souvent une flèche de 4000 à 5000^m

Les méandres du Pô, de. 3000 à 4000

Ceux de la Moselle, entre Metz et Nancy, de. 1000 à 1500

Ceux de la Saône et du Doubs, au-dessus de Verdun-sur-Saône, de. . . 1000 à 1200

Ceux de la Seille, immédiatement avant sa jonction avec la Saône, au-dessous de Tournus, de. 1000

Ceux du Guier, entre le pont de Beauvoisin et Saint-Genix, de. . . . 800

Les méandres de la Seine, entre le confluent de l'Aube et Montereau, ont souvent une flèche de 400 à 800

Le rapprochement de ces différents nombres semble indiquer que la flèche des méandres croît, d'une part, avec la grandeur de la rivière, et de l'autre, avec sa vitesse.

Il est essentiel de remarquer que les méandres dont il s'agit ici, et dont la planche II, fig. 5, 5_I, 5_{II}... 5_{VI} (1) présente des exemples multipliés, sont formés par le lit mineur de la rivière, dans l'intérieur de son lit majeur; c'est-à-dire par le serpentement de la rivière sur le fond plat de sa vallée. Mais si l'on promène un œil attentif sur les vallées prises dans leur ensemble, on reconnaît aisément que le lit majeur est sujet à serpenter lui-même d'une manière tout à fait analogue, quoique sur une plus large échelle. Le corps des vallées présente de nom-

Rapports
entre l'amplitude
des méandres
et la grandeur
de la rivière.

(1) Ces fragments topographiques sont tirés des minutes au 40 000^e de la carte d'état-major publiée par le dépôt de la guerre.

La forme générale
des vallées
porte l'empreinte
de l'action
érosive des eaux.

breuses inflexions qui se coordonnent aux accidents de l'écorce terrestre et qui dans beaucoup de cas s'adaptent avec une merveilleuse précision aux fissures qui la traversent; mais ces inflexions n'en ressemblent pas moins à celles que produisent les rivières actuelles et elles portent en cela le cachet indélébile de l'action érosive des eaux qui ont élargi et façonné les vallées. Celles de la Meuse entre Mézières et Dinant, de la Moselle entre Trèves et Coblenz, et celle de la Seine entre Charenton et Vernon, d'une part, puis entre le Pont de l'Arché et la mer de l'autre, offrent de ce fait des exemples frappants. Seulement les flèches des méandres du corps de la vallée sont, pour la Meuse, de 3 à 4000^m
Pour la Moselle, de 6 à 8000
Pour la Seine, de 9 à 16000

Ces flèches surpassent donc respectivement de beaucoup celles des méandres de la rivière correspondante actuelle : pour la Seine, elles surpassent d'un tiers les flèches des méandres du Mississipi.

Grandeur
et vitesse
des courants
diluviens.

La grandeur des méandres que forme le corps des vallées dévoile la *grandeur* des courants qui leur ont donné naissance, de même que la grosseur des blocs erratiques qui s'y trouvent témoigne de la *vitesse torrentielle* de ces mêmes courants. On pourrait espérer que ces faits rapprochés des lois du mouvement des fluides donneront prise au calcul sur les *courants diluviens*. Malheureusement les formules usuelles de l'hydraulique, adaptées à des cours d'eau uniformes, dont le régime est établi, ne peuvent être appliquées directement aux grands et tumultueux phénomènes dont les vallées portent l'empreinte.

275

EXPLICATION DES PLANCHES.

PLANCHE I^{re}. *Torrents des hautes Alpes* (d'après M. Surell).

- Fig. 1 (p. 11), torrent entre deux rameaux ou contre-forts et cône de déjection.
- Fig. 2 (p. 11 et 30), torrent qui prend naissance sur le flanc d'une montagne et cône de déjection.
- Fig. 3 (p. 16), profil du lit d'un torrent et coupe du terrain sur lequel il coule.

