

Les essais sur modèles en hydraulique.

par

J. Blockmans & J. Lamoën.

I. - Avant-propos.

=====

But des Laboratoires d'hydraulique.

Le présent article ne doit être considéré que comme une première introduction à la matière : nous nous bornerons à quelques généralités concernant la résolution des problèmes hydrotechniques au moyen d'essais sur modèles à échelle réduite.

Les considérations quantitatives relatives aux mouvements des liquides peuvent se grouper en deux classes de théories bien distinctes.

1° L'hydrodynamique qui se propose de déterminer le mécanisme du mouvement de l'eau dans ses moindres détails et tâche d'établir la trajectoire de chaque particule liquide.

2° L'hydraulique qui ne considère que des mouvements d'ensemble sans s'occuper des trajectoires des différentes molécules d'eau. Partant d'hypothèses qui se rapprochent plus ou moins de la réalité, elle arrive à des relations quantitatives simples entre les différentes grandeurs intéressant l'ingénieur.

L'hydraulique est avant tout une science expérimentale. Il est dès lors inutile d'insister sur la grande importance que présentent les essais au laboratoire, c'est-à-dire sur modèles à échelle réduite, pour autant, bien entendu, que les résultats qu'ils donnent puissent être extrapolés aux ouvrages réels. La réalisation des constructions hydrauliques absorbe des capitaux très importants ; les essais à échelle réduite permettent souvent de réaliser de grandes économies, en évitant des mécomptes qui se produisent si souvent

lors de la réalisation d'ouvrages qui ne peuvent être projetés avec une garantie suffisante de succès.

Les premiers laboratoires pour essais sur modèles à échelle réduite datent de la fin du siècle dernier ; ce n'est cependant que depuis une dizaine d'années que les laboratoires se sont multipliés et que la question d'essais à échelle réduite a pris une place importante dans la science de l'ingénieur.

La publication : "Hydraulic Laboratory Practice", éditée par les soins de l'American Society of Mechanical Engineers donne un tableau presque complet de la situation mondiale des recherches expérimentales d'hydraulique à la fin de l'année 1928. Cet ouvrage pourrait être opportunément complété par la description détaillée des laboratoires français et des nouveaux laboratoires des Etats-Unis et de l'U.R.S.S.

II. - Comparaison des résultats d'essais avec ceux des observations directes.

=====

On conçoit qu'il faut saisir toutes les occasions possibles pour confronter les résultats d'une étude sur modèles avec les observations directes effectuées sur l'ouvrage réel construit d'après l'essai sur modèle. Une telle vérification donne un contrôle rigoureux des règles de report basées sur les lois de similitude dont on fait usage pour passer des grandeurs relatives au modèle à celles relatives à l'ouvrage réel. Le fait qu'à l'heure actuelle on n'est pas encore parvenu, dans de nombreux cas, à baser ces règles de report sur des principes rigoureux, mais qu'on doit se contenter de les établir d'une manière semi-empirique, donne une importance capitale à ce genre de contrôle. Cependant ces confrontations sont peu nombreuses parce qu'elles demandent des recherches coûteuses et que, bien souvent, elles ne sont pas aisées à faire sur les ouvrages en service. Elles se rapportent presque exclusivement au groupe des phénomènes hydrodynamiques qui ne comportent pas de modifications des surfaces solides en contact avec le liquide.

Pour ce genre de phénomènes la méthode des essais sur modèles réduits s'est montrée apte à fournir des indications d'ordre quantitatif sur les phénomènes qui se produisent dans l'ouvrage en vraie grandeur. Les règles de report basées sur les lois de similitude sont donc suffisamment exactes ici. Ajoutons que les parois peuvent être en repos, comme les murs d'une écluse ou en mouvement, comme les aubes d'une turbine.

Au point de vue des règles de report il est également très intéressant d'étudier un même ouvrage ou appareil au moyen de deux ou plusieurs modèles à échelles différentes. Citons dans cet ordre d'idées les beaux travaux du laboratoire de Toulouse où l'on a fait l'étude d'un barrage sur 4 modèles d'échelle différente, (1/300e, 1/150e, 1/100e et 1/19,5e.) Citons également des essais concernant un même problème qui ont été effectués conjointement à la Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau à Berlin et au Forschungs-Institut für Wasserbau und Wasserkraft, à Obernach.

