

ENCYCLOPÉDIE

DES

TRAVAUX PUBLICS

Fondée par **M.-C. LECHALAS**, Inspecteur général des Ponts et Chaussées  
*Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889*

---

HYDRAULIQUE FLUVIALE

---

LA FORME

DU

LIT DES RIVIÈRES

A FOND MOBILE

PAR

L. FARGUE

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES EN RETRAITE

---

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.

Quai des Grands-Augustins, 55

1908

TOUS DROITS RÉSERVÉS

# ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS

Directeur : G. LECIALAS, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, quai de la Bourse 13, Rouen.

Volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures.

Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889  
Exposition de 1900 (Voir pages 3 et 4 de la couverture)

## OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES

- M. BECHMANN. *Distributions d'eau et Assainissement*. 2<sup>e</sup> édit., 2 vol. à 20 fr., 40 fr. — *Cours d'hydraulique agricole et urbaine*, 1 vol. . . . . 20 fr.
- M. BRICKA. *Cours de chemins de fer de l'École des ponts et chaussées*. 2 vol., 1343 pages et 464 figures . . . . . 40 fr.
- M. COLSON. *Cours d'économie politique* : Six livres, chacun . . . . . 6 fr.
- M. L. DURAND-CLAYE. *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur*, en collaboration avec MM. Dérôme et Feret, 2<sup>e</sup> édit. considérablement augmentée, 15 fr. — *Cours de routes de l'École des ponts et chaussées*, 606 pages et 234 figures, 2<sup>e</sup> édit., 20 fr. — *Lever des plans et nivellement*, en collaboration avec MM. Pelletan et Lallemand. 1 vol., 703 pages et 280 figures (cours des Ecoles des ponts et chaussées et des mines, etc.) . . . . . 25 fr.
- M. FLAMANT. *Mécanique générale (Cours de l'École centrale)*, 1 vol. de 544 pages, avec 203 figures, 20 fr. — *Stabilité des constructions et résistance des matériaux*. 2<sup>e</sup> édit., 670 pages, avec 270 figures, 25 fr. — *Hydraulique (Cours de l'École des ponts et chaussées)*, 1 vol., 2<sup>e</sup> éd. considérablement augmentée (Prix Montyon de mécanique); XXX, 685 pages avec 130 figures . . . . . 25 fr.
- M. GABRIEL. *Traité de physique*. 2 vol., 448 figures. . . . . 20 fr.
- M. HIRSCH. *Cours de machines à vapeur et locomotives*. 1 vol. 510 pages, 314 fig. . . . . 18 fr.
- M. F. LAROCHE. *Travaux maritimes*. 1 vol. de 490 pages, avec 116 figures et un atlas de 46 grandes planches, 40 fr. — *Ports maritimes*. 2 vol. de 1006 pages, avec 524 figures et 2 atlas de 37 planches, double in-4<sup>e</sup> (*Cours de l'École des ponts et chaussées*) . . . . . 50 fr.
- M. F. B. DE MAS, Inspecteur général des ponts et chaussées. *Rivières à courant libre*, 1 vol. avec 97 figures ou planches, 47 fr. 50. — *Rivières canalisées*. 1 vol. avec 176 figures ou planches, 47 fr. 50. — *Canaux*. 1 vol. avec 190 figures ou planches. . . . . 17 fr. 50
- M. NIVORT, Inspecteur général des mines : *Cours de géologie*, 2<sup>e</sup> édition, 1 vol. avec carte géologique de la France; 615 pages, 429 fig. et un tableau des formations géologiques de 7 pages . . . . . 20 fr.
- M. M. D'OCAGNE. *Géométrie descriptive et Géométrie infinitésimale* (cours de l'École des ponts et chaussées), 1 vol., 340 fig. . . . . 12 fr.
- M. DE PRÉAUDEAU, Inspect. général des P.-et-Ch., prof. à l'École nat. *Procédés généraux de construction. Travaux d'art*. Tome I, avec 508 fig. 20 fr. Tome II, avec 389 fig. . . . . 20 fr.
- M. J. RÉSAL. *Traité des Ponts en maçonnerie*, en collaboration avec M. Degrand. 2 vol., avec 600 figures, 40 fr. — *Traité des Ponts métalliques* 2 vol., avec 500 figures, 40 fr. — Le 1<sup>er</sup> volume des *Ponts métalliques* est à sa seconde édition (revue, corrigée et très augmentée). *Constructions métalliques, élasticité et résistance des matériaux : fonte, fer et acier*. 1 vol. de 652 pages, avec 203 figures, 20 fr. — *Cours de ponts*, professé à l'École des ponts et chaussées : *Études générales et ponts en maçonnerie*, 1 vol. de 410 pages avec 284 figures, 14 fr. — *Cours de ponts métalliques*, tome I, 1 volume de 660 pages avec 375 figures, 20 fr. — *Cours de Résistance des matériaux* (École des ponts et chaussées), 120 figures., 16 fr. — *Cours de stabilité des constructions*, 240 figures, 20 fr. — *Poussée des terres et stabilité des murs de soutènement* . . . . . 40 fr.

## OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

- M. DEHARME. *Chemins de fer. Superstructure*; première partie du cours de chemins de fer de l'École centrale. 1 vol. de 696 pages, avec 310 figures et 1 atlas de 73 grandes planches in-4<sup>e</sup> doubles (voir *Encyclopédie industrielle* pour la suite de ce cours). . . . . 50 fr.  
On vend séparément : *Texte*, 45 fr.; *Atlas*, 35 fr.
- M. DENFER. *Architecture et constructions civiles*. Cours d'architecture de l'École centrale : *Maçonnerie*. 2 vol., avec 794 figures, 40 fr. — *Charpente en bois et menuiserie*. 1 vol., avec 680 figures, 25 fr. — *Couverture des édifices* 1 vol., avec 423 figures, 20 fr. — *Charpenterie métallique, menuiserie en fer et serrurerie*. 2 vol., avec 1.050 figures, 40 fr. — *Fumisterie (Chauffage et ventilation)*. 1 vol. de 726 pages, avec 731 figures (numérotées de 1 à 375, l'auteur affectant chaque groupe de figures d'un numéro seulement). 25 fr.
- Plomberie : Eau; Assainissement; Gaz*, 1 vol. de 568 p. avec 391 fig. . . . . 20 fr.
- M. DORION. *Cours d'Exploitation des mines*. 1 vol. de 692 pages, avec 1.100 figures. . . . . 25 fr.
- M. MONNIER. *Electricité industrielle*, cours professé à l'École centrale, 2<sup>e</sup> édition considérablement augmentée, 1 vol. de 826 pages; 404 très belles figures de l'auteur. . . . . 25 fr.
- M. M<sup>l</sup> PELLERIER. *Droit industriel*, cours professé à l'École centrale 1 vol. . . . . 15 fr.
- MM. E. ROUCHÉ et BRISSE, anciens professeurs de géométrie descriptive à l'École centrale. *Coupe des pierres*. 1 vol. et un grand atlas (avec de nombreux exemples). . . . . 25 fr.

## OUVRAGES D'UN PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS

- M. E. ROUCHÉ, membre de l'Institut. *Éléments de statique graphique*. 1 vol. . . . . 12 fr. 50
- MM. ROUCHÉ et Lucien LÉVY. *Calcul infinitésimal*, 2 vol. de 557 et 829 p. (*Enc. indust.*) . . . . . 15 fr.

(Voir la suite ci-après)

HYDRAULIQUE FLUVIALE

---

LA FORME

ou

**LIT DES RIVIÈRES**

A FOND MOBILE

*Tous les exemplaires de l'ouvrage LA FORME DU LIT  
DES RIVIÈRES A FOND MOBILE, par L. Fargue devront être  
revêtus de la signature de l'auteur et de la griffe du  
libraire.*



The image shows a handwritten signature in cursive script that reads "Fargue". Below the signature is a thick horizontal line with a diagonal slash extending from the right end downwards and to the left.

ENCYCLOPÉDIE

DES

TRAVAUX PUBLICS

Fondée par **M.-C. LECHALAS**, Inspecteur général des Ponts et Chaussées  
*Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889*

---

HYDRAULIQUE FLUVIALE

---

LA FORME

DU

LIT DES RIVIÈRES

A FOND MOBILE

PAR

L. FARGUE

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES EN RETRAITE

---

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.

Quai des Grands-Augustins, 55

1908

TOUS DROITS RÉSERVÉS



## AVANT-PROPOS

---

Il y a cinquante ans, un jeune ingénieur s'est trouvé, dès les premiers jours de son installation dans le service de la Garonne, aux prises avec les difficultés que présentent les projets d'amélioration de la navigabilité des rivières. Il lui fut facile de se procurer tous les renseignements nécessaires en ce qui concerne la constitution matérielle des ouvrages : pieux, fascinages, clayonnages, enrochements, tout cela lui devint promptement familier. Il n'eut qu'à suivre les traditions du service, interroger les agents expérimentés et consulter le mémoire publié par Baumgarten dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (1848, 2<sup>e</sup> semestre).

Il n'en a pas été de même quand il s'est agi de tracer sur un plan les lignes entre lesquelles devait être compris le lit du fleuve. Fallait-il conserver à la rive la situation dans laquelle elle se trouvait, en se bornant à la défendre contre les érosions ? Valait-il mieux constituer de toutes pièces une rive nouvelle ? Cette nouvelle rive devait-elle être droite ou courbe ? Quels résultats pouvait-on espérer, comme profondeur et comme stabilité du chenal navigable, en adoptant tel ou tel tracé ? Sur ces divers points, qui étaient l'essence même du problème, les archives du service ne contenaient absolument rien. Les traités des au-

teurs et les cours de l'École des Ponts et Chaussées parlaient des expériences de Dubuat, donnaient la formule de Prony, les coefficients d'Eytelwein, deux théorèmes d'hydrodynamique mathématique, quelques chiffres empiriques pour transformer la vitesse de superficie en vitesse moyenne ou vitesse de fond, toutes choses n'ayant aucun rapport avec les questions du tracé des rives et de la profondeur du chenal.

Les ingénieurs qui avaient l'expérience des travaux en rivières étaient loin d'être d'accord sur ces questions.

— Faites un lit rectiligne, *disaient les uns*. La pesanteur agit en ligne droite, donc la tendance naturelle de l'eau est de couler en ligne droite. La forme parfaite est évidemment celle du plus court chemin ; la sinuosité est un mal qu'il faut guérir, un vice qu'il faut corriger.

— Gardez-vous de faire des lignes droites, *disaient quelques autres* : la courbure paraît jouer un rôle dans le creusement de la passe. Tracez donc des arcs de cercle ; c'est évidemment la courbe la plus simple et la plus parfaite.

— La forme du tracé est sans importance, *affirmait-on ailleurs*. Pour avoir un bon chenal, il suffit, après avoir supprimé les faux-bras, de bien aménager la section mouillée par des épis et par des dragages, en faisant croître uniformément la largeur de l'amont vers l'aval.

Aucun de ces opinions n'avait, il y a cinquante ans (et n'a acquis depuis) l'autorité que donne une solide base expérimentale. C'étaient, et ce sont encore, des thèses préconçues, inspirées par un petit nombre de faits superficiellement observés, qui contiennent chacune une parcelle de vérité, mais qui deviennent fausses quand on veut les ériger en systèmes absolus.

Bref, aucun principe certain n'existait en la matière et les questions à résoudre étaient fort obscures.

Pour faire cesser ses perplexités, le jeune ingénieur résolut de voir par lui-même comment les choses se passaient sur la Garonne. Il avait à sa disposition de nombreux documents recueillis sous l'intelligente direction de l'un de ses prédécesseurs, M. Jacquemet, et de l'ingénieur en chef du service, M. Couturier : des plans, avec bornage et nivellement, des profils en travers dressés d'après des sondages annuels, des observations hydrométriques, des profils en long du chenal navigable, etc. Il entreprit de compulsier méthodiquement les volumineux atlas, rouleaux et registres sur lesquels ces observations avaient été consignées.

En examinant simultanément le plan et le profil en long, il lui parut qu'ils n'étaient pas indépendants l'un de l'autre : à une même forme des rives correspondait une même configuration du chenal. Il voulut y regarder de plus près et chercher à déterminer la relation entrevue.

Tel a été le point de départ d'une étude qui, entreprise vers 1863, a été poursuivie plus ou moins activement pendant près de quarante-cinq ans et dont les résultats sont consignés dans sept notes ou mémoires successivement publiés dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (1), et dont le premier remonte à 1868.

La méthode suivie est celle de toute science physique : observation des faits et déductions logiques. Elle est irréprochable en elle-même. Mais il a pu arriver qu'elle n'ait pas été toujours bien appliquée.

(1) Voir la pièce annexe I.

Les faits de l'hydraulique fluviale ont en effet de vastes proportions dans l'espace et dans le temps : leurs dimensions se comptent par kilomètres et leurs phases embrassent de longues périodes d'années. Ils sont donc difficiles à saisir et à comparer. De plus, les forces qui les régissent sont nombreuses et, pour démêler l'action de chacune d'elles, il a été nécessaire de recourir à des simplifications qui ont pu être plus ou moins heureuses.

La voie dans laquelle l'auteur s'engageait était nouvelle et les nécessités du service ne lui ont permis d'y avancer que d'une manière intermittente. Il lui est donc arrivé de revenir sur ses pas, de s'aventurer dans de fausses directions et de ne pas toujours suivre le plus court chemin qui va du connu à l'inconnu.

Quoi qu'il en soit, les idées émises dans le mémoire de 1868 ont été diversement accueillies. La réalité des lois formulées fut tout d'abord niée, et on voulut n'y voir que de simples coïncidences fortuites. Mais bientôt ce mémoire obtint les suffrages de la grande majorité des lecteurs des *Annales*. Plus tard, les lois furent examinées et discutées dans les Congrès de navigation. Vérifiées sur divers cours d'eau, elles ont obtenu l'adhésion d'un grand nombre d'ingénieurs, tant en France qu'à l'étranger. Elles ont même pris place dans les ouvrages des auteurs les plus compétents (1).

(1) Flamant, inspecteur général des Ponts et Chaussées, *Hydraulique* (*Encyclopédie des travaux publics*).

De Mas, inspecteur général des Ponts et Chaussées, *Rivières à courant libre*. — *Idem*.

Lechalas, inspecteur général des Ponts et Chaussées, *Hydraulique fluviale*. — *Idem*.

Pour les fleuves à marée, la question a été un instant douteuse sur la Garonne et a été plus longtemps controversée, à cause de la complication due aux grandes variations de la largeur. Il est aujourd'hui démontré que les mêmes lois régissent les parties maritimes de la Garonne, de la Seine et de l'Escaut, et des études ultérieures généraliseront sans doute cette extension.

Enfin, la méthode expérimentale, inaugurée en 1879 à Bordeaux, a reçu des applications remarquables en Angleterre et en Allemagne où de vastes laboratoires ont été organisés pour l'étude, sur des modèles réduits, de tous les faits concernant la navigation.

La science de l'hydraulique fluviale est donc en voie de formation. Sous l'effort de tous ceux qui s'y intéressent, ses fondations expérimentales ne tarderont pas à être élargies. Après avoir réuni des matériaux en quantité suffisante, on saura les mettre en œuvre, les ranger en bon ordre et les condenser, par des méthodes perfectionnées, dans des formules d'une application facile. Les questions pratiques qui s'y rattachent seront alors bien simplifiées, la discussion en sera plus claire et la solution plus sûre.

Pour sa part, l'auteur s'est imposé une dernière tâche, celle de revoir ses études antérieures et d'en coordonner les résultats principaux dans un résumé débarrassé des erreurs, des redites, des tâtonnements et des considérations dont l'utilité n'a pas été démontrée par l'expérience. Ainsi allégé, ce résumé a pu être condensé dans un petit nombre de pages et c'est en quelques lignes que tient sa conclusion essentielle :

**L'allure sinueuse des rivières à fond mobile est un fait général ; les lits rectilignes sont l'exception et la navigation y rencontre le plus de difficultés, tandis que dans les courbes se trouvent les bons mouillages, ainsi que les chenaux stables et profonds.**

**D'autre part, le raisonnement montre que le mouvement d'une masse d'eau sur un fond mobile est nécessairement ondulatoire ; la direction rectiligne n'en est qu'une phase de transition entre deux ondulations consécutives. Des rives présentant une série d'ondulations analogues constitueraient le lit théorique correspondant au minimum de frottements et de perte de force vive, et par conséquent le plus favorable à la navigation.**

**A défaut de la théorie qui pour le moment est muette, il faut interroger la Nature, c'est-à-dire étudier les sinuosités des rivières navigables et les imiter dans celles de leurs parties auxquelles correspondent les meilleurs chenaux.**

Depuis le théorème sur la brachistochrone, la ligne droite, tout en continuant à être en géométrie le plus court chemin, a cessé d'être en mécanique la trajectoire de la plus rapide descente. En attendant une démonstration analytique aussi rigoureuse que celle de Bernouilli, il est expérimentalement établi que, en hydraulique fluviale, la ligne droite n'est généralement pas le meilleur chenal navigable d'un point à un autre.

---

# CHAPITRE PREMIER

---

## FAITS OBSERVÉS

## SOMMAIRE :

- § 1. — Régime de la Garonne.
- § 2. — Relation entre le plan et le chenal.
- § 3. — *Courbes* et biefs.
- § 4. — Lois empiriques.
- § 5. — La petite rivière artificielle de Bordeaux.
- § 6. — L'Escaut maritime.
- § 7. — Largeur du lit moyen.

## CHAPITRE PREMIER

### FAITS OBSERVÉS

---

#### § 1. — REGIME DE LA GARONNE

La partie de la Garonne sur laquelle a été faite l'étude comparative du plan et du chenal navigable s'étend, sur une longueur de 22 kilomètres, entre les bourgs de Gironde et de Barsac (planche I, fig. 1 et 2).

En 1863, époque à laquelle cette étude a été commencée, le lit moyen y était fixé par une série ininterrompue d'ouvrages exécutés depuis une vingtaine d'années et dont l'effet pouvait être considéré comme à peu près entièrement produit. Ces ouvrages consistent dans des lignes de rive en pieux, clayonnages, enrochements et plantations, du système décrit dans le mémoire de Baumgarten (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1848, 2<sup>e</sup> sem.).

L'écartement des lignes de rive n'est pas uniforme : il varie entre 170 mètres et 190 mètres. La largeur de 250 mètres existe exceptionnellement dans le coude très prononcé où se trouve le confluent de la rivière du Drot. Il a été fait provisoirement abstraction de ces différences et, réservant pour une

étude ultérieure la discussion de leur influence sur le régime des passes navigables, on a considéré la largeur comme partout égale à la moyenne de 180 mètres environ.

Une simplification du même genre a été faite en ce qui concerne la pente superficielle. A l'étiage, la pente totale de la Garonne est de 5 m. 01 sur les 21 k. 700 considérés, soit en moyenne de 0 m. 23 par kilomètre. Les pentes kilométriques locales varient entre 0 m. 07 (pente des parties profondes) et 0 m. 65 (pente des parties maigres). Les premières s'étendent sur les trois quarts et les secondes sur le quart environ de la longueur totale. Faisant abstraction de ces différences, on a considéré la pente comme uniforme, ce qui est à peu près vrai pour les eaux moyennes, et surtout pour les eaux de pleins bords.

Le fond est partout formé de sable et de gravier. Les bancs de rocher sont situés à plus de 2 mètres au-dessous de l'étiage. Les grèves n'ont pas toutes la même mobilité; elles sont d'autant plus résistantes qu'elles sont de formation plus ancienne. La grosseur moyenne des graviers est à peu près celle des matériaux usités pour l'entretien des chaussées en empierrement. La proportion de sable dont ils sont mélangés est de 50 à 70 pour cent. Cette proportion varie sous l'influence des tamisages superficiels opérés par les courants. A la *tête* des bancs, le caillou et le gros gravier prédominent; dans la partie médiane, le sable et le gravier sont en égales proportions. La *queue* du banc est généralement composée de sable presque pur. Toutefois ces différences sont d'ordre secondaire quand on considère le fleuve dans son

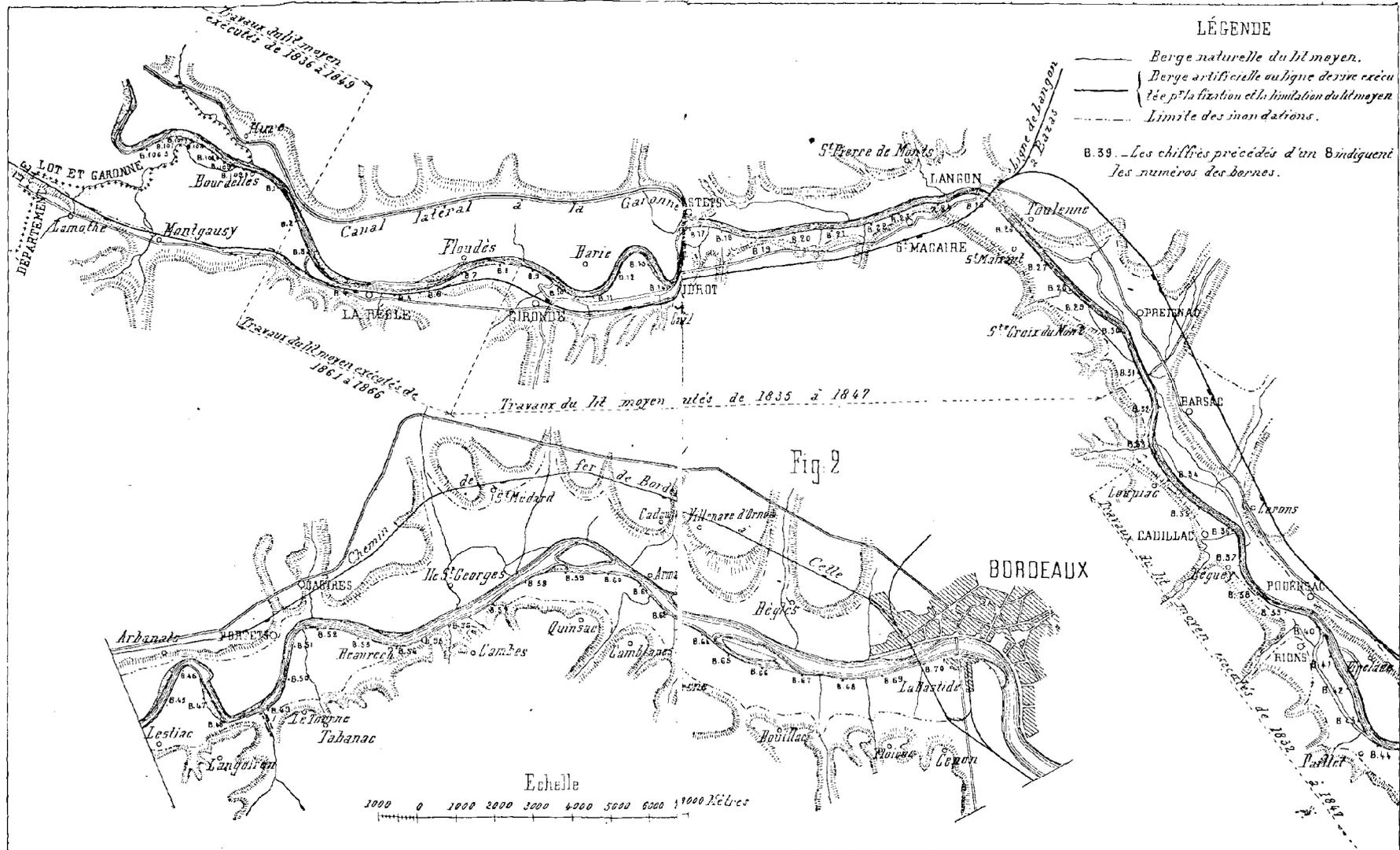
# PLANCHE I

## PLAN D'ENSEMBLE DE LA GARONNE

(Fig. 1 et 2)



PLAN D'ENSEMBLE DE LA GARONNE





ensemble sur une certaine longueur, et, à titre de première approximation, on a admis que le fond avait présenté partout une résistance uniforme aux forces qui ont agi sur lui.

Les affluents que reçoit la Garonne entre Gironde et Barsac ont tous des débits très faibles par rapport au débit du fleuve. Le plus important est le Drot, petite rivière canalisée dont le débit d'étiage peut être considéré comme absolument nul. Les autres affluents sont le canal latéral à la Garonne et un certain nombre de ruisseaux dont les bassins sont peu étendus. On peut admettre comme très sensiblement exact que le débit fluvial est constant entre les limites considérées.

Ce débit a été jaugé à Castets et à Langon.

L'équation de la courbe des débits repérée à l'échelle hydrométrique de Castets est :

$$Q = 85 + 107 \times h + 38 \times h^2.$$

Repérée à l'échelle de Langon, elle est :

$$Q = 87 + 120 \times h + 42 \times h^2.$$

Dans ces formules,  $h$  est la hauteur de l'eau lue à l'échelle hydrométrique du lieu, échelle dont le zéro a été placé au niveau du plus bas étiage connu.

Au moyen de ces formules et des observations de hauteurs faites de 1839 à 1864 inclusivement, c'est-à-dire pendant une période de 26 ans, on a calculé le module ou débit moyen par seconde. On a trouvé :

A Castets, 681 mètres cubes, hauteur hydrométrique correspondante . . .	2 m. 80
A Langon, 687 mètres cubes, hauteur hydrométrique correspondante . . .	2 m. 62

La fréquence des eaux basses, moyennes, de pleins bords et débordées est résumée dans le tableau ci-dessous dont les chiffres sont établis d'après les observations de la même période de 26 années.

État des eaux	Hauteurs à l'échelle du pont de Langon	Durée moyenne (en jours)	
		partielle	par état
Eaux basses . . .	Au-dessous de 1 m. . . .	66,5	66,5
Eaux moyennes . . .	De 1 m. à 2 m. . . . .	107,0	195,0
	De 2 m. à 3 m. . . . .	88,0	
Eaux de pleins bords . . . . .	De 3 m. à 4 m. . . . .	50,0	81,0
	De 4 m. à 5 m. . . . .	31,0	
Débordements ordinaires . . . . .	De 5 m. à 6 m. . . . .	10,0	20,8
	De 6 m. à 7 m. . . . .	7,0	
	De 7 m. à 8 m. . . . .	3,8	
Débordements extraordinaires . . .	Au-dessus de 8 m . . . .	1,7	1,7
	Totaux . . . . .	365,0	365,0

En étiage, les marées de vive-eau se font sentir jusqu'à Castets ; celles de morte-eau s'arrêtent à Langon. En eaux moyennes, les syzygies sont à peine sensibles à Langon et les quadratures à Barsac. Dans les débordements ordinaires, l'action des marées ne remonte pas au delà de Paillet. On n'a pas eu égard à ces diverses circonstances, et il a été admis qu'elles n'ont pas d'influence sensible sur la distribution des profondeurs et la formation du chenal navigable.

## § 2. — RELATION ENTRE LE PLAN ET LE CHENAL

A partir de 1839, les ingénieurs du service de la navigation de la Garonne ont fait relever chaque année la forme du fond du fleuve au moyen de sondages exécutés suivant un certain nombre de profils en travers. Les résultats de ces sondages annuels ont été rapportés au plus bas étiage connu et consignés dans des atlas spéciaux jusqu'en 1870, époque à partir de laquelle ces atlas ont été remplacés par des plans à teintes graduées.

L'examen de ces atlas et de ces plans montre clairement que chaque profil en travers s'est modifié dans sa forme lorsque les lignes de rive du lit moyen ont été changées par des travaux. Quand la configuration du lit est demeurée la même pendant un certain nombre d'années, le profil en travers prend une forme déterminée, stable et permanente. On y constate, il est vrai, des variations, mais elles sont minimes, périodiques et absolument négligeables par rapport aux dimensions du fleuve.

Il suit de là que la répartition des profondeurs dans le sens transversal dépend de la forme du lit moyen. En un mot, le profil en travers est *fonction* du plan.

Or, le thalweg, ou son équivalent pratique le chenal navigable, n'est autre chose que le lieu des points bas des profils en travers.

Il est certain par conséquent que, sur la partie de la Garonne ci-dessus définie, il existe une relation

entre le chenal et le plan. Les passes navigables, telles qu'elles existaient en 1864, étaient la conséquence des formes que les ingénieurs, au cours des 25 années précédentes, avaient données au lit moyen. Si d'autres formes avaient été adoptées, d'autres passes se seraient creusées.

Cela posé, on peut admettre, au moins à titre de première approximation, qu'une forme déterminée du lit a, sur le creusement du chenal, une influence propre, due exclusivement aux propriétés intrinsèques des courbes du tracé des rives et indépendante de la position occupée par ces courbes dans la plaine du fleuve. D'un autre côté, d'après la simplification exposée dans le paragraphe précédent concernant la largeur, on voit que l'étude de la forme du lit moyen a pu, dans le cas particulier qui nous occupe, être ramenée à celle de son *axe*, c'est-à-dire du lieu géométrique des points équidistants des deux rives.

Cette simplification, qui avait été inspirée par la pensée d'embrasser l'ensemble des 22 kilom., n'a rien d'essentiel. On peut s'en dispenser et arriver aux mêmes résultats en considérant la succession des rives concaves, comme on l'a fait quand on a eu à étudier des cours d'eau à largeurs variables.

Quoi qu'il en soit, dans la première étude de la Garonne, le lit a été ramené à une simple ligne courbe (pl. II, fig. 3, 4 et 5) équidistante des rives, dont la nature a été définie par un élément unique, la *courbure*, et, en chaque point de cette ligne courbe, une comparaison a été établie entre la courbure et la profondeur du chenal.

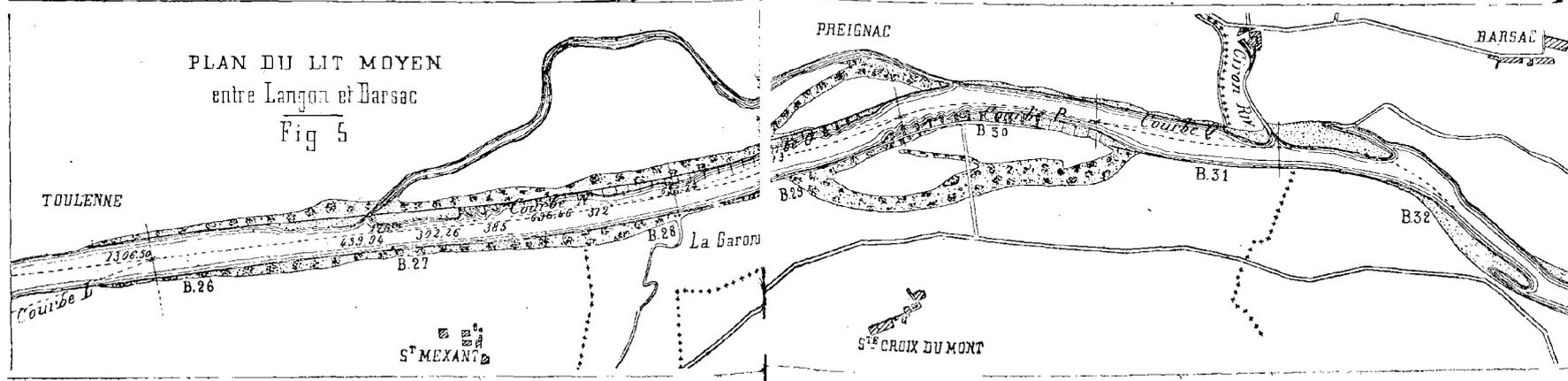
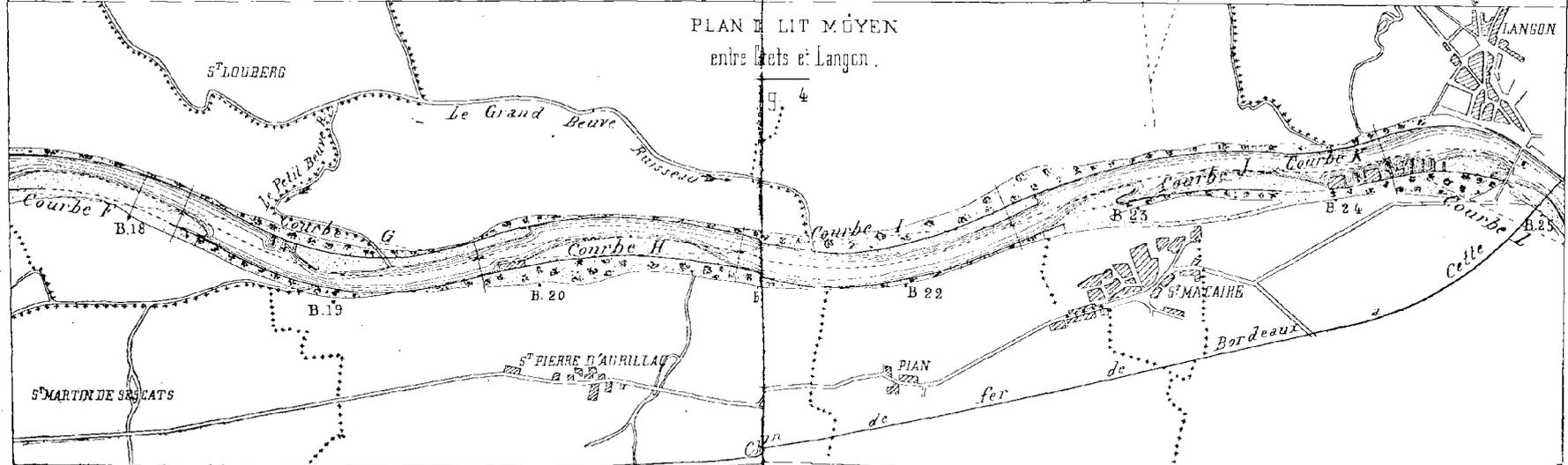
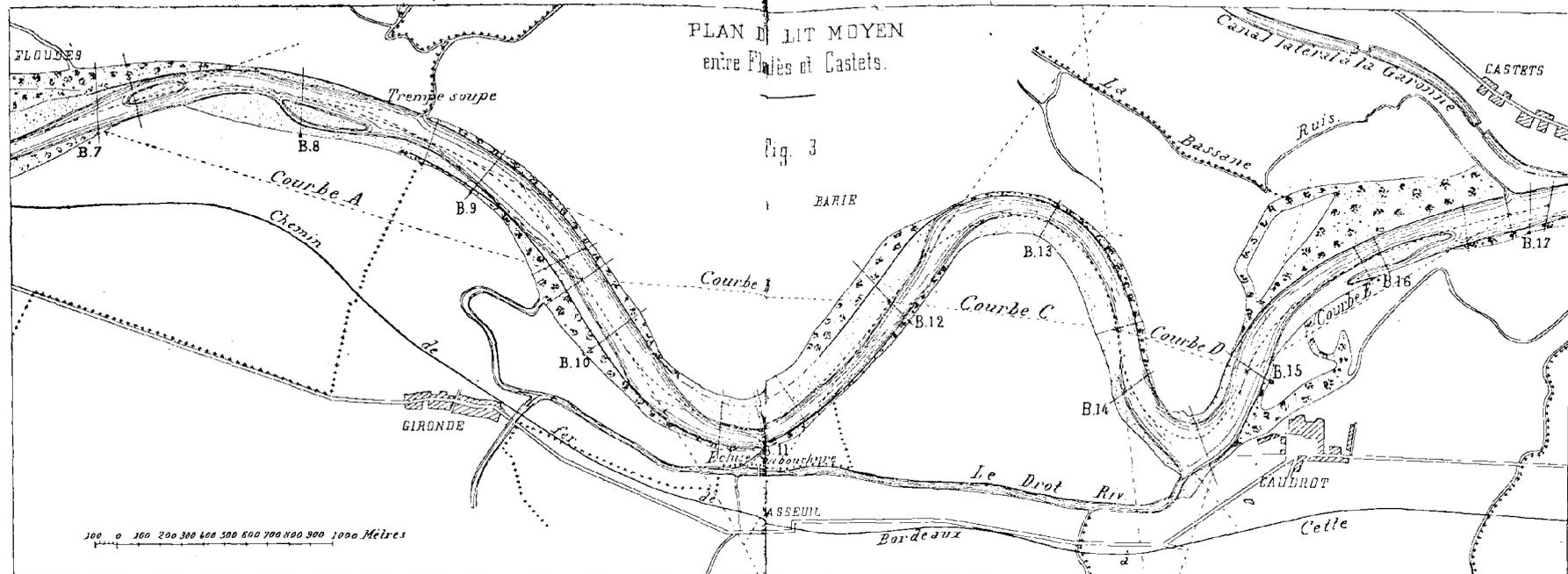
Cette comparaison a été faite au moyen de rappro-

PLANCHE II

PLAN DU LIT MOYEN DE LA GARONNE  
ENTRE FLOUDÈS ET BARSAC

(Fig. 3, 4 et 5)







chements graphiques qui sont représentés *in extenso* sur les figures 1 et 2 de la planche 159 et sur la figure 1 de la planche 158 du mémoire de 1868. Les figures ci-jointes nos 6 et 7 (pl. III) et la figure 8 en sont des reproductions simplifiées et à petite échelle.

Ces rapprochements constituent un diagramme comparatif, c'est-à-dire une sorte de profil en long suivant l'axe de la Garonne et sur lequel ont été portées en ordonnées les courbures de l'axe du lit et les profondeurs d'eau du chenal à l'étiage.

Les courbures ont été calculées au moyen de la décomposition en arcs de paraboles du second degré, méthode exposée dans une note spéciale (pièce annexe VI). Comme elles sont exprimées en fractions décimales généralement très petites, il a été commode de considérer la courbure kilométrique, c'est-à-dire l'inverse du rayon de courbure exprimé en kilomètres.

Il avait tout d'abord paru utile de figurer aux yeux le sens des diverses sinuosités du lit, et, dans l'étude de 1868, on avait à cet effet porté les courbures *au-dessus* ou *au-dessous* de l'axe des abscisses selon que la concavité est sur la rive *droite* ou sur la rive *gauche*. Il aurait fallu, pour être logique, faire de même pour les profondeurs, ce qui eût été bien inusité et par conséquent difficilement intelligible. Cette distinction est sans utilité pratique. A moins de faire intervenir la considération des forces provenant de la rotation de la terre autour de son axe, il est à admettre que le creusement du chenal ne dépend que de la valeur absolue et non du sens ou signe algébrique de la courbure. Dans nos études ultérieures, toutes les courbures ont été portées au-dessous de

l'axe, et le diagramme comparatif y a beaucoup gagné en clarté.

Les points ainsi obtenus forment la courbe des courbures de l'axe du lit de la Garonne. Quand cet axe est rectiligne ou circulaire, la courbe des courbures se confond avec l'axe des abscisses du diagramme, ou lui est parallèle.

La profondeur d'eau a été portée, en chaque profil, sur la même ordonnée que la courbure. Ces profondeurs sont celles du chenal d'après les sondages de 1863 rapportés à l'étiage de 1854. Cet étiage était alors le plus bas connu de la Garonne et il est d'usage dans le service d'y rapporter les sondages faits pendant la saison des eaux basses. On obtient ainsi la profondeur d'eau fictive qui aurait existé sur le point considéré si le débit de l'étiage extrême s'était reproduit avec les mêmes pentes.

Les sondages de 1863 ont été choisis parce qu'ils étaient les plus récents au moment où l'étude dont il s'agit a été commencée. Il a été vérifié qu'ils ne présentent pas de différence essentielle avec ceux des années voisines ; pour quelques-uns la vérification a embrassé une période de plus de quarante ans. Le régime qu'ils représentent peut donc être regardé comme stable et définitif.

Les profondeurs d'eau à considérer sont celles qui sont pratiquement utiles à la navigation. Ce sont généralement celles des points les plus bas de chaque profil. Toutefois il se trouve certains passages où le thalweg proprement dit présente une inflexion brusque qui en rend la direction impraticable aux bateaux. Il arrive aussi qu'un entre-profil présente un haut-fond qu'on ne reconnaît que par un sondage

## PLANCHE III

### DIAGRAMME COMPARATIF

(Fig. 6 et 7)



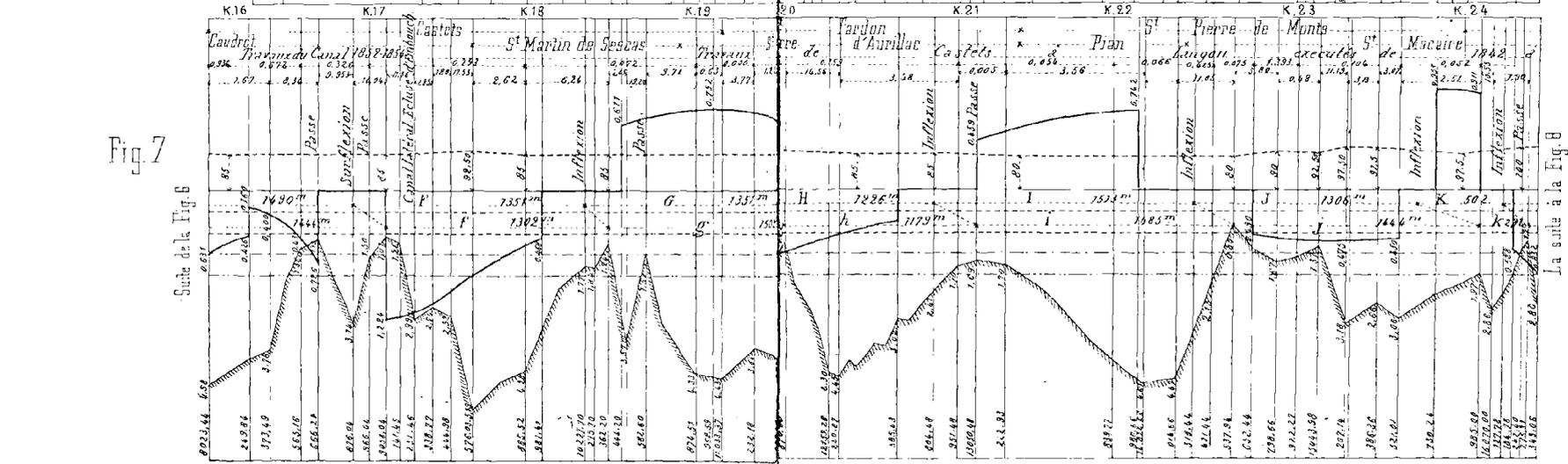
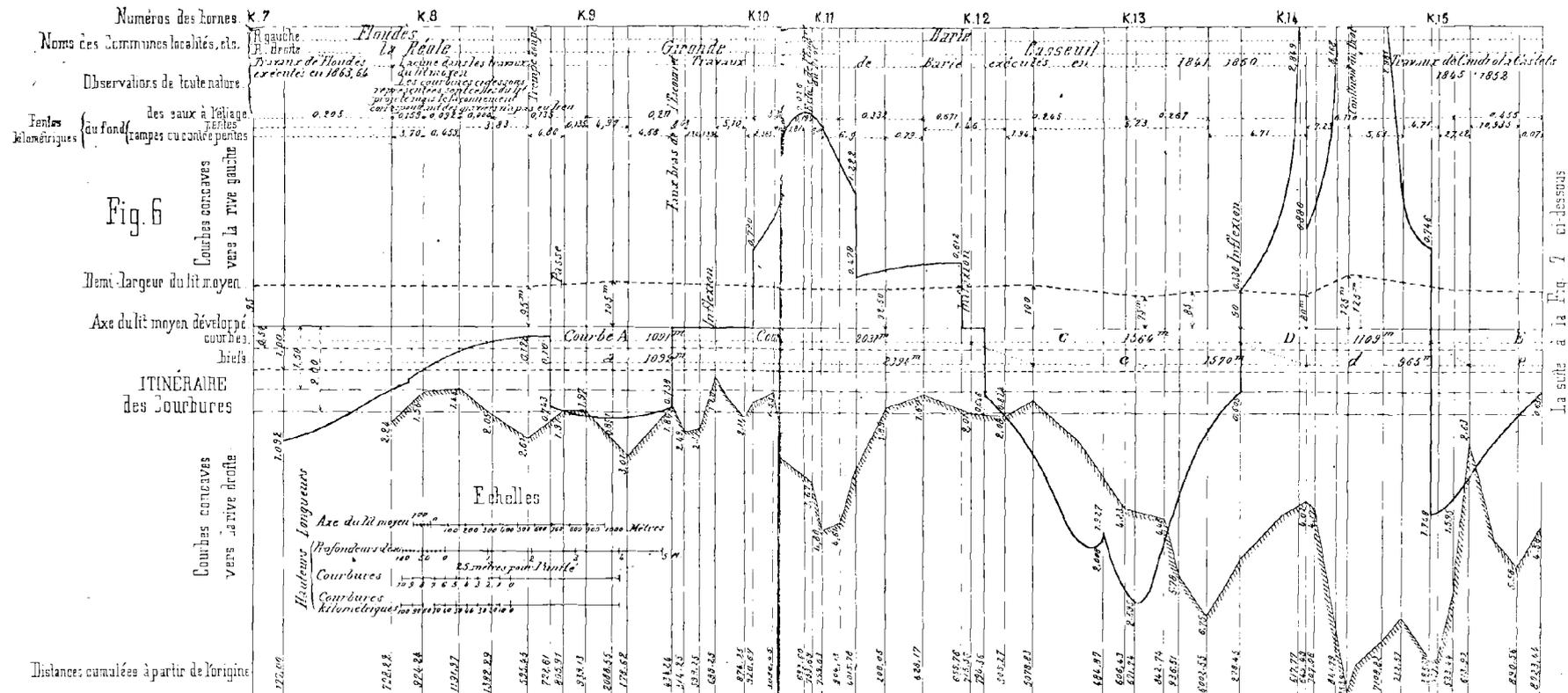


Fig. 6 et 7. Same comparatif.