PLANCHE II. *Mouvements de l'eau dans les rivières.*

- Fig. 1 (p. 107), courbe représentant la vitesse de l'eau à différentes profondeurs dans une rivière.
- Fig. 2 (p. 109), décomposition de la force de la pesanteur.
- Fig. 3 (p. 114), profil d'une vallée réduit à un angle ouvert par en haut.
- Fig. 4 (p. 142), ondulations du sable dans l'expérience de Du-buat.
- Fig. 5, 5_I, 5_{II}, 5_{III}, 5_{IV}, 5_V, 5_{VI} (p. 151, 153, 258 et 270), exemples de rivières serpentantes, avec les *morts-bras* qu'elles ont abandonnés et dont les uns sont encore remplis d'eau, tandis que d'autres sont plus ou moins comblés et abandonnés.

PLANCHE III. *Régime de la Seine* (communiquée par M. Dausse).

- Fig. 1 (p. 158 et 172), moyennes hauteurs de la Seine pour chaque mois et pour l'année.
- Fig. 2 (p. 158 et 161), tenues de la Seine aux différentes hauteurs de ses eaux, pour chaque mois et pour l'année.
- Fig. 3 (p. 178), tableau graphique des hauteurs et des portées de la Seine en rapport avec les quantités d'eau tombées à Paris et à Montmorency, avec la température et l'évaporation.

PLANCHE IV. *Régime du Rhône* (d'après M. Dausse). *Régime du Nil* (d'après la description de l'Égypte).

Fig. 1 (p. 182), moyennes hauteurs du Rhône pour chaque mois et pour l'année.

Fig. 2 (p. 182), tenues du Rhône aux différentes hauteurs de ses eaux, pour chaque mois et pour l'année.

Fig. 3 (p. 204), courbe représentant la loi de l'accroissement et du décroissement du Nil.

Fig. 4 et 5 (p. 211), profils de la vallée du Nil à Manfalout et à Siout (relevés par M. Girard ; les hauteurs sont amplifiées).

Fig. 6 (p. 212), profil de la vallée du Nil à Minyeh (relevé par M. Jomard).



ERRATA.

Pages.	Lignes.	
9,	10.	<i>Au lieu de</i> M. Gros, <i>lisez</i> M. Gras.
47,		Supprimez les deux premières lignes.
39,	3.	<i>Au lieu de</i> neve, <i>lisez</i> nevé.
71,	13.	— des pentes des divers cours, <i>lisez</i> des pentes de di cours.
90,	9.	— Bourget, <i>lisez</i> du Bourget.
131,	13.	— d'un <i>u</i> au produit de l'opération, <i>mettez</i> une <i>n</i> .
173,	6.	— <i>lisez</i> de beaucoup plus fréquemment.
179,	20.	— auquel, <i>lisez</i> auxquels.
202,	25.	— 860 mètres, <i>lisez</i> 860 kilomètres.
224,	28.	— de faits, <i>lisez</i> fait.
252,	9.	— (<i>tiers</i>), <i>lisez</i> (liers).
260,	4.	— seul, <i>lisez</i> nul.
271,		

TABLE DES MATIÈRES.

DOUZIÈME LEÇON.

	Pages.
<i>Des torrents et de leurs dépôts.</i>	1
Objet des leçons précédentes contenues dans le 1 ^{er} vol. de l'ouvrage.	1
Suite du même sujet.	1
Continuation de l'étude des matériaux meubles, répandus sur la surface du globe.	1
Matières charriées par les eaux courantes.	2
Remarques générales sur les vallées et sur le régime des eaux courantes.	2
Ramification des vallées, choix arbitraire du filet d'eau qu'on appelle la <i>Source d'une rivière</i>	3
Les phénomènes produits par les eaux courantes sont plus frappants près de leurs sources.	4
<i>Torrents des hautes montagnes.</i>	5
Distinction entre les <i>rivières</i> , les <i>ruisseaux</i> et les <i>torrents</i>	6
Trois classes de <i>torrents</i> dans les Hautes-Alpes.	8
Trois parties à distinguer dans chaque torrent.	10
<i>Bassin de réception.</i>	11
<i>Canal d'écoulement.</i>	11
<i>Cône de déjection.</i>	11
Rôle que les eaux y jouent.	12
Causes subites qui réunissent les eaux dans les bassins de réception.	12
Fontes de neige.	12
Orages.	12
Rapidité des crues des torrents.	13
Accidents qui en résultent.	13
Explication de l'arrivée subite des eaux.	14
Effets singuliers que produisent les eaux des torrents.	14
Rafales.	14
Ponts qu'elles enlèvent.	15