A côté de ces problèmes purement hydrauliques, c'est-à-dire qui concernent uniquement le mouvement de l'eau, il est des cas où la surface solide en contact avec le liquide se modifie à cause de l'érosion de la matière des parois ou à cause du dépôt de matériaux nouveaux. Ces recherches ont trait, dans ces cas, à l'entraînement des particules solides par les courants, à l'amélioration du lit des rivières à fond mobile, des estuaires et des ports. Dans ces cas les confirmations de la similitude entre phénomènes dans les modèles et ceux des ouvrages sont beaucoup moins nombreuses et moins concluantes. On peut dire que, pour ces phénomènes, les essais de laboratoire ne donnent en général que des indications d'ordre qualitatif et non plus quantitatif et ce parce qu'il est impossible de réaliser une similitude réelle.

Le défaut d'une similitude complète ne saurait d'ailleurs réduire l'importance de cette catégorie d'essais. Il s'agit en général de projets d'ouvrages fort coûteux, comme des rectifications, des endiguements de

rivières, des améliorations de fleuves et d'estuaires, des projets de port en plage mobile, etc... dont le succès dépend d'une série de facteurs d'appréciation difficile et qui constituent ainsi des problèmes devant lesquels la théorie est à proprement parler impuissante. Le fait que l'essai sur modèle donne des indications d'ordre qualitatif constitue dès lors déjà un avantage qui représente dans la plupart des cas, des sommes considérables. De plus le modèle peut être modifié à peu de frais au cours des études, ce qui permet de comparer les effets des diverses solutions proposées et de discerner le rôle de certains facteurs, dont l'influence est ignorée ou est sous-estimée.

III. - Mouvement laminaire et mouvement turbulent.

=====

Règles de report basées sur les lois de similitude.

Avant d'entamer la question des règles de report il est nécessaire de définir les deux aspects très différents sous lesquels peuvent se présenter les écoulements des liquides naturels. Dans certaines circonstances les particules liquides décrivent des trajectoires très régulières qui constituent pour ainsi dire des filaments qui s'écoulent l'un à côté de l'autre avec une très grande régularité: c'est le régime laminaire ou régime de Poiseuille. Dans d'autres conditions les particules ne suivent plus des lignes droites ou des courbes simples, mais elles se mélangent continuellement, elles suivent des trajectoires tortueuses et irrégulières: c'est le régime turbulent ou hydraulique. Si dans un mouvement laminaire on introduit un mince filet coloré, celui-ci dessinera une courbe régulière; dans un mouvement turbulent, à peu de distance du point d'introduction, il colorera déjà tout le liquide. Le mouvement turbulent n'est pas permanent comme le mouvement laminaire; la vitesse et la pression en un point déterminé n'ont pas une valeur constante dans le temps mais oscillent autour de valeurs moyennes.

La grande majorité des courants naturels sont turbulents. La turbulence est la cause de grandes pertes de charges entre ces écoulements.

Dans le régime de Riseuille les pertes de charges sont proportionnelles à la vitesse : en régime hydraulique ces pertes sont proportionnelles à une puissance de la vitesse s'approchant du carré.

Le mouvement laminaire existe aux faibles vitesses et quand les dimensions transversales sont petites. Ainsi dans le cas de la conduite circulaire de diamètre d , si l'on désigne par v la vitesse et par ν le coefficient dynamique de viscosité du liquide, on sait que pour

$$R_e = \frac{vd}{\nu} < 2300$$

dans les cas usuels, l'écoulement est laminaire. Le nombre R s'appelle "nombre de Reynolds" (1). Pour une valeur plus élevée, mais non encore définie exactement, le mouvement devient turbulent. Pour des valeurs croissantes du nombre de Reynolds l'influence de la viscosité devient de plus en plus petite et les pertes de charges tendent à devenir proportionnelles au carré de la vitesse. Cette discussion des régimes d'écoulement nous servira lors de l'examen des perturbations des lois de similitude.