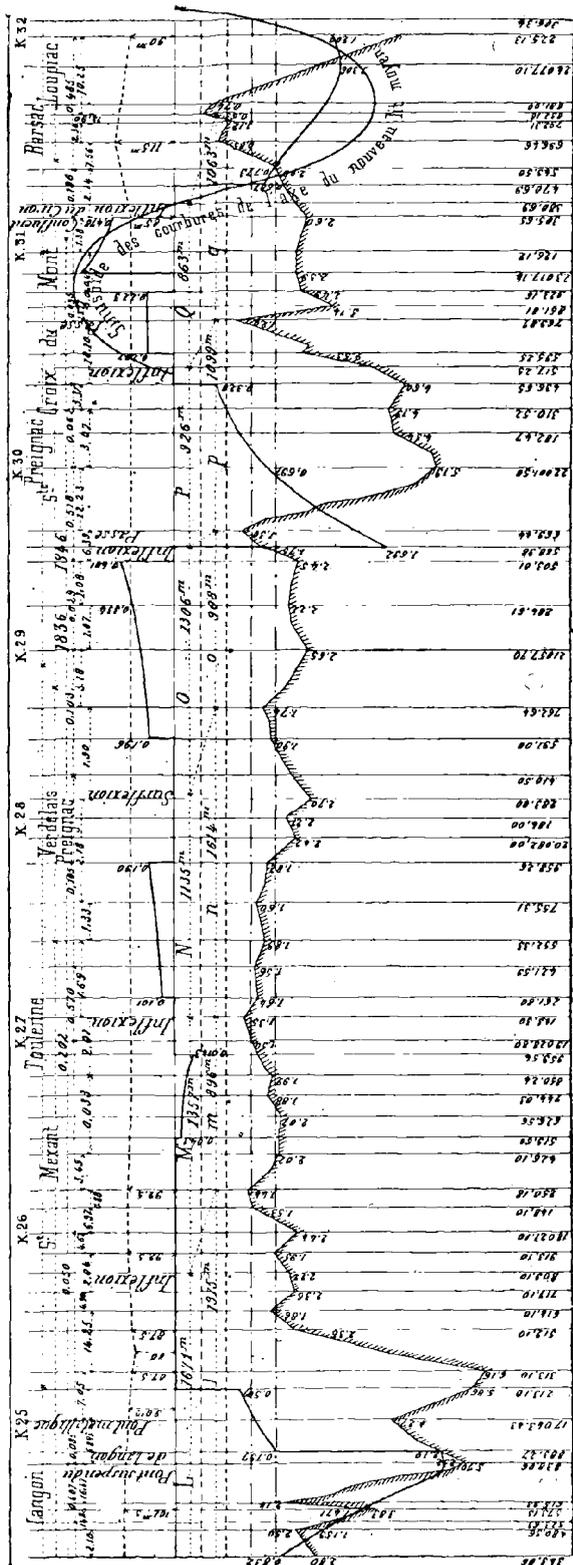


Fig. 8 (suite des fig. 6 et 7, planche III). — Diagramme comparatif.

longitudinal direct. Pour ces points exceptionnels, c'est le fond de la passe ou chenal d'étiage, c'est-à-dire la trajectoire des bateaux en eaux basses, qui figure sur le profil en long.

Le dessin ainsi constitué a formé un *itinéraire* du cours de la Garonne où sont synoptiquement rapprochées les quantités à comparer : les courbures de l'axe du lit et les profondeurs d'eau du chenal d'étiage,

---

## § 3. — COURBES ET BIEFS

*Courbes.* — En prenant le milieu, ou à peu près, des principaux alignements droits, on a décomposé l'axe de la rivière en segments qui, dans le tracé, correspondent à certaines portions auxquelles, pour la facilité du langage, il a été donné le nom spécial de *courbes* (1).

Les *courbes* sont séparées les unes des autres par des points notables. Quand les courbures sont alternes, c'est-à-dire quand la concavité change de rive, ce sont, suivant l'expression usitée en géométrie, des points d'*inflexion*. On peut leur donner le nom de points de *surflexion* dans le cas contraire, c'est-à-dire quand la concavité reste sur la même rive. Les vingt-deux kilomètres de rivière étudiés présentent 17 *courbes*, 14 points d'inflexion et 3 points de surflexion.

Les points où la courbure atteint son maximum sont les *sommets*.

Les 17 *courbes* sont désignées sur le plan (fig. 3, 4, 5) et sur l'itinéraire (fig. 6, 7, 8) par les lettres majuscules A, B, C..., P, Q. La moyenne générale de leur longueur est de 1330 mètres.

Quatre d'entre elles présentent des particularités :

A et Q. — Les *courbes* extrêmes, à l'origine et à la

(1) Le mot de *courbe* est écrit en *italiques* toutes les fois qu'il est pris dans ce sens spécial.

fin de la partie considérée, s'étendent davantage, l'une à l'amont et l'autre à l'aval, mais vers des parties où le lit moyen n'était pas fixé en 1863.

B. — Longueur : 2.031 mètres ; c'est la plus longue.

K. — Longueur : 502 mètres ; c'est la plus courte.

*Biefs.* — Au premier coup d'œil, la profondeur semble varier d'une manière tout à fait irrégulière. Toutefois, en y regardant avec attention, on voit que ses variations sont de deux sortes : les unes ne règnent que sur une longueur restreinte de rivière et sont comme locales et accidentelles ; les autres embrassent une longueur notable et dessinent le profil général du chenal. En faisant abstraction des premières et n'ayant égard qu'aux secondes, on peut dire que la profondeur d'eau suit une loi générale de périodicité : elle croît à partir d'un *minimum* qui se trouve en un point qui est le *maigre* ; elle atteint un maximum en un autre point qui est la *mouille* ; elle décroît ensuite jusqu'à un second maigre, pour croître de nouveau jusqu'à une autre mouille, et ainsi de suite.

En prenant pour points de division les principaux maigres, on partage la rivière en 17 portions qu'on peut appeler *biefs*.

Les biefs, désignés sur l'itinéraire par les lettres minuscules *a, b, c, ..., p, q*, correspondent respectivement aux *courbes* A, B, C..., P, Q.

Cette correspondance présente trois circonstances que l'œil saisit de suite avec facilité :

1° Le maigre correspond au point d'inflexion ou de surflexion ;

2° La mouille correspond au sommet ;

3° La mouille est d'autant plus profonde que la courbure du sommet est plus prononcée.

Ces trois relations sont connues depuis longtemps : ce sont en quelque sorte des propositions élémentaires de l'hydraulique fluviale. Mais un examen plus attentif de notre diagramme permet de les préciser et d'en déduire d'importants corollaires.

---

## § 4. — LOIS EMPIRIQUES

Il est à noter d'abord que la surflexion est, comme l'inflexion, caractérisée par un maigre. D'où il faut conclure que la cause du maigre n'est pas l'inversion du sens de la courbure, mais bien l'existence d'un minimum dans la série des valeurs que prend cette quantité. Le minimum de la courbure et le minimum de la profondeur sont deux faits corrélatifs.

**Ecart du maigre.** — Il faut remarquer ensuite que, sur l'itinéraire, l'extrémité de la *courbe* ne se trouve pas sur la même ordonnée que l'extrémité du bief. La corrélation graphique est oblique au lieu d'être orthogonale. Les maigres sont comme reportés ou *écartés* à une certaine distance en aval des extrémités des *courbes*.

Cette distance est variable; elle est en moyenne de 253 mètres, c'est-à-dire le cinquième environ de la longueur moyenne de la *courbe*. Mais ce *coefficient d'écart* de 0,20 est une moyenne brute dans laquelle sont confondus dix-sept tracés qui ne sont pas tous également recommandables. Pour les bons tracés, c'est-à-dire pour ceux auxquels correspondent des maigres profonds, le coefficient d'écart est de 0,25. C'est ce qui résulte de la discussion suivante.

Les faits sont résumés dans le tableau ci-après :

Designation des courbes	Profondeur d'eau à l'étiage sur		Longueur des courbes	Écart du maigre d'aval	Rapport de l'écart à la longueur ou coefficient d'écart	Courbure kilomé- trique moyenne
	le maigre d'aval	les hauts- fonds intermé- diaires				
	mètres		mètres	mètres		
A	1,20		1 091	0	0,000	0,554
B	1,60		2 031	363	0,178	0,977
C	1,02		1 564	428	0,273	1,484
D	2,63		1 109	260	0,234	2,381
E	1,27		1 490	182	0,122	0,686
F	1,24		1 351	134	0,100	0,602
G	1,22		1 351	261	0,193	0,553
H	1,69		1 226	246	0,200	0,377
I	0,86		1 513	219	0,143	0,395
J	1,97	1,37	1 306	361	0,276	0,308
K	1,22		502	138	0,273	0,480
L	1,44		1 671	441	0,264	0,573
M	1,35		1 337	0	0,000	0,023
N	1,74	1,56 1,60	1 135	479	0,422	0,084
O	1,30		1 306	80	0,061	0,196
P	1,20		926	253	0,273	0,729
Q	0,68		863	453	0,525	0,281
Moyennes	1,57		1 281	253	0,208	0,620

Rayon moyen : 1600 m.

Pour opérer une sélection parmi ces dix-sept courbes, il faut tout d'abord éliminer les extrêmes A et Q qui sont en contact avec des portions du lit non encore fixées en 1863, où les maigres sont très saillants (1,20 et 0,68) et où le coefficient d'écart a des valeurs extrêmes (zéro et 0,525). La courbe M est à éliminer aussi, car, avec sa courbure très faible et son coefficient d'écart nul, c'est presque un alignement droit.

Pour les quatorze autres courbes, les moyennes sont :

Profondeur sur le maigre. . . . . 1 m. 67  
 Longueur des courbes . . . . . 1320 m. »

Coefficient d'écart . . . .	0,215
Courbure moyenne . . . .	0,702

Sur les sept *courbes* dont le coefficient d'écart est moindre que la moyenne 0,215, six correspondent à des maigres plus saillants que la moyenne (1,67), savoir : B, E, F, G, I et O.

La septième est la *courbe* H qui, comme profondeur de maigre (1,69), et comme coefficient d'écart (0,20), représente sensiblement la moyenne.

Aucune de ces *courbes* ne constitue le modèle à imiter.

Parmi celles dont le coefficient d'écart est supérieur à 0,215, il faut éliminer les suivantes :

J. (0,276). Indépendamment de son maigre normal, elle présente un haut-fond intermédiaire ou *anormal* de 1 m. 37 seulement.

K. (0,275). Trop courte, 502 mètres seulement, avec un maigre de 1 m. 22.

L. (0,264). Son maigre (1 m. 44) se trouve dans un alignement droit de 1300 mètres de longueur.

N. (0,422). Courbure presque nulle. Bief encombré de deux hauts-fonds intermédiaires (1 m. 56 et 1 m. 60).

P. (0,273). Trop courte : 926 mètres. Maigre 1 m. 20.

Il ne reste en résumé que les deux *courbes* C et D qui peuvent fournir des indications sur les caractères d'un bon tracé. Or, leurs caractères distinctifs, indépendamment de la distribution des courbures et des largeurs, sont :

Profondeur moyenne du maigre . . . .	3 m. 33
Longueur moyenne de la <i>courbe</i> . . . .	1336 m. »

Ecart moyen du maigre . . . . .	344 m. »
Coefficient moyen d'écart. . . . .	0,25

En résumé, la valeur normale du coefficient de l'écart est 0,25.

En d'autres termes, dans un bon tracé, le maigre est situé en aval de l'inflexion, à une distance égale au quart de la longueur de la *courbe*.

Ce résultat a été confirmé par d'autres faits, comme on le verra plus loin.

**Ecart de la mouille.** — A chaque sommet correspond une mouille qui est très généralement le point le plus profond du bief, mais où, dans tous les cas, la profondeur est maximum par rapport aux points voisins. La courbure et la profondeur sont en corrélation dans leurs maxima, comme dans leurs minima ; c'est ce que l'on constate dans la grande majorité des faits.

La coïncidence graphique des sommets et des mouilles présente la même particularité que celle des inflexions et des maigres. Elle est oblique sur l'itinéraire et la mouille, comme le maigre, présente un *écart*. La moyenne générale en est de 308 mètres, ce qui donne, pour le coefficient d'écart, le chiffre de 0,23. Ce coefficient est de 0,27 pour la *courbe C*, qui, comme on l'a vu ci-dessus, a donné le maigre le plus profond et que, par conséquent, on peut regarder comme représentant le meilleur tracé.

La loi de l'écart de la mouille joue un rôle important dans le phénomène de la divagation du lit des rivières à berges affouillables. La remarque en a été faite pour la première fois par M. l'ingénieur Clavel, qui a publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées*

(avril 1895) une note intitulée : « La déformation du « lit des rivières à fond mobile et la loi de l'écart ». Après avoir cité un exemple de divagation de la Garonne, « exemple remarquable par la netteté des « documents sur lesquels il est établi et par la rapidité du phénomène qu'il accuse », M. Clavel ajoute que la plaine submersible de la Garonne, surtout dans les parties où elle est large, porte des traces évidentes de déplacements du lit. « Les vestiges « encore visibles d'anciens faux-bras, les noms des « lieux, les traditions locales tendent à prouver qu'à « des époques plus ou moins reculées, la rivière a « successivement occupé toutes les parties du fond « de la vallée ».

Si la mouille, c'est-à-dire le point où se trouve le maximum du creusement du lit et par conséquent de l'affouillement et de l'érosion de la berge, coïncidait avec le sommet de la rive concave, et si la plus grande saillie de la grève se trouvait au sommet convexe, les érosions rapides marcheraient transversalement à la direction générale de la vallée, et le lit ne se déplacerait pas longitudinalement, ou du moins le déplacement serait extrêmement lent. « Les « sommets des courbes avanceraient normalement à « travers la plaine et les méandres s'allongeraient « jusqu'à atteindre le pied des cotaux qui limitent la « vallée et où s'arrêterait le mouvement ».

Or, telle n'est pas la marche du phénomène. Les sinuosités descendent rapidement le long de la plaine ; la rive concave s'avance vers l'aval de 10 m. 15 et même, dans certaines circonstances, de 20 mètres par an, et la rive convexe la suit, tandis que, dans le sens transversal, il n'y a qu'une oscilla-

tion relativement négligeable. La mouille, siège du maximum de l'érosion, est en aval du sommet; elle n'est donc pas arrêtée par le pied du coteau; elle progresse, entraînant avec elle l'ondulation du lit qui ne s'arrête qu'au défilé d'aval, c'est-à-dire à la partie étroite de la plaine submersible.

**Loi de la mouille.** — La mouille est d'autant plus profonde que la courbure au sommet est plus prononcée.

Cette loi ressort avec évidence du rapprochement graphique des faits. Sur la figure 9, la courbure kilométrique de chaque sommet a été portée en abscisse, et la profondeur de la mouille a été portée en ordonnée. Les lettres majuscules désignent respectivement les points ainsi obtenus. Ces points n'affectent pas une succession parfaitement régulière. Toutefois, la courbe qui est tracée sur le dessin les relie d'une manière suffisamment approchée.

Quatre points font exception et se trouvent *au-dessous* de la courbe; ils concernent les quatre *courbes* qui ont été tout d'abord signalées, et qui sont extrêmes, deux par leur situation (A et Q) et deux par leur développement (B et K).

En faisant abstraction de ces quatre points, on voit que la profondeur de la mouille croît ou décroît en même temps que la courbure du sommet. Cette loi est exprimée, dans le cas particulier qui nous occupe, par l'équation :

$$C = 0,03H^3 - 0,23H^2 + 0,78H - 0,76$$

dont les coefficients ont été calculés par la méthode des moindres carrés et dans laquelle H représente

en mètres la profondeur de la mouille (sous l'étiage) et  $C$  la courbure kilométrique au sommet.

Il est à noter que cette relation cesse d'être exacte quand la longueur de la *courbe* diffère notablement

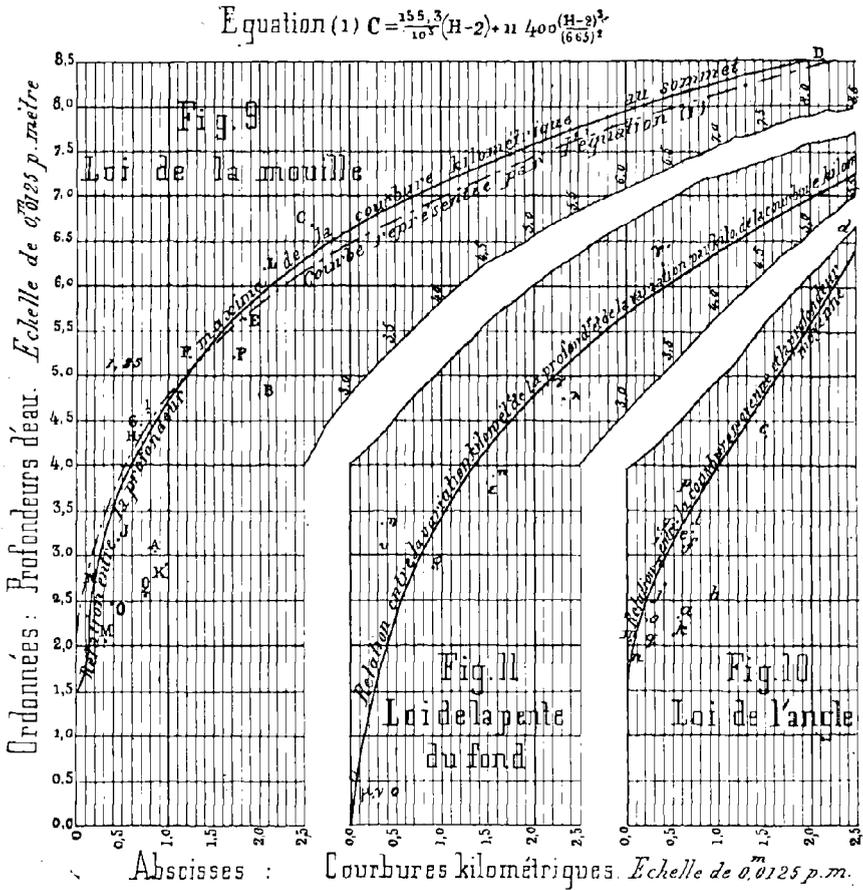


Fig. 9, 10 et 11.

de la longueur moyenne. Les mouilles des *courbes* B et K prouvent que la profondeur maximum est moindre, toutes choses égales d'ailleurs, quand la lon-

gueur est très grande, comme 2000 mètres, ou très faible, comme 500 mètres.

**Loi de l'angle.** — La profondeur moyenne du bief croît et décroît en même temps que la courbure moyenne de la *courbe* correspondante.

La somme ou intégrale des profondeurs d'eau d'un bief est représentée, sur l'itinéraire, par l'aire comprise entre la ligne d'étiage et la courbe des profondeurs. Cette somme, divisée par la longueur  $l$  du bief est la profondeur moyenne  $h_1$  :

$$h_1 = \frac{1}{l} \int_0^l h ds.$$

De même, la somme ou intégrale des courbures d'une *courbe* est représentée sur l'itinéraire par l'aire comprise entre l'axe des abscisses et la courbe des courbures. Cette somme, divisée par la longueur  $l$  de la courbe, est la courbure moyenne  $c_1$  :

$$c_1 = \frac{1}{l} \int_0^l c ds.$$

Les profondeurs moyennes et les courbures moyennes sont consignées dans le tableau numérique (Pièce annexe II). Elles sont représentées graphiquement sur la figure 10. Les lettres minuscules désignent les points ; une courbe les relie approximativement. L'équation en est :

$$h_1 = 1,50(1 + \sqrt{c_1^2 + 1,71 c_1})$$

L'intégrale  $\int_0^l c ds$  est l'angle  $a$  que font entre elles les deux tangentes aux extrémités de la courbe du tracé. Cet angle est exprimé en unités de longueur, c'est-à-dire par la longueur de l'arc intercepté entre

ses côtés dans le cercle dont le rayon est l'unité. De plus, il est extérieur par rapport à l'angle dans lequel est placée la courbe et dont il est le supplément.

Par conséquent, la relation qui nous occupe peut se traduire ainsi en langage ordinaire : « à longueur « égale, la profondeur d'eau moyenne d'un bief est « d'autant plus grande que les deux tangentes « extrêmes de la *courbe* forment un angle extérieur « plus ouvert ».

Les quatre points déjà signalés  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $q$  sont les plus éloignés de la courbe de la figure 10 et ils sont au-dessous de cette courbe.

**Loi du développement.** — De là cette conséquence importante : avec une grande longueur de *courbe*, telle que 2000 mètres, ou avec une longueur faible, telle que 500 mètres, on obtient, pour la mouille, une profondeur maximum, et pour le bief une profondeur moyenne, qui sont l'une et l'autre moindres qu'avec une longueur moyenne telle que 1330 mètres.

Il y a donc tout avantage à ce que la longueur de la *courbe* diffère le moins possible de la moyenne.

Une observation analogue a été faite sur d'autres parties de la Garonne et sur d'autres cours d'eau. Il y a donc là un élément constant, et par conséquent une *loi*. On peut lui donner le nom de *loi du développement*.

**Loi de la pente du fond.** — En y regardant avec attention, on distingue, sur l'itinéraire, des *courbes* dans lesquelles la variation de la courbure a lieu d'une manière graduelle et successive sur une cer-

taîne étendue, 700 à 800 mètres par exemple. Telles sont les *courbes* B, C, E, F, H, I, L, P. On peut y joindre l'ensemble des trois *courbes* M, N, O.

D'autres présentent une courbure presque constante, comme G et J.

D'autres enfin ont des courbures qui varient brusquement dans un espace relativement restreint, comme D et K.

Je laisse de côté les *courbes* extrêmes A et Q qui sont au contact de portions non fixées du lit moyen.

Considérées au point de vue de la variation de la courbure, nos *courbes* se classent donc en trois groupes : celui de la continuité, celui de la constance, et celui de la discontinuité.

Pour les deux derniers groupes, on n'aperçoit pas d'autre loi que celle-ci : la profondeur diminue brusquement à tous les changements brusques de la courbure.

Mais, en ce qui concerne le premier groupe, on aperçoit tout d'abord que la ligne qui figure le fond du thalweg présente une régularité analogue à celle de la courbe des courbures. La profondeur comme la courbure varie d'une manière successive et continue. Si l'on considère les accroissements de la profondeur et ceux de la courbure (1), on reconnaît que ces deux quantités sont en relation.

Désignons par  $q$  la variation par kilomètre de la courbure kilométrique, et par  $p$  la variation kilométrique de la profondeur, nous aurons :

$$q = 10^6 \cdot \frac{\Delta c}{\Delta s} \quad \text{et} \quad p = 10^3 \cdot \frac{\Delta h}{\Delta s}.$$

(1) Pièce annexe II. Tableau n° 2.

Le tableau n° 2 contient dix valeurs de  $p$  correspondant à dix valeurs de  $q$  ; cinq sont positives et cinq sont négatives.

L'accroissement de la courbure, ou, si l'on peut s'exprimer ainsi, l'*incurvation* de la *courbe*, correspond à un abaissement du fond ; la diminution de la courbure, ou aplatissement de la *courbe*, correspond à un relèvement.

Bien que ce ne soit qu'approximativement exact, il est à admettre que la loi est la même pour les deux cas, et que, pour une même variation absolue de la courbure, il y a une même variation de la profondeur, soit dans un sens, soit dans l'autre, suivant que la courbure croît ou décroît.

D'après cela, on a porté en abscisses, abstraction faite du signe, les dix valeurs de la quantité  $q$  et, en ordonnées correspondantes, les dix valeurs de la quantité  $p$ . On a obtenu ainsi des points qui sont désignés sur la figure 11 (p. 28) par des lettres grecques.

Ces points n'affectent pas une succession parfaitement régulière. Toutefois la courbe qui est tracée sur l'épure les relie d'une manière suffisamment approchée. Cette courbe est celle de l'équation :

$$q = 0,1553 \times p + 0,0114 \times p^3,$$

équation dont les coefficients ont été calculés par la méthode des moindres carrés appliquée aux chiffres qui font l'objet du tableau numérique n° 2.

On a admis *a priori* que le second membre de cette équation ne devait pas contenir de puissances paires de  $p$ , par la raison que la fonction  $q$  change de signe en même temps que la variable  $p$ .

Cette équation peut s'écrire :

$$10^3 \frac{\Delta c}{\Delta s} = 155 \times \frac{\Delta h}{\Delta s} + 11 \left( \frac{\Delta h}{\Delta s} \right)^2$$

ou, à la limite :

$$10^3 \times \frac{dc}{ds} = 155 \frac{dh}{ds} + 11 \left( \frac{dh}{ds} \right)^2.$$

En langage ordinaire, elle se formule ainsi : « La « pente du fond du chenal navigable est déterminée « par l'inclinaison de la tangente à la courbe des « courbures ».

*C'est la loi de la pente du fond.*

**Résumé.** — L'observation des faits, dans le cas particulier de la Garonne fluviale, dans le département de la Gironde, établit en résumé qu'il existe une relation entre la configuration du lit moyen et la profondeur du chenal navigable. Cette relation s'exprime par les six lois empiriques suivantes :

1° Le maigre et la mouille sont respectivement reportés en aval du point d'inflexion et du sommet. Loi de l'écart ;

2° La mouille est d'autant plus profonde que la courbure au sommet est plus prononcée. Loi de la mouille ;

3° Dans l'intérêt de la profondeur, tant maximum que moyenne, la *courbe* ne doit être ni trop courte ni trop développée. Loi du développement ;

4° A longueur égale, la profondeur moyenne d'un bief est d'autant plus grande que les deux tangentes extrêmes de la *courbe* forment un angle extérieur plus ouvert. Loi de l'angle ;

5° Le profil en long du chenal ne présente de régularité qu'autant que la courbure varie d'une manière graduelle. Tout changement brusque de courbure occasionne une diminution brusque de la profondeur. Loi de la continuité ;

6° Si la courbure varie d'une manière continue, l'inclinaison de la tangente à la courbe des courbures détermine la pente du fond du chenal. Loi de la pente du fond.

Des observations analogues ont été faites sur plusieurs autres rivières navigables, et il est fort probable que les lois ci-dessus formulées sont générales.

Les coefficients numériques des trois équations qui, sur la Garonne, expriment les lois de la *mouille*, de l'*angle* et de la *pente du fond*, ont sans doute paru ne présenter qu'un intérêt secondaire, car il n'a pas été fait, que nous sachions, de calculs analogues pour d'autres rivières. Il y a lieu de le regretter, car les coefficients de la Garonne ont été utilisés pour la vérification d'une théorie mathématique de l'écoulement de l'eau que M. Poisson, ingénieur des ponts et chaussées, a exposée dans un remarquable mémoire inséré dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (premier trimestre 1882). Cette vérification n'a malheureusement pas été concluante : il n'y a en effet qu'une concordance insuffisante entre les chiffres fournis par l'observation et ceux auxquels a conduit la théorie. Si le savant auteur du mémoire dont il s'agit avait eu à sa disposition des formules empiriques résumant des faits observés sur d'autres rivières, il aurait pu pousser plus loin ses très

intéressantes recherches, au grand profit de la science.

Quoi qu'il en soit, les réciproques des trois lois de la *mouille*, de l'*angle* et de la *pente du fond* sont évidemment vraies, et l'on aperçoit facilement que ces relations peuvent servir pour faire connaître le profil du chenal quand on connaît le tracé du lit moyen ou, réciproquement, le tracé quand on connaît le profil du chenal.

Au moyen de ces lois, les ingénieurs de la Garonne purent aborder la question du tracé rationnel, c'est-à-dire du tracé dont les sinuosités sont en concordance logique avec celles du profil en long du chenal. Ils en déduisirent certaines règles qui, sans déterminer entièrement le problème, fournirent d'utiles indications et furent appliquées avec succès.

---

### § 3. — LA PETITE RIVIÈRE ARTIFICIELLE DE BORDEAUX

Ces études et les discussions auxquelles elles donnèrent lieu ne furent pas interrompues en 1875, lorsque l'auteur dut quitter le service de la Garonne pour être chargé de celui du département des Hautes-Alpes. Elles furent au contraire poursuivies avec une nouvelle activité.

A cette époque, en effet, à l'occasion d'une enquête sur les mesures à prendre pour maintenir et améliorer les accès et les mouillages du port de Bordeaux, une sous-commission locale fut chargée de donner son avis sur la réalité des lois formulées dans le paragraphe précédent et sur la valeur des règles qui en avaient été déduites.

Tout en ne se dissimulant pas les critiques qui peuvent être adressées à des conclusions trop hâtivement tirées d'expériences mécaniques faites en petit, cette sous-commission a pensé que les phénomènes qu'elle pourrait constater dans une rivière artificielle présenteraient, dans leur ensemble, une grande analogie avec les phénomènes naturels. Elle a en conséquence fait construire un cours d'eau artificiel. On y a observé la manière dont un fond de sable est façonné par l'eau courante, et on a consigné sur des plans cotés et teintés les résultats de ces observations.

Limitant son travail à la question qui lui était posée, la sous-commission s'est bornée à examiner

ces plans dans leur ensemble et à rendre compte de cet examen dans un rapport (1) qui se termine ainsi :

«... Les conclusions de M. Fargue sont confirmées  
« par nos expériences, en ce qu'elles ont de plus  
« important. »

Ces expériences étaient une nouveauté. Organisées avec beaucoup de soin par M. l'ingénieur en chef de Laroche-Tolay et conduites avec zèle et intelligence par tous les agents qui en avaient été chargés, elles méritaient certainement mieux que cette brève appréciation. L'auteur a eu plus tard l'occasion de revoir le rapport de la sous-commission et d'examiner de près les carnets des observateurs ainsi que les plans des sondages. Une discussion plus serrée des faits et la rectification de quelques erreurs ont conduit à des résultats intéressants qui ont fait l'objet de deux notes publiées dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (2) et qui sont résumées ci-après.

**Expériences.** — Les expériences ont eu lieu sur une dérivation du ruisseau appelé Estey de Bègles qui se jette dans la Garonne immédiatement en amont de Bordeaux.

La prise d'eau (fig. 12, pl. IV), était placée en amont du barrage de Gattebourse. Elle consistait en une buse cylindrique de 0 m. 40 de diamètre (fig. 13), dont l'orifice d'amont était muni d'un grillage métallique destiné à arrêter les débris végétaux entraînés par le ruisseau. Il était en outre muni d'une vanne

(1) Voir pièce annexe III.

(2) Mars 1894 et 3<sup>e</sup> volume 1907.

en tôle manœuvrée au moyen d'une tige à vis.

A sa sortie de la buse, l'eau arrivait dans un bassin de 2 mètres de largeur et de 8 mètres de longueur où elle perdait sa vitesse d'introduction. Elle entraient ensuite, par une section rectangulaire de 1 mètre de largeur, à seuil maçonné, dans la rivière en expérience. Elle en sortait par une section disposée comme celle d'amont et arrivait ensuite dans un second bassin où s'arrêtait le sable qui avait pu être entraîné. Elle était enfin ramenée au ruisseau par un canal de fuite dont le débouché était placé à 75 mètres environ en aval du barrage.

La petite rivière avait des berges fixes et verticales formées par une sorte de bordage en planches clouées sur des pieux.

Le fond en était formé par du sable de la Garonne de grosseur moyenne, disposé suivant une couche d'une épaisseur de 0 m. 30 environ, et dont la surface était, avant chaque expérience, dressée suivant un plan sensiblement horizontal.

Sous l'action du courant, le sable prenait un certain relief que l'on relevait, au moyen d'opérations de nivellement convenablement disposées, suivant un grand nombre de profils en travers. Les résultats de ces nivellements étaient ensuite consignés sur des plans cotés et teintés analogues aux plans de sondages.

La règle relative au développement des sinuosités, règle d'après laquelle la distance entre deux points d'inflexion consécutifs ne doit être ni trop grande ni trop petite, ayant sans doute paru évidente, on s'est borné à expérimenter deux tracés ayant l'un et l'autre des courbes de longueur moyenne.

PLANCHE IV

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX  
PLAN D'ENSEMBLE ET DÉTAILS DE LA PRISE D'EAU

(Fig. 12 et 13)



Fig 12 Plan d'ensemble

Légende

Le tracé plein représente la rivière artificielle dans laquelle ont eu lieu les neuf expériences de la série A (1 Juin et Juillet 1875). Les rives sont uniformément distantes de 1<sup>m</sup>00 et sont formées d'arcs de cercle et de lignes droites.

Le tracé pointillé représente la rivière artificielle dans laquelle ont eu lieu les trois expériences de la série B (du 25 Juin 1875 au 3 Février 1876, course d'essai) et les trois expériences de la série C (de Février à Mai 1876, longue durée).

Fig 13 Détails de la prise d'eau

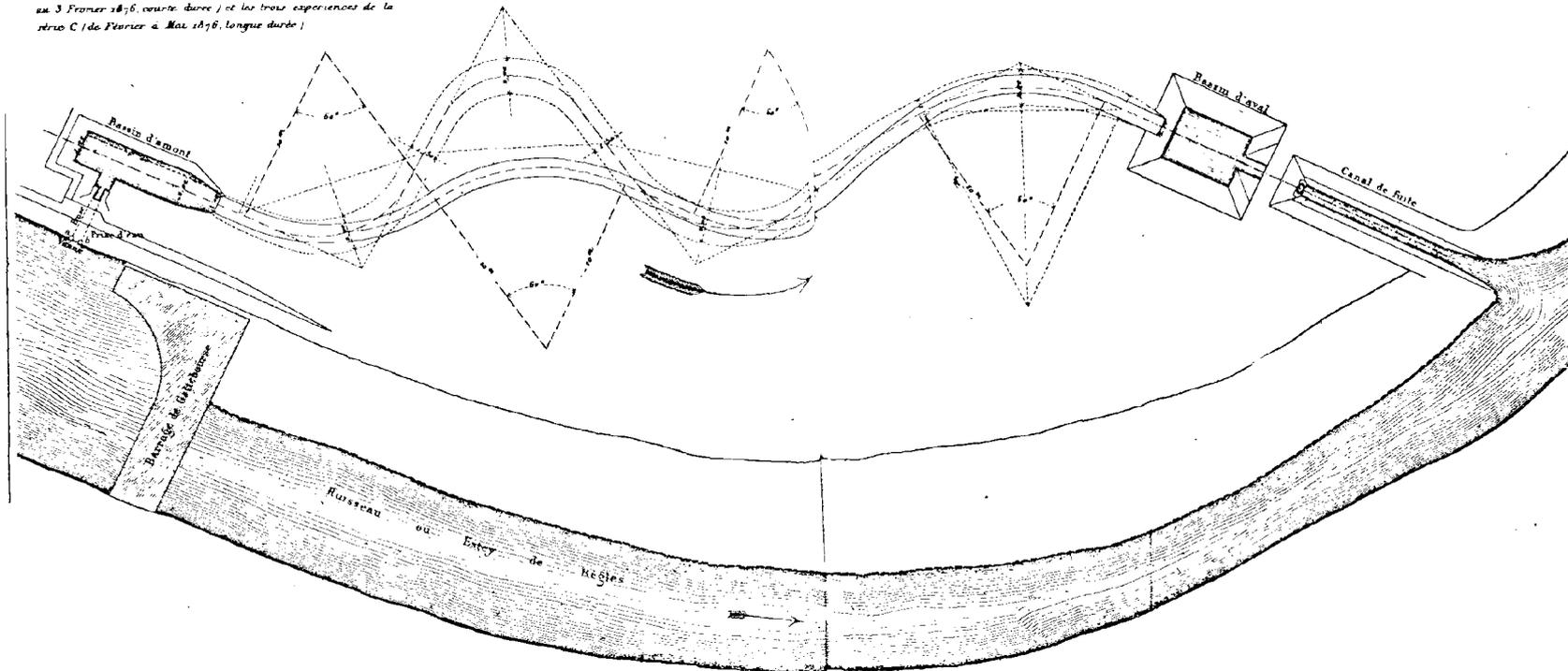
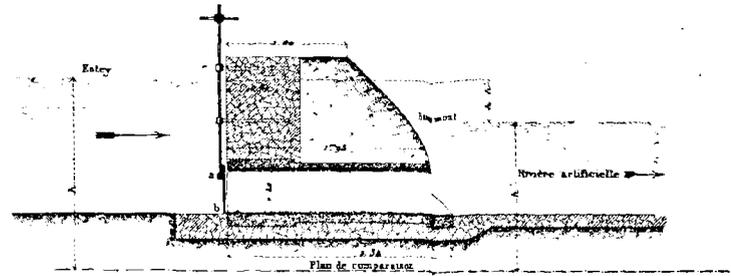


Fig. 12 et 13. — Petite rivière de Bordeaux, d'ensemble et détails de la prise d'eau.



On a fait varier la durée des expériences dans de larges limites, depuis 45 minutes jusqu'à 160 heures.

Les expériences ont été continuées pendant une année entière et sont au nombre total de 21.

Elles peuvent être rangées en trois séries distinctes.

*Série A.* — Les neuf premières ont eu lieu pendant les mois de mai, juin et juillet 1875, avec une durée de 6 heures au plus, dans une rivière d'une longueur de 59 m. 50 et d'une largeur uniforme de 1 mètre. L'axe en était formé (fig. 12) de quatre arcs de cercle de 10 mètres de rayon, à courbure alternée et ayant un angle au centre de 60°. Les deux premiers arcs se raccordaient entre eux directement sans interposition de ligne droite. Entre le second et le troisième, et, entre le troisième et le quatrième, il était ménagé un alignement droit ayant respectivement 4 mètres et 8 mètres de longueur.

*Série B.* — Du 25 août 1875 au 3 février 1876, il a été fait neuf autres expériences dont la durée n'a été également que de quelques heures, mais qui ont eu lieu dans une autre rivière (fig. 12), de 64 m. 80 de longueur, présentant des largeurs et des courbures variables. Vers l'amont, les courbures et les largeurs étaient aménagées suivant les règles du tracé rationnel. Vers l'aval, on avait disposé, à titre de contre-épreuve, une partie rectiligne suivie d'une partie sensiblement circulaire.

*Série C.* — Enfin, pendant les mois de février, mars, avril et mai 1876, il a été fait, dans la seconde rivière, trois expériences dont chacune a été prolongée pendant près d'un mois et a eu une durée effective de 160 heures environ.

Les cotes de sondages ou de nivellement de la série A ont été rapportées à un plan de comparaison horizontal passant par le seuil du bassin d'amont. Pour les séries B et C, on a adopté un plan de comparaison passant par le seuil d'amont et par le seuil d'aval.

Ce dernier seuil était en contre-bas de celui d'amont, savoir :

De 0 m. 075 pour les expériences I et II de la série A ;

De 0 m. 025 pour les autres expériences de cette même série ;

Et de 0 m. 054 pour celles des séries B et C.

Par conséquent, les plans de sondages des séries B et C sont exactement comparables entre eux, et, sans erreur sensible, comparables aussi dans leur ensemble à ceux de la série A, abstraction faite des deux premiers. Il a été d'ailleurs tenu compte de la différence dont il s'agit dans la comparaison détaillée des profils en long et en travers dont il sera parlé ci-après.

Bien que les circonstances fussent très favorables, il n'a pas été fait de jaugeage direct, et on ne peut que le regretter, car l'occasion était bonne pour recueillir des chiffres très intéressants. Quoi qu'il en soit, nous n'avons pu évaluer le débit de la rivière artificielle qu'à la prise d'eau, au moyen de la formule :

$$Q = k\omega \sqrt{2g(h - h')}.$$

En raison des dispositions de l'appareil (voir Claudel, Formules, aide-mémoire, etc. 8<sup>e</sup> édition, t. I, p. 149),

on a attribué la valeur 0,80 au coefficient  $k$  quand la vanne est entièrement levée, c'est-à-dire quand l'orifice est entièrement ouvert.

Pour les levées partielles de 0 m. 35, 0 m. 30, 0 m. 25 et 0 m. 20, on a admis, sur les indications de M. Bazin, inspecteur général des ponts et chaussées, les valeurs respectives de 0,75, 0,70, 0,65 et 0,60 pour le coefficient de la dépense,

Le débit a été calculé au moyen de la formule ci-dessus. Toutes réductions faites, et en appelant  $v$  la vitesse due à la chute ou différence de niveau entre le ruisseau et le bassin d'amont, cette formule devient, savoir :

Pour une levée de	0 m. 20	$Q = 0,038 \times v$
—	0 m. 25	$0,054 \times v$
—	0 m. 30	$0,071 \times v$
—	0 m. 35	$0,087 \times v$
—	0 m. 40	$0,100 \times v$

Les chiffres de débits ainsi obtenus, s'ils ne sont pas l'expression exacte de la réalité, sont du moins bien comparables entre eux.

**Premier tracé.** — *Série A.* — Les deux premières expériences de la série A (30 et 31 mai 1875) n'ont été, à proprement parler, que des essais préparatoires. Leurs résultats, représentés sur deux plans cotés (planche V), n'offrent que peu d'intérêt. Ils ne méritent pas une grande confiance à cause de l'inexpérience des observateurs. Ils ne sont pas susceptibles d'être comparés, du moins dans le détail, avec les résultats des expériences subséquentes, parce qu'on a changé certaines dispositions essentielles, notam-

ment la position des profils en travers. Enfin, le seuil du bassin d'aval a été, comme il vient d'être dit, relevé de 0 m. 05 à partir de l'expérience n° III.

Dans les expériences III et IV (8 et 21 juin), la vanne de prise d'eau a été levée de 0 m. 28 seulement. La durée a été de 3h.20' pour l'une et de 5h.20 pour l'autre. Ces deux expériences sont donc comparables entre elles, mais seulement d'une manière très générale, car, d'une part, les profils en travers n'y ont pas été levés aux mêmes points, et d'autre part, en l'absence de toute constatation concernant la charge à l'orifice de prise d'eau, il est impossible d'évaluer le débit avec lequel on a opéré. On sait seulement que la vitesse de superficie, déduite de l'observation de flotteurs, a été, dans l'expérience n° III, de 0 m. 90, 0 m. 90, 0 m. 81 et 0 m. 74, soit en moyenne 0 m. 84 par seconde ; et, dans l'expérience n° IV, de 0 m. 81, 0 m. 76, 0 m. 81 et 0 m. 82, soit en moyenne 0 m. 80 par seconde. A la vue des deux plans, on voit que les plus grandes profondeurs sont bien le long de la rive concave et les plus petites le long de la rive convexe. On voit aussi que dans l'expérience n° IV, qui a été la plus longue, ces effets sont un peu plus accentués que dans l'expérience n° III. Mais c'est tout ce que l'on peut dire.

L'expérience V, faite le 26 juin devant la commission d'enquête, a duré 45 minutes seulement. La vanne était levée entièrement, c'est-à-dire de 0 m 40, mais on n'a pas noté la charge sur l'orifice de prise d'eau. Le carnet d'observations porte seulement la mention suivante au crayon : « vitesse à la surface : 0 m. 90 par seconde ».

Enfin, les expériences n<sup>os</sup> VI, VII, VIII et IX ont

# PLANCHE V

## PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX

*Plans de sondages de la série A*

(Fig. 14, 15 16 et 17)



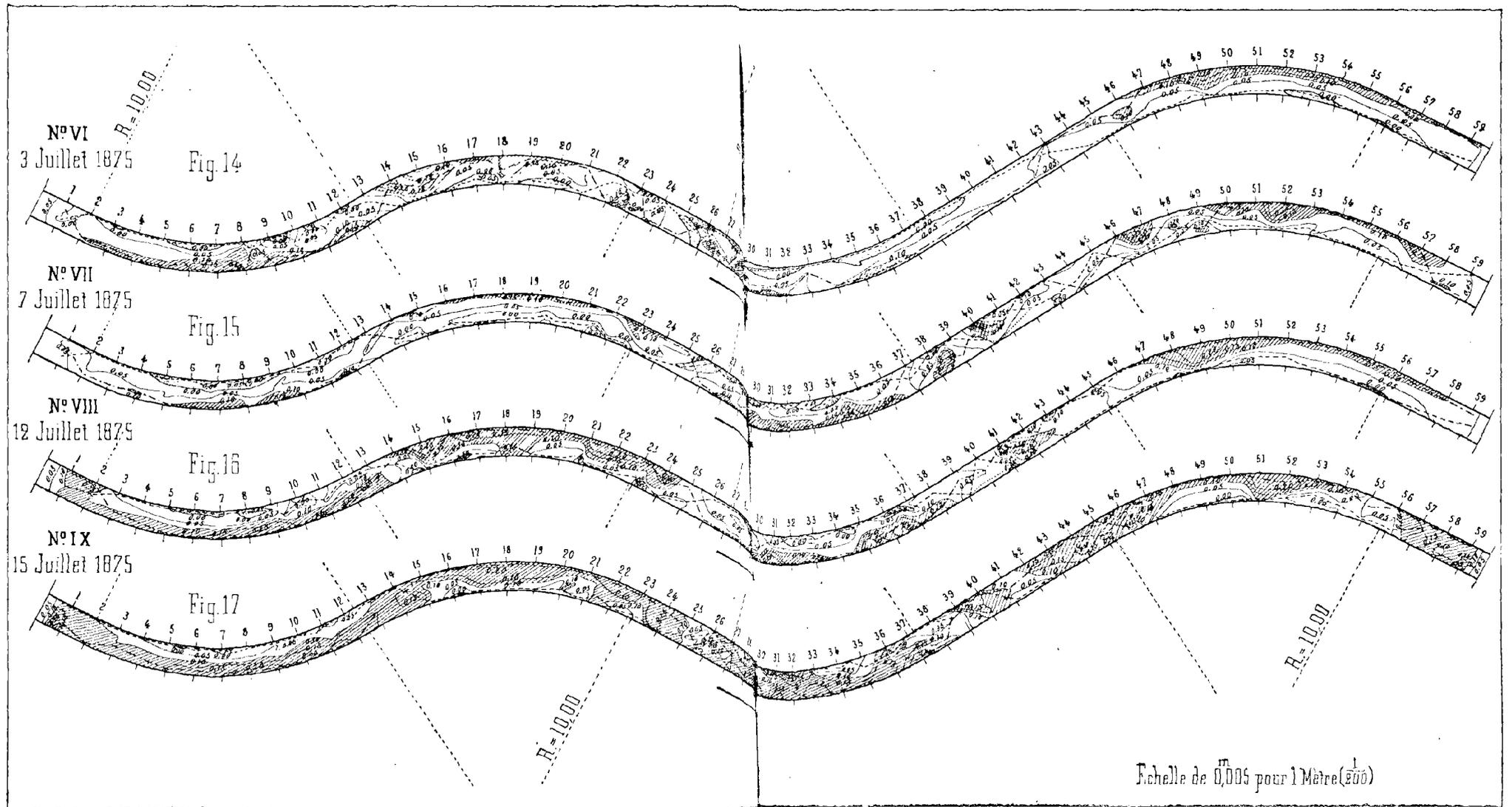


Fig. 14, 15, 16 et 17. — Petite rivière de Reaux. — Plans de sondages de la série A.



duré régulièrement six heures chacune avec une levée complète de la vanne.