	Pages.
Blocs de rocher lancés.	15
Pentes sur lesquelles ces effets se produisent.	15
Comment les torrents se chargent de débris.	16
Comment ils dégradent le terrain.	16
Obstacles qu'on oppose à ces dégradations.	17
Manière dont les eaux se réunissent.	17
<i>Canal d'écoulement.</i>	18
Action que le torrent y exerce.	19
<i>Cônes de déjection.</i>	19
Dépôts qui s'y accumulent.	19
Rapports entre les canaux d'écoulement et les cônes de déjection.	20
Longueurs et pentes des vallées, des torrents.	20
Pentes et formes des cônes de déjection.	20
Apparence générale de ces cônes dans les grandes vallées des Alpes.	23
Observation sur les cônes de déjection de la vallée de Barcelon- nette.	24
Observation de M. Forbes sur les cônes de déjection de la vallée de Saint-Nicolas.	25
Ressemblance des dépôts qui s'y forment avec les <i>moraines</i> des glaciers.	26
Disposition habituelle des matières charriées dans les cônes de déjection.	27
Natures diverses de ces matières	28
Pentes sur lesquelles les torrents abandonnent des matières de diverses grosseurs.	29
Ravages que les torrents produisent en couvrant des terrains cul- tivés des matières qu'ils charrient.	29
Culture ou boisement des cônes de déjection, praticable à la longue.	30
Le torrent doit avoir reçu préalablement une direction fixe.	31
Routes qui traversent des cônes de déjection.	31
Difficulté de l'établissement des ponts.	31
Analogies entre le régime des torrents et celui des rivières.	32
Exceptions et modifications qu'elles comportent.	33
<i>Torrents-rivières et rivières torrentielles.</i>	34
La quantité totale d'eau dépensée dans une crue de torrent n'est pas très-considérable.	35
Caractère essentiel des torrents.	35
Leur puissance est due à la concentration de leurs eaux.	36
Les déboisements favorisent leur action.	36

	Pages.
Contraste entre les rivières des pays sauvages et celles des pays civilisés.	37
Quantité spécifique des matières terreuses que l'eau peut tenir en suspension.	38
Quantité énorme que les <i>Nants sauvages</i> en renferment.	38
Phénomènes produits en 1835 dans le <i>Nant de Saint-Barthélemy</i> , près Saint-Maurice.	38
Grande pesanteur spécifique de la matière coulante.	40
Elle <i>flottait</i> des blocs calcaires.	40
Pesanteur spécifique d'un mélange d'eau et de matières terreuses.	41
Comparaison des courants boueux très-épais avec les coulées de lave.	42
La quantité spécifique de matières terreuses contenues dans les eaux troubles, est généralement très-petite.	43
Faits et remarques à ce sujet	44
Eaux troubles du Rhône flottant sur le lac de Genève.	45
Limites qu'on peut assigner à la quantité spécifique de matières terreuses contenues dans les eaux troubles.	46
Exemple des eaux de l'Amazone.	47
Calcul auquel il donne lieu.	48
Ce calcul conduit à un résultat hors de proportion avec la réalité.	48
Hypothèses faites par différents savants.	49
Expériences de M. Horner sur le Rhin.	50
Expériences de MM. Dupasquier et Lortet sur le Rhône.	51
Résultats mensuels obtenus à Lyon par M. Fournet.	53
Résultats obtenus à Ghazipur sur les eaux du Gange, par M. Everest.	58
Calculs qu'on a basés sur cette expérience.	61
Petitesses comparatives des phénomènes actuels d'érosion et de sédimentation.	61

TREIZIÈME LEÇON.