Nous allons traiter maintenant brièvement des règles de report des résultats d'essais sur modèles à la réalité. Les coefficients par lesquels il faut multiplier les quantités expérimentales pour obtenir celles de la nature sont en général donnés par les lois de similitude. Ces lois forment la base scientifique du report des résultats d'essais à la réalité. Nous dirons aussi quelques mots des circonstances qui font qu'on ne peut jamais réaliser, d'une façon absolue et complète, la similitude entre les ouvrages ou les phénomènes naturels d'une part et les modèles qu'on peut pratiquement reproduire dans les laboratoires d'autre part.

(1) Le nombre de Reynolds n'a pas de dimension : sa valeur ne dépend donc pas des unités choisies.

Il existe différents modes d'établissement des lois de similitude; nous en citerons deux. On peut procéder par identification des équations différentielles comme le fait M.L. Escande dans son "Etude théorique et expérimentale sur la similitude des fluides incompressibles pesants" (Revue générale de l'Electricité, 3,10,17 et 24 avril 1929). On peut aussi comparer les forces agissant dans le modèle à celles de la nature : c'est le moyen employé par M.R. Spronck dans son mémoire : "La similitude hydrodynamique et les essais sur modèles en hydraulique appliquée" (Annales des Travaux Publics de Belgique, février-avril 1932). Ce dernier procédé est sans nul doute le meilleur au point de vue didactique; il présente également l'avantage de montrer clairement pourquoi la similitude ne saurait jamais être qu'approximative. Dans l'établissement d'une règle de similitude on ne peut tenir compte que d'un nombre très restreint de forces; la règle obtenue sera d'autant moins approximative que les effets des forces négligées seront plus intenses. D'après les forces auxquelles on veut se limiter on peut établir théoriquement un certain nombre de lois de similitude.

Nous admettons toujours implicitement que le liquide qui s'écoule dans le modèle est identique à celui de l'ouvrage réel et que l'accélération de la pesanteur est la même dans les deux cas. Désignons par n l'échelle des longueurs. Nous aurons

$$\frac{L}{l} = \frac{n}{1} \qquad \frac{S}{s} = \frac{n^2}{1} \qquad \frac{W}{w} = \frac{n^3}{1}$$

où L est une longueur de l'ouvrage et l la longueur correspondante du modèle; de même S et s sont des surfaces et W et w des volumes.

Considérons la trajectoire d'une particule liquide de l'ouvrage réel; soit T le temps qu'emploie cette particule pour parcourir un certain espace et t le temps dans lequel l'espace homologue du modèle est franchi. Si pour toute trajectoire et son homologue on a

$\frac{T}{t} = \tau$ constante, on dit qu'il y a similitude cinématique entre la construction ou le phénomène naturel et le modèle.

Nous emprunterons maintenant au mémoire précité de M. Spronck une définition de la similitude dynamique.

" Deux systèmes sont dits en similitude dynamique lorsqu'il se conserve spontanément un rapport constant entre deux caractéristiques homologues quelconques des deux systèmes : longueurs, vitesses, accélérations, etc... Ce rapport, variable avec la caractéristique envisagée, doit rester le même pour une caractéristique déterminée, quel que soit le couple de points homologues choisis ; il constitue l'échelle de report de la caractéristique envisagée".

Considérons d'abord un cas où l'on peut négliger toutes les forces autres que la pesanteur et les forces d'inertie (similitude dite de Reech-Froude).

La similitude dynamique entre le modèle et l'ouvrage réel sera réalisée quand on aura la relation :

$$\frac{\text{poids dans l'ouvrage}}{\text{poids dans le modèle}} = \frac{\text{force d'inertie dans l'ouvrage}}{\text{force d'inertie dans le modèle}}$$

Or

$$\frac{\text{poids dans l'ouvrage}}{\text{poids dans le modèle}} = \frac{n^3}{1}$$

puisque dans les deux cas nous supposons le même liquide et

$$\frac{\text{force d'inertie dans l'ouvrage}}{\text{force d'inertie dans le modèle}} = \frac{\text{volume dans l'ouvrage}}{\text{volume dans le modèle}} \times$$

$$\frac{\text{longueur dans l'ouvrage}}{\text{longueur dans le modèle}} \times \frac{(\text{temps dans le modèle})^2}{(\text{temps dans l'ouvrage})^2} =$$

$$= n^3 \times \frac{n}{\tau^2}$$

Il faut avoir :

$$n^3 = n^3 \times \frac{n}{\tau^2}$$

d'où

$$\tau = \sqrt{n}$$

ce qui fixe l'échelle des temps en fonction de l'échelle des longueurs. Désignons par V une vitesse dans l'ouvrage et par v la vitesse homologue dans le modèle.