Dans l'expérience n° VI (3 juillet), on a noté les vitesses de superficie mesurées au flotteur, savoir : 1 m. 07, 1 m. 09, 1 m. 09, 1 m., 0 m. 98, 0 m. 93 et 0 m. 94, en moyenne 1 m. 01 par seconde.

Dans les expériences suivantes, on a noté la charge sur l'orifice ainsi que les vitesses de superficie.

L'expérience n° VII (7 juillet) a eu un débit décroissant de 190 à 150 litres par seconde ; débit moyen : 180 litres. La vitesse moyenne de superficie a été de 0 m. 75 par seconde.

L'expérience n° VIII (12 juillet) a eu un débit à peu près constant de 222 litres avec une vitesse moyenne au flotteur de 0 m. 90 par seconde.

Les opérations de sondage et de nivellement ont eu lieu le lendemain. Ensuite, contrairement à ce qui avait été pratiqué jusque-là, on n'a pas régaloé le sable du fond. Le relief que l'on venait de constater a été conservé, et l'expérience n° IX (15 juillet) a été la continuation, après un arrêt de deux jours, de l'expérience n° VIII. Les observations correspondantes donnent un débit sensiblement constant de 203 litres par seconde et une vitesse au flotteur de 0 m. 75.

En résumé, dans la série A, on ne trouve que quatre expériences qui soient susceptibles d'une étude détaillée. Les circonstances principales en sont résumées ci-dessous :

Numéros des expériences	Dates	Durée	Levée de la vanne	Vitesse à la surface en mètres par seconde			Débits en litres par seconde			Observations
				Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	
				h.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	litres	
VI.	3 juillet 1875	6	0,40	1,10	0,93	1,04	»	»	»	(1)
VII.	7 juillet 1875.	6	0,40	0,81	0,71	0,75	190	150	180	
VIII.	12 juillet 1875.	6	0,40	0,96	0,84	0,90	247	198	222	
IX.	15 juillet 1875.	6	0,40	0,77	0,73	0,75	208	198	203	(2)

(1) Les renseignements manquent en ce qui concerne les débits.  
(2) Le courant, dans cette expérience, a agi sur le fond de sable tel qu'il était à la fin de l'expérience n° VIII.

Examinons d'abord l'expérience VII qui a donné le plus petit débit et la plus faible vitesse.

Considéré sur le plan (pl. V, fig. 15) le lieu des plus grandes profondeurs, c'est-à-dire le thalweg ou chenal, suit les courbes concaves et présente une grande régularité jusqu'au profil 35, voisin de l'origine de l'alignement droit de 8 mètres de longueur. De là au profil 50, il a une forme très tourmentée. Il redevient ensuite régulier jusqu'à l'extrémité d'aval.

Le lieu des profondeurs minima que, pour abrégier le langage, nous appellerons la *ligne de faite*, suit les rives convexes, mais elle ne les épouse pas partout exactement et en est souvent à une assez grande distance.

Jusqu'au profil 35, cette ligne coupe le chenal en aval des points où la courbure change de sens, et une seule fois à chaque changement.

Entre les profils 36 et 50, elle est aussi tourmentée que le chenal lui-même qu'elle coupe jusqu'à neuf fois. Sur ces neuf intersections, il en est quatre (pro-

figs 40, 41, 48 et 49) qui correspondent à des saillies relativement peu importantes et qui disparaîtraient moyennant une tolérance de 4 centimètres au plus dans les cotes des profondeurs maxima ou minima. Cette tolérance est admissible à la rigueur et trouverait sa justification dans la considération des erreurs possibles d'observation et des accidents locaux dus soit à un défaut d'homogénéité du sable, soit à une discontinuité accidentelle dans le bordage en charpente formant la rive, soit à toute autre cause secondaire.

Il reste dans tous les cas au moins cinq intersections. Chacune d'elles correspondant à un haut-fond et à une traversée d'une rive à l'autre, on voit que, dans les alignements droits, le chenal n'a ni la profondeur ni la stabilité qu'il possède dans les courbes.

Afin de faciliter les comparaisons, on a eu recours au diagramme synoptique employé pour l'étude de la Garonne. L'axe de la rivière a été supposé développé suivant une horizontale. Les profils en travers y ont été représentés par des lignes d'ordonnées équidistantes de 1 mètre. Sur ces ordonnées (voir la pl. VI), on a porté, d'une part (fig. 18), la profondeur maximum, et, d'autre part (fig. 19), la profondeur minimum de chaque profil. Les deux lignes ainsi obtenues sont très accidentées. Leurs brusques montées et descentes ne présentent aucune relation bien déterminée avec les courbures concaves ou convexes. Le tracé étant formé d'arcs de cercle et d'alignements droits, avec une largeur uniforme, les courbures, tant de l'axe que des rives, sont successivement constantes et nulles. Le diagramme de ces

courbures se réduit par conséquent à une ligne polygonale formée de lignes droites parallèles à l'axe des abscisses et de portions de cet axe lui-même.

L'expérience n° VIII (pl. V, fig. 16), dans laquelle la vitesse a été de 0 m. 90 et le débit de 246 litres par seconde, a donné des résultats analogues. Le chenal et la ligne de faite se coupent cinq fois dans l'alignement droit; moyennant une tolérance de 3 centimètres et demi, le nombre de ces intersections se réduirait à trois.

Dans l'expérience VI (pl. V, fig. 14), où la vitesse a atteint 1 m. 01, le chenal et la ligne de faite suivent respectivement les concavités et les convexités, mais moins régulièrement que dans les expériences précédentes. Au contraire, la régularité est plus grande dans le grand alignement droit où il n'y a qu'une seule intersection.

En profil, les deux lieux présentent un aspect très tourmenté. La vitesse ayant été plus forte, il semble que le chenal aurait dû être plus profond. Cela a lieu en effet dans la première *courbe*, mais non dans le surplus du cours de la rivière, et on n'aperçoit aucune loi dans l'allure du profil du chenal VI, ni dans les différences qu'il présente avec celui des autres expériences.

L'expérience IX (pl. V, fig. 17), dont la durée a été en réalité de douze heures au lieu de six, et qui a été la continuation de l'expérience VIII, ne présente aucune particularité dans ses résultats. En plan, le chenal et la ligne de faite ne sont pas plus réguliers que dans l'expérience VIII proprement dite. Ils se coupent cinq fois dans l'alignement droit, mais ce

nombre se réduit à trois moyennant une tolérance de 3 centimètres au plus.

Les profils en travers levés, dans les quatre expériences, sur un même point ont été rapportés synoptiquement (fig. 20, pl. VII). Bien qu'on ait fait abstraction des profils intercalaires levés sur les saillies et dépressions exceptionnelles, les résultats obtenus dans une même partie de la rivière sont généralement dissemblables et les quatre lignes d'un même profil forment une sorte d'écheveau très lâche. Les régions où les brins de cet écheveau sont rapprochés les uns des autres sont situées entre les profils 3 et 7, aux abords immédiats des profils 20, 38 et 50, et enfin, le profil 57 excepté, vers l'extrémité d'aval de la rivière, à partir du profil 53. Elles comprennent une longueur totale de 14 mètres. Partout ailleurs, c'est-à-dire sur plus de 45 mètres de longueur, à chaque expérience correspond un relief spécial du fond de sable.

Aucune loi ne s'apercevant d'ailleurs dans la distribution des profils à écheveau serré, on est amené à penser que le relief du fond a dû être déterminé par des causes variables, autres par conséquent que la forme des rives, et au nombre desquelles on peut compter la rugosité des parois, l'imparfaite homogénéité du sable, les variations de la vitesse et du débit, l'action du vent, le trouble des eaux, etc.

Le profil en long (pl. VI, fig. 18) accuse de même une distribution très irrégulière des profondeurs maxima. Les quatre lignes qui représentent les quatre thalwegs se ressemblent assez bien jusqu'au

profil n° 7; elles sont peu éloignées aux profils 19, 20 et 50. Partout ailleurs elles montent et descendent sans ordre et s'enchevêtrent dans un pêle-mêle où l'œil ne saisit aucune loi, ni pour une ligne en particulier, ni pour leur ensemble.

Il en est exactement de même des lignes représentant les profondeurs minima (pl. VI, fig. 19).

En résumé, les seuls résultats généraux qui se dégagent des expériences de la série A sont les suivants :

Quand le débit est faible, le chenal suit la rive concave; dans les alignements droits, il oscille d'une rive à l'autre. Le sable se dépose le long des convexités.

Quand le débit est grand, le chenal suit encore la rive concave et est plus stable dans les alignements droits, mais le sable se dépose moins régulièrement le long de la rive convexe.

Pour le surplus, même en faisant une large part aux erreurs possibles d'observation, on ne démêle rien de régulier dans la succession des trous isolés qui constituent le chenal, rien, pas même l'influence régulatrice qu'on aurait pu *a priori* attribuer à la durée double qu'a eue l'expérience n° IX.

**Deuxième tracé.** — Avant d'aborder une discussion analogue pour les expériences des séries B et C, il convient de donner quelques explications au sujet du tracé des rives de la deuxième rivière dans laquelle ont eu lieu ces expériences.

Ce tracé était composé de deux parties.

La partie d'amont comprenait trois *courbes*, dont

PLANCHE VI

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX

*(Séries A et B)*

DIAGRAMMES DES COURBURES ET DES PROFONDEURS  
MAXIMA ET MINIMA

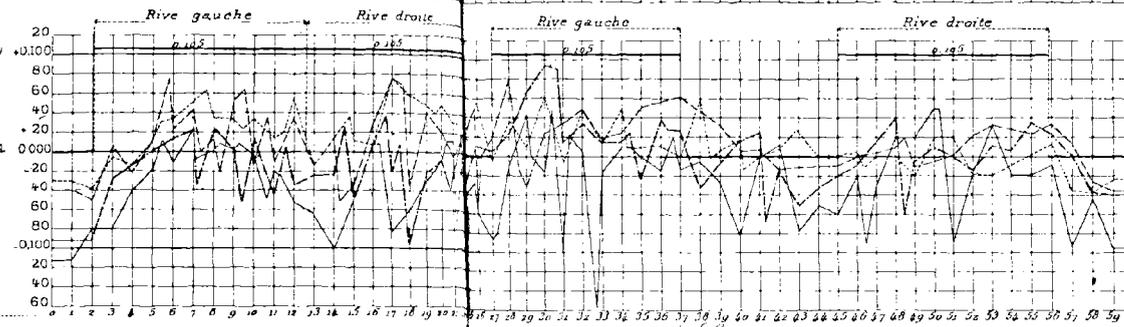
(Fig. 18, 19, 26 et 27)



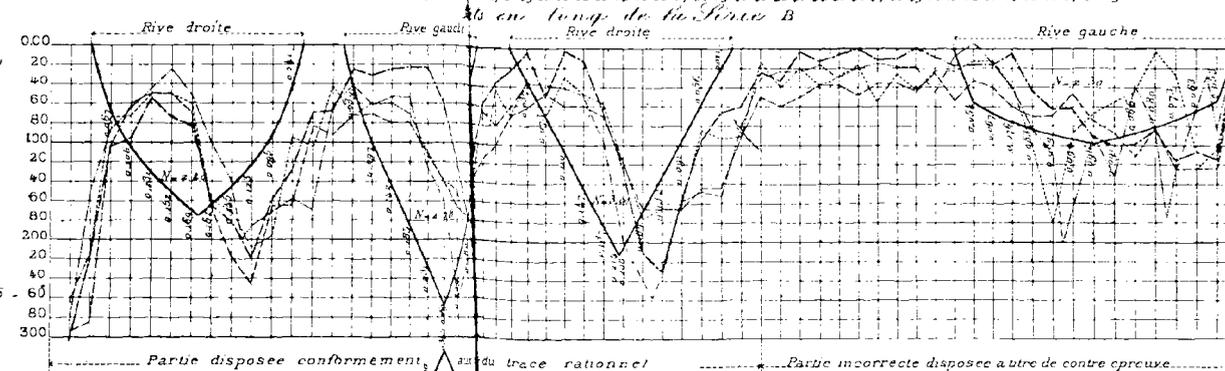
**Fig 18**  
 Courbures concaves (trait gras)  
 Courbe des profondeurs maxima  
 ————  
 - - - - - Expérience VI. 3 Juillet 1875  
 ..... Expérience VII. 7 Juillet 1875  
 - - - - - Expérience VIII. 12 Juillet 1875  
 ———— Expérience IX. 15 Juillet 1875



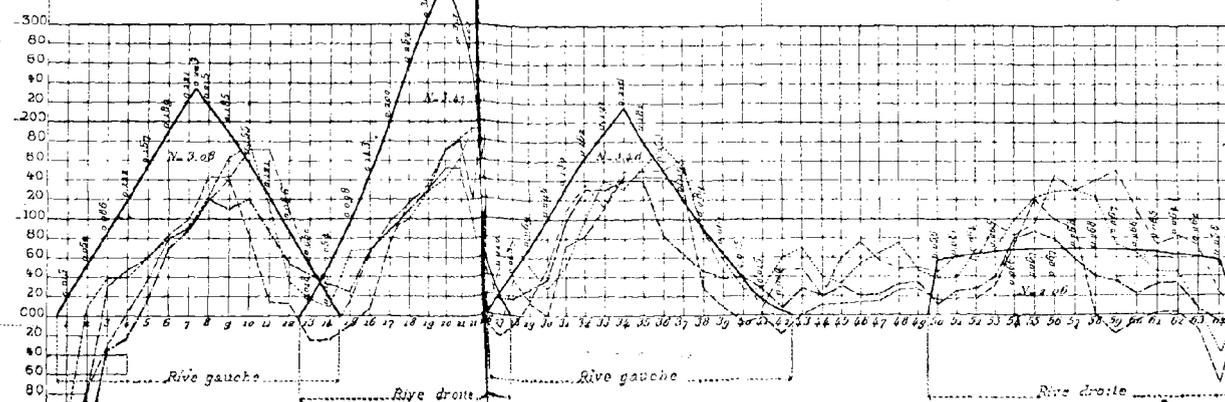
**Fig 19**  
 Courbures convexes (trait gras)  
 Courbe des profondeurs minima  
 ————  
 - - - - - Expérience VI. 3 Juillet 1875  
 ..... Expérience VII. 7 Juillet 1875  
 - - - - - Expérience VIII. 12 Juillet 1875  
 ———— Expérience IX. 15 Juillet 1875  
 Numéros des Profils



**Fig 23**  
 Courbures concaves (trait gras)  
 Chenal  
 ou  
 Lieu des profondeurs maxima  
 ————  
 - - - - - Expérience I. 25 Août 1875  
 ..... Expérience II. 31 Août 1875  
 - - - - - Expérience V. 27 Décembre 1875  
 ———— Expérience VIII. 31 Janvier 1876



**Fig 17**  
 Courbures convexes (trait gras)  
 Ligne de faite  
 ou  
 Lieu des profondeurs minima  
 ————  
 - - - - - Expérience I. 25 Août 1875  
 ..... Expérience II. 31 Août 1875  
 - - - - - Expérience V. 27 Décembre 1875  
 ———— Expérience VIII. 31 Janvier 1876  
 Numéros des Profils





## PLANCHE VII

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX. PROFILS EN TRAVERS

*(Série A)*

(Fig. 20)



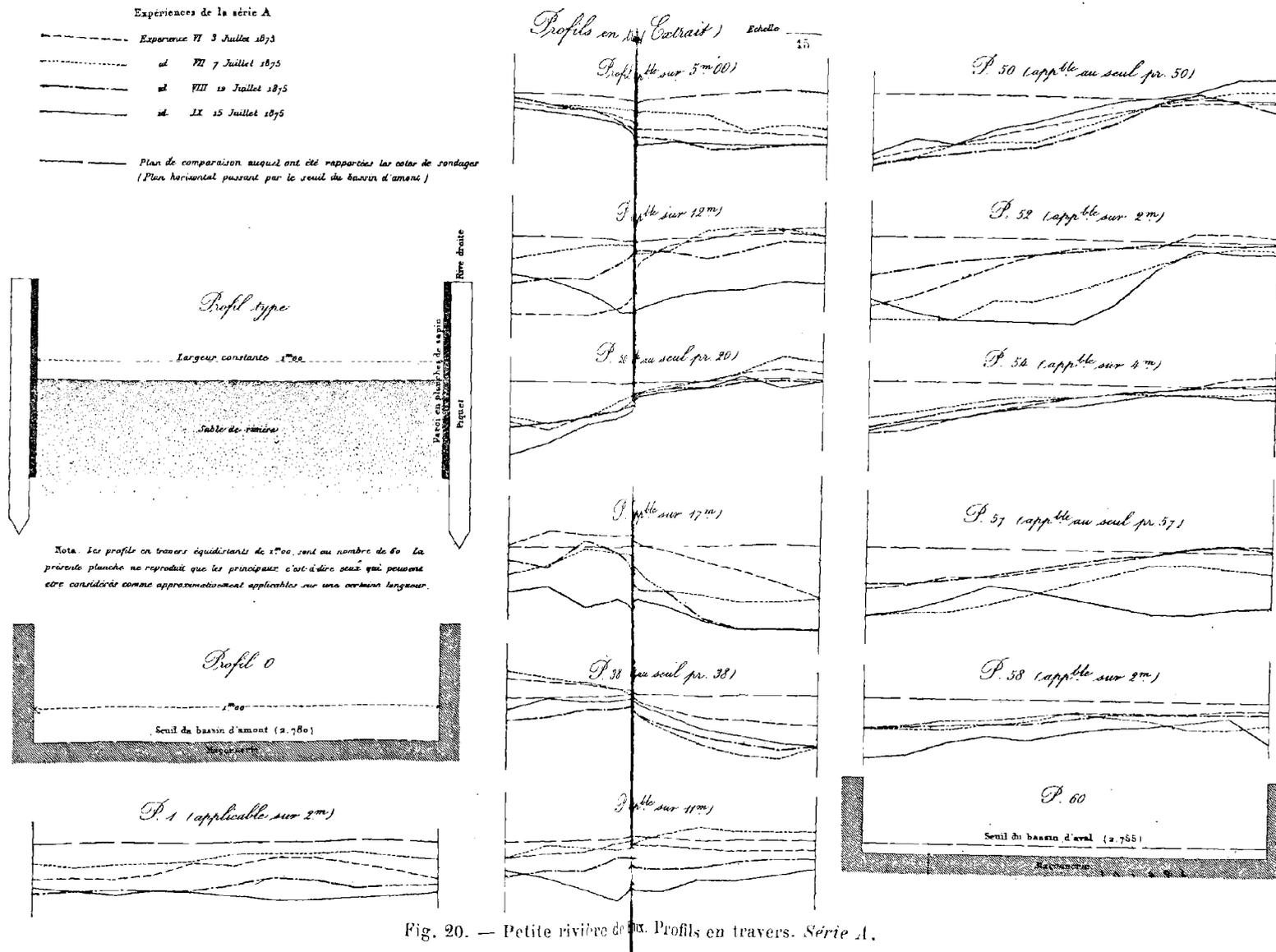


Fig. 20. — Petite rivière de Six. Profils en travers. Série A.



le développement, les courbures et les largeurs étaient aménagés conformément aux règles du tracé rationnel. Dans la partie d'aval, on avait disposé à titre de contre-épreuve un long alignement droit, à largeur sensiblement constante, suivi d'une courbe à axe circulaire et d'une largeur variable.

Le diagramme des largeurs, en chacun des profils en travers (équidistants de 1 mètre sur l'axe), a été dressé au moyen des indications des carnets d'observation sur lesquels les distances, comptées à partir de la rive droite, ont été consignées à 0 m. 01 près. La succession de ces largeurs forme une courbe sinueuse régulière.

Les courbures ont été calculées par le procédé de la décomposition en arcs de lemniscates indiqué à la pièce annexe VI.

Ce procédé n'est pas à recommander et nous aurons à en faire la critique. Toutefois les résultats qu'il a donnés sont suffisamment nets et probants pour la démonstration qu'on avait en vue. Nous nous bornerons donc à résumer ici la discussion de ces résultats telle qu'elle a été présentée en 1894, sauf à montrer ensuite qu'on aurait pu faire mieux.

En raison de la variation de la largeur, il a été nécessaire de considérer, non la courbure de la ligne idéale formant l'axe du lit, mais celle des lignes matérielles formant les rives mêmes du cours d'eau en expérience. On a donc calculé la courbure de l'une et de l'autre rive, à leur rencontre avec tous les profils en travers ; on a ainsi dressé l'itinéraire des courbures concaves et celui des courbures convexes :

*Série B.* — Les principales circonstances des neuf

expériences de la série B sont résumées dans le tableau ci-dessous. Elles y ont été inscrites suivant

Numéros par ordre		Date de l'expérience		Durée en heures	Levée de la vanne	Vitesse à la surface en mètres par seconde (mesurée au flotteur)			Débit en litres par seconde			
d'intensité du courant	chronologique					Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	
1	IV.	29 novembre	1875	7	mèt.	0,20	0,34	0,25	0,29	79	63	67
2	VI.	4 janvier	1876	7		0,40	0,43	0,22	0,37	203	125	159
3	IX.	3 février	id.	8		0,40	0,53	0,35	0,45	160	109	142
4	III.	23 novembre	1875	7		0,20	0,54	0,46	0,50	105	94	102
5	VII.	26 janvier	1876	8 1/2		0,30	0,64	0,48	0,56	150	133	142
6	I.	25 août	1875	6		0,40	0,60	0,54	0,56	208	187	199
7	V.	27 décembre	id.	7		0,40	0,62	0,51	0,56	222	204	209
8	H.	31 août	id.	6		0,40	0,64	0,59	0,60	210	190	205
9	VIII.	31 janvier	1876	8		0,35	0,83	0,59	0,69	211	181	195

leur ordre d'importance, eu égard à la fois au débit, évalué comme il a été dit ci-dessus, et à l'intensité du courant observé à l'aide de flotteurs à la surface.

Les plans de sondages relatifs aux cinq expériences inscrites en tête de ce tableau indiquent que, au cours de ces expériences, le fond de sable a été très faiblement remué : le relief final diffère peu du relief initial. On s'en rend facilement compte en remarquant que l'on n'y a fait agir que de faibles masses d'eau coulant lentement. Le débit moyen n'a pas atteint 160 litres et la vitesse minimum 0 m. 50 par seconde. Ces chiffres sont notablement moindres que ceux de 180, 203 et 222 litres, d'une part, et 0 m. 71, 0 m. 73, 0 m. 84 et 0 m. 93, d'autre part, observés dans les expériences de la série A.

## PLANCHE VIII

### PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX

*Plans de sondages de la série B*

(Fig. 21, 22, 23 et 24)



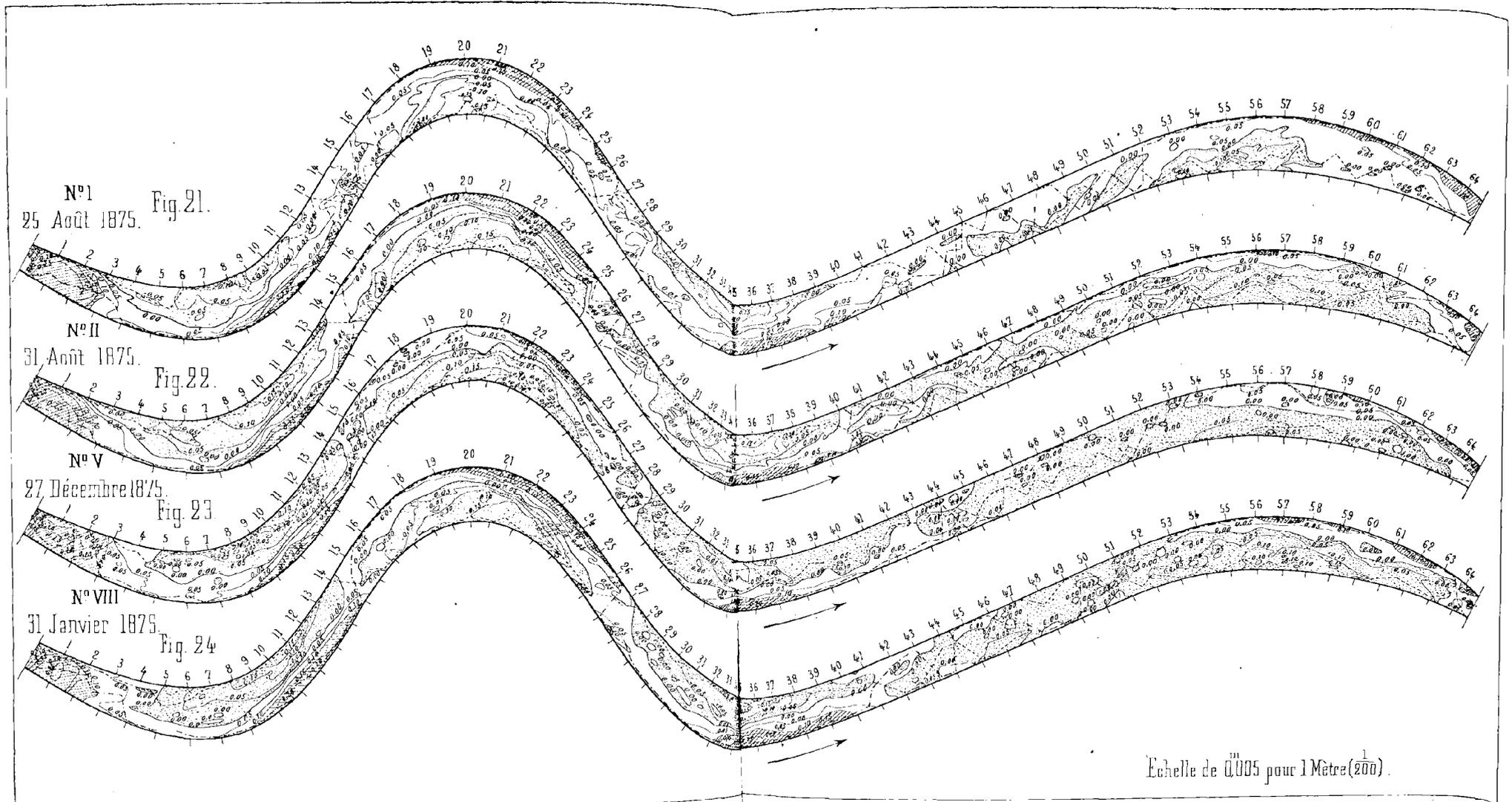


Fig. 21. 22. 23 et 24. — Petite rivière de deaux. — Plans de sondages de la série B.



Par conséquent, pour avoir des résultats qui soient utilement comparables à ceux obtenus dans la première rivière, nous bornerons notre discussion aux expériences relatées dans les quatre dernières lignes du tableau ci-dessus, c'est-à-dire à celles qui, dans l'ordre chronologique, portent les n<sup>os</sup> I, II, V et VIII.

Si l'on regarde simultanément les quatre plans de sondages de ces expériences (pl. VIII, fig. 21, 22, 23 et 24), en limitant d'abord l'examen à la partie d'amont, c'est-à-dire à celle qui a été rationnellement tracée, on reconnaît que les indications en sont sensiblement identiques. La ligne de faite et celle du thalweg ont, dans les quatre expériences, les mêmes positions respectives, la première le long de la rive convexe, la seconde le long de la rive concave. Elles se coupent à chaque inversion de la courbure. L'intersection a généralement lieu en un seul point, comme on le voit sur les plans des expériences n<sup>os</sup> II et VIII. Dans les deux autres, il y a, au premier point d'inflexion, entre les profils 13 et 15, une intersection triple, mais cette intersection deviendrait simple moyennant une seule tolérance de 0 m. 02 dans le tracé de la ligne de faite.

L'examen des profils en travers (fig. 25, pl. IX) confirme ce premier aperçu. Les dissemblances, au lieu d'être en majorité comme dans la série A, n'existent qu'aux profils 2, 11, 36, 59 et 63, et sur une longueur cumulée de 15 mètres seulement. Partout ailleurs, c'est-à-dire sur 50 mètres de longueur, le fond a pris un relief à peu près identique dans les quatre expériences.

En profil en long (fig. 26, pl. VI), les quatre thal-

wegs sont représentés par des lignes dont l'ensemble, comparé au dessin analogue précédemment examiné, paraîtra remarquablement régulier. Ces lignes sont affectées d'un certain nombre de redans ou dentelures qui montrent sans doute que la profondeur ne variait pas d'une manière absolument continue dans les thalwegs considérés, mais qui sont évidemment loin d'être aigus et fréquents comme pour la série A. Nonobstant ces redans, les quatre lignes ont sensiblement la même allure et reproduisent fidèlement les variations de la ligne qui figure les courbures concaves.

On voit en outre que cette reproduction a lieu à une distance, ou *écart*, vers l'aval qui varie entre 1 et 4 mètres.

La ligne de faite (fig. 27, pl. VI), comparée à la courbe des courbures convexes, donne lieu à des observations analogues.

Les résultats sont beaucoup moins concordants si l'on considère la partie de la rivière située en aval du profil 41, où ont été disposées, à titre de contre-épreuve, une ligne droite et une courbe dont l'axe est un arc de cercle.

Dans l'alignement droit, le chenal et la ligne de faite se coupent trois fois dans l'expérience II, cinq fois dans les expériences V et VIII et neuf fois dans l'expérience I. Avec une tolérance de 2 centimètres au plus, on pourrait ramener ce dernier nombre à cinq.

Dans la quatrième *courbe*, la ligne de faite suit assez irrégulièrement la rive convexe. Les profils en travers ne sont ni plus ni moins concordants que

dans la partie d'amont. Mais, sur les profils en long, les lignes du chenal et du thalweg ont des formes accidentées qui rappellent les dentelures et les grands écartements observés dans les expériences de la série A.

*Série C.* — Les expériences de la série C, au nombre de trois seulement, sont résumées dans le tableau suivant :

Numéros par ordre	Date de l'expérience	Durée en heures	Levée de la vanne	Vitesse à la surface en mètres par seconde (mesurée au flotteur)						Débit en litres par seconde			
				Maximum		Minimum		Moyenne	Maximum	Minimum	Moyen		
				Absolu	Moyen	Absolu	Moyen						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
		1876		mèt.									
1	I.	du 8 au 29 fév.	151 $\frac{1}{2}$	0,40	0,66	0,58	0,35	0,46	0,52	270	88	197	
2	II.	7 mars-8 avril	166	0,40	0,62	0,52	0,28	0,41	0,47	265	125	216	
3	III.	2 avr.-16 mai	162 $\frac{1}{2}$	0,40	0,62	0,52	0,32	0,42	0,48	265	140	230	

Les expériences avaient lieu seulement le jour. La vanne d'introduction était ouverte le matin à 8 ou 9 heures, et refermée à 4 ou 5 heures du soir. Les nombres inscrits dans la colonne 4 indiquent donc un total de durées journalières et non des heures consécutives.

La colonne 6 fait connaître la plus grande vitesse observée au cours de la durée totale de chaque expérience. Les chiffres de la colonne 7 sont les moyennes entre les maxima observés chaque jour.

Il en est de même pour les vitesses minima inscrites aux colonnes 8 et 9.

Les carnets d'observation montrent que chaque jour la *vitesse de superficie* a oscillé autour de 0 m. 50

par seconde. Or, d'après les relations généralement admises, cette dernière vitesse correspond à une *vitesse au fond* de 0 m. 30 par seconde, qui est la limite à laquelle le sable de grosseur moyenne, tel que celui qui a été employé, commence à être remué. La petite rivière a donc eu chaque jour une sorte de crue *active*, suivie d'une période de repos. Cette succession d'entraînements et d'arrêts alternatifs des matériaux du fond a été l'image assez fidèle de ce qui se passe en réalité dans le lit de la Garonne.

Les chiffres inscrits dans les trois dernières colonnes du tableau font voir que les débits ont été comparables à ceux des expériences précédemment discutées des séries A et B.

Sur les plans (fig. 28, 29 et 30, pl. X), la ligne de faite et celle du thalweg suivent respectivement la rive convexe et la rive concave. Elles se coupent une seule fois quand la courbure change de sens. Toutefois, dans l'expérience III, il y a une intersection triple au premier point d'inflexion, mais de légères corrections ou tolérances de cotes, l'une de 0 m. 01 et l'autre de 0 m. 02, suffiraient pour redresser le chenal de manière à rendre l'intersection simple.

Sur les profils en travers (fig. 31, pl. XI), le relief du fond est représenté par trois lignes qui oscillent dans une zone généralement très étroite ; cette zone n'offre une largeur sensible que sur 8 mètres environ de longueur, vers l'extrémité d'aval de la rivière.

En profil en long (fig. 33, pl. XII), le faisceau des trois lignes représentant les trois thalwegs est très serré, et on peut, avec une grande exactitude, le considérer comme une ligne unique. Cette ligne, à par-

## PLANCHE IX

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX. PROFILS EN TRAVERS

*(Serie B)*

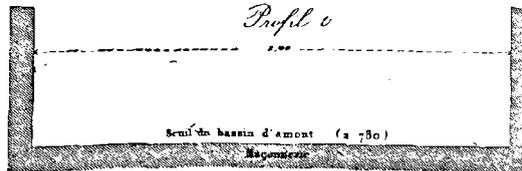
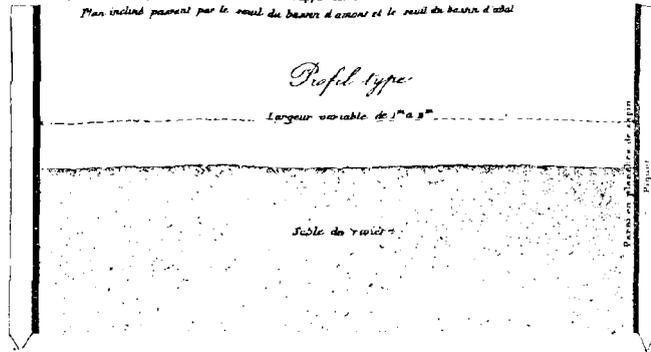
(Fig. 25)



Expériences de la série B

- Expérience I 25 Août 1875
- ..... id II 31 Août 1875
- ..... id V 27 Décembre 1875
- ..... id VIII 31 Janvier 1878

Plan de comparaison auquel ont été rapportées les cotes de sondages  
Plan incliné passant par le seuil du bassin d'amont et le seuil du bassin d'aval



Nota Les profils en travers, équidistants de 1<sup>m</sup>00, sont au nombre de 60. La présente planche ne reproduit que les principales, c'est à dire ceux qui peuvent être considérés comme approximativement applicables sur une certaine longueur.

Profils en travers (Extrait) échelle  $\frac{1}{15}$

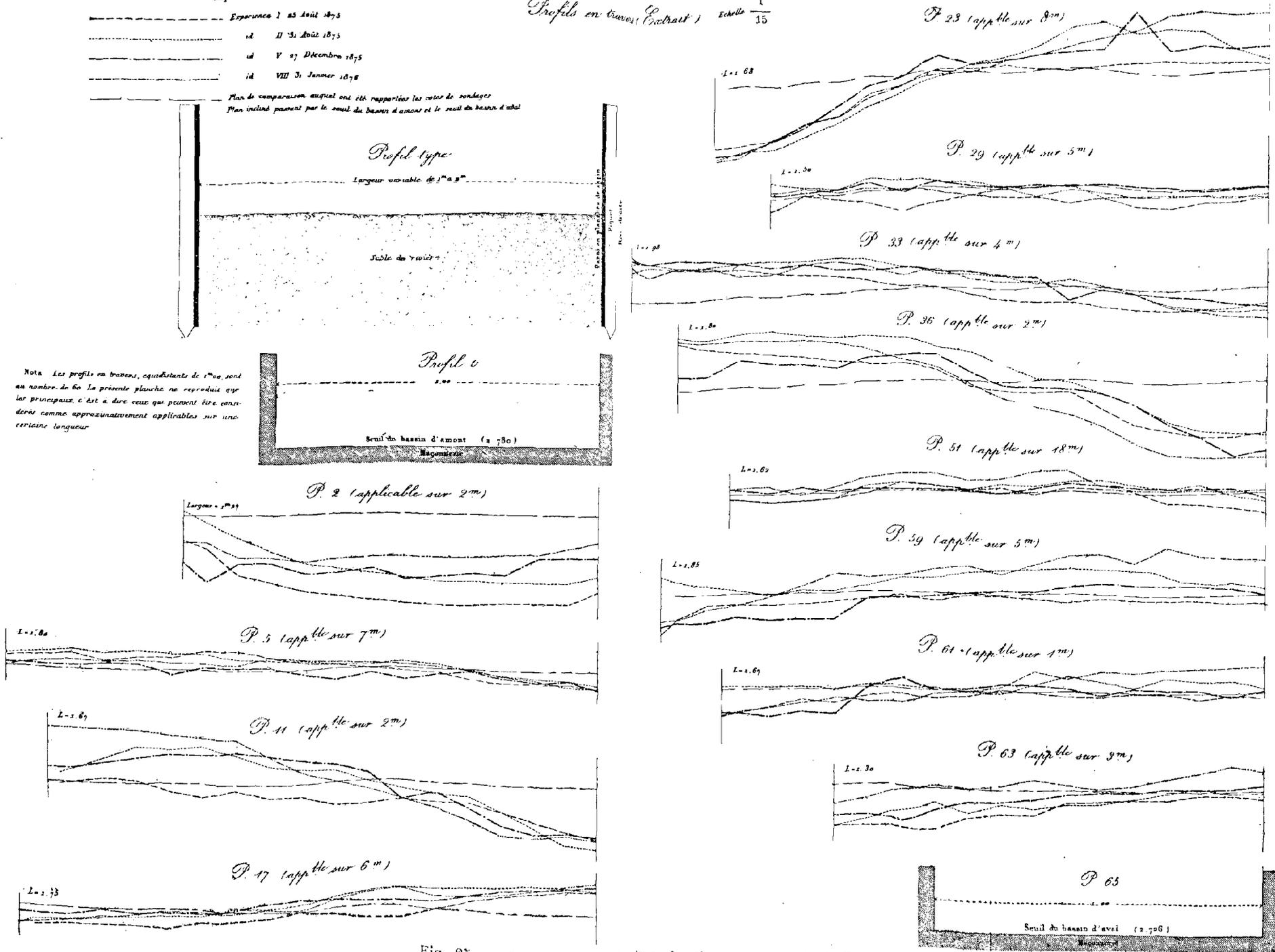


Fig. 25. — Petite rivière de Bordeaux Profils en travers. Série B.



tir du profil 6, c'est-à-dire abstraction faite du raccordement entre le seuil d'amont (qui était fixe) et le fond de sable, reproduit avec une remarquable régularité les variations de la ligne qui figure les courbures concaves.

Cette reproduction a lieu à une distance ou *écart*, vers l'aval, qui est presque constante et égale à 3 mètres 25 environ.

Les points les plus hauts, c'est-à-dire les maigres, ont un écart moyen de 3 m. 70 mesuré sur l'axe de la rivière.

Ces mêmes points ont respectivement les cotes moyennes de 0 m. 07, 0 m. 06 et 0 m. 05. En faisant abstraction du premier maigre dont la profondeur tient évidemment à des causes autres que celles dont nous poursuivons ici l'étude, on voit qu'il y a eu en moyenne 0 m. 055 d'eau sur les maigres à l'étiage.

Les points les plus bas, c'est-à-dire les mouilles ont, sur la petite rivière, un écart moyen de 2 m. 10, mesuré sur l'axe.

Les cotes moyennes des mouilles sont 0 m. 19, 0 m. 24 et 0 m. 28. Elles correspondent respectivement aux maxima 0,169, 0,269 et 0,214 de la courbure, et l'on peut remarquer qu'elles croissent comme les paramètres des courbes concaves, lesquels sont respectivement 2,40, 2,78 et 3,00. Il semblerait donc que la profondeur de la mouille ne dépend pas seulement du maximum de la courbure concave, mais encore de la rapidité avec laquelle ce maximum est atteint.

La ligne de faite (fig. 34) donne lieu à des observations analogues. Abstraction faite de deux redans qui disparaîtraient moyennant une correction d'un

centimètre dans deux cotes de sondage, elle a une allure très régulière; elle est l'image à peine déformée de la courbe des courbures convexes, mais elle en est *écartée* de 2 m. 50 environ vers l'aval.

Ses trois points hauts, les seuls intéressants à considérer, ont pour cotes moyennes 0 m. 130, 0 m. 237 et 0 m. 223 au-dessus de l'étiage, chiffres que l'on peut rapprocher des paramètres des courbes convexes, lesquels sont respectivement 3,08, 3,47 et 3,48.

Les résultats sont beaucoup moins concordants à partir du profil 43, c'est-à-dire dans l'alignement droit. Le chenal et la ligne de faite s'y coupent trois fois dans l'expérience III et cinq fois dans les deux autres. Avec une tolérance de 0 m. 02 au plus, on ramènerait ce dernier nombre à trois.

Jusqu'au profil 50, extrémité de l'alignement droit, les profils en travers ne diffèrent pas d'une manière exagérée. C'est généralement l'expérience II, c'est-à-dire celle qui a réalisé la moindre vitesse moyenne, qui a donné le moindre creusement.

A partir du profil 50, les discordances sont très marquées, et c'est au contraire l'expérience II qui correspond au plus grand creusement.

Sur les profils en long, les lignes de faite et du chenal ont des formes accidentées qui rappellent les dentelures et les grands écartements observés dans les expériences de la série A.

**Résumé.** — En résumé, hormis quelques particularités de détail que nous avons signalées et dont quelques-unes trouveront plus loin leur explication,

# PLANCHE X

## PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX

*Plans de sondages de la série C*

(Fig. 28, 29, 30 et 35)



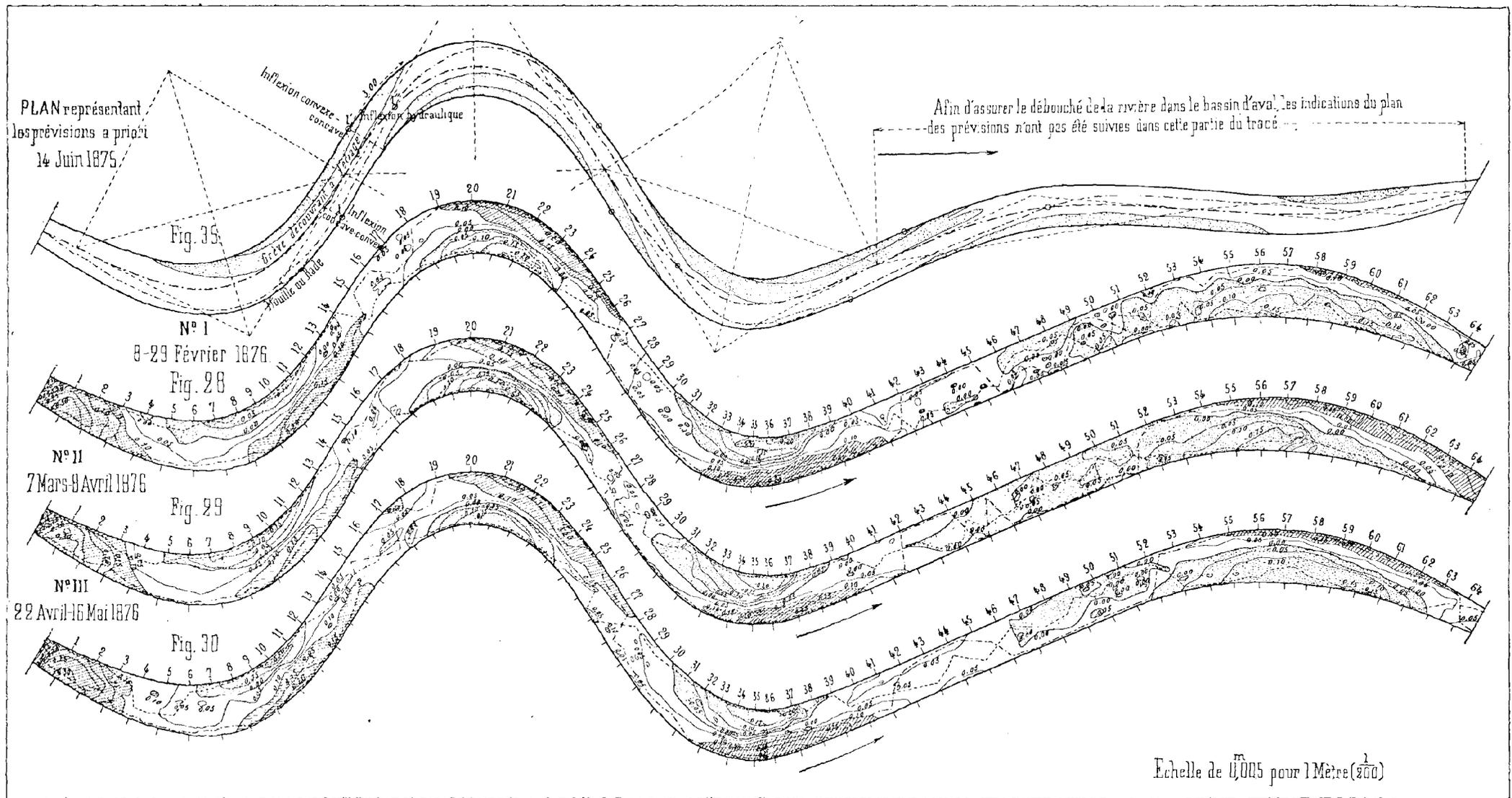


Fig. 28, 29, 30 et 35. — Petite rivière de Bordeaux. — Plans de sondages de la série C.



