**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
**Band:** 123/124 (1944)
**Heft:** 11

**Artikel:** Des rapports de l'hydraulique technique et de l'hydraulique générale
**Autor:** Jaeger, Charles
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-54011

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

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

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

**Download PDF:** 12.07.2025

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

INHALT: Des rapports de l'hydraulique technique et de hydraulique générale. — L'œuvre de l'architecte suédois Gunnar Asplund. — Zur Sanierung unserer Seen. — Mitteilungen: Elektrische Güterzuglokomotiven für Chile. Ueber technische Staubabscheidung und ihre physikalischen Grundlagen. Ein Landesatlas der Schweiz. Einheits-Hochöfen. Ateliers de constructions mécaniques de Vevey S. A. Spezialkurs für Betriebsleiter, Personalchefs. — Wettbewerbe: Siedlungsbauten für die kantonalen Anstalten Waldhaus-Chur und Realta. — Literatur.

Band 124 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 11

# Des rapports de l'hydraulique technique et de l'hydraulique générale

Par CHARLES JAEGER, Dr. ès. Sc. techn., Privat-docent à l'Ecole Polytechnique Fédérale, Zurich
Collaborateur scientifique du Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'E. P. F. [1])

La civilisation classique du XVIIe siècle avait créé un certain type d'homme, dont on loue l'équilibre de pensée. «L'honnête homme», décrit par La Bruyère, allie certaines qualités de coeur et d'esprit qui le placent fort loin et de l'homme romantique et de l'intellectuel moderne.

En science également, la figure du savant évolue de siècle en siècle. Il y eut au Moyen Age de très grands savants, philosophes et mécaniciens à la fois. Que de figures illustres on compte de Léonard de Vinci à Goethe, qui ont incarné ce type de plus en plus rare du savant complet, proche encore du philosophe, qui aborde avec aisance les sujets les plus divers. N'est-on point tenté de l'opposer aux spécialistes de notre époque?

Cette évolution du type d'homme, de la figure du savant que nous suivons à travers l'histoire, n'est-elle pas liée à l'évolution propre à toutes les sciences qui s'acheminent nécessairement vers une spécialisation croissante? On peut le regretter, certes, mais ne faut-il pas accepter cette évolution inéluctable?

Nous ne savons certes pas ce qu'il en est des disciplines autres que la nôtre. Mais, nous nous plairons à montrer ici comment l'hydraulique technique, discipline d'application pratique, vouée par sa nature à la solution de problèmes spéciaux, n'a pu se développer qu'en se rapprochant des disciplines théoriques voisines, et plus particulièrement de l'hydraulique générale. Pour l'ingénieur hydraulicien, la spécialisation qui lui fut imposée fut compensée par l'obligation où il s'est trouvé de faire appel aux résultats d'autres sciences.

Pour bien ordonner notre exposé, il faudrait pouvoir donner, et de l'hydraulique générale et de l'hydraulique technique, deux définitions différenciées qui délimitent leurs domaines respectifs. Pareilles définitions exigent que l'on fasse intervenir la finalité des recherches, ce qui laisse place à quelque imprécision. Peut-être pourrait-on dire que l'hydraulique générale est un chapitre de la physique qui traite des lois générales de l'eau à l'état de repos et à l'état de mouvement, alors que l'hydraulique technique traite des problèmes hydrauliques en vue d'applications techniques. L'hydraulique générale recherche une connaissance désintéressée et surtout théorique des phénomènes. L'hydraulique technique, elle, doit enseigner à l'ingénieur comment il doit construire une conduite forcée, une chambre d'équilibre, une adduction d'eau, ou comment il doit endiguer un fleuve. Elle est constamment sollicitée par les besoins de la pratique qui exige d'elle des résultats immédiats et précis. Relevons en passant que notre énumération laisse à dessein de côté les problèmes relatifs aux machines hydrauliques, qui ne sont pas de notre ressort.

Si nous nous étions posé, il y a quelque trente ans, la question, à laquelle nous nous attachons aujourd'hui, des rapports de l'hydraulique générale et de l'hydraulique technique, nous aurions bien pu montrer que la première servait d'introduction à la seconde, mais que, les équations générales de l'hydraulique une fois posées, on n'en faisait plus grand usage. L'hydraulique technique semblait être vouée à une spécialisation croissante, appuyée solidement sur la seule expérience de l'ingénieur constructeur.