On aura :

$$\frac{V}{v} = \frac{\text{longueur dans l'ouvrage}}{\text{longueur dans le modèle}} \times \frac{\text{temps dans modèle}}{\text{temps dans ouvrage}} =$$

ou encore

$$\frac{n}{\tau} = \sqrt{n}$$

$$v = \frac{V}{\sqrt{n}}$$

ce qui est l'expression de la loi de Froude. C'est la loi de similitude la plus importante au point de vue de la pratique des laboratoires hydrauliques.

Comme le débit = $\frac{\text{volume}}{\text{temps}}$ on aura $\frac{Q}{q} = n^{5/2}$, Q étant un débit dans la nature et q le débit homologue dans le modèle. C'est par cette dernière formule que l'on calcule le débit à envoyer dans le modèle, le niveau d'eau dans celui-ci étant réglé, par exemple, au moyen d'un déversoir réglable en hauteur.

Supposons une rivière ayant une section de 200 m² et une vitesse moyenne de 1 m/sec. Quel débit faut-il envoyer dans le modèle si $n = 25$?

$$\text{On aura } Q = 200 \times 1 = 200 \text{ m}^3/\text{sec.}$$

et

$$q = \frac{200.000}{25 \times 25 \times \sqrt{25}} = \frac{200.000}{25 \times 25 \times 5} = 64 \text{ l/sec.}$$

Dans le cas où interviennent uniquement les forces d'inertie et la viscosité (similitude de Reynolds) on tient un raisonnement identique à celui qui nous a conduit à la loi de Reech-Froude.

On développe la relation

$$\frac{\text{force d'inertie dans l'ouvrage}}{\text{force d'inertie dans le modèle}} =$$

$$= \frac{\text{effort de frottement interne dans l'ouvrage}}{\text{effort de frottement interne dans le modèle}}$$

et on obtient finalement la formule

$$n = \sqrt{\tau}$$

Si l'on voulait considérer la pesanteur, les forces d'inertie et la viscosité il faudrait satisfaire en même temps aux deux relations

$$\tau = \sqrt{n} \quad \text{et} \quad n = \sqrt{\tau}$$

Ceci n'est possible que pour $n = \tau = 1$.

La similitude n'est donc pas réalisable : il faudrait que le modèle soit identique à l'ouvrage réel.

Il convient toutefois de signaler que dans les mouvements turbulents les effets de la viscosité sont plus ou moins masqués par ceux de la turbulence ; ces effets se traduisent par des chocs et des tourbillonnements, c'est-à-dire par des phénomènes dans lesquels n'interviennent que les forces d'inertie.

Cette circonstance, augmentant sensiblement dans beaucoup de phénomènes hydrauliques la prépondérance des forces d'inertie sur celles de la viscosité, a pour conséquence d'étendre le champ d'application de la similitude de Froude.

IV. - Perturbations des lois de similitude.

=====

Ainsi que nous venons de montrer, la diversité des facteurs physiques (des forces) dont il faudrait tenir compte rend impossible toute similitude rigoureuse. Dans nombre de cas cependant un petit nombre de ces facteurs interviennent d'une façon prépondérante et l'on peut négliger les autres. Ainsi, en agissant selon la règle de Froude les résultats seront particulièrement exacts si l'influence de la viscosité est réellement minime. Il en est de même pour la règle de Reynolds si l'on peut négliger légitimement l'influence de la pesanteur.

Dans beaucoup de cas la similitude géométrique ne saurait être qu'approchée. Il est notamment impossible de reproduire à l'échelle du modèle les aspérités des maçonneries et les dimensions des matières entraînées dans le lit d'un fleuve. Quand dans un essai l'écoulement se fait sous une épaisseur très faible, l'effet de la tension superficielle peut devenir sensible et fausser les résultats. D'après Rehbock il ne faut jamais admettre des profondeurs de moins de 2 cm. dans le modèle.