## PLANCHE XI

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX. PROFILS EN TRAVERS

*(Série C)*

(Fig. 31)



Expériences de la Série C

- Expérience I - 6.29 Février 1876
- ..... Expérience II - 7 Mars - 8 Avril 1876
- Expérience III - 22 Avril - 16 Mai 1876

Nota - Le plan de comparaison, le profil-type.  
le profil 0 et le profil 65 sont les mêmes que pour la Série B

Profils en travers (Extrait) Echelle  $\frac{1}{10}$

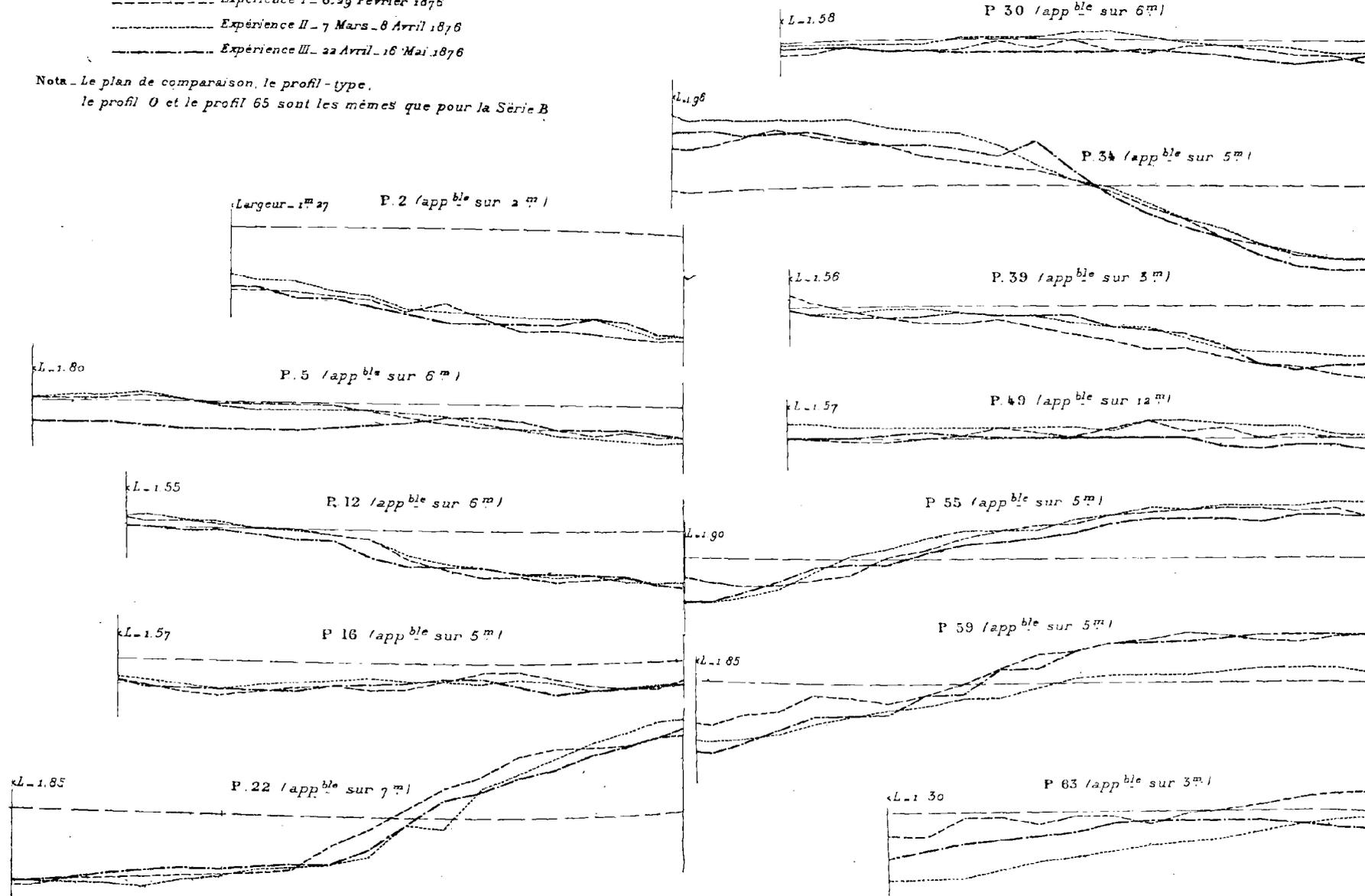


Fig. 31. — Petite rivière de Bordeaux. Profils en travers (Série C).



la conclusion à tirer de la discussion qui précède n'est pas autre chose que l'énoncé même des lois expérimentales qui ont été formulées dans le paragraphe précédent.

Ces lois ont donc été confirmées par l'épreuve à laquelle on les a soumises

Leur degré de certitude et de précision devant s'accroître à mesure qu'on observera plus fréquemment leur accord avec la réalité, il importe de faire connaître les faits suivants qui constituent une vérification intéressante.

**Prévisions relatives au deuxième tracé.** — La seconde rivière, théâtre des expériences des séries B et C, a été tracée suivant les indications que l'auteur a adressées à M. l'ingénieur en chef de Laroche-Tolay. Le dessin lui en a été envoyé, sur sa demande, avec une lettre explicative dont les principaux passages sont transcrits ci-dessous :

Gap, 14 juin 1875.

« La rivière artificielle que je propose de réaliser  
 « est la miniature d'une Garonne telle que je la  
 « ferais si j'en avais les moyens... L'échelle de réduction des dimensions en plan est de  $\frac{1}{400}$  ... Les hauteurs verticales seront réduites au  $\frac{1}{20}$  ; les vitesses le seront dans la proportion  $\frac{1}{1,60}$ . Les sections le seront en raison composée des largeurs et des hauteurs, soit  $\frac{1}{2000}$ , et les débits en raison composée des sections et des vitesses, soit  $\frac{1}{3200}$ .

« Voici le résumé des trois états principaux à réa-  
« liser :

	Hauteur au-dessus de l'étiage		Débit par seconde		Profondeur d'eau			
					réelle		réduite	
	Réelle	Réduite	Réel	Réduit	sur le maigre	dans la mouille	sur le maigre	dans la mouille
	mèt.	mèt.	m. cub.	litres				
Eaux de pleins bords	5,20	0,26	1 920	600	6,90	9,95	0,345	0,500
Eaux moyennes	2,60	0,13	690	220	4,30	7,35	0,215	0,368
Etiage	0	0	86	27	4,70	4,75	0,085	0,238

« La différence de niveau entre le seuil d'amont et  
« le seuil d'aval devra être de 0 m. 064.

« J'ai représenté sur un plan (fig. 35, pl. X) mes  
« prévisions concernant l'emplacement des grèves,  
« des maigres et des rades (ou mouilles). Je donne  
« ci-dessus les profondeurs d'eau qui existeront  
« probablement à l'étiage.

« . Il est à penser que nos prévisions ne se réali-  
« seront pas avec une exactitude parfaite, mais ce  
« serait beaucoup si l'ensemble du phénomène affec-  
« tait d'une manière générale la physionomie que  
« nous indiquons *a priori*. »

Les figures 28, 29 et 30 (pl. X) montrent que les plans de sondages de la série C présentent, dans leurs lignes générales, une ressemblance évidente avec celui du 14 juin 1875. Les prévisions se sont exactement réalisées pour l'emplacement des mouilles et de la partie centrale des bancs ou grèves. Mais ces bancs ont été en réalité moins allongés, et surtout le

## PLANCHE XII

PETITE RIVIÈRE DE BORDEAUX

*(Série C)*

DIAGRAMMES DES COURBURES ET DES PROFONDEURS  
MAXIMA ET MINIMA

(Fig. 32, 33, 34)



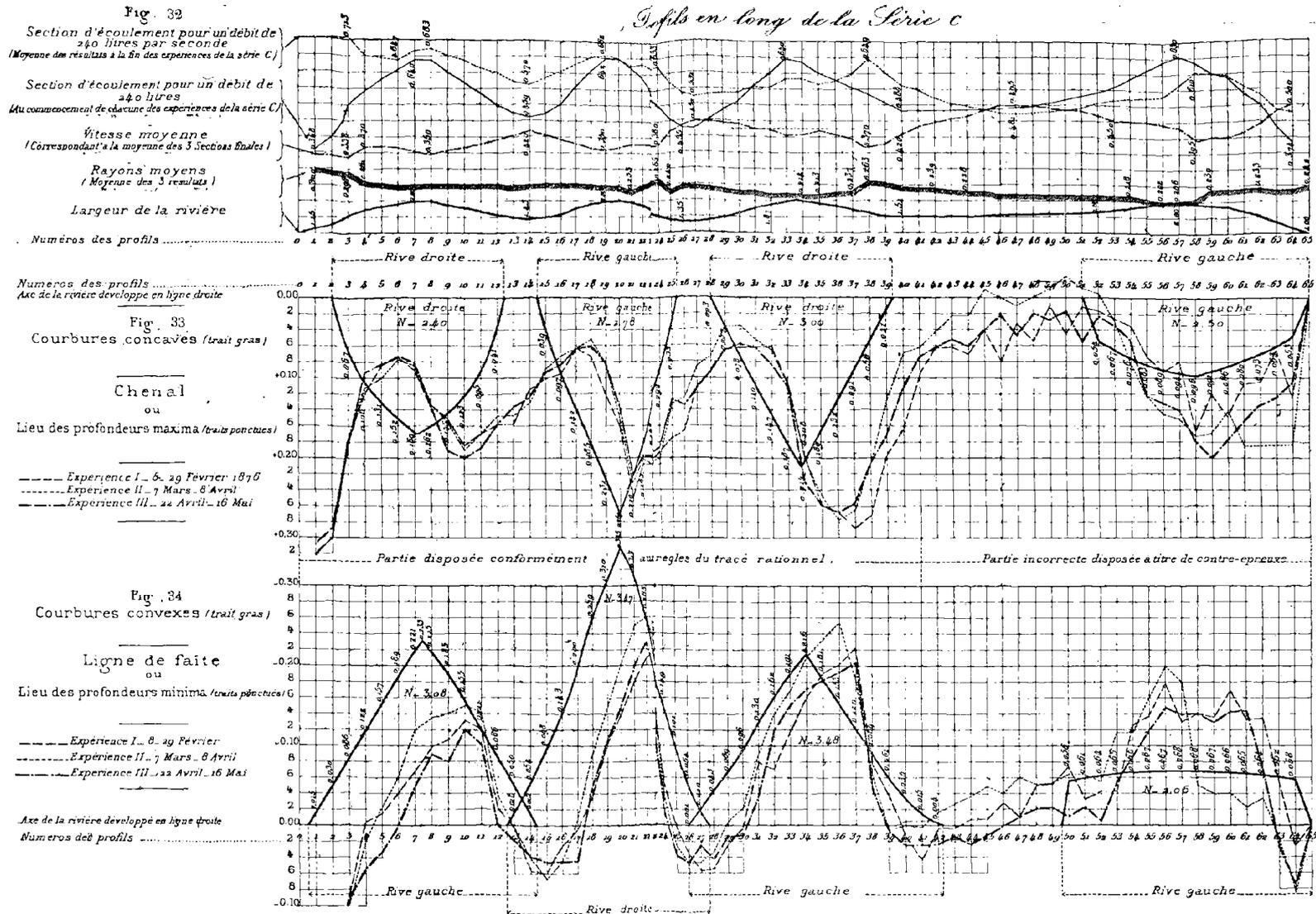


Fig. 32, 33, 34. — Petite rivière de Bordeaux (Série C). Diagrammes des courbures et des profondeurs maxima et minima.



chenal a passé d'une rive à l'autre beaucoup plus brusquement qu'il n'avait été prévu. La traversée lente et graduelle figurée sur le plan schématique des prévisions serait incontestablement meilleure pour la navigation. On arrivera à la réaliser en serrant de plus près que je n'ai su le faire la question du meilleur tracé.

En regard des chiffres que contient la lettre du 14 juin 1875, il faut mettre ceux des observations faites le 29 février, le 8 avril et le 13 mai 1876. La hauteur d'eau et le débit y ont en effet été très sensiblement constants. Ces observations ont été faites à la fin de chacune des expériences de la série C, et le fond mobile, parvenu à peu près à sa forme d'équilibre, était configuré comme l'indiquent les plans cotés. En un mot, le régime observé était sensiblement *permanent*.

D'après les inscriptions faites sur les carnets, ces chiffres sont les suivants :

Dates	Débit moyen de la journée en litres par seconde	Hauteur d'eau sur le seuil		Pente		Vitesse moyenne à la surface
		d'amont	d'aval	totale de l'eau entre les deux seuils (Distance = 64 m. 80)	moyenne par kilomètre	
1876	litres	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
I. 29 février . . .	245	0,320	0,325	0,049	0,756	0,569
II. 8 avril . . .	235	0,370	0,375	0,049	0,756	0,453
III. 13 mai . . .	240	0,320	0,325	0,049	0,756	0,514
Moyennes . . .	240	0,337	0,342	0,049	0,756	0,512

On voit tout d'abord que le débit observé est à peu près celui qui avait été prévu pour les eaux moyennes.

Mais la hauteur d'eau correspondante *au dessus* de l'étiage a été deux fois et demie celle qui avait été annoncée. En outre, la pente kilométrique a été de 0 m. 75, ce qui est trois fois seulement la pente de la partie de la Garonne que j'avais eu l'intention de reproduire ; d'après les échelles adoptées, le rapport des pentes aurait dû être 5 et non 3.

Ce sont là des différences notables. Elles tiennent sans doute à ce que le seuil d'aval a été placé trop haut : d'une part, on l'avait mis à 1 centimètre en contre-haut de ce que j'avais indiqué ; d'autre part, mon chiffre de 0 m. 064 était erroné ; il aurait dû être de 0 m. 080. Mais elles tiennent surtout à ce qu'il est très difficile, sinon impossible, de réaliser une miniature exacte du régime d'une grande rivière.

Quoi qu'il en soit, les prévisions, en ce qui concerne les profondeurs d'eau *au-dessous* de l'étiage, se sont bien réalisées.

Pour le maigre, la prédiction était de 0 m. 085, et on a eu en réalité 0 m. 055, ainsi qu'il a été dit ci-dessus. L'exactitude a même été plus grande qu'il ne paraît au premier abord. Il faut noter en effet que l'étiage visé dans les prévisions devait débiter 27 litres par seconde, tandis que l'étiage auquel ont été rapportées les cotes de sondage est un étiage conventionnel d'un débit nul. Il y aurait donc à ajouter à la cote 0 m. 055 la hauteur de la tranche d'eau correspondant au débit de 27 litres. Quelle est cette hauteur ? L'observation directe n'en a pas été faite, mais on peut l'évaluer à 0 m. 043 en remarquant qu'il s'agit de parties de la rivière où la largeur était de 1 m. 50, et en faisant l'hypothèse assez plausible que,

comme sur la Garonne réelle, la vitesse sur le maigre a été, en étiage, au moins égale à la vitesse en eaux moyennes, soit 0 m. 52 à la surface, 0 m. 42 pour l'ensemble de la section.

En ce qui concerne la mouille, la profondeur prédite est de 0 m. 238. Les cotes observées ont été 0 m. 190, 0 m. 240 et 0 m. 280.

La concordance de ces chiffres, jointe à la ressemblance générale qu'offre le plan des prévisions avec les plans de sondages des expériences B et C, ne peut manquer d'attirer l'attention. Sans oublier qu'il ne s'agit que d'une rivière artificielle, on peut dire qu'il y a certainement du vrai dans une théorie qui subit aussi victorieusement l'épreuve d'une vérification par voie de synthèse et de prédiction.

**Principe de la continuité de la courbure.** — La sous-commission de Bordeaux a, comme on l'a vu, reconnu que ses expériences ont confirmé les conclusions de l'auteur, mais elle a ajouté : *en ce qu'elles ont de plus important*. Cette restriction, qui vise la loi de la continuité de la courbure, nécessite quelques explications.

La sous-commission a été induite gravement en erreur au sujet de la définition géométrique du second tracé. Son rapport contient en effet le passage suivant :

« Dans sa seconde forme, le lit de la rivière artificielle présentait d'abord trois arcs de cercle consécutifs alternativement courbés en sens contraire et d'une très forte courbure. A la suite du dernier, venait tangentiellement une partie droite d'une quinzaine de mètres, suivie elle-même d'un dernier arc de cercle. »

Nous n'avons pas réussi à connaître les motifs de cette singulière méprise du rapporteur.

Il en est de même en ce qui concerne le silence gardé dans le rapport de la sous-commission au sujet des neuf expériences de la série B et de l'expérience III de la série C.

Ainsi inexactement renseignée, la sous-commission n'a vu dans les différences des résultats constatés sur les deux petites rivières que l'effet d'une courbure plus ou moins accentuée et d'une durée plus ou moins prolongée de l'action du courant.

Elle a mis en doute la réalité de la loi de la continuité de la courbure. Tout en reconnaissant que « *les tracés graphiques semblent jusqu'à un certain point justifier cette loi* », elle a été unanime « à penser qu'il pouvait y avoir là une concordance accidentelle et que des observations portant sur 22 kilomètres seulement n'étaient pas suffisantes pour établir une influence aussi considérable du degré de contact dans le raccordement des courbes successives ».

Le nombre des faits est le même que pour les autres lois ; suffisant pour les unes, pourquoi ne le serait-il pas pour les autres ?

Les faits observés sur la Garonne et groupés dans la loi de la *pente du fond* montrent que la profondeur du chenal diminue brusquement à tous les changements brusques de la courbure ; le profil en long du chenal présente une régularité analogue à celle de la courbe des courbures. La même loi s'est manifestée dans les expériences de Bordeaux. Celles de la série B ont montré que, même avec une durée de 6 à 8 heures seulement, les résultats que donnent les

rives à courbures graduées présentent une régularité et une concordance qu'on ne trouve pas dans les expériences faites avec des rives formées de lignes droites et d'arcs de cercle. Enfin les résultats de la série C, dans la partie aval de la seconde rivière, montrent que la durée ne suffit pas à elle seule pour donner de la régularité et de la concordance. Des résultats analogues ont été constatés sur d'autres rivières et, dans les Congrès de navigation, la continuité de la variation de la courbure a été regardée sans conteste comme une des conditions nécessaires pour la formation d'un bon chenal.

A cette première objection, la sous-commission en a ajouté une seconde, plus faible encore.

D'après elle « la différence entre le contact et l'osculation, déjà très faible sur une épure, serait absolument insensible sur le terrain et difficilement réalisable dans un tracé réel ». Il y a là un simple malentendu qu'il est facile de dissiper.

Sans doute, à ne considérer, soit sur l'épure, soit sur le terrain, que les abords immédiats d'un point A d'inflexion ou de raccordement (fig. 36), il est évident qu'il n'y a pas de différence appréciable entre les points appartenant à un arc de cercle AB et ceux appartenant à un arc à courbures graduées, tel, par exemple, qu'un arc AC de spirale-volute (1).

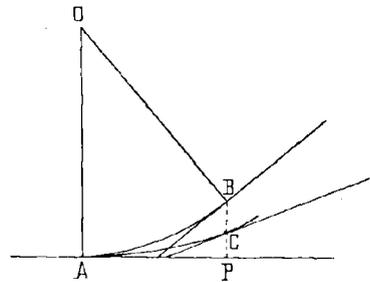


Fig. 36.

(1) Courbe dont la courbure est proportionnelle à la longueur de l'arc. Voir pièce annexe V.

L'auteur n'a jamais prétendu ni donné à entendre qu'il attribue à l'osculution une vertu spéciale concentrée au point commun A. Mais les deux tracés AB et AC sont-ils équivalents ? C'est là qu'est la question.

Au point de vue purement géométrique il suffit de regarder à une certaine distance au delà du point A pour constater que les deux tracés divergent et ne tendent pas vers les mêmes régions du plan. Soit, par exemple, le rayon  $OA = 1000$  mètres et l'arc  $AB = 100$  m. Au point B la direction de la tangente, c'est-à-dire la *dévi*ation est de  $5^{\circ} 43' 45''$ ; l'abscisse AP est de 100 mètres environ et l'ordonnée BP est de 5 mètres, tandis que, au point C, à longueur égale, la déviation est moitié moindre ( $2^{\circ} 51' 52''$ ), l'abscisse est à peu près la même, et l'ordonnée : 1 m. 65 seulement.

Pour les opérations sur le terrain, les courbures graduées du tracé AC sont aussi faciles à réaliser que la courbure constante du tracé AB. Imaginons, pour fixer les idées, que ces deux tracés soient décomposés en dix éléments rectilignes de 10 mètres chacun. Si, d'une part, on donne à ces éléments une inclinaison mutuelle constante égale au dixième de l'angle  $5^{\circ} 43' 45''$ , on réalisera le tracé circulaire AB. Si d'autre part on prend la 55<sup>e</sup> partie  $\beta$  de l'angle  $2^{\circ} 51' 52''$ , et si on incline le premier élément d'un angle égal à  $\beta$ , le second de  $2\beta$ , le troisième de  $3\beta$ , et ainsi de suite jusqu'à  $10\beta$ , on aura réalisé le tracé AC, et il y aura, au premier élément, un raccordement par *osculution*, au sens pratique du mot.

Au point de vue dynamique, qui est surtout celui qui nous occupe, il s'agit d'une trajectoire à suivre

par une masse en mouvement, composée d'eau et de matériaux solides plus ou moins mobiles. La courbure de cette trajectoire étant l'un des facteurs de l'action que cette masse exerce contre la rive, et de la réaction qu'elle en reçoit, il importe qu'elle ne varie que par degrés insensibles. C'est en effet cette réaction qui, en déterminant le mouvement transversal des graviers, contribue à opérer la séparation de l'eau et des matériaux solides ; c'est elle en un mot, qui creuse le chenal et remblaie la convexité. Si l'on veut avoir une bonne passe navigable, il faut ménager à ces phénomènes une évolution graduée. Il faut donc que la courbure ne subisse aucune variation brusque, et il est clair que le tracé AC réalise cette condition beaucoup mieux que le tracé AB.

En résumé, à quelque point de vue que l'on se place, les critiques de la sous-commission ne sont pas fondées, et le principe de la continuité de la variation de la courbure a reçu dans les expériences de Bordeaux, comme les autres lois formulées par l'auteur, une confirmation complète et d'autant plus éclatante qu'elle n'y avait pas été cherchée.

Cette confirmation est devenue elle-même un enseignement; elle a montré que, dans le second tracé, le principe dont il s'agit n'avait été appliqué que d'une manière imparfaite. Les courbures sont en effet représentées sur le diagramme par une série d'arcs curvilignes qui se raccordent mal avec l'axe des abscisses, et surtout entre eux, puisque le sommet, c'est-à-dire le maximum de la courbure, est réduit à un point saillant où a lieu un changement brusque de direction. Cette discontinuité aurait pu être évitée, et elle l'aurait certainement été si on

avait pu prévoir que cette question serait particulièrement discutée par la sous-commission. Au lieu de prendre un tracé satisfaisant à certaines conditions géométriques, pour en déduire ensuite une courbe des courbures incomplètement continue, on aurait pris pour point de départ une courbe des courbures d'une continuité irréprochable et on en aurait conclu le tracé. On aurait ainsi reproduit en petit un passage de la Garonne qui doit être considéré comme le modèle à imiter puisque le maigre y offre le maximum de profondeur et de stabilité ; nous voulons parler de la courbe C, située entre les bornes kilométriques 12 et 14. L'itinéraire des courbures, comme le profil en long du chenal, y affecte une forme très sensiblement sinusoïdale. La longueur de la *courbe* est de 1.564 mètres, l'écart est de 363 mètres pour le maigre d'amont, de 421 mètres pour la mouille et de 428 mètres pour le maigre d'aval. L'écart moyen est de 400 mètres, soit un peu plus du quart de la longueur commune de la *courbe* et du bief. Sur le maigre d'aval, la navigation trouve une profondeur d'eau de 4 mètres sous l'étiage, profondeur qu'on ne rencontre sur aucun autre maigre de cette partie de la Garonne et qui, depuis près de cinquante ans, n'est jamais descendue au-dessous de 3 m. 50. tandis que la moyenne est de 1 m. 70 à peine. C'est donc la *courbe* type, et il est regrettable qu'on n'ait pas songé à en reproduire les dispositions dans la petite rivière artificielle de Bordeaux.

---

## § 6. — L'ESCAUT MARITIME

**Diagramme.**— A l'occasion des discussions auxquelles ont donné lieu les nombreux projets qui ont été proposés pour l'extension du port d'Anvers, la question s'est posée de savoir si, sur l'Escaut maritime, il existe, entre les profondeurs du chenal et la forme du lit, des relations analogues à celles qui ont été constatées sur d'autres rivières à un seul courant.

Consulté à ce sujet, je me suis livré à une étude dont voici les principaux résultats.

Entre le fort de Cruybeke et l'ancien fort Lillo (fig. 37), le lit de l'Escaut présente un développement de 22 kilomètres où se trouve six sinuosités, dans lesquelles les longueurs, les courbures et les largeurs sont très variables.

Les rives n'étant pas kilométrées, des repères fictifs ont été placés en plan sur l'axe du fleuve, à l'équidistance de 500 mètres.

La comparaison entre les profondeurs et les courbures a été faite au moyen d'un diagramme synoptique (fig. 38, pl. XIII) analogue à celui qui a été employé pour l'étude de la Garonne et de la rivière artificielle de Bordeaux.

L'axe du fleuve a été supposé développé suivant une horizontale. Des profils en travers fictifs, correspondant aux repères du plan, y ont été représentés par des lignes d'ordonnées, sur chacune desquelles ont été portées synoptiquement la largeur du lit, la profondeur du chenal et la courbure de la rive concave dans le profil considéré.

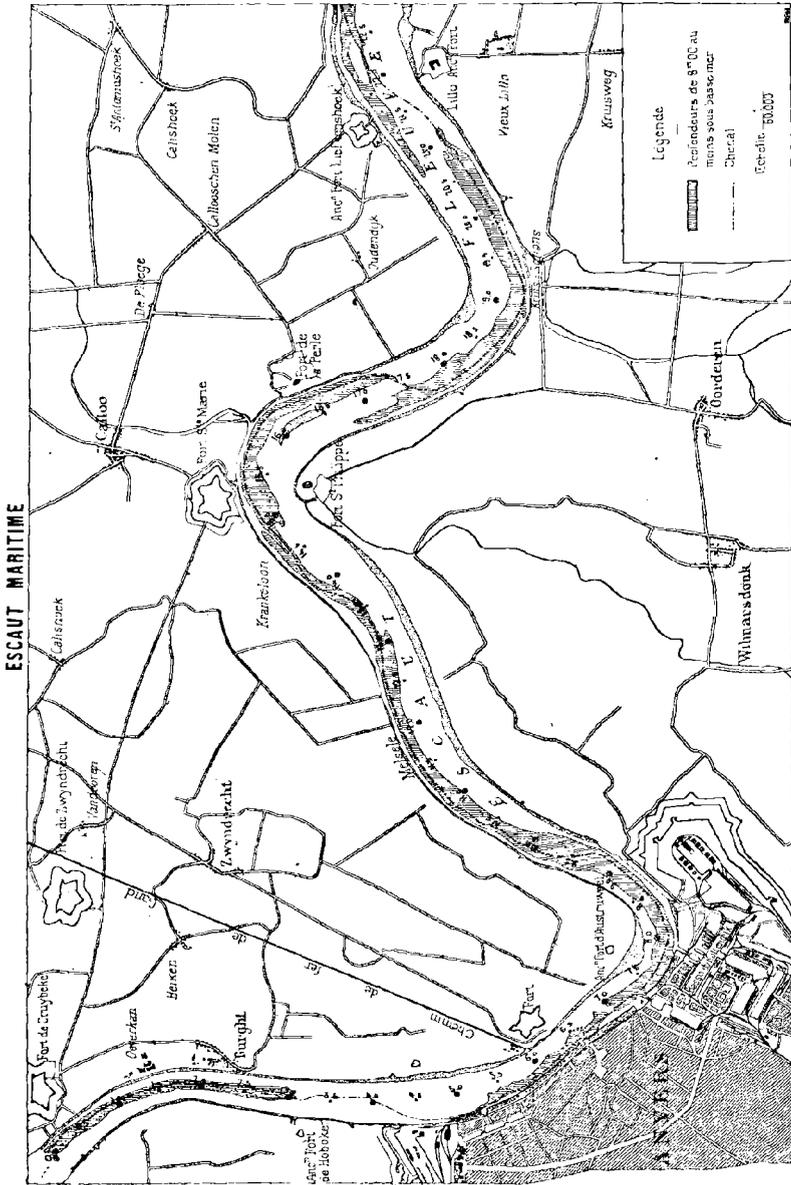


Fig. 37.

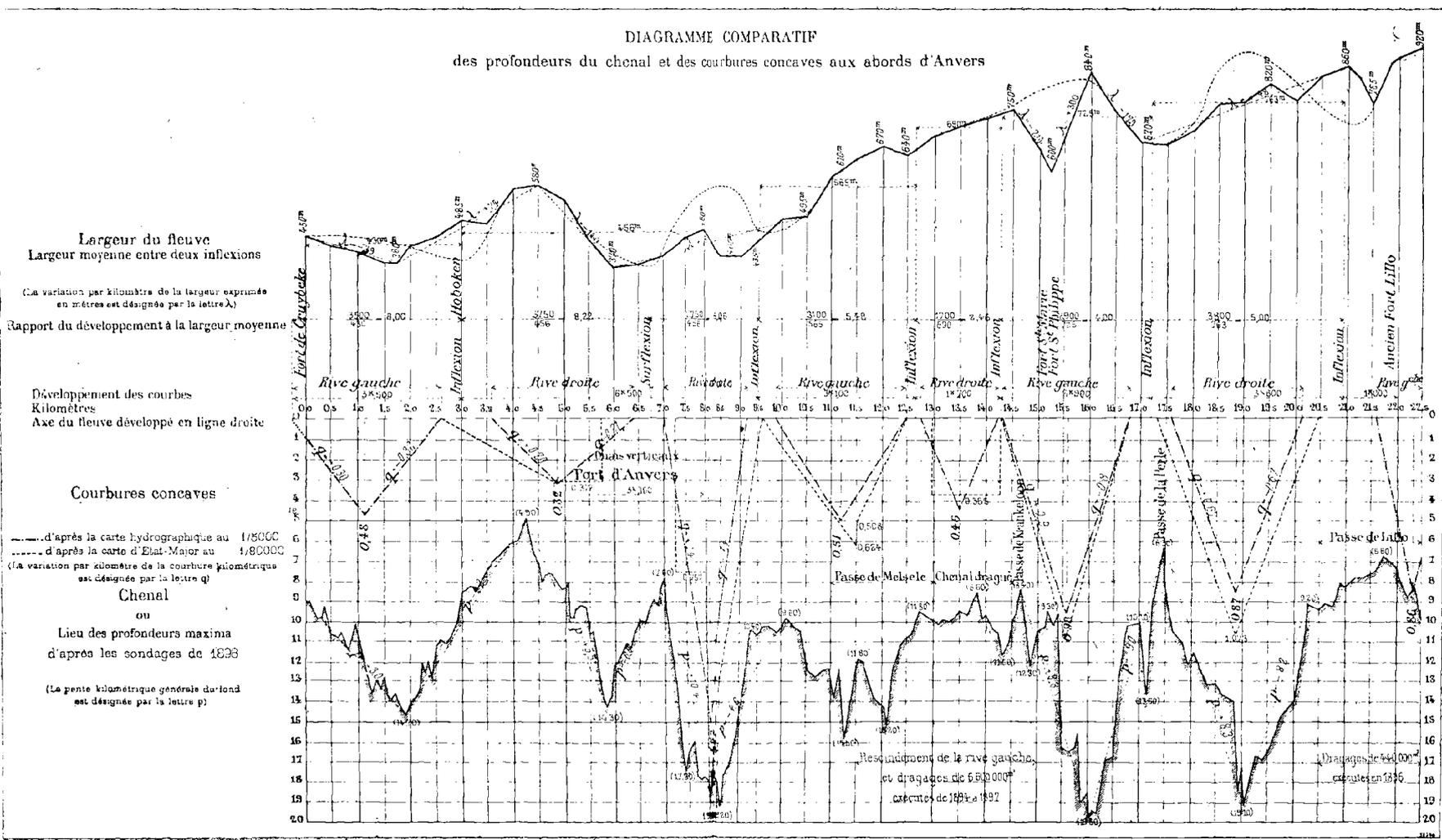
## PLANCHE XIII

DIAGRAMME COMPARATIF DES PROFONDEURS DU CHENAL  
ET DES COURBURES AUX ABORDS D'ANVERS

(Fig. 38)



**DIAGRAMME COMPARATIF**  
des profondeurs du chenal et des courbes concaves aux abords d'Anvers



Pl. 38.



La largeur du lit est celle qui résulte des mesures prises sur la carte de l'état-major au 1/20000 et sur la carte hydrographique au 1/5000.

Le chenal étudié est celui qui résulte des sondages exécutés en 1898 et reportés sur la carte hydrographique. Sa profondeur et sa direction, en chaque point, sont à peu près les mêmes à chaque relevé hydrographique ; les variations ont lieu tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, et sont négligeables par rapport aux dimensions des autres éléments de la question. On peut donc, d'une manière générale, considérer le chenal de 1898 comme permanent.

Deux points seulement sont à excepter :

Entre les repères 12,0 et 15,5, la passe navigable et la forme naturelle du lit ont été modifiées par des dragages importants, exécutés de 1894 à 1897. La rive gauche (convexe) a été rescindée profondément ; les passes dites de Melsele et de Krankeloon, situées sur la rive gauche, ont été réunies par un large chenal artificiel de 8 mètres au moins de profondeur, et la passe dite de Saint-Philippe, située sur la rive droite, a été remblayée. Ces travaux ont comporté des dragages de plus de 6 millions et demi de mètres cubes.

Sur la passe de Lillo (repère 21) il a été dragué, en 1896, plus de 450.000 mètres cubes.

En raison de la variation de la largeur, j'ai dû considérer non la courbure de la ligne idéale formant l'axe du lit, mais celle des rives mêmes de l'Escaut. Les sondages ne donnant pas les points *les plus hauts* de chaque profil, je ne me suis pas occupé des rives convexes, et je n'ai établi de comparaison qu'en-

tre les profondeurs du chenal et les courbures des rives concaves.

Le procédé qui a été suivi pour déterminer ces courbures, fait l'objet d'explications qui sont données dans la pièce annexe VI.

**Discussion.** — La première sinuosité, d'une longueur de 3500 mètres, a sa concavité sur la rive gauche. Elle commence en dehors de la limite de la carte de l'état-major et finit au repère 3 km. 0. Sa courbure croît jusqu'au repère 1 km. 1, où se trouve le sommet ; la courbure kilométrique y atteint le maximum de 0,48, ce qui correspond à un rayon de 2 km. 080. Les profondeurs croissent elles-mêmes jusqu'au repère 1 km. 9, où elles atteignent le maximum de 14 m. 70. Les lignes correspondantes du diagramme sont, dans leur allure générale, à peu près parallèles et les maxima se correspondent, avec un *écart* de 800 mètres pour la mouille.

La courbure décroît ensuite jusqu'au repère 3 km. 0. La profondeur décroît elle-même jusqu'au repère 4 km. 2, où, sans doute sous l'influence de l'élargissement du lit, elle présente un minimum de 4 m. 90 seulement, avec un écart qui atteint le chiffre considérable de 1200 mètres. De grands dragages et des travaux de resserrement du lit sont en cours d'exécution, en vue d'obtenir sur ce maigre une profondeur de 8 mètres au moins sous basse mer.

A partir du repère 3 km. 0, la concavité passe sur la rive droite et s'y maintient jusqu'au repère 9 km. 5. Sur ce développement de 6500 mètres, où les quais d'Anvers occupent une longueur de 3160 mètres, il y a deux courbes de même sens, l'une de 3750 mè-

tres, l'autre de 2750 mètres, et séparées par une ligne droite formant *surflexion*.

Au premier sommet (repère 4 km. 850, courbure : 0,32) correspond une fosse de 14 m. 30, située au repère 5 km. 750. Le lit se rétrécit et l'écart de la mouille est de 900 mètres.

Au point de surflexion, repère 6 km. 750, correspond un maigre (repère 7 km. 0), où le chenal n'a que 7 m. 60 de profondeur. Dans cette région, la largeur varie peu, et l'écart du maigre est de 250 mètres.

Au second sommet, repère 8 km. 1, se trouve un coude très prononcé, courbure : 1,52 ; rayon : 0 km. 658. La mouille correspondante est très profonde (19 m. 20) et se trouve au repère 8 km. 600, avec un écart de 500 mètres. Elle est en même temps très longue : sur plus de 2 kilomètres, la profondeur sous basse mer est supérieure à 10 mètres. Cette rade remarquable est due à la juxtaposition de deux mouilles, celle de jusant et celle de flot.

A l'inflexion, située au repère 9 km. 5, correspond un maigre de 9 m. 60, situé au repère 10 km. 1. Ecart : 600 mètres.

La sinuosité suivante, dont la concavité est sur la rive gauche, a 3100 mètres de développement. Les profondeurs y augmentent d'abord et diminuent ensuite, en même temps que la courbure ; mais la mouille présente deux fosses (15 m. 80 et 15 m. 20), distantes de 850 mètres et séparées par un haut-fond relatif (11 m. 80).

La sinuosité qui vient ensuite est courte. Son développement (1700 mètres) est à peine deux fois et demie la largeur moyenne (690 mètres). La relation

entre les courbes et les profondeurs n'y apparaît pas. C'est dans cette région du fleuve qu'ont été exécutés, de 1894 à 1897, les grands dragages des passes de Melsele et de Krankeloon.

Dans les deux sinuosités suivantes, de 2900 mètres sur la rive gauche, et de 3900 mètres sur la rive droite, les lignes qui, sur le diagramme, représentent les courbures, sont sensiblement parallèles à celles qui, d'une manière générale, représentent les profondeurs. L'écart des deux maigres et des deux mouilles y est d'environ 400 mètres.

Ainsi, sur l'Escaut maritime comme sur la Garonne, et comme sur la rivière artificielle de Bordeaux, le chenal est d'autant plus profond que la courbure concave est plus prononcée. Au maximum et au minimum de la courbure correspondent respectivement le maximum et le minimum de la profondeur. Cette correspondance n'a pas lieu dans le même profil transversal ; la mouille est en aval du sommet concave et le maigre est en aval de l'inflexion ou de la surflexion. L'écart de la mouille varie entre le quart et le cinquième de la longueur de la *courbe* ; l'écart du maigre varie dans des limites plus étendues, sans doute à cause des variations que présente la largeur.

Les hauts-fonds les plus saillants correspondent aux parties du lit où se trouvent les plus longs alignements droits formant inflexion ou surflexion.

Le chenal est stable et profond partout où la courbure de la rive concave varie d'une manière continue.

Enfin, en ce qui concerne la loi du développement, les faits observés sur l'Escaut maritime ne sont pas

assez nombreux pour qu'on puisse, pour le moment du moins, les rapprocher utilement de ceux observés sur d'autres rivières. Il semble toutefois que la période de l'oscillation du chenal d'une rive à l'autre est comprise entre 3.200 et 4.000 mètres.

En résumé, dans l'Escaut, aux abords d'Anvers, où la marée a une grande amplitude, il existe, entre les courbures et les profondeurs, des relations analogues à celles qui ont été constatées sur les rivières à un seul courant.

Il en est très vraisemblablement de même pour la Garonne maritime jusqu'à l'estuaire de la Gironde. Le diagramme dressé par les ingénieurs et présenté au congrès de navigation de 1894, ne s'étend pas en aval de l'île Lalande. La largeur, dont l'action sur la profondeur du chenal est du même ordre que celle de la courbure, y varie entre des limites étendues et parfois très brusquement. Il est donc difficile de démêler dans le résultat la part de chacune des deux causes.

Ces sortes d'études sont compliquées, comme l'ont constaté les ingénieurs de la Garonne et de la Seine maritimes (voir la pièce annexe V, *a* et *b*). Il est à désirer néanmoins qu'elles soient faites sur d'autres fleuves et rivières. Leur conclusion restera sans doute la même. Mais alors les lois de l'hydraulique fluviale pourront être déclarées générales et applicables aux rivières dans toute leur étendue, y compris la portion de leur cours où il y a renversement du courant sous l'action de la marée.

Pour les estuaires, la question est toute différente, et elle n'est pas abordée ici. Il en sera seulement dit quelques mots au paragraphe 3 du chapitre II.

## § 7. — LARGEUR DU LIT MOYEN

**La Garonne.** — Résultats des travaux antérieurs à 1863. — Dans les parties du cours de la Garonne où le lit moyen a été fixé par des travaux, de 1839 à 1863, l'écartement des rives n'est pas uniforme. Il ne varie pas entre des limites très étendues : c'est seulement sur un très petit nombre de points qu'on trouve les chiffres extrêmes de 150 mètres et de 250 mètres ; partout ailleurs la largeur varie entre 170 et 190 mètres. Mais ces irrégularités sont plutôt accidentelles que systématiques. Tout indique que, en principe et dans la pensée des auteurs des projets, la largeur devait avant tout être moindre que la largeur naturelle ; elle devait être constante sur de petites longueurs et croître proportionnellement à la distance pour les travaux de grande étendue. Le rétrécissement a été général, comme le montrent les figures 3, 4 et 5 ; mais les deux autres règles n'ont pas toujours été observées sur les plans, ni exactement réalisées sur les chantiers ; les inégalités sont réparties comme au hasard, ou du moins sans motif apparent, et la largeur du lit semble avoir été regardée comme un facteur d'importance secondaire qu'on pouvait, sans inconvénient, faire varier arbitrairement dans des proportions notables.

A ne considérer que chaque passage maigre en particulier, les résultats ont été pour la plupart satisfaisants et la navigabilité de la Garonne, dans le département de la Gironde, est certainement meil-

leure aujourd'hui qu'en 1832. Mais, outre qu'ils ont été incomplets sur certains points, ces résultats ont été, dans leur ensemble, accompagnés d'un phénomène qui, sans avoir été absolument imprévu, a atteint des proportions auxquelles les ingénieurs étaient loin de s'attendre, et qui auraient pu compromettre totalement le succès de l'entreprise. Nous voulons parler de l'abaissement de l'étiage.

Les figures 39 et 39 *bis* (pl. XIV et XV) représentent synoptiquement les profils en long de quatre étiages extrêmes de la Garonne, sur 70 kilomètres, entre la limite du département de la Gironde et Bordeaux. En aval d'Arbanats, où l'action de la marée se fait fortement sentir, le niveau des basses mers d'étiage a peu changé dans la période de 42 ans, de 1832 à 1874. Mais en amont, sur une longueur de 45 kilomètres, l'abaissement moyen, dans cette même période, a été de 0 m. 90. Il présente trois maxima qui correspondent à des rapides de l'étiage de 1832, savoir :

A Barie-Caudrot, l'abaissement a été	
de . . . . .	1 m. 80
A La Garonnelle, l'abaissement a été	
de . . . . .	1 m. 38
A Podensac, l'abaissement a été de . . . . .	1 m. 41

Les échelles hydrométriques de Barie et de Caudrot sont situées immédiatement en amont d'un groupe d'anciennes îles (des Trois-Cousins, de l'Espérance) dont les faux-bras ont été entièrement barrés et complantés de saules, de 1845 à 1850. et au travers desquelles on a ouvert le lit moyen actuel.

A La Garonnelle, un second groupe d'îles (de

Gruère, du Port et des Carrots) a été traité de même. Toutefois, sur la demande des intéressés, le faux-bras de rive gauche n'a été fermé que partiellement à son origine et laissé ouvert à son extrémité.

A Podensac, on en a usé de même pour l'île des Marguerites et celle du Grand-Vert. Le faux-bras de rive droite a été laissé ouvert à ses deux bouts.

Cet abaissement considérable de l'étiage a été utile à la navigation en aval de Castets, car il a permis à l'action de la marée de s'étendre beaucoup plus loin qu'auparavant

Mais, au-dessus de Castets, la pente des eaux basses a été augmentée et de nouveaux seuils ont apparu, en sorte que la navigabilité de la Garonne supérieure, malgré de dispendieux travaux du même genre, n'a été améliorée que dans une assez faible mesure.

Ce grave mécompte aurait été évité ou notablement amoindri si, au lieu de creuser, à la traversée des archipels, un lit presque rectiligne et uniformément rétréci, on avait utilisé l'un des faux-bras pour établir une sinuosité d'un développement convenable, avec un rétrécissement borné aux abords immédiats du seuil à abaisser. La pente des eaux basses aurait été moins profondément, et surtout moins inutilement modifiée.