<i>Du régime des rivières.</i>	63
L'étude des torrents conduit à celle des rivières.	63
Il s'agit d'appliquer les lois de l'hydraulique au régime et aux effets des rivières.	64
Forme générale d'un lit des rivières. Pente le plus souvent décroissante.	64
Exemples de pentes de diverses rivières.	65

	Pages.
Beaucoup de rivières coulent sur une pente de 0,0001 ou de 20 secondes.	66
Pentes plus faibles encore de quelques grands fleuves.	66
Exemples de pentes pris dans diverses rivières.	67
Limite supérieure des pentes des rivières navigables.	69
Pentes à donner aux canaux qui doivent débiter de grands volumes d'eau	70
Pentes de quelques rivières très-rapides.	71
Les pentes des rivières régulières ne dépassent pas $\frac{1}{1000}$ ou 6' 52" 1/2.	72
Ces pentes, quoique très-variées, sont toutes également insensibles à l'œil	72
Pentes bien plus fortes des cours d'eau des pays de montagnes.	72
Limites des pentes sur lesquelles les eaux produisent divers effets.	72
Rivières.	73
Rivières torrentielles.	73
Torrents.	73
Comparaison de ces pentes avec celles observées ou employées dans les chemins de fer.	74
Dans les routes ordinaires.	75
Vitesse des rivières.	75
Elles dépendent à la fois de la pente et du volume des eaux	75
Vitesses de diverses rivières dans différentes circonstances.	76
La Seine.	76
Le Rhône.	77
Le Rhin.	77
Le Nil.	77
Le Gange.	77
Le Mississipi.	78
La vitesse d'une rivière qui ne tarit jamais est rarement triplée dans les crues	79
Vitesse des courants marins.	80
Elles sont comprises dans des limites peu différentes de celles des vitesses des rivières.	80
Vitesses des torrents beaucoup plus considérables.	82
Comparaison des vitesses des cours d'eau avec d'autres genres de vitesses.	83
Variations auxquelles les rivières sont sujettes.	84
Étiage, état moyen, <i>module</i> , grandes crues.	84
Constance des cours d'eau qui sortent de grands lacs.	85
Le Saint-Laurent.	85
Variations souvent énormes des cours d'eau privés de régulateurs.	85

	Pages.
Crues de l'Ohio.	86
Crues du Mississipi.	86
Crues du Nil.	86
Crues des rivières d'Europe.	86
La Seine.	86
La Loire.	87
La Garonne.	87
Le Rhin.	88
Le Weser.	88
L'Elbe.	89
L'Oder.	89
La Vistule.	89
Le Niémen.	89
Le Rhône.	90
Le Pô.	90
Quantités d'eau débitées par les rivières dans leurs diverses phases.	91
La Garonne.	92
La Seine.	92
La Loire.	93
Le Rhône.	94
Rapports entre les débits du Rhône et de ses affluents dans les hautes et basses eaux.	96
Le Rhin.	98
Le Pô.	98
L'Adda.	99
Le Nil.	99
Le Gange.	99
Le Mississipi.	100
Le Saint-Laurent.	100
Remarques sur les variations du débit des rivières.	100
On peut y distinguer deux classes opposées.	101
Variations dans la vitesse d'une même rivière occasionnées par celles de son débit.	102
Du mouvement des eaux dans les rivières.	102
Remarques de M. de Prony.	103
Remarques de Dubuat.	104
Le filet le plus rapide se trouve très-près de la surface, au-dessus de la partie la plus profonde du lit.	105
La vitesse diminue quand on s'approche des bords et quand on s'enfoncé.	106

	Pages.
Expériences de Dubuat.	107
Formule de M. de Prony.	108
Application aux rivières.	109
Comparaison entre les vitesses avec lesquelles l'eau coule dans différents lits	109
Influence de la pente.	109
Influence de la forme de la section.	110
<i>Périmètre mouillé.</i>	110
<i>Rayon moyen ou profondeur hydraulique moyenne.</i>	111
Équation fondamentale du mouvement de l'eau dans les canaux. Expressions simplifiées de la vitesse et de la dépense.	112
La simplification n'est permise que lorsque la vitesse dépasse un mètre par seconde.	112
Les coefficients sont relatifs à l'eau à peu près pure.	113
Plus la masse d'eau est grande, et moins il lui faut de pente pour acquérir une vitesse donnée.	113
La pente requise pour une vitesse donnée est en raison inverse du rayon moyen de la section.	113
Cas où le profil du lit se réduit à un angle ouvert par en haut. Formes très-simples que prennent alors les formules.	114
La vitesse sans être constante, est l'élément le moins variable de l'état d'une rivière, ce qui fait qu'elle a réellement un régime à elle.	115
Rapports dans lesquels varient les différents éléments.	116
Vérification dans des cas particuliers.	117
Le Rhône, à sa sortie du lac de Genève	117
Le Rhône, à Lyon	118
L'Ain.	119
La Durance.	119
La Loire, à Roanne	119
La Loire, à Orléans	119
Constance approximative de la vitesse d'une même rivière en différents points de son cours.	120
Le profil longitudinal d'une rivière forme habituellement une courbe concave vers le ciel.	121
Dans les crues, la vitesse va en décroissant de la source vers l'em- bouchure.	122
Une rivière peut couler pendant quelque temps en contre-pente. Le fond est bien plus souvent en contre-pente que la surface.	123
Les inégalités du lit rendent le courant irrégulier, et font naître des affouillements.	124