La similitude ne peut pas non plus exister lorsque dans le modèle la vitesse atteint la valeur ^{qui} correspond à la possibilité du ressaut superficiel, alors qu'il n'en n'est pas ainsi dans l'ouvrage. On obtient alors dans le modèle un écoulement en régime torrentiel dont les caractéristiques ne correspondent plus à un régime fluvial.

Lorsque le mouvement réel est turbulent il faut évidemment empêcher que dans le modèle le régime ^{ne} devienne laminaire. Soit, par exemple, un essai relatif à un cours d'eau ou un canal en mouvement sensiblement uniforme. Désignons par v la vitesse moyenne (exprimée en m/sec et par R le rayon moyen en mètres).

D'après Reynolds il y a mouvement laminaire lorsque $vR \leq 0,002$.

Pour $0,002 \leq vR \leq 0,007$ le mouvement peut être turbulent ou laminaire; pour $vR \geq 0,007$ on a toujours le régime turbulent. Les valeurs 0,002 et 0,007 de vR correspondent respectivement à des valeurs de 1700 et 5800 du nombre de Reynolds R_e en prenant $\nu = 1,2 \times 10^{-6}$ m²/sec. (Voir Hydraulic Laboratory Practice, page 771).

Ces valeurs de R_e diffèrent d'ailleurs fortement d'après les auteurs. Ainsi dans la Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau à Berlin, on préconise :

$$2000 \leq R_e \leq 7000.$$

M. Lindquist qui se base sur d'autres expériences ne conseille pas une si grande prudence et propose

$$500 \leq R_e \leq 600.$$

On peut lire à ce sujet l'article "Om inverkan av vatnetts stromart och ytspänning vid flodbyggnadstekniska modellförsök" (Teknisk Tidskrift 1927) et Handbuch der Physikalischen und Technischen Mechanik, Auerbach und Hort : Band V, 1931, page 977.

Enfin dans beaucoup de cas on est obligé d'avoir recours à une généralisation des lois de similitude. On considère des systèmes, non plus géométriquement semblables, mais on adopte des échelles différentes pour

les dimensions en plan et celles en hauteur. Ainsi, dans le cas de fleuves larges et peu profonds, l'on est bien forcé, si l'on veut éviter la construction de modèles dont les dimensions en plan étaient par trop grandes, d'adopter une échelle en plan plus petite que l'échelle des hauteurs, dont la valeur limite est imposée par l'obligation d'avoir une épaisseur d'eau suffisante pour permettre de bonnes observations et pour éliminer les effets de la tension superficielle.

Ainsi, par exemple, on prendra $n = 500$ pour les dimensions horizontales et $m = 100$ pour les profondeurs.

Le rapport $\frac{n}{m} = \frac{500}{100} = 5$ est appelé par les Anglais et les Américains "distorsion" et par les Allemands "Verzerrung".

Il importe évidemment de prendre ce facteur aussi petit que possible.

V. - Questions étudiées au moyen d'essais sur modèles.

=====

Actuellement il est déjà un grand nombre de questions complexes en construction hydraulique qui ont été résolues d'une manière très satisfaisante au moyen d'essais sur modèles. Nous ne pouvons évidemment donner une nomenclature de ces questions; nous nous bornerons à citer quelques exemples types. On a fait de nombreuses expériences ayant trait à la construction de barrages déversoirs. Il s'agit ici notamment de réduire le plus complètement possible l'énergie de la lame déversante afin de protéger les fondations de ces ouvrages contre les affouillements. Les essais sur écluses sont également très nombreux; ils portent surtout sur les dispositifs devant permettre de réduire le temps d'éclusage au minimum, sans toutefois augmenter l'agitation de l'eau dans le sas et sans soumettre le bateau à des oscillations trop brutales. Citons également les problèmes relatifs à la meilleure disposition des piles de pont dans la section transversale d'une rivière afin de diminuer le plus possible le remous.

Les problèmes cités ci-dessus sont des problèmes locaux de portée assez limitée. Les laboratoires ont déjà traité des questions autrement vastes.