Il est clair en effet que le but qu'on se proposait a été considérablement dépassé. On voulait seulement dégraser les maigres qui existaient à l'étiage de 1832. Or, c'est tout l'ensemble du lit qui a été déblayé ; les anciennes grèves ont été remaniées et amoin-

## PLANCHE XIV

### PROFIL DE L'ABAISSEMENT DE L'ÉTIAGE DE LA GARONNE

(Fig. 39 ; voir la suite à la planche XV)



Abaissement total de l'étiage durant la période de 42 ans de 1832 à 1874

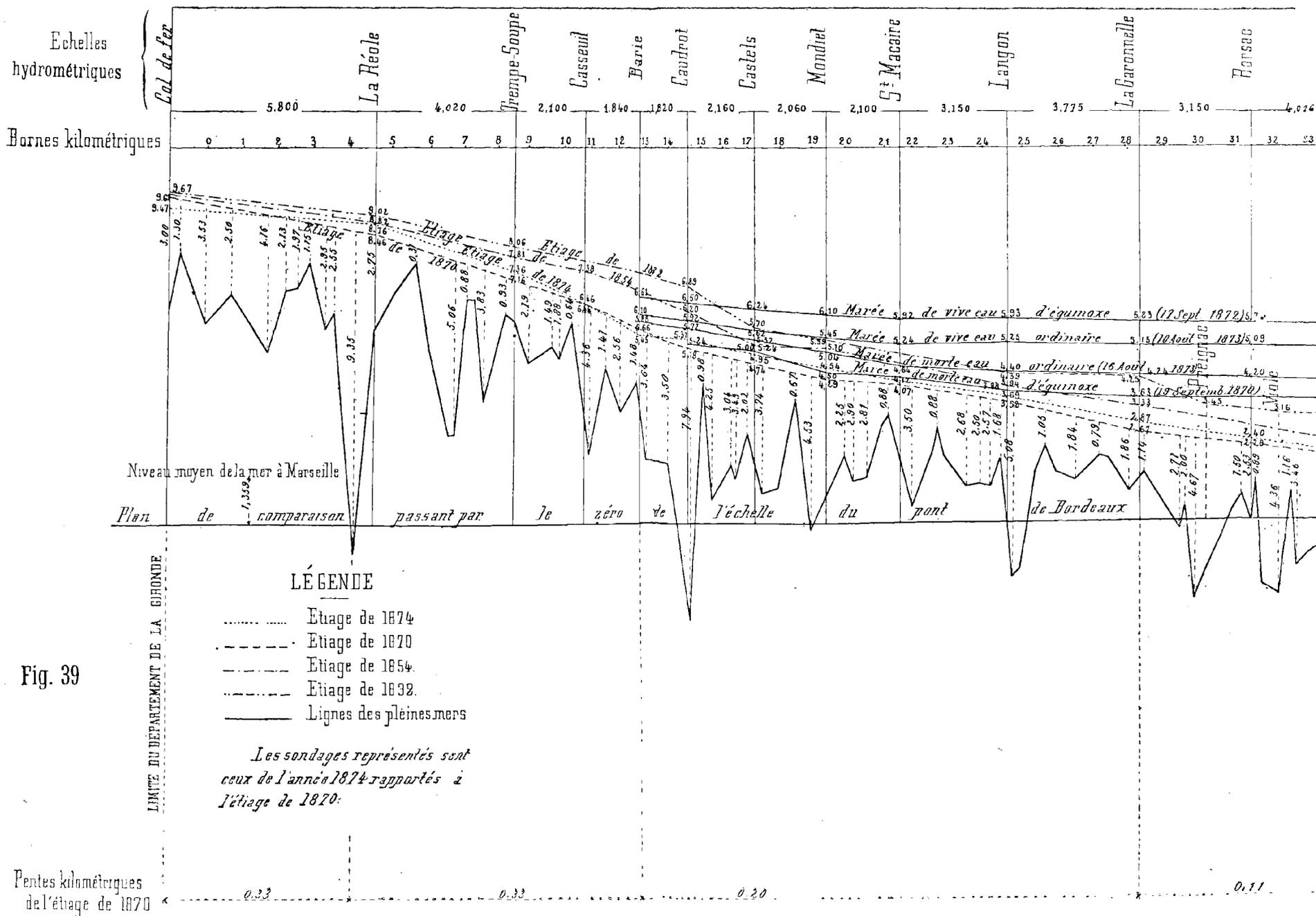


Fig. 39

Les quatre années 1832, 1854, 1870 et 1874 ont été entièrement sèches. Le débit de la Garonne est descendu à un minimum remarquable. A défaut de jaugeage précis, on a, pour comparer les trois premiers de ces minima, les lectures qui ont été faites à deux échelles hydrométriques placées à deux points extrêmes où le lit moyen n'a pas subi de modification notable, savoir :  
 Tonneins (Lot-et-Garonne) à 100 kilomètres de Bordeaux : en 1832, 0 m. 00 ; en 1854, 0 m. 12 ; en 1870 — 0 m. 10 (Fond rocheux).  
 Bordeaux (Basse mer) : en 1832, 0 m. 00 ; en 1854 + 0 m. 10 ; en 1870 — 0 m. 02.  
 Ces chiffres montrent que l'on peut considérer le débit auquel la Garonne a été réduite pendant l'étiage de 1832 comme le minimum absolu de ce débit, évalué à 86 mètres cubes par seconde, et qu'on peut, avec une approximation suffisante, considérer les étiages de 1854 et 1870 comme ayant reproduit ce minimum.  
 Le débit de l'étiage de 1874 a été l'objet d'un jaugeage précis dont le résultat est 91 mètres cubes par seconde.  
 Les différences que présentent les nivellements de ces quatre étiages peuvent donc être regardées comme représentant les abaissements qu'a subis le niveau de l'étiage absolu de la Garonne.

Dressé par l'ingénieur ordinaire soussigné :  
 Bordeaux, le 30 janvier 1875.

Signé : FARGUE.



dries ; leurs matériaux ont été entraînés par les courants et sont allés se déposer en aval. Pour en apprécier la masse, il faudrait superposer synoptiquement les profils en travers actuels et les plus anciens, ceux de 1839 par exemple. Ce travail n'a pas été fait, mais il serait bien à désirer qu'il le fût. Le gros chiffre auquel on arriverait mettrait en évidence les inconvénients du système du rétrécissement systématique du lit. Il expliquerait aussi les encombrements qu'on a constatés dans les rades et dans les chenaux en aval de Bordeaux.

Il est incontestable en effet que, en aval de Portets, le fond s'est exhaussé. L'étiage n'a pas subi de surélévation sensible, mais l'exhaussement du fond a été constaté sur un grand nombre de points. D'après certains calculs qui remontent à 1880, la partie de la Garonne comprise entre Portets et Bordeaux recevrait, en moyenne, par an, 300.000 mètres cubes de matériaux de plus qu'elle n'en écoule par l'aval. En supposant que cet apport ait été constant pendant les quarante années qui se sont écoulées, depuis le commencement des travaux jusqu'en 1880, on arrive au chiffre de 12.000.000 de mètres cubes. D'un autre côté, on peut admettre, au moins à titre d'approximation, que l'abaissement du fond, en amont de Portets, a été, en moyenne, égal à celui de l'étiage, c'est-à-dire de 0 m. 90, sur 45 kilomètres de longueur et une largeur moyenne de 220 mètres ; dans ces conditions, le débit opéré serait évalué au chiffre de 9.000.000 de mètres cubes.

**Bons passages.** — Au cours de la discussion qui précède, il a été dit qu'on aurait pu, pour améliorer la navigabilité de la Garonne, se borner à en rétré-

cir le lit aux abords immédiats de chaque maigre trop saillant, en conservant partout ailleurs les largeurs naturelles. Cet aperçu est confirmé par l'examen détaillé de la répartition des largeurs dans les bons passages de la rivière, c'est-à-dire ceux où le maigre a une profondeur supérieure à la moyenne : 1 m. 69.

Ces passages sont au nombre de six, dont trois dans la partie de 22 kilomètres où le lit moyen a été fixé, et trois en aval de Barsac où les rives sont presque partout à l'état naturel et où l'action de la marée commence à être puissante.

*Courbe C.* — Le premier, à partir de l'amont, est celui de la *courbe C* (entre les bornes kilométriques 12 et 14). Il en sera question ci-après.

*Courbe D.* — La *courbe D* se trouve au confluent de la rivière du Drot. Les courbures y sont très prononcées et leur succession est discontinue. Malgré cette discontinuité, le maigre d'aval a une profondeur sous l'étiage de 2 m. 63. Or, les largeurs du lit sont ainsi distribuées :

A l'inflexion d'amont . . . . .	180 m.
Au sommet. . . . .	250 m.
A l'inflexion d'aval . . . . .	180 m.

Le lit est resserré aux inflexions et renflé au sommet.

*Courbe G.* — Le bief correspondant à cette *courbe* se termine par un maigre sur lequel, aux sondages de 1863, il existait une profondeur de 1 m. 22; c'était la *passé de Mondiet*, du nom d'un hameau voisin. A la fin du printemps de 1865, la baisse des eaux ayant été exceptionnellement rapide, le chenal d'étiage n'eut pas le temps de se creuser sous l'action des

PLANCHE XV

PROFIL DE L'ABAISSEMENT DE L'ÉTIAGE DE LA GARONNE (*Suivre*)

(Fig. 39 *bis*)



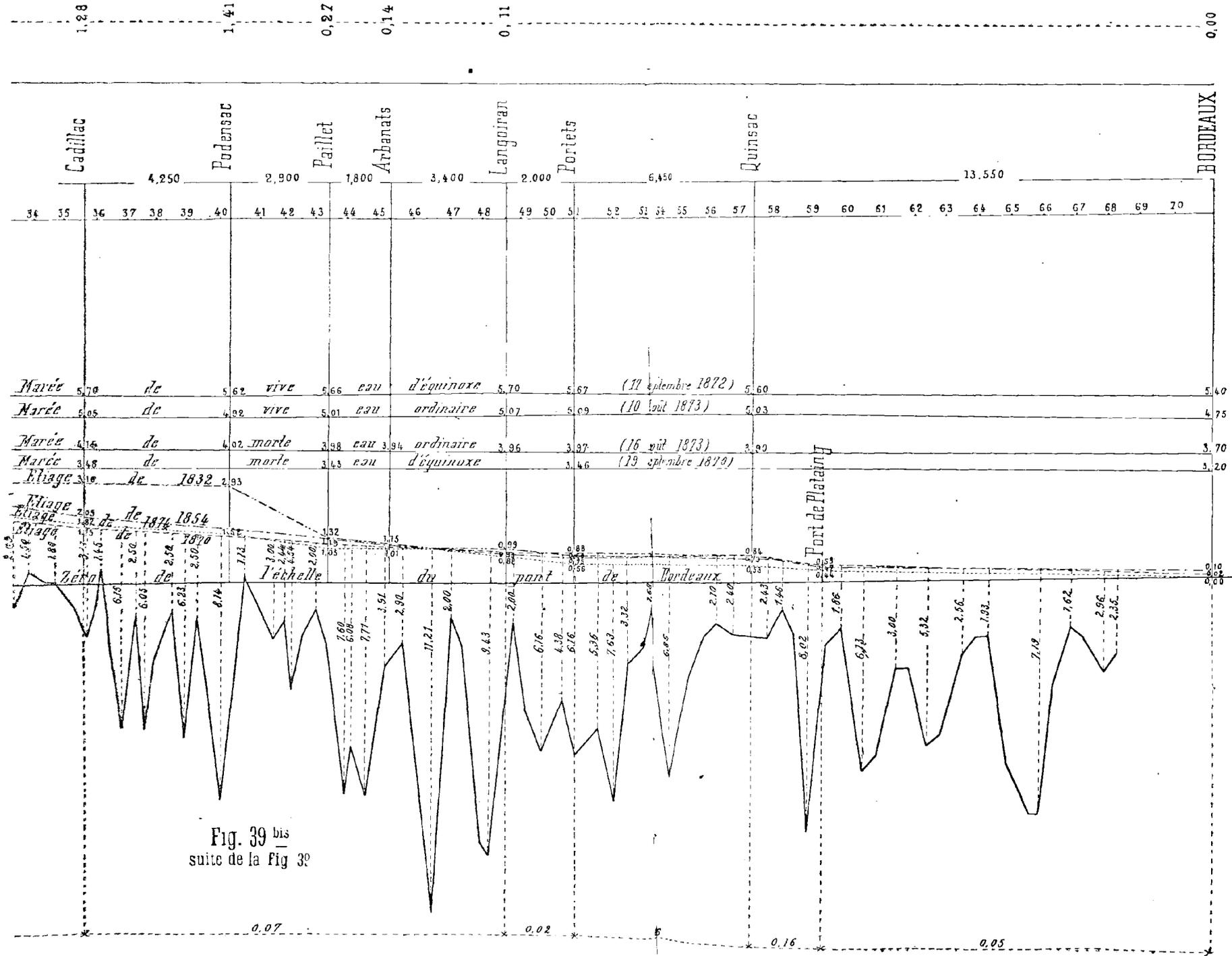


Fig. 39 bis  
suite de la Fig 39



eaux moyennes, et, aux eaux basses, la passe de Mondiet présentait une profondeur de 0 m. 75 seulement. Ce seuil constitua un véritable barrage en écharpe sur lequel vinrent s'échouer plus de vingt-cinq gabares ; le service des bateaux à vapeur fut interrompu et la navigation littéralement interceptée. La passe fut dégagée par un sillon de dragages, et, sur leur proposition, les ingénieurs furent autorisés, dès l'année suivante, à modifier la forme des rives en vue de rendre définitif l'approfondissement créé par la drague. Les rives étaient artificielles, leur construction remontait à 1845-1852, c'est-à-dire à la même époque que celles de la passe précédente. Mais la distribution des largeurs avait été faite en sens inverse. L'écartement des rives est à peu près régulièrement de 170 mètres partout, à l'exception de l'emplacement du maigre, où la largeur était de 185 mètres.

Guidés par l'exemple de la *courbe D*, les ingénieurs ont réduit à 165 mètres la largeur à l'inflexion en faisant avancer la rive gauche. Le résultat a été complètement satisfaisant : après un second dragage exécuté en 1867, suivant une direction en harmonie avec la nouvelle forme des rives, la passe s'est approfondie à 2 m. 20 au-dessous de l'étiage. Cette grande profondeur s'est maintenue longtemps sans dragages nouveaux ; la passe de Mondiet est comptée désormais au nombre des passages les plus sûrs et les plus faciles de la navigation entre Castets et Bordeaux.

*Passe de Cadroy.* — Cette passe est en aval de Barsac, au droit de la borne 46. Avant 1870, il y existait un seuil très maigre où la profondeur à

l'étiage était de 1 mètre seulement. Les rives artificielles qui ont été établies sur ce passage, de 1870 à 1874, ont été tracées de manière à y ménager une largeur de 160 mètres. La largeur au sommet d'amont est de 220 mètres. La succession des courbures ne présente aucune particularité notable. La passe de Cadroy, après avoir été ouverte par un dragage, s'est approfondie à 2 m. 90. Elle s'est maintenue depuis, sans nouveau dragage, à cette profondeur, dans une direction fixe et stable.

*Passage de Portets.* — Vis-à-vis Portets, borne kilométrique n° 51, le chenal passe de la rive droite à la rive gauche sans que cette traversée soit, comme il arrive généralement, accompagnée d'un seuil gênant pour la navigation. Or les rives, qui sont à l'état naturel et dont les sinuosités sont quelconques, présentent les écartements suivants :

A l'amont, entre les bornes 49 et 51, de 250 à 300 mètres.

A la traversée, entre les bornes 51 et 51 *bis*, 200 mètres.

En aval, vers la borne 53, 320 mètres.

*Passage de Quinsac.* -- Entre les bornes 60 et 62, le lit de la Garonne est à l'état naturel ; il est presque rectiligne et présente une largeur réduite à 240 mètres. Le thalweg passe de la rive gauche à la rive droite, et cette traversée se fait avec une profondeur dépassant 5 m 50. En amont et en aval se trouvent des courbes très prononcées, aux sommets desquelles se sont formées des îles (île Lalande, île des Juifs) Les largeurs cumulées des deux bras donnent respectivement, aux deux sommets, les

chiffres de 400 et 500 mètres. L'écartement maximum des rives extrêmes, y compris la largeur des îles, est de 900 mètres pour l'île Lalande et de 700 mètres pour l'île des Juifs.

Les bons passages de la Garonne, au nombre de cinq, ci-dessus énumérés présentent donc à la fois un seuil stable et profond et un lit rétréci au point où se fait l'inversion de la courbure.

*Courbe C.* — Avant de généraliser, il convient de remarquer que cette liste des seuils profonds n'est pas complète ; il y manque celui de la *courbe C*, située entre les bornes kilométriques 12 et 14. Ainsi qu'il a été dit au chapitre I, cette *courbe* présente des courbures dont l'itinéraire se rapproche beaucoup du type sinusoïdal, et est suivie d'un seuil exceptionnellement profond : 4 mètres au-dessous de l'étiage. Or, les largeurs y sont ainsi réparties :

A l'inflexion d'amont.	190 m.
Au sommet . . . . .	150 m.
A l'inflexion d'aval. . . . .	180 m.

Le lit est renflé aux inflexions et resserré au sommet, disposition inverse de celle signalée ci-dessus

**Loi expérimentale.** — En conséquence, la règle générale peut être ainsi formulée :

« Pour que le chenal, à la traversée d'une rive à l'autre, soit profond et stable, il faut que la partie rectiligne du lit soit plus étroite que les parties voisines présentant une courbure prononcée »

Et, pour tenir compte de tous les faits, il convient d'ajouter ce scolie :

« Cette disposition n'est pas toujours absolument

« nécessaire et une bonne répartition des courbures  
« peut y suppléer. ».

Ainsi libellée, cette règle est pleinement confirmée par les observations faites sur la Seine maritime (Voir la pièce annexe IV, § 1-C).

Dans tous les cas, le resserrement à l'inflexion ne peut que donner de bons résultats : c'est une disposition en harmonie avec le régime des bonnes passes dans une rivière à fond mobile.

Pour le montrer, nous rappellerons sommairement les phénomènes qui caractérisent la mobilité du lit d'une rivière, en nous bornant à ce qui se rattache directement à notre sujet.

**Débit solide.** — Une rivière à fond mobile ne débite pas seulement de l'eau ; elle débite aussi des matériaux solides. Chaque année, par exemple, dans la partie de cette rivière comprise entre deux sections déterminées, il arrive de l'amont une certaine quantité de galets, graviers, sables et limons ; une certaine quantité de ces mêmes matières sort par la section d'aval. Si ces deux quantités sont égales, le régime est stable. Si le débit entrant est supérieur au débit sortant, le fond est en exhaussement ; si la différence est en sens inverse, le fond se creuse et par conséquent le niveau de l'étiage s'abaisse.

La permanence du régime est donc subordonnée à la condition que *le débit solide soit constant dans toute l'étendue de la rivière*, formule simple, mais qui implique en réalité des relations fort complexes entre un grand nombre d'éléments.

*Faits observés dans les rivières.* — Il est très difficile de mesurer, même grossièrement, le débit solide

d'une rivière. On arrive assez facilement à jauger les limons tenus en suspension dans l'eau ; nous citerons notamment les intéressantes expériences faites par Baumgarten (1) et qui établissent que chaque année la Garonne charrie à Marmande plus de 5 millions de mètres cubes de limons. Mais on n'a pas, que nous sachions, entrepris d'expériences précises pour évaluer les quantités de graviers, sables et limons traînés sur le fond du lit, c'est-à-dire la partie du débit solide dont le régime intéresse surtout la navigation.

Dans leur charriage de l'amont vers l'aval, les gros matériaux subissent des chocs et des frottements qui les usent et les triturent, amoindrissent leurs dimensions et les rendent de plus en plus mobiles, de plus en plus faciles à entraîner. Ce travail, longtemps continué, finit par transformer en limon tenu ce qui, à l'origine, était sable, gravier et même galet. Il s'opère donc, de l'amont vers l'aval, une transformation dans la qualité et dans le mode de transport du débit solide : le débit en gros matériaux traînés sur le fond, qui n'a lieu que sous l'influence de vitesses notables, va en diminuant ; celui des matériaux tenus, en suspension dans l'eau et obéissant aux faibles vitesses, va au contraire en augmentant.

La condition de la permanence du régime de la rivière est donc que la trituration des matériaux soit normale, c'est-à-dire dans un certain rapport avec le profil en long : il faut qu'aucun galet ou gravier

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, 1848, 2<sup>e</sup> semestre, pages 46 et 48.

ne parvienne en un point quelconque de ce profil que suffisamment atténué pour pouvoir être ultérieurement remis en marche par les courants qui se développent en ce même point. Si, pour une cause quelconque, naturelle ou accidentelle, cette condition n'est pas remplie, les masses de gros matériaux que poussent en avant les crues maxima s'arrêtent en certains points, forment des dépôts que ne reprennent pas les crues subséquentes, dont l'arrêt en un mot est définitif, et qui constituent par conséquent des parties *immobiles* dans le fond mobile de la rivière. Ces dépôts, sur lesquels les courants sont sans action, deviennent dans une rivière à l'état naturel des causes de changement du lit, par corrosion des berges. Dans une rivière à berges fixes, artificiellement aménagée pour les besoins de la navigation, il faut les enlever artificiellement; il faut les draguer toutes les fois qu'ils se reforment. Ce serait déplacer, ce serait même compliquer la difficulté que de chercher à s'en débarrasser en les poussant en avant au moyen de modifications introduites dans les formes du lit de la rivière.

Nous ne parlerons pas ici de ces dépôts *immobiles*; nous ne nous occuperons que des portions réellement *mobiles* du lit, c'est-à-dire des matériaux solides traînés sur le fond, qui ne subissent, dans leur transport vers la mer, que des arrêts intermittents.

Dans une rivière à fond mobile et à un seul courant, l'écoulement des matériaux solides a toujours lieu dans le même sens, de l'amont vers l'aval, non d'une manière continue, mais par intermittences. Il est très faible ou nul à l'étiage. Quand une crue sur-

vient, les matériaux se mettent en mouvement, les plus ténus les premiers, les plus lourds les derniers. Au maximum de la crue, le débit solide acquiert sa plus grande intensité. A la décrue, c'est-à-dire pendant la période décroissante de la crue, les matériaux s'arrêtent successivement et se répartissent suivant leur grosseur et suivant les forces auxquelles ils sont soumis.

Les eaux de crue étant toujours troubles, ces diverses phases du phénomène ne sont pas visibles ; sur la Garonne, elles sont facilement perceptibles par le bruissement dont elles sont accompagnées et qui provient du frottement des cailloux et graviers les uns contre les autres. Ce bruissement, qui rappelle le pétilllement d'un vin mousseux, s'entend partout, aussi bien dans les coudes que dans les parties droites de la rivière. Le mouvement des matériaux est donc général pendant l'étale de la crue. Dès que la baisse se fait sentir, le bruissement s'affaiblit, le mouvement diminue et c'est alors que le profil transversal du lit prend la forme qu'il conservera jusqu'à la crue suivante.

Il est clair qu'un projet d'amélioration d'une rivière navigable ne saurait avoir pour objet d'annuler le débit solide. Il faut se proposer seulement de régler, au mieux des intérêts de la navigation, cette répartition des matériaux qui caractérise la période critique et décisive de la décrue.

Le problème est très indéterminé parce que les données expérimentales manquent jusqu'à présent. On a fait beaucoup de théories sur le mécanisme en vertu duquel les matériaux traînés par la crue sur le fond du chenal, le long de la concavité, ne s'y arrê-

tent pas et vont finalement se déposer le long de la convexité, mais on n'a pas encore vu comment les choses se passent réellement et on n'a pas saisi en quelque sorte le phénomène sur le vif. Les ingénieurs de la Garonne l'ont essayé de plusieurs manières. Un long tube en zinc, d'un assez fort diamètre, a été, au moment d'une crue, plongé dans l'eau, par l'un de ses bouts fermé par une vitre, et on a regardé par l'autre bout resté ouvert. Le fond du tube est toujours obscur et il a été impossible d'y rien distinguer. On a descendu dans le courant une fiole vide, en verre mince et fragile, pour voir à quelle hauteur au-dessus du fond les cailloux en mouvement la briseraient : la fiole a toujours été ramenée intacte.

*Expérience du bassin tournant.* — Une seule expérience a fourni quelques indications intéressantes. C'est celle du *bassin tournant* qui a été faite plusieurs fois à Langon et à Rouen. En voici la description sommaire :

Sur un plateau circulaire horizontal est fixé un bassin cylindrique en zinc de 1 mètre de rayon, avec une paroi verticale de 0 m. 40 de hauteur. A Langon, le bassin était annulaire : la paroi intérieure avait 0 m. 50 de rayon.

Le bassin étant rempli d'eau jusqu'à une certaine hauteur, 0 m. 15 à 0 m. 20 par exemple, on fait tourner le plateau, très lentement d'abord, puis progressivement plus vite. L'eau, entraînée peu à peu par son frottement contre les parois du bassin, afflue vers la paroi concave et s'abaisse vers le centre, ou le long de la paroi convexe. Si l'expérience est conduite avec précaution, de manière qu'aucun excès brusque de vitesse relative n'existe entre le

bassin et la masse liquide, on voit bientôt la surface de l'eau affecter nettement la forme d'un parabolôide de révolution et on a sous les yeux la réalisation matérielle d'un théorème classique d'hydrostatique.

Une première série d'expériences faites à Rouen dans ces conditions simples (1) offre un certain intérêt par les chiffres qui y ont été recueillis, savoir :

Durée de la rotation . . .	5"8	4"0	3"3	2"5	2"0
Vitesse angulaire $\omega$ . . .	1,08	1,57	1,90	2,50	3,14
Relèvement $a$ observé au- dessus du niveau primitif le long de la paroi concave. . .	0 <sup>m</sup> 02	0 <sup>m</sup> 04	0 <sup>m</sup> 07	0 <sup>m</sup> 11	0 <sup>m</sup> 18
Distance verticale $2a$ cal- culée au-dessus du sommet du parabolôide . . . . .	0,04	0,08	0,14	0,22	0,36 (2)
Même distance $\frac{\omega^2}{2g}$ d'après la formule théorique . . . . .	0,06	0,125	0,185	0,32	0,50
Vitesse due au relèvement total $u = \sqrt{2g \times 2a}$ . . . . .	0,886	1,253	1,657	2,078	2,658
Rapport des vitesses $\frac{u}{\omega}$ . . . . .	0,82	0,80	0,87	0,83	0,84
				Moyenne = 0,83	

OBSERVATIONS

L'abaissement du sommet du parabolôide, en contre-bas du niveau de l'eau au repos, est égal au relèvement le long de la paroi, en sorte que la dénivellation totale est égale à  $2a$ . Cela découle immédiatement des propriétés du parabolôide de révolution.

Le rayon du bassin étant de 1 mètre, la vitesse effective de la tranche d'eau contiguë à la paroi est exprimée par le même chiffre que la vitesse angulaire  $\omega$ .

(1) Voir le compte rendu de ces expériences, annexe IV, § 1<sup>er</sup>.

(2) Dans cette expérience le centre du bassin s'est asséché; la quantité  $2a$  n'est donc pas l'expression algébriquement exacte de la dénivellation totale : mais la différence (0 m. 003 seulement) est numériquement négligeable. Voir la note sur les formules théoriques du bassin tournant, pièce annexe IV, § 2.

Le relèvement ou *dévers* total n'est, comme on le voit, que les deux tiers environ du relèvement théorique. Ce désaccord entre la théorie et l'expérience provient sans doute des forces passives dont il a été fait abstraction dans l'établissement de la formule, notamment de la résistance que l'air oppose à la rotation de l'eau. La vitesse angulaire qui a été notée par les observateurs est celle du bassin et celle de l'eau n'était probablement que  $0,83 \times \omega$  (voir la pièce annexe IV, § 2).

Dans une seconde série d'expériences, on a recouvert le fond du bassin d'une couche uniforme de sable et de gravier, et on a mis à la surface de l'eau un certain nombre de flotteurs. Les choses se passent alors de la manière suivante :

Quand le bassin met plus de quatre secondes à accomplir sa révolution, la force centrifuge ne surmonte pas les résistances, et les matériaux solides restent immobiles par rapport au bassin.

Quand la durée de la rotation n'est plus que de trois secondes et demie, quelques parties de sable et de gravier se portent isolément vers la paroi concave. Le mouvement dans le sens du rayon se généralise à mesure que la vitesse augmente et que par conséquent la force centrifuge devient prédominante. Quand la rotation ne dure plus que deux secondes et demie, la masse entière du gravier est venue s'appuyer contre la paroi concave suivant une surface plus ou moins régulière.

Les flotteurs descendent au contraire peu à peu la pente du paraboloïde et quelques-uns viennent même

échouer sur les parties asséchées de la paroi convexe ou du fond.

La rotation ayant été convenablement prolongée et le régime uniforme étant bien établi, on arrête brusquement le plateau. L'eau prend alors une double vitesse par rapport au bassin, l'une circulaire et l'autre centripète, ce qui détermine un mouvement plus ou moins tumultueux suivant que la vitesse angulaire était plus ou moins grande au moment de l'arrêt. Le creux qui s'était formé vers le centre se remplit et la surface du courant redevient peu à peu horizontale.

Le gravier, obéissant à la pression centripète de l'eau, se porte vers la paroi convexe avec d'autant plus de vivacité que la vitesse angulaire au moment de l'arrêt était plus considérable.

Quand cette vitesse est 0,74 (durée de rotation 8''5), les matériaux se répandent presque uniformément sur le fond ; le zinc n'est mis à nu que le long de la paroi concave et dans une zone peu large et discontinue.

Quand elle est 1,11 (durée de rotation 5'' 2/3), le sable et le menu gravier vont vivement à la paroi convexe ; les graviers moyens se répartissent presque uniformément, sauf le long de la paroi concave où s'arrêtent seulement quelques gros graviers.

Quand elle est 3,14 (durée 2''), tous les graviers sont d'abord projetés violemment vers le centre. Les sables fins y viennent ensuite, mais seulement après avoir décrit des spirales plus ou moins allongées sous l'impulsion combinée du courant circulaire et de la composante centripète qui persiste jusqu'à la cessation complète du mouvement de l'eau.

Les flotteurs se rapprochent généralement beaucoup de la rive concave, mais sans régularité. Cette partie du phénomène, dans laquelle la résistance de l'air paraît jouer un rôle prépondérant, n'a pas la netteté de l'autre.

Il y a une analogie évidente entre ces faits et ceux qui se sont passés dans la première rivière artificielle de Bordeaux (expériences de la série A). Dans l'un et l'autre cas, l'eau coule sur un fond mobile, entre des berges fixes tracées suivant deux arcs de cercle concentriques. Dans le bassin annulaire, le sable est reporté vers la rive convexe par une composante centripète qui a sa cause dans le mouvement circulaire de l'eau. Il est probable qu'il en est de même dans la petite rivière. Bien que les expérimentateurs ne l'aient pas noté, le niveau de l'eau s'est certainement relevé sensiblement le long de la paroi concave; car sur la Garonne, dans les coudes prononcés, on a observé, pendant les crues, des surélèvements ou *dévers* de 0 m. 20, non pas immédiatement le long de la rive concave, mais à une certaine distance, sur le point où le courant est le plus rapide. Cette circonstance rend difficiles des observations précises au moyen d'une échelle hydrométrique. Mais le phénomène est bien visible, et les bateliers l'expriment en disant que « l'eau monte tant que le fort du courant « est gonflé; quand l'eau baisse, le fort du courant se creuse ».

**Résumé.** — En résumé, sur la Garonne, les choses se passent très vraisemblablement de la manière suivante :

Pendant la crue, l'eau est relevée dans les conca-

vités; les matériaux cheminent en masse et le fond tend à se niveler, tant en long qu'en travers. Dès les premiers moments de la décrue, les gros matériaux s'arrêtent les premiers, et les bancs commencent à se reformer; la dénivellation transversale de l'eau diminue, devient nulle et s'établit même en sens contraire. Il se développe donc dans la masse du courant une vitesse transversale qui entraîne les matériaux fins à la queue des bancs.

Par conséquent, pendant la décrue, il se dépose dans une étendue déterminée de la rivière, une quantité plus ou moins grande, mais limitée, de matériaux. C'est à cette masse de dépôts qu'il faut donner artificiellement une répartition utile à la navigation. La condition nécessaire de cette répartition artificielle est que la totalité des dépôts s'arrête loin des maigres, et cette condition, si on peut la réaliser, sera suffisante, car un maigre peut toujours être creusé par un dragage à la profondeur maximum que comporte le régime de la rivière, et il s'y maintiendra si les matières ne s'y arrêtent pas.

Or, les faits suivants sont d'observation constante.  
1° Il ne se dépose pas de matériaux et l'on trouve au contraire des profondeurs le long des rives concaves et dans les traversées étroites;

2° C'est le long des rives convexes et dans les parties renflées du lit que l'on trouve, en eaux basses, les amas de matériaux connus sous les noms de grèves, bancs, etc.

On obtiendra donc le résultat voulu en resserrant le lit dans le voisinage du changement de sens de la courbure et en l'élargissement aux abords du sommet convexe.

Ce résultat, combiné avec les lois de l'écart et de la mouille et complété par des considérations de continuité sur lesquelles il est inutile d'insister, conduit au principe suivant :

*Entre deux maigres consécutifs, la largeur doit croître d'abord de l'amont vers l'aval, à mesure que le chenal s'approfondit, présenter vers la mouille un maximum d'autant plus grand que la mouille est plus profonde, et décroître ensuite graduellement avec la profondeur du chenal, pour atteindre, au maigre d'aval, un minimum qui est plus grand que le minimum initial.*

D'une manière abrégée, on peut dire que la largeur doit présenter des variations proportionnelles à celles de la profondeur.

Sur la Garonne fluviale, les largeurs normales au sommet et à l'inflexion sont respectivement 200 mètres et 150 mètres pour les courbures moyennes. Le rapport entre la plus grande et la plus petite largeur, dans l'étendue d'une même *courbe* est donc d'environ égal à  $\frac{4}{3}$ .

**La Seine maritime.** — La navigabilité de la Seine maritime, entre Rouen et la mer, a été améliorée par des travaux de resserrement dont le tracé a été fait d'après les mêmes principes que ceux de la Garonne : longs alignements droits, raccordements circulaires et largeurs variables au hasard des circonstances locales. Le résultat obtenu a été analogue : une amélioration d'ensemble, avec des lacunes et des aggravations. Les seuils qu'on se proposait d'abaisser ont disparu pour la plupart. Toutefois, quelques hauts-fonds, formés de tourbe, de

galets, de débris de roches, sont demeurés inaffouillables malgré la vitesse excessive des courants. Cette violence est devenue telle que la navigation en a été sérieusement gênée. Les étranglements du lit, exagérés dans tous les coudes et surtout dans ceux situés en aval de Caudebec et jusque dans l'estuaire même, ont été un obstacle à l'introduction du flot; ils ont sur certains points creusé des profondeurs inutiles et provoqué sur d'autres des atterrissements nuisibles; ils ont enfin contribué à accentuer la violence du mascaret.

Il a été reconnu indispensable d'atténuer autant que possible ces inconvénients. A cet effet, on a d'abord effectué de puissants dragages dans les bancs résistants, principalement dans celui dit *des Flaques*; on a ensuite élargi le lit sur trois points :

Au débouché dans l'estuaire, en reculant la digue Nord (rive droite du fleuve);

Et dans les coudes de Tancarville et d'Aizier, en rescindant profondément la rive convexe.

Ces élargissements, bien que non encore complètement terminés, ont beaucoup amélioré la situation. Le flot entre et se propage mieux, les courants sont moins excessifs et le mascaret est moins violent.

Ces faits montrent que le resserrement du lit d'une rivière, surtout d'une rivière à marée, est un moyen d'amélioration dont il ne faut user qu'avec une grande prudence, en tenant compte de tous les éléments de la question, résistance du fond, courbures, débit du jusant, volume d'eau introduit par la marée (1), etc.

(1) Voir le mémoire présenté au 6<sup>e</sup> congrès de navigation (1894) par MM. Mengin-Lecreux et Guiard.

**Tracé des rives à l'inflexion.** — Le chenal, après avoir longé une rive concave, doit s'en éloigner et venir se placer le long de l'autre rive, devenue concave à son tour. Pour que, dans cette traversée, il soit stable et profond, il faut qu'il existe sur chaque rive une grève permanente, c'est-à-dire se reformant à chaque décrue, avec les mêmes dimensions, et que les deux grèves encadrent un lit d'étiage notablement moins large que le lit moyen.

Il semble même, au premier abord, que les deux grèves devraient avoir la même largeur et la même saillie. Mais l'observation montre que cette traversée idéale n'est jamais réalisée par la seule action de la forme du lit moyen, et on ne l'obtient généralement que par des travaux du lit mineur, des épis d'étiage notamment.

L'observation montre également que, quand la courbure est peu prononcée, la convexité n'est pas toujours accompagnée de dépôts. L'égalité des grèves et la loi des dépôts (1) ne sont donc que des hypothèses, et les déductions qu'on en peut tirer ne doivent être considérées que comme de simples indications.

Quelle forme faut-il donner aux rives du lit moyen pour que, à la traversée du chenal, les grèves soient permanentes et que le maigre atteigne son maximum de profondeur ? Cette question n'est pas, pour le moment, susceptible d'une solution solidement basée sur des faits précis. L'influence des convexités sur les grèves n'a pas été étudiée comme celle des concavités

(1) Voir le § 4, 2<sup>o</sup>, de l'étude insérée dans les *Annales des Ponts et Chaussées* d'octobre 1882.

sur les profondeurs. Les plans de sondages de la Garonne fournissent à ce sujet des indications confuses et on n'y a démêlé aucune loi. Quelques chiffres ressortent des observations faites sur la petite rivière de Bordeaux, mais ils ne sont pas probants et ne jettent qu'une faible lumière sur la question. Ils ne sont donnés ici que sous toutes réserves.

La figure 34 (planche XII, montre que, sur le profil en long de la ligne de faite, c'est-à-dire du lieu des points de moindre profondeur au-dessous, et de plus grande saillie au-dessus de l'étiage, la *pente* est beaucoup plus raide que la *rampe*. Le point où cette ligne émerge est situé à 4 m. 40 en moyenne en aval de l'origine de la courbe convexe : son point culminant est à 2 m. 50 en aval du sommet de cette courbe. Le point où elle plonge sous l'étiage se trouve à 2 m. 50 en moyenne *en amont* de l'extrémité de la convexité.

En résumé, la tête et le sommet de la grève ont respectivement pour coefficient d'écart 0,35 et 0,20. Pour la queue de la grève, ce coefficient est négatif : — 0,20.

Ce dernier résultat paraît être anormal et à sans doute pour cause une défectuosité du tracé adopté. Il semble notamment que la plus grande largeur du lit aurait dû se trouver à la mouille et non au point de plus grande courbure. Par là, la grève aurait été reportée vers l'aval, et, en supposant que par ailleurs les choses fussent restées les mêmes, l'écart de la queue de la grève aurait été + 0,75 environ.

Quoi qu'il en soit de cette correction, ces chiffres montrent tout au moins que la loi des dépôts est plus compliquée que celle du chenal.

On a vu en effet que la loi du chenal, consistant en ce que *la profondeur est l'intégrale de la courbure*, a été déduite d'un fait d'observation qui est la loi de l'écart et de la mouille. Or, la loi de l'écart n'est pas spéciale au chenal d'une rivière navigable. Elle existe très probablement pour les grèves ou bancs, comme l'indique la figure 33 (pl. XII). Elle se manifeste en cosmographie et en électricité. Les maxima et les minima, quotidiens et annuels, de la chaleur solaire se font sentir après midi et après minuit — après les solstices d'été et d'hiver. Les maxima et les minima des marées suivent de trente-six heures les syzygies et les quadratures. Enfin, le retard, ou, comme disent les électriciens, le *décalage* de l'intensité des courants alternatifs, par rapport à la force électromotrice qui les produit, se rattache à la même loi générale.

Cette loi doit se retrouver dans tous les phénomènes naturels où les forces en jeu ont une résultante dont l'intensité est périodique, c'est-à-dire varie périodiquement autour d'une certaine moyenne. Dans ce cas, le maximum de l'action produite n'a pas lieu au moment où la résultante acquiert son maximum d'intensité, mais bien au moment où la somme ou *intégrale* des actions qu'elle exerce *dans le même sens* atteint son maximum. Or, ce moment est celui où la force résultante cesse d'être supérieure à la moyenne, pour rester ensuite au-dessous. L'intervalle entre ces deux moments est plus ou moins grand suivant que la loi de périodicité est plus ou moins compliquée.

Il est donc certain qu'il existe, pour les grèves ou bancs des rivières navigables, une loi analogue à

celle du chenal. C'est seulement quand cette loi aura été établie expérimentalement que l'on pourra aborder et traiter d'une manière rationnelle la question de la largeur du lit et de la courbure des rives aux abords de la traversée du chenal d'une rive à l'autre.

**Rapport entre la largeur du lit et la longueur de la courbe.** — En attendant, et à titre de contribution à cette future étude, nous consignerons ici la remarque suivante :

Ainsi qu'on l'a vu au paragraphe 4, l'écart du maître, comme celui de la mouille, comparé au développement de la *courbe*, a pour coefficient normal 0,25. Si on le compare à la largeur du lit, on trouve très généralement qu'il en est le double. C'est la proportion qu'on a constatée sur tout le cours de la Garonne dans le département de la Gironde, en faisant abstraction des passages où le lit a une forme anormale ou exceptionnelle. On l'a constatée aussi sur la petite rivière de Bordeaux, sur l'Escaut maritime et sur la Seine maritime (Voir la pièce annexe V, C).

Il suit de là que la largeur serait normalement égale au huitième de la longueur de la *courbe*.

C'est en effet la proportion que l'on trouve très généralement, et on peut l'adopter comme la proportion type.

Ainsi, entre deux inflexions consécutives, le développement normal d'une rivière navigable est de huit fois sa largeur minimum, et on peut ajouter que ces huit largeurs se répartissent généralement de la manière suivante : cinq pour la partie où la cour-

bure est prononcée et où se trouvent le chenal profond, le sommet et la mouille; et trois pour la partie où la courbure est faible, où se fait la traversée et où se trouvent l'inflexion et le maigre.

---

## CHAPITRE II



## DÉDUCTIONS

## SOMMAIRE :

- § 1. — Equations des lois empiriques.
- § 2. — Lit rectiligne.
- § 3. — Lit curviligne.
- § 4. — La *Petite-Seine* et les expériences

## CHAPITRE II

### DÉDUCTIONS

---

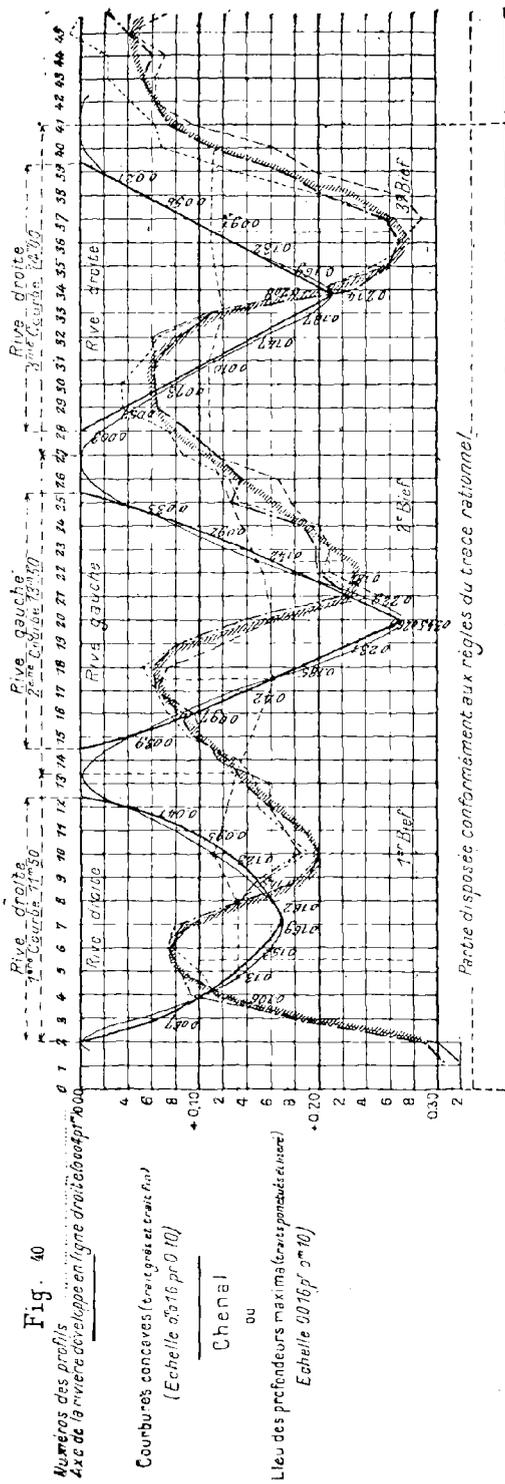
#### § 1. — ÉQUATIONS DES LOIS EMPIRIQUES

Les lois empiriques énoncées dans le paragraphe 4 du chapitre I ne sont évidemment que des expressions particulières de la relation générale qui existe entre les courbures du lit et les profondeurs du chenal. Cette relation n'est autre que celle qui existe entre les deux courbes de l'itinéraire.

Or, pour un même bief, ces courbes sont l'une et l'autre périodiques; elles ont même période et sont écartées l'une de l'autre d'une quantité qui, dans les circonstances normales, est égale au quart de la période. Comme ce sont là les caractères de la relation qui existe entre une fonction sinusoïdale et sa dérivée, on est conduit à vérifier expérimentalement si l'une des deux courbes du diagramme synoptique peut être considérée comme la dérivée de l'autre.

Cette vérification a eu lieu d'abord sur la petite rivière artificielle de Bordeaux où elle a été facile. Elle a ensuite été étendue à la Garonne où elle a donné d'intéressants résultats.

*Rivière artificielle. — Comparaison du chenal et des courbures.* — Parmi les expériences faites sur la



petite rivière artificielle de Bordeaux, il en est trois qui ont eu une certaine durée et dont les résultats ont présenté une concordance remarquable. Ce sont celles qui ont été groupées dans une série spéciale désignée par la lettre C.

Considérons le diagramme comparatif du chenal et des courbures correspondantes à ces expériences.

La figure 40 ci-contre est la reproduction abrégée de la figure 33.

Les courbures sont celles des rives concaves : elles sont représentées

par une série d'arcs curvilignes qui, comme il a été dit ci-dessus, sont discontinus à leurs raccordements entre eux et avec l'axe des abscisses. Or, la discontinuité n'est pas dans la nature du phénomène qui nous occupe. Les raccordements par *point saillant* sont défectueux et il aurait évidemment mieux valu les éviter. Il faut en faire abstraction dans la discussion des résultats généraux. La courbure, comme la plupart des quantités qui interviennent dans le phénomène, est tantôt positive et tantôt négative ; elle s'annule ; elle n'excède pas certaines limites et passe périodiquement par les mêmes valeurs. Elle est donc une fonction plus ou moins complexe du sinus de la variable  $s$ , c'est-à-dire de la longueur de l'axe de la rivière comptée à partir d'une certaine origine.

Par conséquent, il est permis de considérer au lieu du *trait gras* de la figure 40, une courbe sinusoidale continue telle que celle représentée par un trait *fin*. On peut même dire en toute vérité que, par cette substitution, nous éliminons en quelque sorte les défectuosités accidentelles de l'expérience et que nous nous rapprochons davantage de la réalité dans ce qu'elle a d'essentiel.

Un raisonnement analogue nous conduit à représenter le chenal correspondant par une courbe sinusoidale indiquée sur le diagramme par un liseré.

Le trait fin se décompose, de l'amont à l'aval, en trois *courbes* et le liseré en trois *biefs*.

Si nous comparons les *courbes* et les *biefs*, nous constaterons d'intéressantes coïncidences graphiques.

Nous commencerons par la deuxième *courbe* qui occupe le centre de la partie considérée de la rivière en expérience.

1° Au profil 13,5 correspond une ordonnée sur laquelle se trouvent à la fois le minimum zéro de la courbure et le maximum de la *rampe* du fond ;

2° Au profil 17,5, on trouve sur la même ordonnée le maximum de l'accélération de la courbure et le minimum de la profondeur ;

3° Au profil 20, la même ordonnée rencontre le maximum de la courbure et le maximum de la *pente* du fond ;

4° Au profil 12,5 on trouve le maximum de la diminution de la courbure et c'est au profil 22, c'est-à-dire 0 m. 50 en amont, que le chenal atteint son maximum de profondeur ;

5° Les quatre points d'inflexion (deux du liseré et deux du trait fin) sont situés sur une ligne dont la direction générale est parallèle à l'axe des abscisses.