	Pages.
Influence des inégalités du fond sur la surface.	126
Le filet d'eau le plus rapide forme au milieu du courant le sommet d'une légère proéminence.	126
Deux rivières égales, en se réunissant, en forment ordinairement une nouvelle dont la largeur n'est pas double.	127
Variations dans les dimensions du lit qui accompagnent les variations de la pente.	128
Changements de régime qui surviendraient si la même quantité d'eau passait dans une rivière en moins de temps.	130
La force avec laquelle l'eau choque les obstacles est à peu près proportionnelle au carré de sa vitesse.	130
Les effets des crues sont à peu près proportionnels à la profondeur qu'elles donnent à la rivière.	131
Comparaison avec les <i>écluses de chasse</i>	132
Effets funestes du déboisement des montagnes.	132
Crues dont l'industrie sait profiter.	132
Crues artificielles.	132
Crues offensives.	133
Comment on les rendrait le plus désastreuses possible.	133
Comment de grandes débâcles ont pu être produites.	133
Une rivière gonflée devient capable des mêmes effets qu'une rivière dont la pente est rapide.	134
Ces considérations serviront à l'explication des phénomènes erratiques.	134

QUATORZIÈME LEÇON

<i>Formation des dépôts de matières meubles dans les vallées.</i>	135
Action des cours d'eau considérés comme agents de déblais et de remblais.	135
L'action des rivières est en rapport avec la nature des roches de leur bassin.	136
Les matières entraînées diminuent graduellement de grosseur.	137
Comment il finit par s'établir un lit stable.	137
Grosseur des matières entraînées en rapport avec la vitesse.	138
Expériences de Dubuat.	138
Entraînement du sable par les rivières, analogue à la formation des dunes.	142
Matières ténues que les eaux troubles tiennent en <i>suspension</i>	142
Elles se déposent très-lentement.	143

	Pages.
Comment les alluvions se déposent.	143
Beaucoup de vallées ont un fond plat.	143
Une rivière dépose peu dans la partie la plus profonde de son lit.	144
Elle couvre ses rives de sédiments.	144
Comment elle les y entraîne et les y dépose.	144
Nature et forme du dépôt qu'elle produit.	145
Le dépôt s'élève davantage sur les bords de la rivière qu'à une certaine distance.	146
Distinction entre le <i>lit mineur</i> et le <i>lit majeur</i>	146
Netteté de leur séparation.	147
Cette disposition met en défaut les formules approximatives établies précédemment.	147
<i>Colmatage</i>	148
Analogie de ses effets avec la formation des deltas.	148
Dépôts qui se forment dans toutes les parties du lit où la vitesse est diminuée.	148
<i>Affouillements</i> qui s'opèrent dans les points où la vitesse au fond est augmentée.	149
Points où ils ont lieu de préférence.	149
Ces effets atteignent promptement une limite presque fixe.	149
Les rivières, dans leurs grandes inondations, sont cependant capables de déplacer leurs dépôts antérieurs.	149
Elles ont une action plus efficace pour changer leur direction que pour changer le niveau de leur fond.	150
Tendance des rivières à serpenter.	151
Mécanisme par lequel elles produisent leurs <i>méandres</i>	151
En donnant à leur lit une forme serpentante, les rivières s'allongent et tendent à élever leur niveau.	152
Ces effets se limitent d'eux-mêmes.	153
Coupure des méandres.	153
Production des îles, des <i>morts-bras</i>	153
Exemples fournis par diverses rivières.	153
Les rivières qui serpentent le plus sont celles qui coulent au milieu des alluvions.	154
Les rives concaves sont plus abruptes, et la rivière y est plus profonde.	154
Les rives convexes sont en pente douce; c'est là que les alluvions se déposent.	154
Causes diverses qui peuvent déterminer le courant à se porter tantôt vers une rive, tantôt vers l'autre.	155