Parmi les problèmes où il suffit d'étudier le mouvement de l'eau, sans devoir tenir compte de l'entraînement de matières solides, nous citerons à titre d'exemple, les expériences que le laboratoire de Berlin, la Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, exécute sur un modèle de la Durme, pour le compte de l'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique. Il s'agissait d'étudier l'effet que les raccourcissements du cours de la rivière, produits par les travaux d'amélioration en projet, exerceraient sur les niveaux des marées tempêtes calamiteuses. On recherchait aussi la meilleure disposition à admettre pour diminuer les niveaux de ces marées, par l'établissement de polders emmagasinant une partie des eaux de flot. Le modèle de la Durme a été, sur toute sa longueur, y compris le Moervaart et la Zuidlede, reproduit à l'échelle de $1/120$ pour les dimensions en plan et de $1/40$ pour les hauteurs. Grâce à un dispositif ingénieux fonctionnant automatiquement, la marée a été reproduite à l'embouchure de la rivière et cette marée se propage dans le modèle réalisant une similitude quasi absolue entre les courbes locales de la marée du modèle et celles de la nature. Ces essais extrêmement intéressants, permettront d'établir en parfaite connaissance de cause le projet des travaux que l'on a en vue, chose qui eût été impossible si l'on n'avait pas eu recours à l'essai sur modèle réduit.

Signalons aussi les essais de l'influence des travaux de resserrement du lit de la Ruhr, sur les niveaux des hautes eaux et ceux relatifs à l'influence de l'endigement des grandes régions d'inondation sur les hautes eaux de l'Elbe, dont s'est occupé également la Preussische Versuchsanstalt.

Un autre exemple d'un problème de la même catégorie est l'essai qui s'exécute actuellement au laboratoire d'hydraulique de l'Ecole Technique Supérieure de Delft,

Les problèmes cités ci-dessus sont des problèmes locaux de portée assez limitée. Les laboratoires ont déjà traité des questions autrement vastes.

Parmi les problèmes où il suffit d'étudier le mouvement de l'eau, sans devoir tenir compte de l'entraînement de matières solides, nous citerons à titre d'exemple, les expériences que le laboratoire de Berlin, la Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, exécute sur un modèle de la Durme, pour le compte de l'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique. Il s'agissait d'étudier l'effet que les raccourcissements du cours de la rivière, produits par les travaux d'amélioration en projet, exerceraient sur les niveaux des marées tempêtes calamiteuses. On recherchait aussi la meilleure disposition à admettre pour diminuer les niveaux de ces marées, par l'établissement de polders emmagasinant une partie des eaux de flot. Le modèle de la Durme a été, sur toute sa longueur, y compris le Moervaart et la Zuidlede, reproduit à l'échelle de $1/120$ pour les dimensions en plan et de $1/40$ pour les hauteurs. Grâce à un dispositif ingénieux fonctionnant automatiquement, la marée a été reproduite à l'embouchure de la rivière et cette marée se propage dans le modèle réalisant une similitude quasi absolue entre les courbes locales de la marée du modèle et celles de la nature. Ces essais extrêmement intéressants, permettront d'établir en parfaite connaissance de cause le projet des travaux que l'on a en vue, chose qui eût été ^{im}possible si l'on n'avait pas eu recours à l'essai sur modèle réduit.

Signalons aussi les essais de l'influence des travaux de resserrement du lit de la Ruhr, sur les niveaux des hautes eaux et ceux relatifs à l'influence de l'endigement des grandes régions d'inondation sur les hautes eaux de l'Elbe, dont s'est occupé également la Preussische Versuchsanstalt.

Un autre exemple d'un problème de la même catégorie est l'essai qui s'exécute actuellement au laboratoire d'hydraulique de l'Ecole Technique Supérieure de Delft,

dans le but de déterminer l'influence que des travaux du Hellegat auront sur le partage des débits et sur la modification dans la salinité des eaux dans les différents bras de l'estuaire de la Meuse.

En ce qui concerne l'étude des questions relatives aux rivières à fond mobile, des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années.

Les premiers essais sur modèles relatifs à des cours d'eau dont le fond est mobile sous l'action du courant, ont été exécutés par Fargue. Afin d'étudier l'amélioration d'un tronçon de la Garonne, Fargue construisit en 1875 la "petite rivière artificielle de Bordeaux" à fond de sable. Les rapports des échelles des divers éléments du modèle étaient arbitraires.