Des coïncidences analogues existent dans la première et dans la troisième *courbe*. Quatre d'entre elles sont sensiblement moins exactes, ce qui peut s'expliquer par des circonstances spéciales.

Le tableau ci-contre résume l'ensemble de ces coïncidences.

Les ordonnées sont comptées de haut en bas.	Abscisses ou profils		
	L'équidistance est de 1 m. sur l'axe		
	1 <sup>re</sup> courbe	2 <sup>e</sup> courbe	3 <sup>e</sup> courbe
Minimum (zéro) de la courbure (trait fin).	2,0	13,5	27,0
Maximum de la <i>rampe</i> du fond (Inflexion ascendante du liseré) . . . . .	3,0	13,5	27,0
	(a)		
Maximum de l'accélération de la courbure (Inflexion descendante du trait fin) . . .	5,0	17,5	31,0
Minimum de la profondeur (Point haut du liseré. — Maigre) . . . . .	6,0	17,5	31,0
	(a)		
Maximum de la courbure (sommet) . . .	7,0	20,5	34,0
Maximum de la pente du fond (Inflexion descendante du liseré) . . . . .	8,0	20,5	33,0
	(a)		(b)
Maximum de la diminution de la courbure (Inflexion ascendante du trait fin) . . .	10,0	22,5	36,5
Maximum de la profondeur (Point bas du liseré). — Mouille. . . . .	10,0	22,0	37,0

**OBSERVATIONS**

(a) Entre les profils 0 et 4, il existe des profondeurs anormales dues à la grande vitesse dont l'eau était animée à sa sortie du bassin d'introduction, surtout au début des expériences avant que le régime ne fût devenu permanent. Sous l'action de cet excès initial de vitesse, le sable du fond a été, sur une certaine longueur, entraîné plus loin que ne le comportait la forme des rives.

(b) L'imperfection, d'ailleurs peu marquée, de cette coïncidence peut être attribuée au voisinage de la partie de la rivière où le lit avait été incorrectement tracé.

Supposons pour un instant que l'axe des abscisses soit la ligne à peu près droite et à peu près horizontale qui passe par les douze points d'inflexion. Rapportés à cet axe, le trait fin et le liseré ne présentent pas une distance horizontale constante. Si l'on considère, en effet, la deuxième *courbe*, on voit que la *rampe* du fond du chenal est sensiblement moindre que la pente, en sorte que l'*écart du maigre* est de 4 mètres, tandis que celui de la *mouille* est de

2 m. 50 seulement. Cette dissymétrie a une cause spéciale que nous n'étudions pas pour le moment. Nous en ferons abstraction et nous raisonnerons sur l'écart moyen qui est de 3 m. 25. Cette distance est égale au quart environ de la longueur commune de la *courbe* et du bief qui est de 13 m. 50.

Les *courbes* n<sup>os</sup> 1 et 3, c'est-à-dire les parties extrêmes de la rivière, sont, avec un peu moins d'exactitude, dans les mêmes conditions.

D'autre part, le trait fin et le liseré interfèrent de telle sorte que, aux douze profils 5, 8, 10, 13,5, 17,5, 20, 22,5, 27, 31, 33, 36,5 et 40 se trouvent une ordonnée nulle pour l'une d'elles et une ordonnée maximum pour l'autre.

Or, ce sont là les deux caractères de l'interférence d'une sinusoïde avec sa *dérivée*.

*Interférence d'une sinusoïde et de sa dérivée.* — Considérons en effet une sinusoïde  $O a B c D$  (fig. 44) dont la période est  $OD = 2S$  et l'amplitude  $HH' = 2a$ .

En appelant  $s$  l'abscisse  $OP$  mesurée à partir de l'origine  $O$ , et  $z$  l'ordonnée  $MP$ , son équation est :

$$z = a \sin \pi \frac{s}{S}.$$

Soit une seconde sinusoïde  $A'B'C'D'$  ayant la même période  $2S$ , avec une amplitude  $A'A' = 2b$  et placée de manière que la distance  $OB'$  soit égale au quart de la période.

Son équation sera :

$$z' = b \cos \pi \frac{s}{S}.$$

Or, la première dérivée de l'ordonnée  $z$  est :

$$\frac{dz}{ds} = a \frac{\pi}{S} \cos \pi \frac{s}{S}.$$



terférence et qui est caractérisée par deux circonstances principales :

1° *Ecart* égal au quart de la période commune ;

2° (pour employer le langage de l'acoustique) coïncidence des *nœuds* de l'une avec les *ventres* de l'autre.

Par conséquent, à ne considérer que leur allure générale, le trait fin et le liseré sont constitués par trois groupes de sinusoides, et, dans chaque groupe, les ordonnées du trait fin, *comptées à partir de la ligne médiane*, sont proportionnelles aux dérivées des ordonnées du liseré.

En d'autres termes, l'équation du liseré étant de la forme :

$$z = a \sin \pi \frac{s}{S},$$

celle du trait fin sera :

$$z' = k a \frac{\pi}{S} \cos \pi \frac{s}{S} = k \frac{dz}{ds},$$

$k$  étant un paramètre arbitraire à déterminer suivant les circonstances de la question.

*Equations et leur traduction.* — Prenons maintenant pour axe des abscisses l'axe même de la rivière développé en ligne droite, tel qu'il est représenté sur la figure 40.

Pour plus de clarté, nous raisonnerons sur la figure 41 qui sera en quelque sorte le schéma théorique de la figure 40.

Au profil P, la courbure concave, exprimée par un nombre  $c$ , est représentée par l'ordonnée KR et la profondeur  $h$  du chenal est représentée par l'ordonnée KM.

Désignons par  $C$  la courbure maximum  $FC'$ , et par  $e_1$  la courbure moyenne. On voit facilement sur la figure 40 que  $e_1$  est égal à  $\frac{1}{2} C$ , soit  $OA' = e_1$ .

Appelons de même  $h_0$  la profondeur minimum  $Aa$ ,  $H$  la profondeur maximum  $AQ$  et  $h_1$  la moyenne  $\frac{1}{2}(H + h_0)$ .

Sur la figure, on lit les relations :

$$\begin{aligned} MP &= KP - KM \quad \text{ou} \quad z = h_1 - h \\ RP &= OA' - KR \quad \text{ou} \quad z' = e_1 - e. \end{aligned}$$

Les équations des deux sinusoides peuvent donc se mettre sous la forme :

$$(1) \quad h_1 - h = (h_1 - h_0) \sin \pi \frac{s}{S}$$

$$(2) \quad e_1 - e = e_1 \cos \pi \frac{s}{S}.$$

La condition :

$$z' = k \frac{dz}{ds}$$

donne :

$$e_1 = k (h_1 - h_0) \frac{\pi}{S};$$

d'où :

$$h_1 - h_0 = \frac{Se_1}{k\pi}$$

ou bien :

$$(3) \quad h_1 = h_0 + \frac{Se_1}{k\pi}.$$

Or, dans l'étendue de la *demi-courbe*  $S$  du tracé, la courbure moyenne est  $e_1$ . Par conséquent le produit  $Se_1$  est égal à l'angle  $A$  formé par les deux tangentes menées à la courbe du tracé, l'une au point d'inflexion et l'autre au sommet.

Les équations (1) et (2) peuvent donc s'écrire :

$$(4) \quad h = h_0 + \frac{A}{k\pi} \left( 1 - \sin \pi \frac{s}{S} \right)$$

$$(5) \quad c = c_1 \left( 1 - \cos \pi \frac{s}{S} \right).$$

Les équations (4) et (2) montrent que :

*L'oscillation de la courbure, de part et d'autre de sa valeur moyenne, est proportionnelle à la dérivée de l'oscillation de la profondeur de part et d'autre de la profondeur moyenne.*

Moyennant une intégration très simple, on obtient la relation :

$$(6) \quad x_1 - x = k(h_1 - h)$$

qui peut se traduire ainsi :

*La profondeur du chenal oscille autour de sa valeur moyenne comme la direction de la rive concave oscille autour de la direction correspondant au tracé circulaire.*

La discussion de ces équations conduit à divers résultats ; ceux qui se rapportent directement à notre sujet sont les suivants.

On voit d'abord que les points homologues ont des abscisses équidistantes de  $\frac{S}{2}$ , c'est-à-dire du quart du développement ; ainsi, aux abscisses zéro et  $\frac{S}{2}$  correspondent respectivement le minimum zéro de la courbure et le minimum  $h_0$  de la profondeur. Aux abscisses  $S$  et  $\frac{3}{2}S$  correspondent de même le maximum  $C$  de la courbure et le maximum  $II$  de la profondeur. C'est l'expression de la *loi de l'écart*.

A la mouille, dont l'abscisse est  $\frac{3}{2}S$ , l'équation (4) donne :

$$H = h_0 + \frac{2A}{k\pi} \quad \text{ou} \quad H = h_0 + \frac{SC}{k\pi}.$$

La mouille est d'autant plus profonde que la courbure au sommet est plus prononcée. C'est la *loi de la mouille*.

La relation (3) :

$$h_1 = h_0 + \frac{Sc_1}{k\pi}$$

est la traduction algébrique du premier énoncé de *la loi de l'angle : la profondeur moyenne d'un bief est fonction de la courbure moyenne de la courbe correspondante* (1).

Le second énoncé : *à longueur égale, la profondeur moyenne est d'autant plus grande que les deux tangentes extrêmes de la courbe du tracé forment un angle extérieur plus ouvert*, traduit la même formule sous son autre forme :

$$h_1 = h_0 + \frac{A}{k\pi}.$$

Enfin, en différentiant les équations (4) et (5), on

(1) Dans l'étude de 1868, j'ai comparé les courbures d'une *courbe* de la Garonne (au sens spécial donné à ce mot) avec le chenal du *bief* correspondant. Cette comparaison est en quelque sorte oblique sur le diagramme, en raison de la loi de *l'écart*. Dans la présente note, il faut, pour la logique du raisonnement, que la comparaison soit *orthogonale*, c'est-à-dire que les courbures et les profondeurs comparées soient comprises entre les mêmes ordonnées. Les deux méthodes sont, sur le schéma de la figure 40, absolument identiques et, sur les itinéraires réels de la figure 39, à très peu près équivalentes.

obtient, avec les notations adoptées dans le paragraphe 4 du chapitre I :

$$(7) \quad \frac{dh}{ds} = p = -\frac{c_1}{k} \cos \pi \frac{s}{S}$$

$$(8) \quad \frac{dc}{ds} = q = \frac{c_1 \pi}{S} \sin \pi \frac{s}{S},$$

d'où l'on tire l'équation suivante qui est celle d'une ellipse :

$$(9) \quad k^2 p^2 + \frac{S^2}{\pi^2} q^2 = c_1^2 \quad (1).$$

Le paramètre  $k$  dépend non seulement du débit moyen, de la nature des matériaux du fond, de la pente des eaux, de la largeur du lit moyen, etc., mais encore des éléments géométriques qui déterminent la forme même des *courbes* du tracé; il varie donc d'une *courbe* à l'autre, mais il est constant dans l'étendue de chacune d'elles. Par conséquent, en limitant la signification de l'équation (9) à l'étendue d'une seule et même courbe, d'un développement déterminé  $2S$ , on voit qu'il n'y a dans cette équation que les deux variables  $p$  et  $q$ , et que par suite ces deux coefficients différentiels sont fonctions l'un de l'autre. En d'autres termes, suivant l'énoncé de 1868, *la pente du fond est déterminée par l'inclinaison de la tangente à la courbe des courbures.*

Comme on le voit, la traduction en langage algébrique est remarquablement fidèle et complète.

De là, ce théorème :

*Si la courbe des courbures et le profil en long du chenal sont des sinusoides, dont la première est proportionnelle à la dérivée de la seconde, les lois empiriques sont satisfaites ;*

(1) Voir la pièce annexe VI, § 2.

**Théorème** dont la réciproque est évidente, savoir :  
*Si les lois empiriques sont satisfaites, la courbe des courbures est une sinusoïde proportionnelle à la dérivée de la sinusoïde du chenal.*

**La Garonne.** — Sur les 22 kilomètres qui font l'objet de l'étude de 1868, on ne rencontre sur la Garonne qu'un seul passage où l'itinéraire des courbures présente, à vue d'œil, une ressemblance quelque peu satisfaisante avec une sinusoïde. C'est celui qui correspond à la *courbe* désignée par la lettre C, précédemment signalée. Le profil en long du chenal y affecte une régularité analogue à celle de la courbe des courbures. La condition de la coïncidence des *nœuds* de l'un des itinéraires avec les *ventres* de l'autre n'est que grossièrement satisfaite. Néanmoins il y a une analogie évidente entre le diagramme de la petite rivière et celui de la *courbe* C de la Garonne, analogie telle que toutes les déductions que nous avons tirées du premier auraient pu l'être, à la rigueur, des données du second.

Dans les *courbes* B et D, le diagramme synoptique montre également des courbes ressemblant à des sinusoïdes, mais cette ressemblance est imparfaite et ne s'aperçoit pas au premier coup d'œil.

Dans les passages G, I, J, il y a encore quelque symétrie dans l'itinéraire des courbures et dans le profil en long du chenal, mais les courbes sont encore plus éloignées du type sinusoïdal.

Partout ailleurs, leur allure est tout à fait irrégulière.

Par conséquent, en vertu de la réciproque ci-dessus énoncée, sous la réserve qu'il ne s'agit que de

la Garonne ou de rivières ayant un régime analogue et de sinuosités ni trop courtes ni trop longues, offrant à l'œil une continuité satisfaisante, il est démontré que les courbes qui représentent la courbure et la profondeur du chenal sont du type sinusoïdal.

Ce résultat n'a rien d'inattendu, car la courbure, comme la profondeur, croît à partir d'un minimum, atteint une certaine limite, décroît ensuite et repasse périodiquement par les mêmes valeurs. On pouvait donc prévoir *a priori* que ce sont des fonctions plus ou moins complexes de la variable  $s$ .

Mais l'étude précédente met en lumière un second fait que l'on peut formuler ainsi :

*La sinusoïde des courbures est la dérivée de la sinusoïde des profondeurs*, formule qu'on peut rendre plus concise encore :

*La profondeur est l'intégrale de la courbure*, ce qui est une traduction abrégée de l'équation (6).

Ainsi l'approfondissement du chenal est due à la déviation imposée au courant par la rive concave.

## § 2. — LIT RECTILIGNE

Les faits exposés dans le chapitre premier, corroborés par un grand nombre d'exemples tirés de divers fleuves et rivières, notamment du Weser, montrent que les portions systématiquement rectilignes des cours d'eau à fond mobile sont caractérisées par un maigre à peu près général, sans chenal ni mouillages. Si la navigation y réclame une augmentation de profondeur, il faut recourir à des dragages ou à des rétrécissements. Les dragages, devant s'étendre sur tout l'alignement droit, sont extrêmement coûteux, et les rétrécissements entraînent leurs inconvénients ordinaires: abaissement de l'étiage ou gêne dans l'expansion du flot suivant les cas.

Dans les parties sinueuses, au contraire, la navigation trouve un chenal stable et profond et des rades ou mouillages le long des concavités. Les passages maigres ont une longueur qui peut être réduite au quart du développement de la *courbe* et les dragages y sont, le cas échéant, d'autant plus faciles. Enfin, le rétrécissement à l'inflexion, compensé par l'élargissement au sommet, n'a que des effets utiles.

Ces notions expérimentales étant acquises, on peut, en les prenant pour guides ou points de repère, se proposer d'analyser le phénomène de l'écoulement de l'eau dans le lit d'une rivière à rives fixes et à fond mobile.

Considérons d'abord une partie rectiligne comprise (fig. 42) entre deux sections AC et A'C' normales à la

direction générale du courant et distantes d'une quantité  $BB'$ , égale, par exemple, à une ou deux fois la largeur du lit. Nous supposons la rivière en état de régime permanent, et nous entendons par là la permanence pratique, celle qui consiste, tant pour la vitesse que pour les résistances, dans une sorte d'oscillation, d'amplitude et de fréquence plus ou moins grandes, autour d'une certaine valeur moyenne.

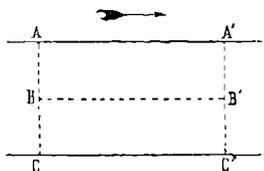


Fig. 42.

En un point quelconque  $M$  de la section d'amont

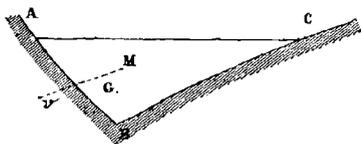


Fig. 43.

ABC (fig. 43) menons une droite  $Mv$  dans la direction du courant et prenons sur cette droite une longueur  $Mv$  égale à l'espace  $v$  parcouru en

une seconde par la molécule correspondante à ce point.

Le lieu des points  $v$  est une surface courbe qui, avec le périmètre mouillé, le plan de la section et le plan d'eau passant par  $AC$ , délimite un volume  $Q$  égal au débit de la rivière par seconde.

Le centre de gravité  $G$  de ce volume est le point d'application de la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les molécules d'eau composant le débit de la rivière. On peut l'appeler le *centre du débit*; il est animé de la *vitesse moyenne*  $V$  telle qu'on la définit généralement; c'est celle qui, multipliée par la section  $\omega$ , donne le débit  $Q$ .

La résistance s'exerce au périmètre mouillé; elle a pour composantes:

1° Le *frottement* proprement dit, dirigé en sens inverse du courant, perpendiculairement au plan de la section et tangentiellement à la surface par laquelle le volume  $Q$  est en contact avec la berge et le fond ;

2° La *réaction* qui est normale à cette même surface de contact.

Chaque résistance élémentaire est donc oblique au plan de la section, et la résistance totale est une force  $F$  dont le point d'application ne coïncide généralement pas avec le centre du débit, dont la direction est quelconque et dont l'intensité dépend de toutes les circonstances de la forme et de la constitution du périmètre mouillé.

La section d'aval  $A'C'$  a une forme différente de celle de  $AC$ . A supposer, en effet, que les contours des deux sections aient été un instant les mêmes, soit naturellement, soit artificiellement, cette identité de forme ne sera qu'éphémère : à la première décrue, les matériaux hétérogènes qui constituent le fond ne s'arrêteront certainement pas de la même manière dans les deux sections. Les deux profils en travers différeront plus ou moins, mais notablement, même avec un tracé rectiligne. C'est ce que montre l'observation constante des faits, et ce que l'on conçoit d'ailleurs facilement en songeant à l'extrême improbabilité d'un résultat identique.

Si donc on fait sur la section  $A'C'$  les mêmes opérations et raisonnements que sur  $AC$ , on aura à considérer un volume  $Q'$  qui, dans l'hypothèse du régime permanent, est équivalent au volume  $Q$ , mais qui en diffère, tant par le contour du périmètre mouillé que par la distribution des vitesses, et dont le centre de

gravité est, par conséquent, autrement placé que dans la section d'amont.

La droite  $GG'$ , c'est-à-dire le lieu géométrique du *centre du débit*, n'est donc pas parallèle à la direction générale du courant. En d'autres termes, le *centre du débit* se déplace transversalement et verticalement dans la masse d'eau à mesure qu'elle descend vers l'aval. Comme ce double mouvement ne peut pas se continuer indéfiniment dans le même sens, il est nécessairement périodique et par conséquent sinueux, tant en plan qu'en profil en long. La trajectoire ainsi décrite a quelque analogie avec celle que suivrait dans l'espace un pendule dont le point de suspension serait mobile.

Le cours d'eau, quand il est à l'état naturel, c'est-à-dire quand ses rives sont aussi friables que son fond, se charge lui-même de façonner son périmètre mouillé de manière à réduire au minimum la résistance qu'il en éprouve. Mais la forme qu'il donne ainsi, ou qu'il tend à donner à son lit, ne convient qu'à un état des eaux : elle change avec le débit. Pour une rivière navigable, cette instabilité est inadmissible ; il lui faut avant tout des rives fixes. Si on les fait rectilignes sur une grande longueur, elles ne seront certainement pas en harmonie avec la trajectoire naturelle du centre du débit. Il en résultera des réactions anormales et des pertes inutiles de force vive qui ne peuvent être inoffensives que dans des cas très particuliers : eau limpide, fond inaffouillable, débit constant. Avec un fond mobile et un débit variable, chaque décrue amène des dépôts de matériaux sur une région quelconque du lit ; le fond de la rivière se nivelle partout à peu près uniformément,

de manière à ne présenter qu'un *maigre* général, sans chenal d'accès ni mouillage de stationnement pour les bateaux.

Le raisonnement, comme l'observation, montre donc que les rives rectilignes réalisent en quelque sorte le maximum de déperdition de force vive et le minimum d'utilité nautique.

---

## § 3. — LIT CURVILIGNE

**Rivières à un seul courant.** — Considérons maintenant un lit de rivière ayant en plan une forme curviligne.

Le phénomène étant très complexe, des simplifications sont nécessaires pour fixer les idées et pour faciliter le raisonnement. Celles que nous faisons représentent la réalité dans ses traits généraux quand il s'agit d'une rivière navigable contenue, à l'état de régime permanent, dans les limites de son lit moyen.

Etant donnée une section AC, normale à la direction générale du courant, nous la divisons en tranches verticales auxquelles nous donnons le nom de *filet*, et nous admettons les circonstances suivantes :

1° Dans chaque filet, la vitesse décroît proportionnellement à la profondeur à partir de la surface, et la vitesse moyenne est égale à la vitesse superficielle multipliée par un coefficient constant ;

2° Les vitesses superficielles croissent à partir de chacun des bords jusqu'à un certain maximum ;

3° Il en est de même des profondeurs d'eau ou hauteurs des filets ;

4° Les deux maxima coïncident ; le filet de plus grande vitesse est au point le plus profond ;

5° La courbure croît de la section d'amont A à la section d'aval A'.

Cela posé, dans la section A la direction de la rive concave est représentée par un angle  $\alpha$  fait avec un

axe quelconque. Dans la section suivante, cette direction est  $\alpha + \Delta\alpha$ .

Le filet contigu à la rive concave a d'abord la direction  $\alpha$  qu'il tend à conserver ; mais, en allant de A en A', il rencontre, sous un angle  $\Delta\alpha$ , une surface solide qui est la berge même; sa direction est forcément déviée suivant l'angle  $\Delta\alpha$ .

Le filet voisin n'est pas dans les mêmes conditions ; c'est une surface liquide, et non solide, contre laquelle il vient se heurter suivant l'angle  $\Delta\alpha$ . Le phénomène est en général peu connu, mais, dans les circonstances ordinaires du régime d'une rivière navigable, les choses se passent comme si les molécules du second filet se mélangeaient, en totalité ou en partie, à celles du premier ; le second filet pénètre en quelque sorte le premier.

La vitesse du filet pénétrant étant plus grande, la quantité de mouvement du filet pénétré se trouve augmentée au détriment de celle du pénétrant.

Le second filet est à son tour pénétré par le troisième et soustrait à celui-ci une certaine quantité de mouvement.

La quantité de mouvement du second filet subit donc une modification qui est la différence entre ce qu'il reçoit d'un côté et ce qu'il perd de l'autre.

Il en est de même pour un filet quelconque de la section.

Or, l'action directrice de la rive concave ne se fait pas sentir instantanément sur tous les filets de la même section. Cette action ne s'exerçant que par pénétrations successives, il y a une sorte de propagation transversale d'effet qui exige un certain temps, temps pendant lequel les filets avancent dans le

sens de l'écoulement. On rencontre donc dans une même section, en allant de la rive concave à la rive convexe, d'abord un filet qui subit l'action directrice de la section considérée, puis un autre qui obéit à la section précédente, puis un troisième dont l'action directrice vient de plus loin encore à l'amont, et ainsi de suite. Une même section est donc, sous le rapport des pénétrations et des transmissions de quantités de mouvement, le théâtre de phénomènes dont les causes sont dans la configuration du lit, sur une certaine étendue à l'amont.

Les filets les plus rapprochés de la rive concave reçoivent plus de quantité de mouvement qu'ils n'en cèdent. Or, pour un filet, un accroissement de masse est un accroissement de hauteur. Cet allongement peut avoir lieu par en haut et par en bas. Par en haut, c'est une surélévation de niveau qui n'est sensible que pour les grandes vitesses. Par en bas, l'allongement, favorisé par l'action de la pesanteur et par l'accélération, se traduit, sur un fond mobile, par un approfondissement.

Par conséquent, c'est le long de la rive concave que le thalweg tend à se fixer, et il y prend une position et une profondeur qui dépendent d'un certain ensemble ou *intégrale* des courbures précédentes, c'est-à-dire de l'angle mesurant le changement de direction.

D'une section transversale à la suivante, le thalweg subit une modification qui dépend de la variation de cet angle. Cette variation, c'est-à-dire la courbure, doit donc être graduelle et continue pour que la modification, c'est-à-dire la pente, du thalweg soit elle-même graduelle et continue.

Enfin, si l'on considère la courbure maximum, on voit que le profil transversal en éprouvera un maximum d'effet, ce qui signifie que le profil en long du thalweg présentera un point de profondeur maximum; mais on voit aussi que ce n'est pas dans la section même du sommet, mais à une certaine distance en aval, que se trouvera la mouille.

On retrouve donc par le raisonnement tous les éléments essentiels des lois empiriques.

Il est donc plausible d'admettre que :

1° Quand deux filets liquides se rencontrent sous un très petit angle, celui des deux qui offre une résistance latérale, est pénétré par l'autre; le filet pénétrant cède au filet pénétré une fraction de sa quantité de mouvement qui dépend de l'angle de contingence, de la masse et de la vitesse de l'un et de l'autre filet;

2° Que cette transmission de quantité de mouvement n'est pas instantanée et qu'elle se propage transversalement dans une masse liquide avec une vitesse qui est comparable à celle de l'écoulement de cette masse.

Si l'on applique les considérations qui précèdent au filet de hauteur maximum, on voit que ce filet cède plus qu'il ne reçoit; il cesse donc d'être maximum et, dans la section suivante, c'est le filet voisin qui devient maximum à son tour.

Par conséquent, le thalweg, comme le centre du débit, se déplace dans le sens transversal à mesure que la masse d'eau s'écoule vers l'aval, et il faut, comme ci-dessus, en conclure que sa trajectoire est sinueuse.

L'amplitude et la période de cette sinuosité ne sont pas arbitraires ; elles dépendent des circonstances naturelles du régime, nature du fond, pente, débit, fréquence des crues, etc.

Si donc l'on veut réduire au minimum les déperditions inutiles de force vive et réaliser par suite le maximum d'utilité nautique, il faut chercher à déterminer cette amplitude et cette période et donner aux rives des contours qui, les reproduisant le mieux possible, soient en harmonie avec la forme naturellement sinueuse du thalweg ou chenal navigable.

**Rivières à marée.** — La doctrine du lit sinueux est en général admise pour les rivières à un seul courant, mais elle est contestée pour les rivières à marée et ses contradicteurs citent l'exemple de la Seine maritime où « toutes les sinuosités nuisent à l'introduc-  
« tion du flot et affectent plus ou moins, suivant  
« leur importance, la puissance hydraulique du  
« fleuve (1).

Il ne faut pas oublier que, dans les travaux d'endiguement de la Seine maritime, le resserrement du lit a été général et s'est étendu à tous les coudes, y compris même les plus prononcés.

La région où le volume d'eau introduit par la marée diminue le plus rapidement est celle comprise entre Tancarville et Le Trait. Or, c'est dans cette même région que se trouvent trois coudes très sail-  
lants où le lit avait subi un étranglement si exagéré que des rescindements ont été jugés nécessaires, ainsi qu'il a été dit au paragraphe 7 du chapitre I.

Ce n'est donc pas à la sinuosité mais à l'étrangle-

(1) Voir la pièce annexe V, *d*.

ment qu'il faut attribuer les difficultés que l'introduction du flot rencontre dans ce passage de la Seine maritime, et il est extrêmement probable que les autres exemples qu'on pourrait citer dans le même sens donneraient lieu à des observations analogues.

**Estuaires.** — Les raisonnements qui précèdent cessent d'être applicables quand, en vertu de circonstances spéciales, le débit varie peu et quand la vitesse est sensiblement la même dans toutes les parties de la masse liquide en mouvement.

C'est ce qui arrive dans les estuaires, principalement dans leur partie la plus voisine de la côte.

En effet, pour le courant de flot, le régime est pratiquement permanent, car le débit oscille, périodiquement et régulièrement, entre des limites relativement peu étendues. Quant à la vitesse, c'est celle dont l'onde-marée est animée quand elle pénètre dans l'estuaire, et elle se maintient longtemps sans altération sensible.

Pour le courant de jusant, le débit est celui du flot augmenté du débit fluvial, mais cette différence est relativement minime surtout dans la partie d'aval de l'estuaire. Quant aux vitesses, elles sont peu influencées par le fond semi-fluide et éminemment mobile.

Il s'ensuit que le centre de gravité, tant dans un sens que dans l'autre, se meut à peu près en ligne droite : les chenaux et les rives sont sensiblement rectilignes.

C'est ce que l'on observe notamment dans l'estuaire de la Gironde.

Mais à mesure qu'on s'éloigne de la côte, le débit

fluvial devient relativement important, les rives se rapprochent, la résistance du périmètre mouillé augmente, les vitesses cessent d'être uniformes dans une même section et la tendance au serpentement apparaît.

La limite entre les deux régimes est d'ailleurs incertaine et variable.

---

§ 4. — LA *PETITE-SEINE* ET LES EXPÉRIENCES EN PETIT

**La Petite-Seine.** — En 1887, l'administration des Ponts et Chaussées ordonna l'étude d'un ensemble de travaux ayant pour objet l'extension du port du Hayre et l'amélioration des accès du port de Rouen. Au cours de la discussion des nombreux projets qui furent présentés, M. l'ingénieur en chef Mengin-Lecreux, s'inspirant de ce qu'il avait vu à Manchester, eut l'idée de faire construire un plan en relief représentant à une échelle réduite l'estuaire et le cours de la Seine maritime de Rouen à la mer. En diminuant dans une proportion convenable chacun des éléments du régime du fleuve, on aurait une Seine en miniature sur laquelle il serait facile de réaliser, rapidement et à peu de frais, toutes les modifications auxquelles on pouvait raisonnablement penser. Celle de ces modifications qui donnerait le chenal le plus profond serait la meilleure. On aurait ainsi, sur le modèle réduit, l'indication de ce qu'il y aurait à faire sur le fleuve lui-même.

On se mit à l'œuvre. Le lit de la *Petite-Seine* fut fait en ciment pour les parties inaffouillables et en sable fin pour les parties mobiles. D'ingénieuses dispositions permirent d'y faire circuler de l'eau, dans les deux sens alternativement, de manière à reproduire les courants de jusant et de flot.

Mais plusieurs problèmes étaient soulevés et la solution en était fort délicate. Le coefficient de réduction ne pouvait pas être le même pour tous les élé-

ments du régime. Les hauteurs, par exemple, ne pouvaient pas être amoindries dans la même proportion que les dimensions en plan : dans une couche d'eau très mince, les attractions capillaires auraient dénaturé complètement le phénomène de l'écoulement. En outre, quelle échelle de réduction fallait-il adopter pour la vitesse des courants, pour la grosseur et la densité des matériaux mobiles, pour la durée des périodes, etc. ? Toutes ces questions furent traitées avec beaucoup de sagacité et reçurent des solutions assez satisfaisantes pour que le régime du fleuve fût, dans ses lignes principales, reproduit avec une remarquable exactitude. De minuscules marégraphes enregistrèrent des courbes de marée rappelant fidèlement les courbes réelles, et la *Petite-Seine* eut son mascaret tout comme la Seine maritime elle-même.

Les expériences n'ont pas été l'objet d'*attachements* écrits ; les résultats n'en ont pas été consignés dans un rapport, et l'historique n'en existe pas. En rassemblant quelques souvenirs et en consultant quelques notes des ingénieurs du service, nous avons pu le reconstituer dans ses parties essentielles.

*Seine maritime.* — Sous l'action des courants, le sable du fond se disposait en bancs approximativement semblables à ceux de la Seine et le chenal ressemblait assez bien au chenal réel.

Si le relief du fond et le chenal s'étaient reproduits, toujours les mêmes ou à peu près, à chaque expérience, comme cela avait eu lieu dans les expériences de la série C, sur la petite rivière de Bordeaux, le but qu'on s'était proposé aurait été atteint. On aurait pu légitimement dire que ce relief et ce chenal

constants étaient dus à la forme des rives. En modifiant cette forme on aurait eu un autre chenal. Quelques essais auraient suffi pour obtenir un chenal meilleur que les autres, et la forme correspondante des rives aurait été une indication sur le sens dans lequel devaient être dirigées les études des ingénieurs.

Malheureusement la constance du chenal et des bancs n'existait pas, et, à chaque essai, on constatait des différences notables, comme il était arrivé dans les expériences de la série A, sur le premier tracé de la petite rivière de Bordeaux. Cette instabilité provenait sans doute en grande partie de l'imperfection du modèle. Mais il faut noter que, comme dans la première forme de la petite rivière de Bordeaux, les rives de la Seine sont composées d'éléments rectilignes et circulaires et que l'instabilité du chenal est une des caractéristiques de ce genre de tracé.

Quoi qu'il en soit, la *Petite-Seine* n'a fourni aucun élément d'étude sur la question des modifications à apporter au tracé des rives de la Seine.

*Estuaire.* — En ce qui concerne l'estuaire, il en a été autrement, et le modèle a donné des résultats plus précis et par conséquent susceptibles d'être utilisés. Les renseignements ci-après sont extraits d'une note de M. l'ingénieur Cardin en date du 11 février 1908.

« Après avoir rapporté sur le modèle les endiguements, les sables et les fonds de l'estuaire tels qu'ils étaient en 1880, d'après les relevés hydrographiques de cette époque, on a fait fonctionner les marées du modèle pendant un temps corres-

« pondant à une période de 5, 10, 15 et 20 années.  
 « On a constaté que les courbes de marée, aux divers  
 « points de la Seine, les courants, les colmatages  
 « derrière les digues, en un mot, la plupart des phé-  
 « nomènes se reproduisaient d'une manière suffi-  
 « samment approchée pour qu'on pût, non seulement  
 « les reconnaître, mais, quelquefois même, sinon les  
 « mesurer, au moins en apprécier l'importance rela-  
 « tive. Toutefois il semble que le modèle était plutôt  
 « en retard sur la nature et qu'il fallait un plus  
 « grand nombre de marées artificielles pour réaliser  
 « les états de l'estuaire au bout de périodes données.  
 « Cela tenait sans doute à la grosseur relative des  
 « sables du modèle ».

Les ingénieurs ont conclu par une induction légitime, que, si l'on reproduisait sur la *Petite-Seine* les divers systèmes proposés, les résultats observés pourraient donner une idée approchée des conséquences réelles des travaux homologues exécutés dans l'estuaire.

On a expérimenté tout d'abord le projet préconisé par M. l'inspecteur général Partiot, avec modifications proposées par M. de Coëne, et consistant dans la fermeture de l'estuaire par un môle insubmersible enraciné dans la rive Sud et laissant au Nord, aux abords du Havre, un goulet de 1200 mètres de largeur. Le résultat des expériences se résume ainsi :

Les hauts-fonds de l'estuaire actuel qui limitent le tirant d'eau et gênent la circulation des navires ne seraient pas supprimés : ils seraient seulement rejetés plus au large. Au point de vue du Havre, le projet présente donc bien des incertitudes. Au point de vue de la Seine, il aurait de graves inconvénients.

L'introduction du flot serait gênée. Son arrivée aux diverses échelles hydrométriques serait retardée; les hauteurs des pleines mers seraient partout diminuées; le débit du jusant serait diminué lui-même, les chasses qui entretiennent les profondeurs seraient amoindries, et le chenal navigable s'atterrirait.

Par ces motifs, que la *Petite-Seine* a mis en évidence, le projet dont il s'agit a été écarté.

En dehors de cette démonstration, les expériences de la *Petite-Seine* ont été à peu près stériles en résultats.

Il ne faudrait pas en conclure d'une manière générale que les expériences de ce genre sont inutiles. L'insuccès partiel de la *Petite-Seine* tient, en effet, à des causes particulières. Reproduire à une petite échelle le régime d'un cours d'eau déterminé constitue un problème qui, dans l'état actuel de nos connaissances, n'est susceptible que d'une solution approximative. Un petit modèle ne peut pas être un instrument de précision. En outre, les observations ont été superficielles et on n'en a conservé aucune trace.

**La petite rivière de Bordeaux.** — Il n'en a pas été de même à Bordeaux où l'on a créé deux petites rivières artificielles ne différant l'une de l'autre que par le principe du tracé de leurs rives. Chacune d'elles a eu son régime distinct, et, pour la comparaison de ces deux régimes, on a organisé des observations méthodiques, avec carnets d'attachements, sondages, plans, compte-rendu détaillé. Tous ces soins ont porté leurs fruits, car, indépendamment de la confirmation d'une loi générale de l'hydraulique fluviale, ces expériences ont donné divers résultats dont la discussion est intéressante.

Les trois observations de la série C (voir le tableau de la page 59) diffèrent peu les unes des autres. La seule anomalie qu'on y peut remarquer consiste en ce que, dans l'observation du 8 avril où le débit et la vitesse ont été moindres, la hauteur d'eau a été plus grande de 0 m. 05 que dans les deux autres. Faut-il l'attribuer à une erreur de lecture ou de transcription, au trouble des eaux, à l'action du vent ? Les carnets d'attache-ments ne le disent pas. Dans tous les cas, il est plausible d'admettre que l'expérience du 8 avril aurait donné très sensiblement les mêmes résultats si l'eau y avait atteint un niveau moins élevé de 0 m. 05.

A la faveur de cette hypothèse, on a un groupe de trois expériences dans lesquelles les principales circonstances de l'écoulement ont été identiques, débit, hauteur d'eau, vitesse, pente totale, forme des rives, mobilité du lit, les seules différences consistant dans l'action exercée sur le fond de sable.

Ces différences elles-mêmes sont peu marquées, et la moyenne des résultats obtenus peut être considérée comme correspondant à une expérience unique dégagée autant que possible des erreurs ou particularités propres à chaque observation.

*Vitesses moyennes.* — Sur le diagramme comparatif des *vitesses moyennes* et des profondeurs du chenal (1), on voit que la profondeur est loin d'augmenter régulièrement avec la vitesse moyenne. Sur des

(1) Voir figure 32, planche XII. Il a paru inutile de représenter par un trait spécial la profondeur moyenne du chenal ; cette moyenne est figurée par l'ensemble des traits correspondant aux trois expériences.

longueurs notables, notamment de l'origine au profil 8, et, du profil 18 au profil 24, la profondeur varie beaucoup tandis que la vitesse moyenne reste sensiblement constante. A partir du profil 24 jusqu'à l'extrémité d'aval, la profondeur diminue quand la vitesse augmente et réciproquement. Enfin, c'est à une distance de 2 à 3 mètres en aval des maxima de la vitesse (profils 4, 14, 27 et 46) que se trouvent les minima de la profondeur (profils 6, 17, 29 et 49).

Des remarques analogues ont été faites sur un grand nombre de points de la Garonne et de la Seine. Elles contredisent certaines idées préconçues trop souvent invoquées pour justifier de fâcheuses réductions de largeur. Elles méritent de fixer l'attention des ingénieurs et appellent d'autres observations.

La moyenne  $U$  des vitesses moyennes pour l'ensemble de la rivière est 0 m. 432. La vitesse superficielle  $V$  observée au moyen de flotteurs ayant été 0 m. 512 (voir le tableau de la page 59), on voit que le rapport de  $U$  à  $V$  a pour valeur moyenne 0,843, chiffre qui reproduit avec une exactitude remarquable celui de 0,842 trouvé par M. Baumgarten dans ses expériences sur la Garonne (*Annales*, 1847, 2<sup>e</sup> semestre, p. 362).

*Rayon moyen.* — Le *rayon moyen*, c'est-à-dire le rapport de la section au périmètre mouillé, varie (1) entre 0,30 et 0,20. Entre les profils 4 et 24, il est à peu près constamment égal à 0,255. De 24 à 42, les variations sont plus accentuées et la valeur moyenne est environ 0,23. A partir du profil 42, la valeur moyenne est 0,22.

(1) Figure 32, planche XII.

*Périmètre mouillé.* — On a essayé de calculer le coefficient de résistance du périmètre mouillé de la rivière en expérience. Mais, en l'absence d'un profil en long directement relevé au cours des observations, on n'a pu que faire des hypothèses plus ou moins plausibles sur le niveau auquel l'eau s'est élevée dans chaque profil. Les observateurs n'ont pas pensé, en effet, à recueillir ce renseignement et ils se sont bornés à consigner la hauteur d'eau sur le seuil d'amont et sur le seuil d'aval, en sorte que l'on ne connaît que les points extrêmes du profil en long. Dans ces conditions, il est sans intérêt réel de chercher à faire des applications numériques de l'équation du mouvement permanent varié. Les résultats auxquels on est laborieusement arrivé sont hypothétiques, comme une partie des données, et ne méritent pas d'être mentionnés.

*Débit de sable.* — La sous-commission chargée des expériences qui nous occupent aurait été bien inspirée si, élargissant un peu son programme, elle avait profité de l'occasion qui se présentait pour recueillir des données numériques sur les principales circonstances du régime de la petite rivière qu'on avait créée. Nous avons déjà parlé du débit et du profil en long qu'on n'a malheureusement pas déterminés par des observations directes. Le même regret est à exprimer en ce qui concerne les troubles tenus en suspension dans l'eau et les sables traînés sur le fond, troubles et sables qui constituent ce qu'on a appelé le *débit solide*, élément de la plus grande importance et qu'il eût été très intéressant d'avoir, notamment en ce qui concerne les expériences de la série C.

Bien que les vitesses aient été généralement modérées, le débit solide a dû avoir, au cours de ces expériences, une importance notable, à en juger par diverses mentions que les observateurs ont inscrites sur leurs carnets (1). Tout porte à croire que périodiquement le bassin d'aval était nettoyé des sables qui venaient s'y déposer. Il aurait été très facile de cuber ce déblai, et d'inscrire sur les carnets d'observation des chiffres qui auraient servi à vérifier l'évaluation de la quantité de sable que l'eau a remué dans chaque expérience, évaluation qu'on peut faire par la méthode classique de la comparaison des profils en travers levés avant et après l'action du courant.

A l'origine de chaque expérience, le fond de sable était arasé, dans toute l'étendue de la rivière, au niveau de l'étiage (voir le profil type, fig. 31, pl. XI). Si le courant n'avait pas remué le sable, la rivière, avec une hauteur  $h$  (2), aurait contenu, dans un entre-

(1) *Expérience n° I.*

15 février. — . . . dans le bassin aval, il existe un amas de sable dont la superficie peut être évaluée à 2 mètres carrés.

22 février. — Par suite de l'encombrement du sable dans le bassin aval, nous sommes obligés de suspendre l'expérience, et nous ne la reprenons qu'à 1 heure du soir.

*Expérience n° II.*

18 mars. — . . . Les eaux sont lourdes, épaisses, . . . Aussitôt qu'elles commencent à devenir claires, le flotteur se porte avec plus de rapidité vers le bassin d'aval.

20 mars. — Pendant toute la journée, les eaux ont été très lourdes.

23 mars. — Les eaux sont très lourdes.

24 mars. — Les eaux sont très lourdes.

25 mars. — Les eaux sont très épaisses.

29 mars. — Les eaux sont sales et lourdes par suite des pluies.

1<sup>er</sup> avril. — Les eaux sont jaunâtres et très chargées.

(2) En l'absence d'observations directes, j'ai supposé que la pente de l'eau était uniforme; j'ai attribué à  $h$  des valeurs équidifférentes

profil de largeur  $L$ , un volume *initial* exprimé (1) par le produit  $hL$  qui mesure la section initiale. Les valeurs que prend successivement cette quantité, quand on va de l'amont vers l'aval, sont représentées sur la figure 32, planche XII. Le volume initial a pour valeur  $V_0 = 34 \text{ m. c. } 528$ .

A la fin de l'expérience, le volume d'eau contenu dans le même entre-profil a pour expression la section d'écoulement  $\omega$  dont les valeurs successives sont figurées synoptiquement sur la même figure.

La différence des ordonnées représente le déblai ou débit de sable correspondant à l'entre-profil considéré.

Le déblai total pour l'ensemble de la rivière est représenté par la différence des aires.

Ce résultat, avec quelques autres qui s'y rattachent, fait l'objet du tableau numérique ci-dessous.

Numéros des expériences	Durée exprimée en secondes	Débit liquide en mètres cubes		Volume $V_1 = \Sigma \omega$ en mètres cubes	$V_1 - V_0$ Déblai ou débit total de sable	Débit de sable par seconde (en centilitres)	Rapport du débit de sable au débit liquide ou coefficient torrentiel
		par seconde	total				
I.	545.000	0,497	107.444	37 <sup>m</sup> 3,236	2 <sup>m</sup> 3,708	0,5	$\frac{1}{40.000}$
II.	597.600	0,216	129.082	36,856	2,328	0,4	$\frac{1}{55.000}$
III.	535.000	0,230	134.550	38,288	3,760	0,6	$\frac{1}{36.000}$
Moyennes . . . . .			123.692	37 <sup>m</sup> 3,460	2 <sup>m</sup> 3,932	0,5	$\frac{1}{42.000}$

entre les valeurs extrêmes 0 m. 320 et 0 m. 325 qui ont été respectivement les cotes lues aux échelles d'amont et d'aval dans les observations sur lesquelles j'ai raisonné.

(1) Il ne faut pas perdre de vue que l'équidistance des profils en travers, mesurée sur l'axe, est de 1 mètre.

Le diagramme synoptique montre que, de l'origine au profil 20, il y a eu *déblai* de sable, c'est-à-dire excès du débit sortant sur le débit entrant. Il en est de même jusqu'au profil 31. De 31 à 36, les trois expériences ont donné une différence en sens inverse, c'est-à-dire du remblai. Il y a eu ensuite, abstraction faite des détails, déblai jusqu'au profil 48, remblai jusqu'au profil 58 et déblai au delà.