	Pages.
Hauts-fonds qui se forment aux points où le courant se porte vers l'une ou l'autre rive.	156
Gués.	156
Relation intime entre la forme du fond de la vallée et le régime de la rivière.	156
Nécessité d'étudier plus complètement le régime des rivières.	157
Recherches de M. Dausse.	157
Il a introduit dans l'étude des rivières une notion nouvelle, celle de la tenue.	158
Aperçu général de ses travaux.	158
Courbe des hauteurs de la rivière.	158
Ce qu'elle laisse à désirer pour la connaissance du régime de la rivière.	159
Tenue	159
Tenue de chaque mois.	160
Tenue de l'année.	160
Remarques au sujet de la tenue.	160
Tableau des tenues.	161
Courbe des tenues.	161
La courbe des tenues annuelles présente souvent plusieurs renflements.	162
Il y a presque toujours une tenue plus longue que toutes les autres, qui est l'état le plus habituel de la rivière.	162
La plus longue tenue peut être en eaux basses ou en eaux moyennes.	163
Importance du niveau de la plus longue tenue pour la navigation et pour les constructions hydrauliques.	163
Le régime des rivières est plus favorable à la navigation qu'on ne le pense généralement.	163
Fausseté de l'idée de Brinkley que <i>les rivières ont été faites pour alimenter les canaux</i>	163
Influence du niveau de la plus longue tenue sur tout le régime de la vallée.	164
Comment la végétation s'y coordonne.	164
Influence de la végétation aquatique sur le dépôt de la vase.	165
Rapport entre la tenue des rivières à différents niveaux et le climat de leur bassin.	165
Importance de la détermination des tenues pour la mesure de la quantité d'eau débitée par une rivière.	166
Débit par seconde à une hauteur donnée, ou portée élémentaire.	166
Porée intégrale.	166

	Pages.
Expression mathématique de la portée élémentaire.	167
De la portée intégrale.	167
Calcul approximatif de la portée intégrale.	167
Détermination du <i>module</i> d'une rivière.	168
Hauteur à laquelle une rivière devrait couler pour débiter une quantité d'eau égale à son <i>module</i>	168
La <i>hauteur de la plus longue tenue</i> , la <i>hauteur moyenne</i> et la <i>hauteur du débit moyen</i> , sont généralement différentes.	169
Objet général des travaux de M. Dausse.	169
Données qu'il a élaborées.	169
Il distingue dans les rivières deux types principaux.	170
Rivières qui proviennent de plateaux ou de collines peu élevées.	170
Rivières alpines.	171
La Seine à Paris.	171
Hauteur de la plus longue tenue.	171
Sa plus grande crue connue.	172
Le plus bas étiage connu.	172
Amplitude totale de ses oscillations.	172
Époque habituelle de ses crues.	173
Époque habituelle de ses étiages.	173
Époque des plus rapides transitions d'un niveau à un autre.	173
La Seine ne se tient que quarante et un jours, année moyenne, hors des limites où la navigation est possible.	174
Débit de la Seine en basses eaux, en hautes eaux.	174
A la hauteur de sa plus longue tenue.	174
Débit moyen ou <i>module</i> de la Seine.	174
Hauteur de la rivière à laquelle il correspond.	175
Les crues de la Seine sont passagères, elles influent moins que les étiages sur le débit total de l'année.	175
Tableau des <i>portées intégrales</i> de la Seine pour chaque mois et pour l'année entière.	175
Comment on pourra calculer la quantité de matières terreuses que la Seine porte à la mer.	177
Superficie du bassin de la Seine.	177
Quantité d'eau pluviale qui y tombe.	177
Un tiers seulement de cette eau s'écoule par la Seine.	178
La relation entre la quantité d'eau pluviale et la quantité d'eau écoulée varie avec les saisons.	178
Différence entre l'état actuel de la Seine et celui dans lequel elle se trouvait pendant la période gallo-romaine.	178
Rivières alpines.	179