La seconde tentative pour résoudre sur modèles des questions fondamentales au sujet de la régularisation des rivières fut faite par Osb. Reynolds en 1885, à Manchester sur un petit modèle de l'estuaire de la Mersey, le fond du modèle étant recouvert de sable. La durée de la marée agissant dans le modèle était calculée d'après les règles de similitude.

Vernon Harcourt a, en 1886, repris des essais sur un modèle de l'estuaire de la Mersey, et sur un modèle de l'estuaire de la Seine.

Si on laisse de côté ces essais, qui ne présentent plus à l'heure actuelle qu'un intérêt purement historique, on peut dire que les premiers essais systématiques ont été entrepris par M. Engels, au laboratoire d'hydraulique de Dresde.

Ces premiers essais consistaient dans l'étude du mouvement des matières solides dans un lit sinueux représentant à l'échelle de $1/400^e$. un tronçon de l'Elbe et avaient pour but d'établir l'influence des courbures et l'effet des hautes et basses eaux sur la configuration du fond. Le matériau employé était du sable.

M. Engels a repris dernièrement, au Laboratoire d'Obernach, les mêmes essais à une plus grande échelle, notamment $1/55^e$.

Ces derniers essais ont confirmé ceux de Dresde. Le Laboratoire d'Obernach vient de terminer également des essais sur la régularisation du fleuve chinois Hoang-Ho, qui transporte des quantités énormes de vase.

Au cours de ces dernières années le Laboratoire de Karlsruhe a exécuté des essais sur la régularisation du Rhin en amont de Kembs au moyen d'épis. Ces expériences ont donné des résultats surprenants quant à la similitude entre les phénomènes naturels et ceux du laboratoire.

M. Rehbock lui-même était resté longtemps sceptique au sujet de l'efficacité des expériences sur modèles pour les améliorations fluviales. L'objection qu'il formulait contre ce genre d'essais était double :

- 1° La difficulté d'obtenir dans le modèle, à l'aide de sable, des bancs dont la surface ressemble aux bancs de la nature. Le sable donne en général des surfaces à ondulations courtes (ripple-marks, Riffeln).
- 2° L'échelle des temps, déduite de la loi de similitude, amène - vu la lente modification de la configuration du fond du lit dans la nature - à prolonger l'expérience de laboratoire pendant un temps tellement long que l'utilité pratique des essais, n'existe plus en fait.

Pour résoudre la difficulté M. Rehbock a employé l'artifice suivant : en se servant dans le modèle d'un matériau plus facilement transportable, il a obtenu, avec les vitesses de courant, résultant de la loi de similitude, le déplacement des bancs tel qu'il existe dans la nature, mais dans un temps beaucoup plus court que le temps qui serait donné par les lois de similitude. Comme matériau il a employé du déchet de lignite de poids spécifique 1,35. Le déplacement des bancs se faisait ainsi à une échelle de temps 26 fois plus petite que celle résultant de la loi de Froude.

L'échelle du modèle était $1/22^e$. sans "distorsion".

M. Rehbock au cours des discussions au Congrès de Navigation de Venise s'est exprimé dans les termes suivants, quant aux résultats de ces essais :

" La ressemblance parfaite des images du lit fluvial
 " du modèle est vraiment surprenante. Même les ingé-
 " nieurs qui ont travaillé pendant des années sur le
 " Rhin ne peuvent trouver des différences essentielles
 " entre les plans du modèle et ceux d'après nature".

D'autres expériences en vue de la régularisation de la partie du Rhin située plus en amont ont été exécutées, avec les mêmes matériaux par le laboratoire annexé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, sous la direction de M. le Professeur Meyer-Peter.

Sont encore intéressants à signaler, les essais exécutés par la Preussische Versuchsanstalt pour l'étude du tracé de l'embouchure dans le lit majeur du Don, du canal d'évacuation des crues de la Volga.

Il s'agissait d'étudier la meilleure forme en plan à donner au tracé du canal dans le lit majeur, de manière que l'évacuation des crues se fasse facilement et n'apporte pas de grandes perturbations dans le mouvement des alluvions de la rivière.