Le chenal s'est remblayé ou peu déblayé partout où il est en pente. Les régions au contraire où il est en rampe sont celles où le déblai a eu le plus d'intensité.

On peut encore lire sur le diagramme quelques autres faits intéressants, notamment celui-ci qui a son homologue sur la Garonne, savoir :

Pour le thalweg, comme pour la ligne de faite, la pente est plus raide que la rampe.

Il convient de noter que le thalweg de la première *courbe* d'amont fait exception à cette règle.

Les carnets d'observations sont muets sur la question de savoir si le sable que l'on extrayait périodiquement du bassin d'aval était reversé dans le bassin d'amont. Selon toute probabilité, cette précaution n'a pas été prise d'une manière régulière et méthodique. Par conséquent, durant les dernières heures de l'expérience, le débit de sable pouvait devenir, dans la partie d'amont de la rivière, notablement moindre que dans la partie d'aval.

Cette circonstance a pu contribuer dans une certaine mesure à assurer au fond de la rivière une régularité plus grande à l'amont qu'à l'aval.

Il en résulte que les expériences faites sur le second tracé ne font pas ressortir d'une manière complètement évidente les inconvénients des rives circulaires

ou rectilignes, et il est à regretter qu'on n'ait pas entrepris une autre série d'expériences dans laquelle l'épreuve et la contre-épreuve auraient été inversement disposées, savoir : à l'amont, le tracé rectiligne et circulaire, et à l'aval le tracé à courbures graduées.

Mais nos conclusions restent entières, et il suffit de comparer les chenaux de la série A (fig. 18, pl. VI) à ceux de la série B (fig. 26, même pl.) et à ceux de la série C (fig. 33, pl. XII) pour voir clairement que, à distance égale à partir de l'amont, le fond a une forme plus stable et plus régulière quand la courbure des rives varie d'une manière graduelle.

**Utilité des expériences en petit.** — Les expériences en petit peuvent avoir en outre une autre utilité.

Les projets des travaux d'amélioration de la navigabilité des fleuves et rivières sont soumis à des enquêtes dans lesquelles chacun est appelé à donner son avis. Or la lecture d'un plan de sondages et les principes de l'hydraulique fluviale ne sont pas à la portée de tout le monde ; mais tout le monde est apte à suivre et à comprendre une leçon de choses donnée sur une rivière artificielle et, en cas de besoin, les ingénieurs ont à leur disposition un excellent moyen de démonstration et de vulgarisation.

C'est ce qui est arrivé à Bordeaux, dans les circonstances suivantes que nous relaterons afin de préciser notre pensée.

Dans l'enquête ouverte, en 1875-1876, sur les mesures à prendre pour maintenir et améliorer les mouillages du port, quelques personnes, dont l'avis

était généralement écouté, notamment M. Lalande, président de la Chambre de commerce, avaient émis l'opinion que, sans se préoccuper des formes des rives, il suffirait de recourir, pour la Garonne, à des dragages énergiques, comme on l'avait fait avec succès en Angleterre pour les rivières de la Clyde et de la Tyne. Cette opinion avait été combattue par les ingénieurs qui avaient soutenu que, dans un grand fleuve comme la Garonne dont le débit solide est considérable, des dragages en discordance avec les formes des rives n'auraient qu'une durée éphémère et n'étaient par conséquent pratiquement possibles que sur des étendues relativement restreintes. Cette discussion, après s'être prolongée longtemps, a pris fin le 30 mai 1875, au cours d'une séance que la commission d'enquête a tenue sur les bords mêmes de la petite rivière en expérience.

« Au bout d'un quart d'heure environ, dit le compte-rendu, le fond se dégarnit sensiblement le long des rives concaves, et le sable, transporté au point de raccordement d'une courbe à la suivante, y produit des amoncellements en forme de talus très allongé. Cet effet... est très apparent entre la deuxième et la troisième courbe. A cet endroit, le milieu de la rivière est occupé par un plateau de sable et le courant y creuse plusieurs petits passages irréguliers et interrompus.

« M. Fargue fait remarquer ce phénomène et indique que c'est dans des conditions analogues que se forment, dans les rivières, les barres ou seuils si nuisibles à la navigation; il ajoute que c'est une conséquence nécessaire et inévitable de la direction des rives et du mode de raccordement des

« deux courbes successives ; il affirme que, si cet obstacle naturel était enlevé par une force extérieure, il ne manquerait pas de se reformer dans les mêmes conditions. Pour en faire l'expérience, il creuse immédiatement au milieu du banc de sable un passage qui ramène à cet endroit, la rivière à la profondeur qu'elle présente le long des courbes d'aval et d'amont. Presque aussitôt, on voit le sable se déplacer dans la partie supérieure et venir se déposer dans le chenal creusé ; au bout de quelques minutes, le banc se trouve reformé tel qu'il était avant l'opération ».

Dans la séance du 22 septembre suivant, la discussion sur les dragages ayant été reprise, et l'un des membres de la commission ayant dit que « le dragage ne peut produire d'effet sérieux et durable que s'il est pratiqué pour venir en aide à l'action des courants », M. Lalande a déclaré qu'il s'associait sans réserve à cette manière de voir : « *les expériences dont il avait été témoin lui avaient paru concluantes* » et lui avaient fait abandonner sa première opinion.

---

## PIÈCES ANNEXES

---

- I. — Notes et mémoires publiés dans les *Annales des Ponts et Chaussées*.
- II. — Tableaux numériques.
- III. — Rapport au nom de la sous-commission chargée d'examiner le mémoire de M. Fargue et les questions théoriques qui s'y rattachent.
- IV. — Bassin tournant. — § 1. Expériences de Rouen. — § 2. Formules théoriques.
- V. — Extraits d'un mémoire sur la sixième question du programme du sixième congrès de navigation tenu à La Haye, en 1894, par MM. Mengin et Guiard.
- VI. — Courbures. — § 1. Note sur la mesure de la courbure. — § 2. Corollaires des équations des lois empiriques.
- VII. — Instruction sur l'emploi des gabarits de courbure.

## PIÈCE ANNEXE I

---

# NOTES

ET MÉMOIRES PUBLIÉS DANS LES « ANNALES  
DES PONTS ET CHAUSSÉES »

---

1. Etude sur la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur d'eau dans les rivières à fond mobile 1868, tome XV (Médaille d'or).
2. Etude sur la largeur du lit moyen de la Garonne. Octobre 1882.
3. Note sur le tracé des rives de la Garonne. Avril 1884.
4. Expériences relatives à l'action de l'eau courante sur un fond de sable. Mars 1894.
5. Etude sur la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur du chenal dans l'Escaut maritime. 1900, 1<sup>er</sup> trimestre.
6. Vérification théorique des lois empiriques relatives à la forme du lit des rivières à fond mobile. 1903, 2<sup>e</sup> trimestre.
7. Les équations des lois empiriques de l'hydraulique fluviale. 1907, 3<sup>e</sup> volume.

PIECE ANNEXE II

Tableaux numériques. — Tableau n° 1

N numéros d'ordre	Des courbes		des biefs		Ecart		Loi de la mouille		Loi de l'angle			Observations
	extrêmes (1)	non extrêmes l	extrêmes (1)	non extrêmes	du maître (2)	de la mouille (3)	Courbe kilomé- trique au sommet C	Profon- deur d'eau sur la mouille H	Angles formés par les deux tangentes extrêmes de la courbe en degrés, minutes et secondes	Courbe kilométrique moyenne $C_1 = 10^3 \times \frac{a}{l}$	Profon- deur moyenne $h_1$	
1	mètres 1 091	mètres a	mètres 1 092	mètres a	mètres 0	mètres 90	0,851	3,01	0,604	0,554	mètres 2,285	(1)
2	" 2 031	" b	" 2 394	" b	" 363	" 116	2,026	4,80	1,985	0,977	2,452	(2)
3	" "	" c	" "	" c	" 438	" 424	2,595	6,75	2,321	1,484	4,348	(3)
4	" "	" d	" "	" d	" 260	" 456	8,132	8,53	2,641	2,381	6,669	(a)
5	" "	" e	" "	" e	" 182	" 565	1,748	5,58	1,031	0,688	3,974	(b)
6	" "	" f	" "	" f	" 134	" 472	1,224	2,18	0,816	0,602	3,091	(c)
7	" "	" g	" "	" g	" 65	" 12	0,752	4,43	0,751	0,565	3,500	(d)
8	" "	" h	" "	" h	" 251	" 572	0,724	4,45	0,462	0,377	3,015	(e)
9	" "	" i	" "	" i	" 246	" 35	0,742	4,61	0,577	0,395	3,057	(f)
10	" "	" j	" "	" j	" 219	" 35	0,475	3,18	0,241	0,402	3,077	(g)
11	" "	" k	" "	" k	" 351	" 0	0,955	4,45	0,241	0,308	2,444	(h)
12	" "	" l	" "	" l	" 438	" 281	2,132	6,16	0,958	0,480	2,450	(i)
13	" "	" m	" "	" m	" 441	" 475	0,143	2,86	0,023	0,573	3,321	(j)
14	" "	" n	" "	" n	" 0	" 333	0,190	2,70	0,036	0,084	2,054	(k)
15	" "	" o	" "	" o	" 479	" 325	1,614	2,07	0,258	0,196	2,214	(l)
16	" "	" p	" "	" p	" 80	" 415	4,401	5,19	0,675	0,723	3,705	(m)
17	" "	" q	" "	" q	" 253	" 419	1,692	5,19	0,243	0,281	2,072	(n)
171	863		1 063		433	165	0,739	2,60				
Sommes	4 487	17 285	4 840	17 390	4 238	5 229						
Moyennes . . .	1 330		1337,7		252,8	307,6						
						280,2						

(1) Extrêmes tant par leur position que par leur longueur.  
 (2) Distance entre les extrémités d'aval de la courbe et du bief.  
 (3) Distance entre le sommet de la courbe et le point de profondeur maximum.  
 (a) Le sommet est à l'origine de la courbe.  
 (b) Le sommet est presque à l'origine de la courbe.  
 (c) Sommet à l'origine.  
 (d) Sommet presque à l'origine.  
 (e) Courbe très peu prononcée.  
 (f) La mouille considérée n'est pas le point le plus profond de la courbe O.



**Tableau**  
*Relation entre la variation de la courbure et la variation de la profondeur d'eau.*  
 (Loi de ... du fond.)

Courbures kilométriques				Profondeurs d'eau				Observations	Courbures kilométriques				Profondeurs d'eau				Observations			
Profil	Dis-tances $\Delta s$	Courbure kilométrique $10^3 c$	Différences $10^3 \Delta c$	Variation par km. de la courbure kilométrique $\frac{q}{10^3} \frac{\Delta c}{\Delta s}$	Profil	Dis-tances $\Delta s$	Profondeurs d'eau $h$		Différences $\Delta h$	Variation par km. de la profondeur d'eau $\frac{p}{10^3} \frac{\Delta h}{\Delta s}$	Profil	Dis-tances $\Delta s$	Courbures kilométriques $10^3 c$	Différences $10^3 \Delta c$	Variation par km. de la courbure kilométrique $\frac{q}{10^3} \frac{\Delta c}{\Delta s}$	Profil		Dis-tances $\Delta s$	Profondeurs d'eau $h$	Différences $\Delta h$
<i>Courbe A. — Pour mémoire.</i>										<i>Courbe G. — Pour mémoire.</i>										
<i>Courbe B.</i>										<i>Courbe H. (Point <math>\alpha</math>).</i>										
<i>Première Portion. (Point <math>\xi</math> de la fig. 11, page 28).</i>										<i>Courbe I. — (Point <math>\beta</math>).</i>										
10	762,93	0,720	1,306	+ 1,712	10 <sup>a</sup>	709,48	4,53	3,27	+ 4,611	10 <sup>a</sup>	936,24	0,724	0,412	- 0,440	20 <sup>b</sup>	829,61	4,45	2,76	- 3,336	
10 <sup>a</sup>		2,026			11		4,80			10 <sup>b</sup>		0,312			21 <sup>a</sup>		1,69			
<i>Deuxième portion. — Pour mémoire.</i>										<i>Courbe J. — Pour mémoire.</i>										
<i>Courbe C.</i>										<i>Courbe K. — Pour mémoire.</i>										
<i>Première portion. (Point <math>\gamma</math> id.).</i>										<i>Courbe L. (Point <math>\lambda</math>).</i>										
12 <sup>a</sup>	877,38	0,646	1,949	+ 2,221	12 <sup>b</sup>	1 013,72	1,70	5,05	+ 4,981	12 <sup>a</sup>	379,36	0,459	0,286	+ 0,325	21 <sup>a</sup>	974,48	1,69	2,92	+ 2,997	
13 <sup>a</sup>		2,595			13 <sup>b</sup>		6,75			12 <sup>b</sup>		0,745			22 <sup>a</sup>		4,61			
<i>Deuxième portion. (Point <math>\gamma'</math> id.).</i>										<i>Courbe MNO. (Point <math>\mu</math>o).</i>										
13 <sup>a</sup>	606,71	2,595	1,990	- 3,280	13 <sup>b</sup>	185,90	6,75	1,43	- 6,078	13 <sup>a</sup>	2 934,44	0,041	0,360	+ 0,121	26 <sup>a</sup>	3 253,91	1,44	1,01	+ 0,310	
13 <sup>c</sup>		0,605			13 <sup>c</sup>		5,42			13 <sup>b</sup>		0,401			29 <sup>c</sup>		2,45			
<i>Courbe D. — Pour mémoire.</i>										<i>Courbe P. (Point <math>\pi</math>).</i>										
<i>Courbe E. (Point <math>\epsilon</math>).</i>										<i>Observation analogue à la précédente.</i>										
14 <sup>a</sup>	863,87	1,748	1,322	- 1,530	15 <sup>b</sup>	482,93	5,58	1,82	- 3,77	17 <sup>a</sup>	847,67	1,692	1,364	- 1,609	30	637,79	5,19	2,51	- 3,936	
16 <sup>a</sup>		0,426			16 <sup>a</sup>		3,76			18 <sup>a</sup>		0,328			30 <sup>a</sup>		2,68			
<i>Courbe F. (Point <math>\zeta</math>).</i>										<i>Observation analogue.</i>										
17 <sup>a</sup>	827,48	1,224	0,756	- 0,913	17 <sup>a</sup>	309,49	5,18	0,90	- 2,908											
18 <sup>a</sup>		0,468			18		4,28													

## PIÈCE ANNEXE III

---

# RAPPORT

AU NOM DE LA SOUS-COMMISSION CHARGÉE D'EXAMINER  
LE MÉMOIRE DE M. FARGUE  
ET LES QUESTIONS THÉORIQUES QUI S'Y RATTACHENT

---

Une sous-commission composée de MM. de la Roche-Tolay, Abria, Emile Maurel et Lespiault a été chargée par M. le préfet de la Gironde de donner son avis sur les conclusions d'un mémoire publié en 1867 par M. Fargue, ingénieur des ponts et chaussées, touchant la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur de l'eau dans les rivières à fond mobile. Cette commission était invitée subsidiairement à examiner les points par lesquels les difficiles problèmes que soulève la question de la navigation de la Garonne pouvaient se rattacher aux théories mathématiques de l'hydrodynamique.

Les membres de la sous-commission ont été unanimes à reconnaître que les théories fondées sur les principes de l'hydrodynamique ne pouvaient guère, dans l'état actuel de la science, conduire à des formules plus ou moins approchées qu'en ce qui concerne un certain nombre de problèmes relativement simples, tels que l'écoulement des liquides dans des tuyaux droits, à parois solides, à diamètre uniforme.

Lorsqu'il s'agit de la marche de l'eau dans un fleuve, les irrégularités du lit et des courbures, les changements de pente et de largeur, la diversité des matières qui forment le fond et les berges, les variations de hauteur dans le niveau des eaux, constituent des conditions tellement complexes qu'il ne paraît possible de leur appliquer actuellement avec fruit aucune méthode d'analyse mathématique.

La sous-commission s'est donc décidée à se borner à l'examen du mémoire de M. Fargue, et des questions qui s'y rattachent directement.

Les études de M. Fargue portent uniquement sur la portion du lit de la Garonne comprise entre les bourgs de Gironde et de Barsac. Sur cette portion longue de 22 kilomètres, le lit moyen peut être regardé comme fixé par une suite ininterrompue de travaux terminés depuis vingt ans et dont l'effet est par conséquent entièrement produit.

M. Fargue a cherché quelles relations il pouvait y avoir entre les courbures du lit moyen et les profondeurs de la passe à l'étiage. Pour y arriver, il a employé des procédés graphiques ; il a développé l'axe du lit moyen suivant une droite qu'il a prise pour axe des abscisses et il a porté en ordonnées synoptiques, d'une part les courbures du lit, de l'autre les profondeurs de la passe.

La comparaison des courbes ainsi obtenues a conduit l'auteur aux conclusions suivantes :

1° La *mouille* est d'autant plus profonde que la courbure du sommet est plus prononcée ;

2° Les *maigres* correspondent aux points d'inflexion et aussi aux points de surflexion ; en d'autres termes, un maigre se forme toutes les fois que la valeur de la courbure passe par un minimum ;

3° La mouille et le maigre sont constamment reportés à une certaine distance en aval, soit du sommet, soit du point d'inflexion ; cette distance est en moyenne de 300 mètres pour la mouille et de 250 mètres pour le maigre.

La première de ces lois était connue instinctivement en quelque sorte de tous les mariniers, mais elle n'avait peut-être pas été formulée encore avec une précision suffisante. Quant à la position des maigres, on savait aussi qu'elle correspondait en général aux points d'inflexion ; mais on voit que la règle de M. Fargue est plus complète, en ce sens qu'elle fait dépendre le maigre, non d'une inversion dans le sens de la courbure, mais de l'existence d'un minimum dans les valeurs que prend cette courbure.

Enfin, la loi de l'écart n'avait, à notre connaissance, jamais été formulée.

Indépendamment de ces trois lois, M. Fargue a déduit de ses tracés graphiques une autre conséquence qui peut être regardée comme un complément de sa deuxième loi. Cette conséquence, c'est que le profil en long du thalweg ne présenterait de régularité qu'autant que la courbure varierait d'une manière graduelle et successive, de sorte que tout changement brusque de courbure occasionnerait une diminution brusque de profondeur.

Si cette dernière loi était définitivement établie et tout à fait générale, il en résulterait qu'il faudrait éviter dans le tracé rationnel des rives d'un fleuve tout raccordement par simple contact ; car il est clair que le passage d'un arc de cercle à sa tangente, par exemple, constitue un changement brusque de courbure. Telle est en effet la conclusion de M. Fargue ; il attache à ce point une grande importance et il étudie longuement dans son mémoire les moyens géométriques d'arriver à une variation continue de la courbure, en établissant entre les courbes successives d'un tracé rationnel, non plus un simple contact de premier ordre, mais un contact du second ordre, c'est-à-dire par osculation, ou même un contact du troisième ordre. Cette partie du travail de M. Fargue est accompagnée d'une étude géométrique intéressante de deux courbes qu'il appelle la *spirale volute* et la *bi-sinu-soïde*.

Bien que les tracés graphiques de M. Fargue semblent jusqu'à un certain point justifier cette partie de ses conclusions, la sous-commission a été unanime à penser qu'il pouvait y avoir là une concordance accidentelle et que des observations portant sur une longueur de 22 kilomètres seulement n'étaient pas suffisantes pour établir une influence aussi considérable du degré de contact dans le raccordement des courbes successives. Elle est d'avis que la différence entre le contact et l'osculution, déjà très faible sur une épure, serait absolument insensible sur le terrain et difficilement réalisable dans un tracé réel, et elle ne croit pas que la discontinuité dans la courbure, discontinuité qui existe évidemment dès que les raccordements ont lieu par simple contact, ait l'influence que l'auteur lui attribue.

Quoi qu'il en soit de ce point particulier, il nous a paru important de vérifier, autant que possible, par une expérience directe, la réalité des lois que nous inclinons à croire exactes. Ce n'est pas que nous nous dissimulions l'insuffisance d'une telle expérience; nous savons combien d'erreurs peuvent résulter en général de conclusions trop hâtivement tirées d'expériences mécaniques faites en petit. Dans le cas particulier dont nous nous occupons ici, il est impossible d'assimiler aux conditions naturelles les conditions de l'écoulement de l'eau dans une rivière artificielle. Tous les rapports sont changés. D'une part, en effet, la vitesse du liquide est presque la même dans les deux cas. Mais, de l'autre, les différences de largeur, de profondeur, de courbure sont énormes. De plus, si, comme il nous a paru convenable de le faire pour obtenir en peu de temps une action marquée, on donne un lit de sable à la rivière artificielle, les particules à déplacer sont beaucoup plus petites que dans le fleuve naturel, et, tandis que les poids sont dans le rapport des cubes des dimensions, les poussées du liquide, variant comme les surfaces des particules, sont seulement dans le rapport des carrés de ces mêmes dimensions.

Malgré ces différences, nous avons pensé que les phénomènes que nous pourrions constater dans une rivière artificielle présenteraient, dans leur ensemble, une grande analogie avec les phénomènes naturels et qu'en particulier, si les lois que nous avons énoncées plus haut étaient générales, elles se manifesteraient clairement dans nos expériences. Nous pouvions espérer en outre voir de quelle manière se ferait le déplacement du fond et arriver à une idée nette de ce qui se passe dans des conditions simples et bien déterminées. L'un des membres de la sous-commission, M. de la Roche-Tolay, a bien voulu se charger du programme et de la conduite de ces expériences.

Ces expériences ont été faites sur une dérivation de l'estey de Bègles, au barrage de Gâtébourse, à peu de distance de l'embouchure de cet estey. Cette dérivation constituait une rivière artificielle d'environ 60 mètres de longueur sur 1 mètre de largeur et 1 mètre de profondeur. Les parois latérales de cette rivière étaient revêtues de bois, et le fond était formé d'une couche de sable de plusieurs décimètres d'épaisseur. Quant au tracé du lit moyen, il se composait d'une suite de plusieurs arcs de cercle de 10 mètres de rayon, ayant leurs courbures alternativement en sens contraires, et se raccordant, tantôt par contact direct, tantôt par l'intermédiaire d'une ligne droite, de même longueur que les arcs. Bien entendu, d'après ce que nous avons dit plus haut, la commission n'avait pas cherché à réaliser expérimentalement des contacts par osculation. Mais le lit ainsi tracé reproduisait assez exactement les conditions naturelles d'un fleuve, et, en particulier, il présentait un assez grand nombre de points d'inflexion et de sommets de courbes. L'écoulement de l'eau dans le canal était réglé, à la sortie du bassin amont, par une vanne, de manière à faire varier à volonté la vitesse du courant : cette vitesse était indiquée par la marche d'un flotteur. Après chaque expérience, la hauteur du sable était mesurée, de décimètre en décimètre, tout le long de profils transversaux,

distants l'un de l'autre de 50 centimètres (1). On avait ainsi une représentation très exacte du fond. Les plans cotés et les tableaux de ces expériences ont été dressés avec le plus grand soin par M. Boyé, conducteur des ponts et chaussées, sous la direction de MM. les ingénieurs de la Roche-Tolay et Regnault.

Neuf expériences successives, prolongées chacune pendant sept à huit heures, ont été faites dans les mois de juin et juillet 1875. Elles ont généralement confirmé les résultats formulés par M. Fargue, tout en présentant entre elles d'assez grandes différences, et en laissant voir, tout le long du lit de sable, de nombreuses inégalités de niveau où l'on ne pouvait découvrir aucune loi régulière.

Les expérimentateurs ont pensé alors qu'une journée d'expérience n'était pas suffisante pour que le lit de sable eût le temps de prendre sa forme définitive. Bien que le mouvement des particules siliceuses soit surtout apparent dans les premières heures de l'expérience, et semble à peu près nul vers la fin du jour, il persiste néanmoins d'une manière presque insensible, et ce n'est qu'à la longue que le lit arrive à une forme parfaitement arrêtée. Il parut donc convenable de substituer à des expériences de quelques heures des expériences de longue durée, et l'on résolut de les prolonger pendant un mois chacune, tout en modifiant considérablement la forme du lit, de manière à rendre les courbes beaucoup plus prononcées.

Dans sa seconde forme, le lit de la rivière artificielle présentait d'abord trois arcs de cercle consécutifs, alternativement courbés en sens contraire, et d'une très forte courbure (2). A la suite du dernier venait tangentiellement une

(1) D'après les carnets des observateurs et les plans cotés des sondages, l'équidistance des profils était de 4 mètres (Note de M. Fargue).

(2) Le rédacteur de cette partie du rapport a été inexactement renseigné. Cette seconde forme du lit résulte d'un tracé à courbures graduées dont M. Fargue avait fourni le dessin, sur la demande de M. de Laroche-Tolay et sur lequel la distribution probable des profondeurs avait été figurée (*Id.*).

partie droite d'une quinzaine de mètres, suivie elle-même d'un dernier arc de cercle. On avait ainsi quatre sommets et trois points d'inflexion,

Deux expériences de longue durée ont été faites successivement, la première du 8 au 29 février 1876, la seconde du 7 mars au 8 avril. Après chacune de ces expériences, les cotes du fond ont été relevées avec le plus grand soin, de décimètre en décimètre, sur 128 (1) profils transversaux différents. Ces mesures ont été reportées sur un plan coté, et les diverses profondeurs sont indiquées sur ce plan par des teintes bleues ou bistres d'intensités proportionnelles. On aperçoit ainsi d'un coup d'œil le relief du fond.

Les deux expériences ont donné des résultats très concordants que nous pouvons indiquer en quelques mots :

1° Les mouilles se sont formées vers les sommets des courbes concaves, à des profondeurs considérables et sensiblement proportionnelles à la courbure ;

2° Le sable enlevé de ces mouilles s'est reporté, pour la plus grande partie, sur les bords des convexités opposées ;

3° Aux approches des points d'inflexion et sur les parties droites, le sable s'est réparti sur une profondeur sensiblement uniforme tout le long d'un même profil transversal. Les profils sur lesquels la couche de sable a la plus grande épaisseur se trouvent à l'extrémité inférieure de la partie rectiligne de 15 mètres. Ce dernier fait tient, en grande partie, à ce qu'une portion du sable a dû naturellement être entraînée du haut de la rivière artificielle vers le bas ;

4° Les mouilles se sont formées, comme M. Fargue l'avait observé sur la Garonne, non pas exactement aux sommets des courbes, mais avec un écart marqué en aval.

On voit ainsi que les conclusions de M. Fargue sont confirmées par nos expériences en ce qu'elles ont de plus important.

(1) Il n'y en a eu en réalité que 64 (Note de M. Fargue)

Quant à la théorie mécanique des phénomènes si frappants qui se produisent dans ces circonstances, nous répétons que nous n'avons pas tenté de l'aborder par l'analyse mathématique. M. Fargue a cherché à se rendre compte approximativement des actions complexes qui résultent du mouvement de l'eau ; mais il a été obligé pour cela de faire des hypothèses particulières sur les pénétrations mutuelles des filets liquides. L'inconvénient de pareilles hypothèses, c'est qu'on est porté naturellement à les modifier suivant les résultats mathématiques que l'on se propose d'en tirer.

---

PIÈCE ANNEXE IV

BASSIN TOURNANT

DE M. L'INSPECTEUR GÉNÉRAL FARGUE

- § 1. — Expériences de Rouen.
- § 2. — Notes sur les formules théoriques.

§ 1. — EXPÉRIENCES DE ROUEN

A. — Densité du sable expérimenté . . . . .	2,381
<i>Détail de l'opération.</i> — a) Poids d'une éprouvette graduée d'un litre de capacité . . . . .	
	0,842
b) Poids de l'éprouvette remplie de sable anhydre . . . . .	2,456
c) Poids de l'éprouvette remplie d'un litre de sable et d'eau de manière que celle-ci occupe tous les vides. . . . .	2,778

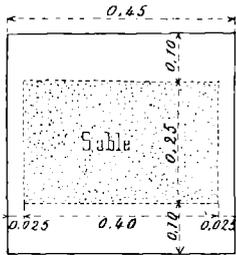


Fig. 44.

$$\text{Densité} = \frac{b - a}{1 - c - b} = 2,381.$$

B.—Coefficient de frottement. 0,35

*Détail de l'opération.* — Ce coefficient a été obtenu de la manière suivante. Dans un bassin en zinc de 0 m. 45 de côté et 0 m. 13 de profondeur, rempli d'eau au tiers, nous avons mis un litre

de sable en couche de un centimètre environ, disposé ainsi que l'indique le croquis ci-dessus en plan.

Cela fait, nous avons incliné très doucement le bassin à l'horizon jusqu'à ce que nous observions un glissement ; l'angle formé à ce moment par le fond du bassin et l'horizon avait pour tangente trigonométrique 0,35.

### C. — *Expériences diverses*

Dans toutes les expériences ci-après décrites, la cuve ou bassin circulaire de 2 mètres de diamètre et de 0 m. 40 de profondeur est rempli d'eau sur 0 m. 15 de hauteur.

Le mouvement est communiqué à la cuve par un moteur à gaz qui ne donne de mouvement uniforme qu'à partir de la vitesse de 1 tour de la cuve par 4'', soit pour une vitesse angulaire de  $\frac{6,28}{4} = 1,57$ .

Le sable employé, provenant d'une carrière d'Oissel, a été soigneusement lavé et passé dans un tamis à mailles de 8 mm. de largeur.

1<sup>re</sup> expérience. — Dix litres de sable répandus uniformé-

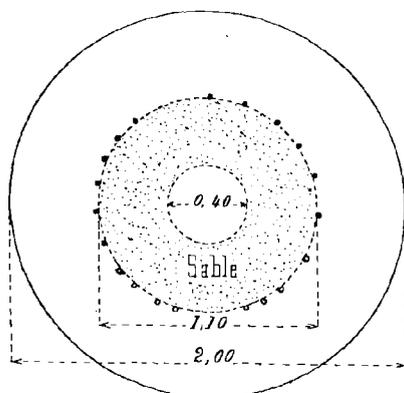


Fig. 43.

ment dans une couronne de 1 m. 10 de diamètre extérieur

et 0 m. 40 de diamètre intérieur, ainsi que le montre le croquis ci-dessus.

En outre, 6 billes en plomb et 6 billes en grès de 13 mm. de diamètre ont été placées à la circonférence extérieure de la couronne, ainsi que 8 têtes de gros clous.

1<sup>o</sup> Nous mettons la cuve en mouvement à une première vitesse de 5"8 ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{3,8} = 1,08$ .

Dès le début toutes les billes disparaissent vers la paroi concave, sauf une en plomb qui paraît calée par le sable.

Ensuite, des graviers, venant, partie du bord de la couronne, partie du milieu et roulant sur les sables s'échappent également suivis de sables fins.

Lorsque l'équilibre paraît établi, la couronne a alors l'aspect ci-dessous :

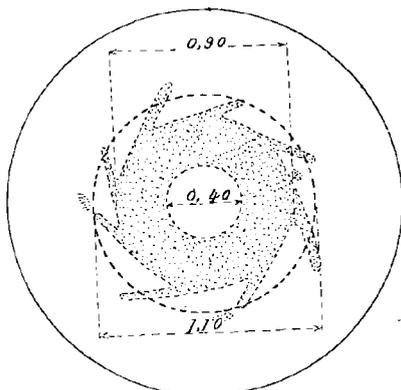


Fig. 46.

où l'on voit nettement des rayons tangents de sable fin dont quelques-uns dépassent de 0 m. 10 le rayon de 0 m. 55 de la couronne primitive.

L'eau est déprimée au milieu et relevée de 0 m. 02 sur les bords ; les flotteurs se tiennent à des distances variables du centre à la circonférence, dans un cercle de 1 m. 20 de diamètre.

2° Nous passons à la deuxième vitesse de 4'' ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{4} = 1,57$ .

Les rayons de sable fin ne sont pas attaqués ; les autres sables ne bougent pas.

L'eau est relevée de 0 m. 04 sur les bords et les flotteurs se rassemblent dans un cercle de 1 m. 10 de diamètre.

3° A la vitesse de 3''3 ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{3,3} = 1,90$ .

Les rayons de sable fin seuls s'amincissent, mais lentement.

L'eau relevée de 0,07 sur les bords et les flotteurs dans un cercle de 0,90 de diam.

4° Vitesse de 2''5 ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{2,5} = 2,51$ .

A cette vitesse la moitié du sable de la couronne est projetée vers la paroi concave ; il ne reste plus qu'une couronne de 0 m. 16 de largeur, soit de 0,36 de rayon extérieur.

Trois têtes de clous gagnent aussi la paroi concave, ainsi que la dernière bille de plomb.

L'eau relevée de 0,11 sur les bords et les flotteurs dans un cercle de 0,70 de diamètre.

5° Vitesse de 2'' ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{2} = 3,14$ .

Tout le reste des sables est alors projeté vivement vers la paroi concave avec les 5 dernières têtes de clou.

L'eau est relevée de 0,18 sur les bords, laissant les flotteurs échoués au centre dans un cercle de 0,50 de diamètre ; ce cercle d'assèchement va en augmentant jusqu'à ce qu'il atteigne près d'un mètre de diamètre ; alors l'eau déborde de la cuve.

6° A ce moment nous stoppons brusquement, l'arrêt est à peu près instantané.

Les graviers sont d'abord violemment projetés vers le centre, les sables fins ensuite, mais ceux-ci décrivent des spirales avant d'atteindre la région déjà occupée par des gra-

viens qu'ils recouvrent. On retrouve les têtes de clous ainsi que les billes en grès à la limite des sables, mais les billes en plomb sont toutes restées le long de la paroi concave.

Les flotteurs décrivent tous des circonférences à des distances variables du centre.

L'état des sables à la fin de cette expérience a l'aspect figuré par le croquis ci-dessous :

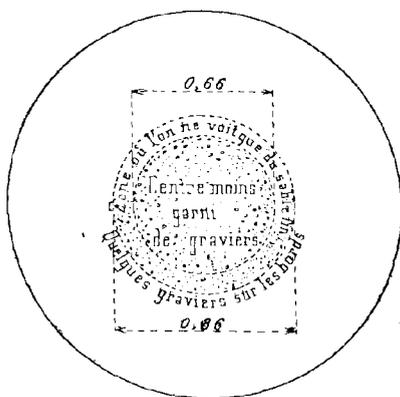


Fig. 47.

2<sup>e</sup> expérience. — L'état des sables est le même qu'à la fin de l'expérience précédente.

1<sup>o</sup> Vitesse de 5''3 ; vitesse angulaire  $\frac{6,28}{5,5} = 1,14$ .

Toutes les billes en grès ont disparu avec 3 billes en plomb.

Des graviers sont partis dès le début avec un peu de sable. Même circonstance que précédemment, les graviers viennent pour la plupart du milieu de la couronne et roulent sur les sables du dessous.

Rayons tangents de sable fin comme plus haut.

2<sup>o</sup> Vitesse de 4'' ; vitesse angulaire = 1,57.

Les rayons de sable fin ne bougent pas ; les 3 billes en plomb s'échappent ;

3<sup>o</sup> Vitesse de 3''3 ; vitesse angulaire = 1,90.

Quelques grains de sable se détachent des rayons qui s'amincissent ;

4<sup>o</sup> Vitesse de 2''5 ; vitesse angulaire = 2,51.

Des sables et graviers, ceux-ci gagnant de vitesse les premiers, partent doucement ; mais la couronne diminue plutôt d'épaisseur que de largeur.

5<sup>o</sup> Vitesse de 2'' ; vitesse angulaire = 3,14.

Tous les sables, en dehors du cercle de 0,20 de rayon, partent vivement, précédés par les têtes de clous.

Les flotteurs s'échouent au centre.

6<sup>o</sup> Nous stoppons brusquement.

Même état que précédemment.

3<sup>o</sup> *expérience.* — L'état des sables est le même qu'à la fin de l'expérience précédente :

1<sup>o</sup> Vitesse de 3''3 ; vitesse angulaire = 1,90.

Tous les sables partent vivement et font place nette jusqu'à la limite d'un cercle de 0,25 de rayon.

L'eau relevée de 0,07 sur les bords.

Les flotteurs dans un cercle de 1 mètre de diamètre.

2<sup>o</sup> Vitesse de 2'' ; vitesse angulaire = 3,14.

Les sables partent jusqu'à la limite d'un cercle de 0 m. 18 de rayon.

Le centre assèche comme précédemment avec les flotteurs échoués.

3<sup>o</sup> Arrêt brusque.

Les sables se groupent comme précédemment vers le centre.

4<sup>o</sup> *expérience.* — Même état des sables qu'à la fin de l'expérience précédente.

1<sup>o</sup> Vitesse de 7''8 ; vitesse angulaire =  $\frac{6,28}{7,8} = 0,81$ .

Rien ne bouge.

2<sup>o</sup> Vitesse de 7''2 ; vitesse angulaire = 0,87,

Rien ne bouge.

3<sup>o</sup> Vitesse de 4''4 ; vitesse angulaire = 1,43.

Quelques menus graviers, en quantité insignifiante, se détachent.

4° Vitesse de 4'' ; vitesse angulaire = 1,57.

Rien ne bouge.

5° Vitesse de 3''3 ; vitesse angulaire = 1,90.

Quelques grains de sable et de gravier s'en vont très doucement.

6° Vitesse de 2''5 ; vitesse angulaire = 2,51.

Les sables partent vivement en amincissant la couronne, qui a presque le même diamètre qu'au début, soit 0 m. 85.

7° Vitesse de 2'' ; vitesse angulaire = 3,14.

Nouvelle projection brusque vers la paroi concave et disparition totale des sables jusqu'à la limite du cercle de 0 m. 20 de rayon.

8° Nous débrayons le moteur, de façon à obtenir un arrêt lent.

Les sables se rassemblent dans un cercle de 1,10 de diamètre environ au lieu de 0,86, dans le cas de l'arrêt brusque ; en outre la couche n'est pas d'épaisseur aussi uniforme et il y a même des points où il n'y a pas du tout de sable ; enfin le gravier ne se détache pas, comme dans le cas de l'arrêt brusque, du sable fin avec lequel il est plus mélangé.

5° *expérience.* — L'état des sables est le même qu'à la fin de l'expérience précédente.

1° Vitesse de 7'' ; vitesse angulaire = 0,90.

Les sables fins sur le bord du cercle de 0,55 de rayon s'amincissent, sortent même de 0 m. 08 à 0 m. 10 en dehors de ce cercle, mais sans continuer vers la paroi concave.

2° Vitesse de 4'' ; vitesse angulaire 1,57.

Une certaine quantité de sables s'est portée vers la paroi concave ; des rayons tangents se sont formés.

3° Vitesse de 3''3 ; vitesse angulaire = 1,90.

Rien ne bouge.

4° Vitesse de 2''5 ; vitesse angulaire = 2,51.

Les sables partent vivement jusqu'à 0 m. 30 du centre.

5° Vitesse de 2" ; vitesse angulaire = 3,14.

Les sables continuent à fuir vers la paroi concave jusqu'à la limite du cercle de 0,20 de rayon.

6° Arrêt brusque.

Même phénomène que précédemment.

6<sup>e</sup> expérience. — La cuve est vide d'eau ; nous y plaçons 10 litres de sable disposé en couronne, comme dans la première expérience.

Même à la vitesse de 2", vitesse angulaire = 3,14, rien n'a bougé.

7<sup>e</sup> expérience. — Nous mettons de l'eau seulement dans la cuve sur 0,15 de hauteur.

Nous marchons d'abord à la vitesse de 2"5 ; l'eau ayant acquis à peu près la même vitesse que la cuve, nous passons à la vitesse de 3"3, de manière à obtenir pour l'eau une vitesse supérieure à celle de la cuve.

Dans ces conditions, le sable projeté suivant un même méridien reste en place.

Nous stoppons brusquement ; tous les sables viennent se loger dans un cercle de 0,50 de rayon.

8<sup>e</sup> expérience. — Même expérience que ci-dessus, mais avec arrêt lent.

Les sables restent toujours à la place où ils tombent et, à l'arrêt, viennent se cantonner dans un cercle de 0 m. 55 de rayon.

Rouen, le 14 novembre 1892.

*Le Conducteur,*

A. PORCHER.

## § 2. — NOTE SUR LES FORMULES THÉORIQUES

Soient  $RDD'R'$  une section méridienne du bassin tournant (fig. 47);

$oR = R$  son rayon,

$Oz$  l'axe de rotation pris pour axe des ordonnées ;

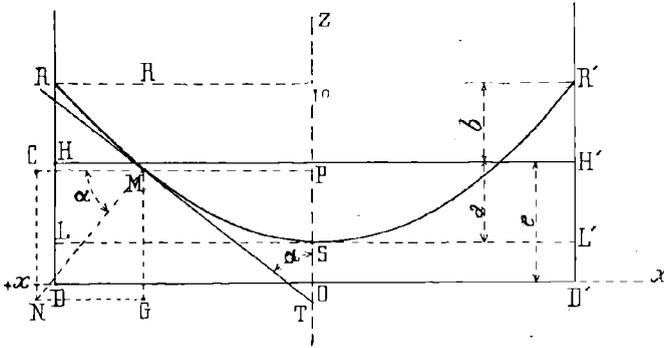


Fig 47.

$Ox$  la base du bassin prise pour axe des abscisses (Pour la facilité de la lecture de la figure, les abscisses positives sont à gauche de l'origine).

$III'$  le niveau de l'eau au repos, à une hauteur  $e$  au-dessus de la base ;

$RSR'$  la ligne de niveau correspondant à une vitesse angulaire  $\omega$ .

Il faut, pour l'équilibre, que cette ligne ait pour normale, en chacun de ses points, la résultante des forces auxquelles est soumise la molécule correspondante. Nous admettrons pour un instant que ces forces sont au nombre de deux seulement, la pesanteur et la force centrifuge.

Soient  $M$  l'une quelconque de ces molécules,  $MP = x$  son abscisse,  $OP = z$  son ordonnée.

Son poids est représenté en grandeur et en direction par une verticale telle que  $MG = P = mg$ .

La force centrifuge a pour expression générale  $\frac{mv^2}{r}$ ; dans le cas qui nous occupe, elle s'exprime par  $m\omega^2x$ , et nous la représentons sur la figure par l'horizontale MC.

La résultante MN de ces deux forces fait avec l'horizontale un angle CMN que nous appellerons  $\alpha$ . On a donc :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{g}{\omega^2 x}.$$

Or, l'angle MTz, que la tangente MT fait avec la verticale Oz, a ses côtés respectivement perpendiculaires à ceux de  $\alpha$ ; il lui est donc égal. Par conséquent,  $\operatorname{tg} \alpha$  est égal au coefficient différentiel  $\frac{dx}{dz}$ .

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dz} &= \frac{g}{\omega^2 x}, & \omega^2 x dx &= g dz \\ \omega^2 x^2 &= 2gz + \text{constante.} \end{aligned}$$

En appelant  $z_0$  l'ordonnée OS correspondant à la valeur nulle de l'abscisse  $x$ , il vient :

$$\omega^2 x^2 = 2g(z - z_0) \quad x^2 = 2 \frac{g}{\omega^2} (z - z_0).$$

Cette équation est celle d'une parabole dont le paramètre est  $\frac{g}{\omega^2}$ .

Si nous plaçons l'origine des coordonnées au sommet S de cette parabole, l'équation est simplement :

$$x^2 = 2 \frac{g}{\omega^2} z, \quad \text{ou } z = \frac{\omega^2 x^2}{2g}.$$

La vitesse  $v$  de la molécule M est  $\omega x$  et la hauteur  $h$  due à cette vitesse est  $\frac{v^2}{2g}$ . Donc  $z = h$ .

Par conséquent, toute molécule de la surface éprouve une

dénivellation égale à la hauteur due à la vitesse dont elle est animée.

La molécule qui est à la paroi est animée de la plus grande vitesse  $V = R\omega$ , son ordonnée  $Z$ , qui est maximum, est égale à la hauteur  $H$  due à la vitesse  $V$ ,  $Z = H = \frac{V^2}{2g} = \frac{R^2\omega^2}{2g}$ .

On peut remarquer que le paramètre  $\frac{g}{\omega^2}$  de la parabole peut s'écrire  $\frac{R^2}{2Z}$ .

L'ordonnée  $Z$  est la dénivellation totale, elle se compose de deux parties : l'abaissement  $a$  du sommet  $S$  au-dessous du niveau  $HH'$ , et le relèvement  $b$ , au-dessus de ce même niveau, de la molécule qui est à la paroi.  $Z = a + b$ .

Je dis que ces deux parties sont égales. Considérons en effet la partie du bassin représentée par le rectangle  $RLL'R'$ . Au repos, il contient un volume d'eau contenu dans un cylindre ayant pour mesure  $\pi R^2 a$ , et un volume d'air contenu dans un cylindre ayant pour mesure  $\pi R^2 b$ . Quand le bassin tourne, les volumes d'eau et d'air ne changent pas, mais leurs formes changent. L'air est contenu dans une calotte de parabolôïde qui a pour mesure :

$$\pi Z^2 \times \frac{R^2}{2Z} = \pi R^2 \frac{Z}{2} = \pi R^2 \times \frac{a+b}{2}.$$

Donc :

$$b = \frac{a+b}{2} \quad \text{et} \quad a = b.$$

Le parabolôïde est tangent au fond du bassin (fig. 48) lorsque  $Z = 2e$ .

Dans ce cas, la vitesse angulaire est égale à :

$$\omega = \frac{2\sqrt{ge}}{R}$$

Quand la vitesse angulaire est supérieure à  $\frac{2\sqrt{ge}}{R}$ , il y a assèchement du fond du bassin, sur un cercle concentrique à

l'axe de rotation et le sommet du paraboloïde devient virtuel.

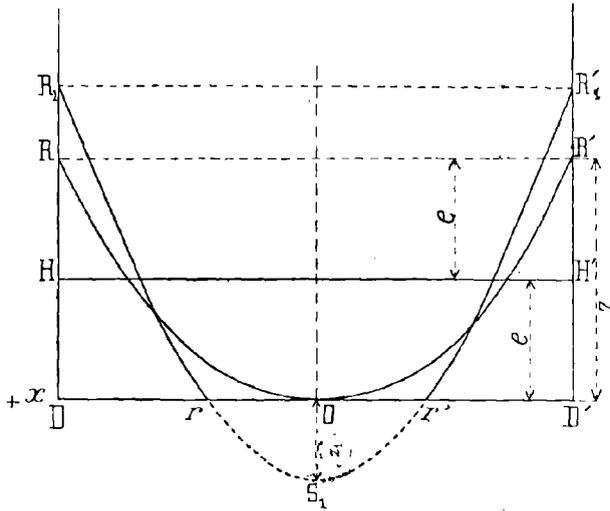


Fig. 48.