	Pages.
Remarques générales sur leur alimentation et leur régime.	179
Différences entre leur régime et celui des rivières ordinaires.	180
Variation du niveau du Rhône à Lyon.	181
o Sa plus longue tenue est très-prononcée.	182
Débit du Rhône à Lyon.	182
§ Comparativement à la grandeur de son bassin, le Rhône à Lyon	
écoule cinq fois autant d'eau que la Seine.	184
Conséquence de ce fait relativement au climat alpin.	184
Aspect des rivières alpines.	184
Remarques sur le Rhin.	185
o Dans les rivières qui traversent des lacs, le régime alpin est	
altéré.	186
Rivières qui le présentent dans toute sa pureté.	186
Particularités du régime de l'Isère.	186
Les rivières alpines perdent leur caractère en s'éloignant des	
montagnes.	187
Le Rhône à Beaucaire est transformé en une rivière du genre	
de la Seine.	187
Caractère alpin des rivières des régions boréales.	187
o Le régime de la plupart des grands fleuves se rapproche de	
celui de la Seine.	188
Le Nil.	188
Avantages qu'il présente pour ce genre d'étude.	188
Son origine	188
Il est privé d'affluents sur une très-grande longueur	188
Cette circonstance simplifie son régime	189
Remarques sur la vallée du Nil.	189
Entrée du Nil en Égypte.	189
La partie habitable de l'Égypte se réduit à la vallée du Nil.	190
Son étendue.	190
Sa constitution géologique.	190
Sa largeur.	192
Le Nil la divise en deux bandes de largeurs inégales.	193
Resserrements qu'elle présente	194
o Largeur du lit du Nil	196
Il est peu profond.	197
Sa vitesse.	197
Son débit dans les basses et dans les hautes eaux.	198
Sa pente.	198
Sa vitesse	201
Le Nil a les allures d'un fleuve rapide.	201

	Pages.
Il serpente peu	202
Ses crues	203
Leur marche en Égypte.	203
Leur hauteur	204
Distribution des eaux des crues sur la surface de l'Égypte.	205
Le Nil n'est jamais parfaitement limpide.	206
Matières qu'il charrie.	207
Dépôts qu'il forme	207
Limon. \	208
Sable.	208
Graviers.	209
Épaisseur des dépôts de limon qu'il a formés sur ses rives.	210
Profils de ses berges.	210
Forme de la section transversale de sa vallée	211
Le sol est plus élevé sur ses bords mêmes qu'à une certaine distance.	211
Effets remarquables qui en résultent.	212
Le sol cultivable de l'Égypte n'est que le <i>lit majeur du Nil</i>	213
Il s'étend graduellement aux dépens des déserts qui le bordent.	214
Plages sablonneuses stériles que le Nil a formées sur ses bords.	214
Couches de sable qui alternent avec le limon, surtout vers la base du dépôt.	214
Emplois divers du limon du Nil.	214
Épaisseur moyenne annuelle des dépôts de limon formés par le Nil.	215
Elle n'est pas la même dans toutes les parties de l'Égypte.	216
Elle paraît être restée constante en chaque point depuis très-longtemps.	217
Le régime du Nil n'a pas varié depuis l'antiquité	217
Son fond s'est élevé de la même quantité que ses rives,	218
Le sol cultivable de l'Égypte est un <i>présent du Nil</i>	219
Il n'en résulte pas que le sol entier de l'Égypte ait été formé par le Nil.	219
Discussions à ce sujet	219
Origine du Delta	219
Origine de la plaine alluviale du Nil.	221
Idées d'Hérodote.	221
Elles sont exagérées.	222
Les eaux de la mer ne peuvent pas s'être étendues originairement jusqu'à Thèbes	222
État probable de la vallée de l'Égypte lorsque le Nil y a com-	?