Les difficultés résidaient dans la grande étendue du tronçon du Don à reproduire (22 Km) ainsi que dans la grande largeur de son lit majeur.

La reproduction du mouvement des alluvions exigeait une grande échelle ; le 1/150e. paraissait la plus petite échelle qui puisse être admise.

Dès lors la longueur du modèle était de 150 m. Les grands débits et l'étendue du modèle exigeaient que les essais aient lieu au laboratoire en plein air de Marquardt.

On a fait des essais préliminaires pour déterminer l'échelle des profondeurs, l'échelle des temps et le sable à employer. Il n'a pas été possible d'admettre pour les profondeurs la même échelle que pour les longueurs, parce qu'il était impossible que le sable se mette en mouvement par basses eaux, ainsi que cela se produisait dans la nature. L'échelle des profondeurs réalisant cette condition était 1 : 75. L'échelle des temps était de 18 heures par année.

La concordance entre la configuration du lit réalisé et celle de la nature était très satisfaisante. En particulier il convient de signaler que c'est dans ces essais, que pour la première fois, l'on est parvenu à obtenir à l'aide de sable, une reproduction du mouvement de bancs tel qu'il a lieu dans la nature.

Les essais exécutés au même laboratoire de Berlin pour le prolongement du môle du port de pêche de Neukuhren, sont à signaler parce que dans ces essais, il fallait reproduire simultanément et les vagues et le courant littoral qui exercent une influence dans la formation des barres d'alluvions. L'effet des lames et du courant est dans la nature très variable avec le temps. On a dû^{se} résigner à considérer les directions prédominantes du vent et des vitesses déterminées du courant. On est parvenu cependant, en modifiant d'une manière systématique la hauteur des vagues et la vitesse du courant, à reproduire d'une manière satisfaisante les conditions de la nature.

Ces quelques exemples permettront de se faire une idée des possibilités techniques des modèles réduits.

x

x

x

Le nombre de laboratoires d'hydraulique s'accroît d'année en année. Il en existe de plusieurs types. La grande majorité des laboratoires sont attachés à des universités et consacrent une grande partie de leur activité à l'enseignement et à des recherches d'intérêt scientifique.

A l'heure actuelle les institutions s'occupant exclusivement d'essais sur modèles pour servir de guide dans les projets de travaux hydrauliques sont assez peu nombreuses. Nous citerons la Preussische Versuchsanstalt à Berlin, avec son laboratoire du Schleuseninsel et celui en plein air de Marquardt ; le laboratoire en plein air d'Obernach, la section de Banlève du laboratoire de Toulouse et le laboratoire de Beauvert près de Grenoble;

en Amérique les laboratoires du "Bureau of Standards" à Washington et la "U.S. Waterways Experiment Station" à Vicksburg .

Les installations de ces divers laboratoires ne se ressemblent aucunement, parce que chacun d'eux a été établi pour les problèmes spéciaux qu'il a mission d'étudier; aussi est-il difficile de donner une description type d'un laboratoire.

Le Ministère des Travaux Publics de Belgique va construire un laboratoire de recherches hydrauliques à Anvers.

Ce laboratoire ayant pour but principal l'étude des problèmes de l'Escaut, qui constitue une grande spécialité, on ne peut évidemment songer à construire d'emblée un laboratoire définitif. En vue de pouvoir fixer en parfaite connaissance de cause, les dispositions à admettre pour ce laboratoire définitif, il a été décidé de construire un laboratoire provisoire, qui servira à acquérir l'expérience voulue.

Ce laboratoire provisoire se compose en ordre principal d'un hall d'essai de 50 x 18 m. complètement libre et d'une installation de pompage permettant de créer un débit de 150 litres par seconde. L'eau circule en circuit fermé en partant d'un grand réservoir inférieur. Les pompes la conduisent à un réservoir supérieur à niveau constant. De ce réservoir partent des tuyaux qui amènent l'eau aux divers modèles. Après avoir parcouru ceux-ci l'eau retourne au réservoir inférieur.

Les installations sont à l'heure actuelle quasi terminées et la construction des premiers modèles est entamée.

Anvers, le 30 novembre 1933.