Soient  $r$  le rayon du cercle asséché et  $z_1$  l'ordonnée virtuelle du sommet ; on a :

$$\frac{r^2}{R^2} = \frac{z_1}{Z}.$$

Or  $Z$  se compose, dans ce cas, de deux parties, l'une réelle  $Z_1 = DR_1$ , et l'autre virtuelle  $OS_1 = z_1$ . Donc :

$$\frac{r^2}{R^2} = \frac{z_1}{Z_1 + z_1}$$

d'où :

$$\frac{R^2 - r^2}{R^2} = \frac{z_1}{Z}$$

$$Z = Z_1 \frac{R^2}{R^2 - r^2}$$

d'où :

$$\omega = \sqrt{\frac{2gZ_1}{R^2 - r^2}}.$$

On peut d'ailleurs établir directement la formule :

$$z_1 = \frac{Z_1(Z_1 - 2e)}{2e}$$

en considérant que le cylindre d'air  $R_1R'_1II'H$  est équivalent à la différence entre les deux calottes de paraboloides  $R_1S_1R'_1$  et  $rS_1r'$ .

Les chiffres recueillis dans les expériences faites à Rouen diffèrent sensiblement de ceux qui résultent des formules ci-dessus. Ce désaccord tient à ce que, pour l'établissement de ces formules, il a été fait abstraction de forces dont l'action est comparable à celle de la pesanteur et de la force centrifuge. La résistance de l'air notamment influe sur le phénomène ainsi que l'ont constaté les expérimentateurs de Langon (1); elle ralentit le mouvement des molécules qui sont à la surface et par conséquent elle diminue la vitesse de la masse entière de l'eau; en sorte qu'une vitesse angulaire  $\omega$  imprimée au bassin ne communique à l'eau qu'une vitesse angulaire sensiblement moindre  $\omega(1 - \epsilon)$ .

Dans les expériences de Rouen, c'est la vitesse de rotation du bassin qui a été enregistrée. Le coefficient de réduction  $\epsilon$  aurait pour valeur moyenne 0,17.

Mais il serait nécessaire de distinguer le cas où le bassin tournant ne contient que de l'eau, et celui où il contient en même temps des matériaux solides. Il est en effet possible que l'attraction moléculaire qui existe entre l'eau et ces matières soit assez puissante pour que ces effets se manifestent dans les expériences du bassin tournant.

Il y aurait lieu en résumé de faire de nouvelles expériences

(1) Dans la première partie de l'expérience, ... « Les flotteurs descendent « peu à peu la pente du paraboloides et quelques-uns viennent même échouer « sur les parties asséchées »...

Dans la deuxième partie, « Les flotteurs se rapprochent généralement « beaucoup de la rive concave, mais sans régularité. Cette partie du phénomène, dans laquelle la résistance de l'air paraît jouer un rôle prépondérant, n'a pas la netteté de l'autre ».

ces en vue de faire ressortir séparément les effets de chacune des forces qui peuvent intervenir dans le phénomène. En ce qui concerne la résistance de l'air, on pourrait l'annihiler en fermant, par exemple, le bassin par un vitrage qu'on placerait sur sa base supérieure.

On pourrait aussi, indépendamment de l'observation de la vitesse angulaire du bassin, observer directement la vitesse réelle de l'eau en différents points de la section, ce qui pourrait se faire de diverses manières : pendule hydraulique, tube de Pitot, moulinet, flotteurs (non saillants au-dessus de l'eau).

---

## PIÈCE ANNEXE V

---

# EXTRAITS

DU MÉMOIRE SUR LA SIXIÈME QUESTION DU PROGRAMME  
DU SIXIÈME CONGRÈS

DE NAVIGATION TENU A LA HAYE EN 1894

Par MM. MENGIN et GUIARD

---

a) Nous donnons, sous forme de diagrammes, l'étude comparative des largeurs, courbures et profondeurs pour la Garonne maritime entre Castets et l'île Lalande, sur 51 kilomètres.....

On voit par ce diagramme que la courbe des profondeurs reproduit presque partout celle des courbures avec toutes ses dentelures. Les quelques anomalies que l'on peut remarquer s'expliqueraient facilement, soit par des variations de largeur, surtout en aval de Langoiran, soit par des irrégularités du tracé et des circonstances locales que la lecture de plans détaillés peut seule faire comprendre.....

b) En ce qui concerne la Seine maritime, entre Rouen et la mer, sur 104 kilomètres, les variations incessantes de la largeur ont un rôle prépondérant... De plus, on rencontre assez fréquemment dans le fond du lit des bancs résistants

ou incomplètement mobiles, rocher, tourbe, galets, argiles... L'influence des courbures est donc plus difficile à discerner...

La courbe des profondeurs suit généralement celle des largeurs. En y regardant de près, on remarque de nombreuses différences qui ne s'expliquent que par les courbures...

... Il n'y a presque aucune des dentelures de la courbe des profondeurs... qui ne s'explique par la superposition de l'effet des largeurs et des courbures agissant tantôt dans le même sens, tantôt en sens inverse.

... Le fond mobile reflète toutes les circonstances du lit, largeurs et courbures, même celles qu'on aurait été tenté de considérer comme insignifiantes.

Pour obtenir le meilleur résultat possible, il n'y a rien à négliger....

c) Sur la Seine,... les écarts varient de 400 mètres à 1.200 mètres, la largeur variant de 200 mètres à 500 mètres. C'est donc encore le rapport 2, en moyenne, car, en fait, ce rapport sur la Seine est loin d'être constant.

La loi de l'écart qui, pour les rivières à marée, agit dans les deux sens, est générale... Pour l'aménagement des tracés, on peut pratiquement adopter entre l'écart et la largeur le rapport 2....

d) Tous rétrécissements et toutes sinuosités nuisent à l'introduction du flot et affectent plus ou moins, suivant leur importance, la puissance hydraulique du fleuve.

## PIÈCE ANNEXE VI

---

# COURBURES

---

Quand on étudie l'influence que la forme du lit exerce sur la profondeur d'un cours d'eau à fond mobile, on rencontre deux questions de géométrie qui se posent ainsi :

1<sup>o</sup> Une courbe étant donnée par son tracé sur un plan, déterminer la succession de ses courbures ;

2<sup>o</sup> Et, réciproquement, déterminer une courbe quand on connaît la succession de ses courbures.

Nous avons abordé ces questions de diverses manières, par les procédés graphiques et par l'analyse mathématique. Aucune des méthodes que nous avons employées n'a la simplicité et la précision pratiques qui seraient désirables. Nous les exposerons sommairement à titre de contribution à la recherche d'une bonne solution qui reste à trouver.

*Arcs de cercle.* — Pour déterminer les courbures d'une courbe donnée graphiquement, ce qui paraît le plus simple, et ce qu'on fait généralement, c'est la décomposition en arcs de cercle. On procède soit par les normales, soit par les tangentes. On se sert habituellement des gabarits circulaires qu'on trouve dans le commerce. Ayant le rayon, et par conséquent la courbure, de chaque arc circulaire élémentaire, on dresse sans difficulté le diagramme des courbures. Chacune d'elles étant représentée par une parallèle à l'axe des

abscisses, le diagramme consiste dans une succession, montante ou descendante, de marches d'escalier.

Cette discontinuité n'est pas généralement l'image de la réalité ; dans les courbes naturelles la courbure ne varie pas en effet par ressauts saccadés ; elle suit une loi continue, et c'est cette variation continue qu'il importe de saisir pour la rapprocher de celle suivant laquelle varient les profondeurs du chenal.

*Arcs de parabole.* — On peut à cet effet décomposer la courbe donnée en arcs élémentaires de paraboles du second degré. Soient (fig. 48) :

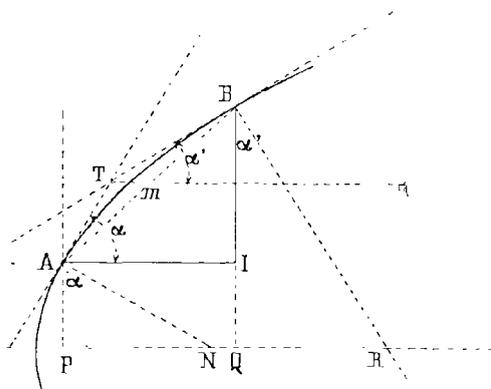


Fig. 48.

AB l'un de ces arcs ;

AT et BT les tangentes aux points extrêmes A et B ;

$\alpha$  et  $\alpha'$  les angles que font ces tangentes avec l'axe de la parabole (La direction de cet axe est déterminée par la droite  $Tm$  joignant le point d'intersection  $T$  des tangentes avec le milieu  $m$  de la corde  $AB$ ). Ces angles sont aussi ceux que les ordonnées  $AP = y$  et  $BQ = y'$ , font respectivement avec les normales  $AN$  et  $BR$  ;

$h$  la différence connue  $BI$  entre les deux ordonnées  $y'$  et  $y$ .

Le paramètre  $p$  de la parabole est égal à la sous-normale.

On a donc :

$$y = p \cotg \alpha \quad \text{et} \quad y' = p \cotg \alpha'$$

d'où :

$$p = \frac{h}{\cotg \alpha' - \cotg \alpha},$$

expression facile à calculer à l'aide de mesures prises sur le plan.

D'autre part, le rayon de courbure peut s'exprimer en fonction de  $p$  et de  $\alpha$ , savoir :

$$p = \frac{ds}{d\alpha} = \frac{dy}{d\alpha \sin \alpha}.$$

Or, de la relation  $p = y \operatorname{tg} \alpha$ , on tire :

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{p}{\sin^2 \alpha}.$$

Donc :

$$\rho = - \frac{\sin^3 \alpha}{p}.$$

En faisant abstraction du signe — dont la considération n'est pas utile ici, il vient :

$$c = \frac{p}{\sin^2 \alpha},$$

expression facile à calculer à l'aide des logarithmes.

Ce procédé a été suivi dans l'étude des courbures de la Garonne (*Annales*, 1868). Il est en défaut pour les petites courbures à cause de l'incertitude graphique de la direction de l'axe de la parabole. Cette courbe, n'ayant d'ailleurs en aucun de ses points une courbure nulle, ne se prête pas, aux abords des points d'inflexion, à une décomposition en arcs élémentaires d'une certaine étendue.

*Lemniscate.* — La méthode suivante a été appliquée à la petite rivière artificielle de Bordeaux et à l'Escaut maritime. Elle est assez commode pour les calculs, mais elle est en défaut au sommet de la courbe.

Sur un plan du cours d'eau, à une échelle convenable, on

mène une ligne droite IT (fig. 49) coïncidant sur la plus grande longueur possible avec la portion du tracé où le sens de la courbure change. On prend le milieu I de cette lon-

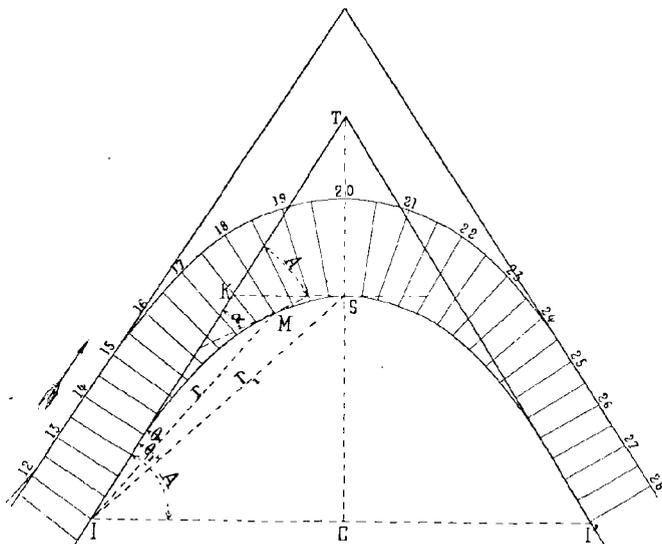


Fig. 49.

gueur. On mène la tangente SK à l'extrémité S de l'arc susceptible d'être identifié avec une courbe de la famille des *lemniscates*.

On mène le rayon vecteur  $IS = r_1$ . On mesure l'angle  $SKT = A$ , et l'angle  $SIT = \theta_1$ . On prend le rapport  $n = \frac{A}{\theta_1}$  et la différence  $V_1 = A - \theta_1$  de ces deux angles.

On calcule le paramètre :

$$R^{n-1} = \frac{r_1^{n-1}}{\sin V_1}$$

On mesure sur le plan le rayon vecteur  $r$  d'un point quelconque M, et la courbure en ce point est donnée par la formule :

$$c = n \frac{r^{n-2}}{R^{n-1}},$$

très commode pour le calcul logarithmique.

La démonstration en a été donnée dans une note insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées* (avril 1884, pages 417 et suivantes). Elle se réduit à la traduction en coordonnées polaires de la définition même de la courbure, en supposant que l'angle  $\alpha$  de la tangente avec l'axe polaire est dans un rapport constant  $n$  avec l'angle vecteur  $\theta$ .

*Spirale-volute.* — La forme en escalier, conséquence de la décomposition de la courbe en arcs de cercle, est très incommode pour l'itinéraire des courbures et ne concorde pas avec ce que l'on fait généralement pour le profil en long du che-

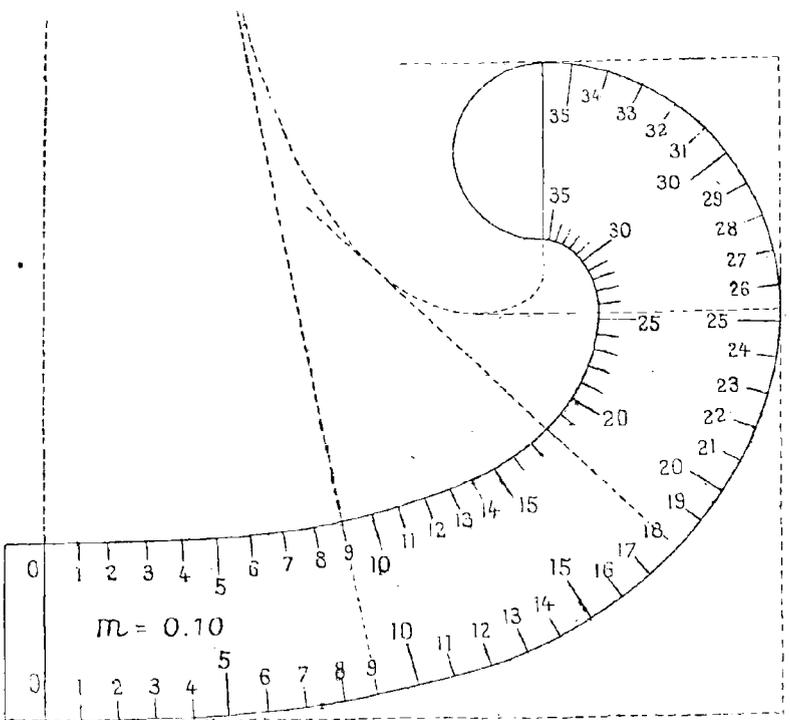


Fig. 50.

nal. Des sondages donnent, en effet, la profondeur sur un certain nombre de points et on suppose que, entre deux points consécutifs, la variation de la profondeur est proportionnelle

à la distance. Pour avoir une épure homogène et des résultats facilement comparables, il convient que la même hypothèse préside à la confection des deux diagrammes. Or, il est trop contraire à la réalité, et par conséquent inadmissible, que le chenal soit figuré par une ligne brisée en escalier. Il est donc naturel d'admettre que les courbures varient, comme les profondeurs, proportionnellement aux distances.

Ces considérations nous ont conduit à étudier la courbe dont la courbure est proportionnelle à la longueur de l'arc. Cette courbe à laquelle, pour la facilité du langage, nous avons donné le nom de *spirale-volute*, a été l'objet d'une étude dont les résultats sont consignés dans le mémoire de 1868. L'administration des Travaux publics a fait construire des gabarits gradués dont le bord convexe est découpé suivant le contour de cette courbe. Ces *gabarits de courbure* sont susceptibles de rendre, pour les courbes à courbure variable, les mêmes services que la règle graduée et la cerce circulaire pour la ligne droite et l'arc de cercle. Nous en donnons un spécimen (fig. 50) et nous renvoyons, pour de plus amples détails, à la pièce annexe VII.

*Bi-sinusoïde.* — La courbe dont les courbures sont proportionnelles aux ordonnées d'une sinusoïde rapportée à son axe, par exemple :

$$c = C \cos \pi \frac{s}{S},$$

a des coordonnées dont l'expression générale est :

$$x = \int \cos \left( A \sin \pi \frac{s}{S} \right) ds + \text{constante}$$

$$y = \int \sin \left( A \sin \pi \frac{s}{S} \right) ds + \text{constante.}$$

Les éléments de ces intégrales sont doublement transcendants ; la courbe peut, pour ce motif, être appelée *bi-sinusoïde*. Elle jouit de propriétés intéressantes, mais elle ne paraît pas susceptible d'être appliquée dans la pratique.

L'équation (5) de la page 110 montre que la forme théorique de la courbe des courbures est une sinusoïde rapportée à sa tangente supérieure :

$$c = \frac{C}{2} \left( 1 - \cos \pi \frac{s}{S} \right).$$

Dans ces conditions, l'expression analytique des coordonnées est encore plus compliquée. Pour le moment, ce n'est que par des procédés graphiques que l'on peut déterminer *approximativement* le tracé d'une rive concave dont la succession des courbures est représentée par une sinusoïde rapportée à sa tangente supérieure.

Plusieurs corollaires peuvent être déduits des équations des lois empiriques. Nous citerons le suivant.

En éliminant la variable  $s$  entre les équations (1) et (2) de la page 109, on obtient l'équation :

$$(10) \quad \left( \frac{h_1 - h}{h_1 - h_0} \right)^2 + \left( \frac{c_1 - c}{c_1} \right)^2 = 1$$

qui est celle d'une ellipse dont les coordonnées sont les oscillations de la courbure et de la profondeur de part et d'autre de leur valeur moyenne.

---

## PIÈCE ANNEXE VII

---

### INSTRUCTION

SUR

### L'EMPLOI DES GABARITS DE COURBURE

PAR

**M. FARGUE,**

Inspecteur général des ponts et chaussées.

---

Un gabarit de courbure est un instrument susceptible de rendre, pour le dessin graphique des courbes à courbure variable, les mêmes services que la règle graduée pour la ligne droite et la cerce circulaire pour le cercle.

Son bord convexe est formé par une courbe dont la courbure est proportionnelle à la longueur de l'arc mesurée à partir de l'origine de la graduation.

Le gabarit est gradué sur ses deux bords. Le chiffre inscrit sur le bord convexe est la valeur numérique de la courbure, c'est-à-dire l'inverse du rayon de courbure exprimé en mètres. Le chiffre du bord concave est un simple repère de direction : toute droite joignant, d'un bord à l'autre, deux divisions de même graduation est normale à l'arc du bord convexe.

Le gabarit est gradué sur ses deux faces de manière à don-

ner des courbures croissantes ou décroissantes dans l'un et dans l'autre sens.

Chaque gabarit est caractérisé par un *module* ou *coefficient* de similitude désigné par la lettre *m*.

Eu égard aux échelles généralement adoptées pour les plans des rivières navigables, les seules valeurs de *m* qui soient réellement utiles dans la pratique sont celles comprises entre 0,10 et 0,50. Des gabarits dont le module varierait de centième en centième, par exemple, entre ces limites, constitueraient une collection très complète. A titre de premier essai, on n'a jusqu'à présent réalisé qu'une collection partielle de seize gabarits seulement, dont les modules ont les valeurs consignées au tableau numérique ci-après.

L'emploi de ces gabarits permet de résoudre, rapidement et avec toute la précision désirable, diverses questions graphiques.

### I. Tracer la normale en un point A quelconque (fig. 51) d'une courbe quelconque

On cherche, par essais successifs de superposition, quel est

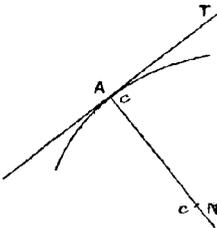


Fig. 51.

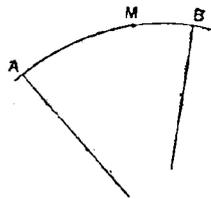


Fig. 52.

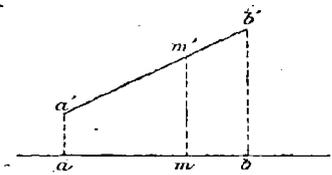


Fig. 53.

le gabarit dont le bord convexe coïncide avec le plus grand arc possible de la courbe de part et d'autre du point A. On marque sur le dessin le point N qui a, sur le bord concave de l'instrument, la graduation *c* lue au point A. Le gabarit étant enlevé, on trace la droite AN qui est la normale cherchée.

## II. Déterminer la courbure en un point A quelconque (fig. 51) d'une courbe donnée

En général, l'opération précédente est d'une exactitude graphique suffisante, et le chiffre  $c$  lu sur la graduation, au point A, mesure la courbure cherchée.

Si l'on veut une précision plus grande, on trace préalablement la tangente  $\Delta T$ , c'est-à-dire la droite qui coïncide sur la plus grande longueur avec la courbe de part et d'autre du point A. La perpendiculaire  $AN$  est la normale, et l'on cherche, par essais successifs de superposition, le gabarit qui, tout en fournissant un arc en coïncidence maximum avec la courbe, satisfait à la condition de la coïncidence des normales. Le chiffre  $c$  que cette double condition amène au droit du point A est la courbure cherchée.

## III. Dresser le diagramme des courbures d'un arc de courbe

PREMIER CAS. — Si l'arc  $AB$  (fig. 52) peut être identifié avec une partie du bord convexe d'un gabarit unique, on opère comme il vient d'être dit, avec ce gabarit, sur les deux extrémités A et B de l'arc donné.

On porte ensuite en abscisse  $ab$  (fig. 53) la longueur  $AB$ , et en ordonnées des longueurs  $aa'$  et  $bb'$  respectivement proportionnelles aux courbures  $c_a$  et  $c_b$  lues sur le gabarit.

Les ordonnées  $mm'$  de la droite  $a'b'$  représentent les courbures des divers point M de l'arc  $AB$ .

*Remarque.* — Abstraction faite des échelles adoptées, la longueur  $ab$  de l'arc  $AB$  est égale à la différence des courbures multipliée par le demi-carré du module  $m$ .

$$ab = (c_b - c_a) \times \frac{m^2}{2}.$$

Par conséquent, le coefficient angulaire de la droite  $a'b'$ ,

c'est-à-dire le paramètre qui mesure la variation plus ou moins rapide de la courbure, est  $\frac{2}{m^2}$ .

Les seize valeurs des coefficients  $\frac{m^2}{2}$  et  $\frac{2}{m^2}$  correspondant aux gabarits de la collection sont données dans le tableau ci-après.

DEUXIÈME CAS. — Quand l'arc donné (fig. 54) n'est pas susceptible d'être trouvé sur un gabarit unique, on y prend un certain nombre de points A, B, C, D, ... et l'on opère comme il vient d'être dit sur chacun des arcs partiels AB, BC, CD, ... On dresse ainsi rapidement, et avec une exactitude très satisfaisante dans la pratique, une ligne polygonale  $a'b'c'd'$  (fig. 55) qui est le diagramme des courbures.

*Première remarque.* — L'opération revient, comme on le voit, à décomposer la courbe donnée (fig. 54) en arcs de gabarits se raccordant entre eux par osculation, c'est-à-dire par contact de second ordre, aux points de division A, B, C, D, ...

*Deuxième remarque.* — L'aire d'un trapèze élémentaire  $cc'b'b$  (fig. 55) est égale à l'angle  $\theta$  formé par les deux tangentes (ou les deux normales) aux points B et C. L'aire totale du polygone des courbures est égale à l'angle  $\alpha$  formé par les tangentes (ou les normales) extrêmes.

Cette remarque fournit une vérification qui est très utile dans une épure de grandes proportions, notamment quand on dresse le diagramme des courbures de l'axe ou des rives d'un cours d'eau sur une longueur de plusieurs kilomètres (voir *Annales des Ponts et Chaussées*, 1868, tome XV, et mars 1894).

*Troisième remarque.* — Si l'on opère sur un plan à l'échelle  $\frac{1}{n}$ , les courbures du tracé réel sont  $n$  fois plus petites que celles lues sur le gabarit.

Les longueurs réelles sont au contraire  $n$  fois plus grandes que celles déduites de la formule :

$$(c_a - c_b) \times \frac{m^2}{2}.$$

*Quatrième remarque.* — Dans l'énoncé du théorème qui fait l'objet de la deuxième remarque, l'angle est supposé exprimé en unités de longueur, c'est-à-dire par l'arc qui le mesure dans le cercle dont le rayon est l'unité. Pour l'exprimer en degrés sexagésimaux, il faudrait faire intervenir le rapport  $\frac{180}{\pi}$ .

**IV. Tracer une courbe dont les courbures varient suivant une loi donnée graphiquement**

On décompose d'abord le contour du diagramme des courbures en éléments rectilignes  $a'b'$  (fig. 55), de telle sorte que

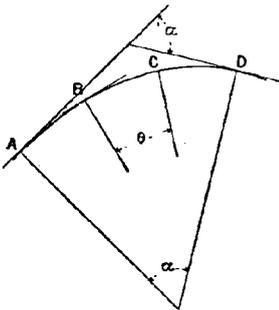


Fig. 54.

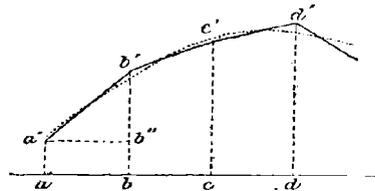


Fig. 55.

l'aire de tout trapèze élémentaire soit égale à celle du quadrilatère curviligne correspondant.

On prend ensuite les valeurs successives du rapport  $\frac{ab}{b'b''}$ , c'est-à-dire de l'accroissement de l'arc à l'accroissement de la courbure, et l'on cherche dans la colonne 3 du tableau numérique ci-après, les chiffres qui en sont le plus rapprochés. Les valeurs correspondantes de  $m$  indiquent les gabarits dont il faut faire usage pour tracer les arcs successifs de la courbe cherchée.

V. Deux arcs AB et CD (fig. 54) étant donnés, les raccorder par osculation, c'est-à-dire par un troisième arc BC ayant avec chacun d'eux un contact du second ordre.

On mène les normales aux extrémités B et C, et l'on détermine leur angle  $\theta$  (en unités de longueur). On détermine aussi les courbures  $c_b$  et  $c_c$  aux mêmes points. On a, dans ce cas, la relation

$$\frac{m^2}{2} = \frac{20}{c_c^2 - c_b^2}$$

qu'il est facile d'établir par la considération du trapèze  $bcc'b'$ . On cherche dans la colonne 3 du tableau numérique ci-après le nombre qui se rapproche le plus de la valeur du second membre. La valeur correspondante de  $m$  indique le gabarit à employer pour tracer l'arc cherché.

Quand l'arc est peu étendu, la question se résout simplement en cherchant, par quelques tâtonnements que l'habitude abrège beaucoup, le gabarit qui donne le plus exactement la coïncidence simultanée des normales et des chiffres de courbure.

Ce problème comporte plusieurs cas particuliers dont la discussion complète ne saurait être abordée ici.

Tableau numérique

Numéros d'ordre	$m$	$\frac{m^2}{2}$	$\frac{2}{m^2}$	Numéros d'ordre	$m$	$\frac{m^2}{2}$	$\frac{2}{m^2}$
1	2	3	4	1	2	3	4
1	0,10	0,00500	200,00	9	0,18	0,01620	61,73
2	0,11	0,00605	165,29	10	0,19	0,01805	55,40
3	0,12	0,00720	138,89	11	0,20	0,02000	50,00
4	0,13	0,00845	118,34	12	0,22	0,02420	41,32
5	0,14	0,00980	102,04	13	0,24	0,02880	34,72
6	0,15	0,01125	88,89	14	0,26	0,03380	29,59
7	0,16	0,01280	78,12	15	0,28	0,03920	25,51
8	0,17	0,01445	69,20	16	0,30	0,04500	22,22

## TABLE DES PLANCHES

---

	Après les pages
<i>Planche I.</i> — Plan d'ensemble de la Garonne (fig. 1 et 2) . . .	10
<i>Planche II.</i> — Plan du lit moyen de la Garonne entre Flou- dès et Barsac (fig. 3, 4 et 5) . . . . .	14
<i>Planche III.</i> — Diagramme comparatif (fig. 6 et 7) . . . . .	16
<i>Planche IV.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Plan d'ensemble et détails de la prise d'eau (fig. 12 et 13) . . . . .	38
<i>Planche V.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Plans de sondages de la série A (fig. 14, 15, 16 et 17) . . . . .	42
<i>Planche VI.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Diagrammes des courbures et des profondeurs maxima et minima (fig. 18, 19, 26 et 27) . . . . .	46
<i>Planche VII.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Profils en tra- vers, série A (fig. 20). . . . .	46
<i>Planche VIII.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Plans de son- dages de la série B (fig. 21, 22, 23 et 24) . . . . .	50
<i>Planche IX.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Profils en tra- vers, série B (fig. 25) . . . . .	50
<i>Planche X.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Plans de sondages de la série C (fig. 28, 29, 30 et 35) . . . . .	54
<i>Planche XI.</i> — Petite rivière de Bordeaux. Profils en tra- vers, série C (fig. 31). . . . .	54
<i>Planche XII.</i> — Petite rivière de Bordeaux, série C. Dia- grammes des courbures et des profondeurs maxima et minima (fig. 32, 33 et 34) . . . . .	54
<i>Planche XIII.</i> — Diagramme comparatif des profondeurs du chenal et des courbures aux abords d'Anvers (fig. 38)	68
<i>Planche XIV.</i> — Profil de l'abaissement de l'étiage de la Garonne (fig. 39). . . . .	76
<i>Planche XV.</i> — Suite de la planche précédente (fig. 39 bis) .	76

---



# TABLE DES MATIÈRES

---

	Pages
AVANT-PROPOS . . . . .	1
CHAPITRE PREMIER	
<b>Faits observés</b>	
§ 1. — <i>Régime de la Garonne</i> . . . . .	9
§ 2. — <i>Relation entre le plan et le chenal</i> . . . . .	13
§ 3. — <i>Courbes et biefs</i> . . . . .	19
§ 4. — <i>Lois empiriques</i> . . . . .	22
Ecart du maigre . . . . .	22
Ecart de la mouille . . . . .	25
Loi de la mouille . . . . .	27
Loi de l'angle . . . . .	29
Loi du développement . . . . .	30
Loi de la pente du fond . . . . .	30
Résumé . . . . .	33
§ 5. — <i>La petite rivière artificielle de Bordeaux.</i> . . . .	36
Expériences . . . . .	37
Premier tracé . . . . .	41
Deuxième tracé . . . . .	48
Série B. . . . .	49
Série C. . . . .	53
Résumé . . . . .	56
Prévisions relatives au deuxième tracé . . . . .	57
Principe de la continuité de la courbure. . . . .	61
§ 6. — <i>L'Escaut maritime</i> . . . . .	67
Diagramme . . . . .	67
Discussion . . . . .	70

§ 7. — <i>Largeur du lit moyen</i> . . . . .	74
La Garonne. . . . .	74
Résultats des travaux antérieurs à 1863 . . . . .	74
Bons passages . . . . .	77
Loi expérimentale . . . . .	81
Débit solide . . . . .	82
Faits observés dans les rivières . . . . .	82
Expérience du bassin tournant . . . . .	86
Résumé . . . . .	90
La Seine maritime . . . . .	92
Tracé des rives à l'inflexion . . . . .	94
Rapport entre la largeur du lit et la longueur de la <i>courbe</i> . . . . .	97

## CHAPITRE II

### Déductions

§ 1. — <i>Equations des lois empiriques</i> . . . . .	101
Rivière artificielle . . . . .	101
Comparaison du chenal et des courbures. . . . .	101
Interférence d'une sinusoïde et de sa dérivée. . . . .	106
Equations et leur traduction. . . . .	108
La Garonne. . . . .	113
§ 2. — <i>Lit rectiligne</i> . . . . .	115
§ 3. — <i>Lit curviligne</i> . . . . .	120
Rivières à un seul courant . . . . .	120
Rivières à marées . . . . .	124
Estuaires . . . . .	125
§ 4. — <i>La « Petite Seine » et les expériences en petit</i> . . . . .	127
La « Petite Seine ». . . . .	127
Seine maritime . . . . .	128
Estuaire . . . . .	129
La petite rivière artificielle de Bordeaux. . . . .	131
Vitesses moyennes . . . . .	132
Rayon moyen . . . . .	133
Périmètre mouillé . . . . .	134

TABLE DES MATIÈRES

487

Débit de sable . . . . .	134
Utilité des expériences en petit . . . . .	138

---

PIÈCES ANNEXES

---

I. Notes et mémoires publiés dans les <i>Annales des Ponts et Chaussées</i> . . . . .	142
II. Tableaux numériques . . . . .	143
III. Rapport d'une sous-commission . . . . .	146
IV. Bassin tournant . . . . .	154
§ 1. — <i>Expériences de Rouen</i> . . . . .	154
§ 2. — <i>Note sur les formules théoriques</i> . . . . .	162
V. Extraits d'un mémoire par MM. Mengin et Guiard . . . . .	168
VI. Courbures . . . . .	170
VII. Instruction sur l'emploi des gabarits de courbure . . . . .	177
TABLE DES PLANCHES . . . . .	183
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	185



# ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS (suite)

## OUVRAGES DE PROFESSEURS A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES

- M. AGUILLON. *Législation des mines, française et étrangère*. 40 fr. On vend séparément :  
 — La *Législation en France, dans les colonies et protectorats*, 2<sup>e</sup> édition (très augmentée),  
 1 très fort volume (1.011 pages) . . . . . 25 fr.  
 — Les *Législations étrangères*. . . . . 15 fr.  
 M. PELLETAN. *Levier des plans et nivellement souterrains* (Voir ci-dessus : Durand-Claye).  
 M. CHESNEAU. *Lois générales de la Chimie*. 1 vol. avec 37 figures. . . . . 7 fr. 50  
 M.M. VICAIRE et MAISON. *Cours de Chemins de fer de l'École des Mines*; 582 p., 493 fig. . . . . 20 fr.

## OUVRAGE D'UN PRÉSIDENT A L'ÉCOLE NATIONALE FORESTIÈRE

- M. THIÉRY. *Restauration des montagnes*, avec une *Introduction* par M. LECHALAS père. Vol.  
 de 442 pages, avec 173 figures. . . . . 15 fr.

## OUVRAGES DE DIVERS AUTEURS

- M. CHARPENTIER DE COSSIGNY, ingénieur civil des mines, lauréat de la Société des agri-  
 culteurs de France. *Hydraulique agricole*. 2<sup>e</sup> édit., 1 vol., avec 160 figures . . . 15 fr.  
 M. DEGRAND, inspecteur général honoraire des ponts et chaussées. *Ponts en maçonnerie*  
 (Voir ci-dessus : J. Résal).  
 M. DONIOL, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite. *Réglementation des che-  
 mins de fer d'intérêt local, des tramways et des automobiles*. 1 vol. avec figures. . . 10 fr.  
 — *Complément à l'ouvrage ci-dessus* . . . . . 3 fr.  
 M. le Dr DUCHESNE, ancien président de la Société de médecine pratique. *Hygiène géné-  
 rale et Hygiène industrielle*, ouvrage rédigé conformément au programme du *Cours  
 d'hygiène industrielle* de l'École centrale. 1 vol. de 740 pages, avec figures . . . 15 fr.  
 M. HENRY (Ernest), inspecteur général des ponts et chaussées. *Théorie et pratique du mou-  
 vement des terres, d'après le procédé Bruckner*. 1 vol., 2 fr. 50. — *Ponts métalliques à tra-  
 vées indépendantes : formules, barèmes et tableaux*. 1 vol. de 639 pages, avec 267 figures,  
 20 fr. — *Traité pratique des chemins vicinaux*, volume de près de 800 pages. . . . . 20 fr.  
 M. MAURICE KOECHLIN, ingénieur. *Applications de la statique graphique*. 1 vol., avec 341  
 figures et 4 atlas de 34 planches, seconde édition, revue et très augmentée, 30 fr. —  
*Recueil de types de ponts pour routes*. 1 vol. de 306 pages et un atlas. . . . . 25 fr.  
 M. LALLEMAND, ingénieur en chef des mines. *Nivellement de précision* (Voir ci-dessus  
*Durand-Claye*).  
 M. LAVOINNE. *La Seine maritime et son estuaire*, 1 vol., avec 49 figures. . . . . 10 fr.  
 M. LECHALAS père, inspecteur général des ponts et chaussées. *Hydraulique fluviale*. 1 vol.,  
 avec 78 figures. 17 fr. 50. — *Des conditions générales d'établissement des ouvrages dans  
 les vallées* (Voir ci-dessus : J. Résal et Degrand; c'est l'introduction à leur *Traité des  
 Ponts en maçonnerie*).  
 M. LECHALAS fils, ingénieur en chef des ponts et chaussées. *Manuel de droit administratif*.  
 Tome I, 20 fr.; tome II, 1<sup>re</sup> partie, 10 fr.; tome II, 2<sup>e</sup> partie . . . . . 10 fr.  
 M. LÉVY-LAMBERT, ingénieur civil, inspecteur principal à la Compagnie du Nord. *Chemins  
 de fer à crémaillère*, 2<sup>e</sup> édition. 1 vol. de 479 pages avec 137 fig. 15 fr. — *Chemins  
 de fer funiculaires, Transports aériens*. 1 vol., avec 150 figures . . . . . 15 fr.  
 M. LEYGUE, ancien ingénieur auxiliaire des travaux de l'Etat, agent-voyer en chef de la  
 province d'Oran. *Chemins de fer. Notions générales et économiques*. 1 vol. de 617 pages,  
 avec figures . . . . . 15 fr.  
 M. E. PONTZEN, ingénieur civil (l'un des auteurs de *Les chemins de fer en Amérique*):  
*Procédés généraux de construction : Terrassements, tunnels, dragages et déraclements*.  
 1 vol. de 572 pages, avec 234 figures (médaille d'or à l'Exposition de 1900). . . . . 25 fr.  
 M. TARBÉ DE SAINT-HARDOUIN, inspecteur général des ponts et chaussées, ancien directeur  
 de l'École de ce corps. *Notices biographiques sur les ingénieurs des ponts et chaussées*.  
 un vol. . . . . 5 fr.  
 M. P. NIEWENGLOWSKI, ingénieur des mines. *Précis d'électricité*, 1 vol. de 200 pages avec  
 64 figures . . . . . 6 fr.  
 M. N. DE TÈDESCO, ingénieur. *Recueil de types de ponts pour routes en ciment armé*. 1 vol.  
 de 307 pages avec atlas . . . . . 25 fr.

Chaque ouvrage se vend séparément (et aussi chaque volume des ouvrages qui en comprennent plusieurs). Il n'y a pas de numérotage général des volumes formant la collection.

Les ouvrages entrant dans les *Encyclopédies des Travaux publics et Industrielle* sortent en vente chez Ch. Béranger et chez Gauthier-Villars.

# ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

Vol. grand in-8°, avec de nombreuses figures

- Exploitation technique des Chemins de fer**, par A. SCHELLER et A. FLEURQUIN, 1 vol. de 408 pag. avec 109 fig. . . . 12 fr.
- Calcul infinitésimal à l'usage des Ingénieurs**, par E. ROUCHÉ et L. LÉVY, 2 vol. de 557 et 829 p. Chag. vol. . . . 15 fr.
- Cours de géométrie descriptive de l'Ecole centrale**, par C. BRISSE, prof. de ce cours, et H. PICQUET, 478 pag. avec 300 fig. . . . 17 fr. 50
- Construction pratique des navires de guerre**, par A. CRONEAU, 2 vol. (996 pag. et 664 figures) et 1 bel atlas double in-4° de 11 pl., dont 2 en 3 coul. . . . 33 fr.
- Verre et verrerie**, par Léon APPERT, et J. HENRIVAUX, 460 p. 130 fig. et 1 atlas. 20 fr.
- Blanchiment et apprêts; teinture et impression, matières colorantes**, 1 vol. de 674 p., avec 368 fig. et échantillons de tissus imprimés, par GUIGNER, DOMMER et GRANDMOUGIN (de Mulhouse) . . . 30 fr.
- Éléments et organes des machines**, par A. GOUILLY, 1 vol. de 410 pages, avec 740 figures . . . 12 fr.
- Les associations ouvrières et les associations patronales**, par HUBERT-VALLEIROUX, avocat. 1 vol. de 361 pages. 10 fr.
- Traité pratique des ch. de fer (intér. local) et des Tramways**, par P. GUÉDON. 11 fr.
- Traité des Industries céramiques**, par Emile BOURRAY, 1 vol. de 755 pages avec 349 fig. ou groupes de fig. et une planche (Cet ouv. a été traduit en angl.). 20 fr.
- Le vin et l'eau-de-vie de vin**, par Henri de LAPPARENT, insp. gén. de l'agriculture. 1 vol. de 545 p., 110 fig. et 28 caries. 12 fr.
- Métallurgie générale**, par LE VERRIER : Procédés de chauffage, 1 vol. de 370 pages avec 171 figures . . . 12 fr.
- Procédés métallurgiques et études des métaux**, 1 vol. de 403 p. avec 138 fig. et 10 planches . . . 12 fr.
- La Betterave agricole et industrielle**, par GESCHWIND et SELLIER, 1 vol. avec 129 figures (méd. d'arg. soc. nat. d'agric. et méd. d'or des agric. de France). 20 fr.
- Cours de chemins de fer de l'Ecole des Mines**, par VICAIRE et MAISON, 532 p. avec 493 fig. . . . 20 fr.
- Chimie organique appliquée**, par A. JOANNIS, professeur à la Faculté des Sc. de Paris. 1406 p. en 2 vol. . . . 35 fr.
- Traité des machines à vapeur, à gaz, à pétrole et à air chaud**, par ALBERGIS et ROCHE. 2 vol., 1176 p., 693 fig. 38 fr.
- Chemins de fer. Superstructure**, par E. DEHARME (Voir: *Encyc. des Travaux publics*).
- Chemins de fer: Résistance des trains.**
- Traction** par E. DEHARME et A. POLIN, ingénieur de la C<sup>o</sup> du Nord, 447 p., 95 f. et 1 planche . . . 15 fr.
- Chaudières de locomotives**, par les mêmes, 130 fig. et 2 pl. . . . 15 fr.
- Locomotives: Mécanisme, Châssis. Types de machines.** 1 fort vol. avec un bel atlas de 18 pl. double in-4°, par les mêmes. 25 fr.
- Electricité industrielle.** 2<sup>e</sup> éd., v. de 826 p., 404 fig. (C. de M. Monnier à l'Ec. Cent.) 25 fr.
- Machines frigorifiques**, par LORENZ, professeur à la faculté de Halle; traduction de PETIT et JAQUET, 195 p., 131 fig. 7 fr.
- Industries du sulfate d'aluminium, des aluns et des sulfates de fer**, par L. GESCHWIND. 372 p. avec 195 fig. Traduit en anglais . . . 10 fr.
- Accidents du travail et assurances contre ces accidents**, par G. FÉOLDOR (Méd. d'arg. Exp. 1900), 1 vol. de 646 p. 7 fr. 50
- Traité des fours à gaz à chaleur régénérée**, par TOLDT (trad. DOMMER), 392 pages. 68 fig. . . . 11 fr.
- Résistance des matériaux et Éléments de la théorie mathématique de l'élasticité**, par A. FÖPPL, trad. de E. HANN, 489 p., 75 fig. . . . 15 fr.
- Industries photographiques**, par le Professeur FABRE, 662 p., 183 fig. 18 fr.
- La Tannerie**, par MEUNIER, VANSEY et VIGNON (650 p., 98 fig.) . . . 20 fr.
- Industrie des cyanures**, par ROBINS et LENGLEN . . . 15 fr.
- Traité des essais de matériaux**, par A. MARTENS, traduction de P. Breuil. 1 vol. de texte de 671 pages avec 538 fig. et un atlas de 31 grandes planches. 50 fr.
- L'Énergie hydraulique et les Récepteurs hydrauliques**, par U. MASONI. 1 vol. de 320 p. avec 207 fig. . . . 10 fr.
- Le Bôle**, par J. BEAUVIERE, 2 fascicules de 11402 pages avec 485 figures (méd. d'or de la soc. nat. d'agric.) . . . 20 fr.
- Étude expérimentale du Ciment armé**, par R. FEERT, 786 pag. avec 196 fig. 20 fr.
- Traité général des Automobiles à pétrole**, par L. PEISSIE, 503 pages avec près de 300 figures. . . . 17 fr. 50

## P. C. N.

- Chimie élémentaire**, 3<sup>e</sup> édition, un vol. relié, par M. A. Joannis, professeur à la Faculté des Sciences de Paris (P. C. N.). . . . 10 fr.
- Physique élémentaire**, par MM. Chevassus et Thovert, préparateurs à la Faculté des sciences de Lyon. Fascicules brochés :
- Premier fascicule. — Mécanique et propriétés générales de la matière, Acoustique. 2 fr.
- Deuxième fascicule. — Chaleur, Optique . . . 3 fr.
- Troisième fascicule. — Magnétisme, Electricité, Radiations. — Météorologie. . . 3 fr.
- Ensemble : un vol. relié. . . . 8 fr.
- Manipulations de physique générale**, par MM. Vaillant et Thovert, chef de travaux et préparateur à la Faculté des sciences de Lyon . . . 3 fr.
- Manipulations d'Electricité industrielle**, par les mêmes. . . . 3 fr.
- Sciences naturelles**, par MM. Faucheron et Conte, préparateur et chef de travaux à la Faculté des sciences de Lyon :
- Botanique, trois fascicules à 2 fr. et 3 fr. ; un vol. relié. . . . 8 fr.
- Zoologie, un volume . . . . . 5 fr.

LAVAL. — IMPRIMERIE PARISIENNE, L. BARNEOUD ET C<sup>o</sup>.