	Pages.
mencé ses dépôts.	225
Le Gange	228
Ses crues ressemblent à celles du Nil, mais elles sont un peu moins régulières	228
Époque à laquelle elles ont lieu	229
Leur hauteur	229
Digues du Gange	230
Leurs effets	230
Leur premier établissement a peut-être été une faute.	230
Action violente que le Gange exerce sur ses rives.	230
Ses eaux contiennent une portion très-considérable de matières terreuses en suspension.	231
Le Mississipi.	231
Ses crues	231
Elles ont plusieurs phases qui correspondent aux crues des divers affluents	232
Circonstances qui diminuent la hauteur de la crue et en augmentent la durée.	232
Époques des crues des affluents et de celles du fleuve principal	232
Hauteur de la crue du Mississipi en différents points.	233
Chaque crue du tronc principal est la prolongation de celle d'un affluent	234
Influence des crues sur la pente.	234
Ses eaux sont rarement limpides dans la partie inférieure de son cours.	234
Largeur du Mississipi.	235
Elle augmente peu par l'introduction des affluents, mais sa profondeur s'accroît un peu.	236
Profondeur du Mississipi en différents points de son cours.	236
Sa vitesse.	238
Nature des matières qui forment son fond	239
Proportion des matières terreuses que ses eaux tiennent en suspension.	239
Longueur et largeur de la plaine alluviale du Mississipi.	240
Sa pente.	241
Ses limites; caps formés par ses bords: <i>Bluffs</i>	242
Composition des <i>Bluffs</i>	243
Le sol est plus élevé sur les rives mêmes du fleuve qu'à une certaine distance	244
Étangs et marais qui se forment entre les rives du fleuve et les	

	Pages.
bords de la vallée.	244
Berges dégradées par l'action des eaux	245
Les îles sont exposées aux mêmes causes de destruction.	245
Méandres du Mississipi.	246
* Le fleuve les coupe et les fait disparaître.	246
Lacs formés par les méandres abandonnés.	247
Les méandres sont surtout très-nombreux un peu au-dessus de la naissance du Delta.	247
En approchant de son embouchure, le fleuve devient moins sinueux.	248
Explication de ce phénomène.	248
Remarques sur l'origine des <i>méandres</i>	250
Changements qui se sont opérés dans la vallée du Mississipi.	251
Forêts qui ont été ensevelies sous ses alluvions.	252
Ces phénomènes ont sans doute été en rapport avec les dénivellations produites par les tremblements de terre.	253
Grande épaisseur des remblais que présente la vallée du Mississipi.	254
A quelles formations géologiques doit-on les rapporter.	254
Remarques sur ce sujet.	254
Régime du Rhin au-dessous de Lauterbourg ; ses méandres.	257
Observations analogues auxquelles beaucoup d'autres rivières pourraient donner lieu.	257
Remarques comparatives sur les méandres de diverses rivières.	258
Point où la vitesse est à son maximum et où le mouvement n'est plus accéléré et n'est pas encore retardé.	259
C'est celui où la vitesse effective de la rivière se trouve égale à celle qu'elle prendrait sur la pente qui y existe.	260
Mobilité des alluvions près du point où la vitesse de la rivière commence à se ralentir.	263
Elles ne se fixent dans le lit que bien au-dessous du point où elles se répandent sur les rives.	263
Les effets des rivières sont analogues à ceux des torrents, quoique plus faibles et moins caractérisés.	264
Les rivières façonnent surtout leur lit et leur vallée pendant leurs crues.	264
Applications de ces remarques à diverses rivières.	265
Le Rhône et la Loire	265
Le Pô.	266
Le Rhin.	266
La Moselle.	266

DES MATIÈRES.**291**

	Pages.
La Seine.	266
Méandres des affluents de la Saône.	269
Analogie générale dans les formes de tous les méandres.	270
Relation entre les rayons de leurs courbures et le volume des caux de la rivière.	270
Grandeurs des méandres de diverses rivières.	270
Rapports entre l'amplitude des méandres et la grandeur de la rivière	271
La forme générale des vallées porte l'empreinte de l'action érosive des eaux	272
Grandeur et vitesse des courants diluviens	272
Explication des planches.	273

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.