Avant d'aborder le problème des rapports actuels des deux sciences, il ne serait pas sans intérêt d'entreprendre une brève incursion dans l'histoire de l'hydraulique. Quelques vieux volumes à feuilleter, quelques échappées vers le passé seront moins fatigants que d'arides considérations théoriques.

Arrêtons-nous un instant au plus grand des précurseurs de l'hydraulique, à Léonard de Vinci, ce génie étonnant qui est, un siècle avant Galilée, à l'origine de la science moderne. En feuilletant ses carnets de notes, nous le voyons préoccupé de toute science. Il est anatomiste et s'occupe du vol des oiseaux, artiste incomparable, peintre, architecte et musicien, c'est aussi un des grands mécaniciens de son siècle. Mais, c'est surtout le plus grand physicien de son époque.

Nous le voyons préoccupé de détails: il expérimente un mouvement de mécanique, ou découvre un alliage; il taille une lentille; il polit un miroir parabolique et, pour cela, crée des ateliers entiers avec des machines nouvelles et étonnantes, auxquelles personne n'avait songé avant lui et que, parfois, personne n'utilisera plus. Mais, en feuilletant les pages de ses cahiers, nous y trouvons encore, chacun le sait, le savant précurseur auquel on doit le premier énoncé du principe de l'inertie en mécanique et — on l'a appris, il y a peu — le premier énoncé du principe physique de Fermat. Puis, sa pensée faisant un bond de quelques siècles en avant, nous le voyons découvrir l'effet Doppler Fireau et énoncer sur les mouvements vibratoires des idées que, ni son siècle ni le suivant ne purent comprendre. En hydraulique également, Léonard de Vinci est un précurseur qui réalise la même synthèse du savant théoricien et de l'ingénieur capable de réalisations. Ingénieur, Léonard de Vinci l'est, de métier et de tempérament. Il se préoccupe de projeter et de tracer des canaux, de construire des écluses et d'inventer les machines qu'il utilisera sur ses chantiers. Que de croquis étonnants il nous a laissés!

Mais, il est aussi l'observateur le plus sagace, le savant le plus averti. Ses croquis du ressaut hydraulique, ses observations sur la formation des tourbillons, ses expériences sur la résistance à l'avancement des corps immergés et sur les jets liquides sont, de beaucoup, les plus importants documents de l'hydraulique que l'on connaisse depuis les Grecs. Il fut vraisemblablement le premier à méditer sainement sur les lois du frottement et son projet de turbine hydraulique, récemment retrouvé, est une preuve de plus de son génie qui précéda les siècles. Pour Léonard, la pratique de sont art d'ingénieur était inséparable de ses méditations de savant. Avec lui, il n'y a qu'une seule et unique science de l'hydraulique dont il est le vrai créateur.

Après lui, nous perdons un peu la trace de cette unité: il y a, en hydraulique, de grands savants qui sont des mathématiciens, mais le métier du fontainier restera pendant longtemps un art et non une science.

Dès les XVIIe et XVIIIe siècles, des mathématiciens éminents ouvrent dans divers pays: Italie, France, Angleterre, Suisse, la voie à de nouveaux développements de l'hydraulique. Mais, ce n'est qu'au XIXe siècle que cette science prendra son plein essor avec Bélanger, de Saint-Venant, Bresse et Boussinesq d'une part, avec Poncelet, Darcy et Bazin d'autre part. Pour bien caractériser cette époque très brillante, il importe de mentionner que Bélanger et Bresse enseignèrent à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, non seulement l'hydraulique, mais aussi la mécanique. Poncelet, de Saint-Venant et Boussinesq sont les uns et les autres de savants mathématiciens. C'est dire que l'hydraulique qui sortira de leurs travaux peut être considérée comme un prolongement de la mécanique. Les recherches expérimentales de Darcy et Bazin fourniront les points d'appui et les confirmations indispensables à leurs développements théoriques. C'est ainsi que prend corps et se parachève, de Bélanger à Boussinesq, le chapitre capital des écoulements graduellement variés dans les cours d'eau à surface libre, c'est à dire des écoulements où la forme du lit et la forme de la ligne d'eau ne varient que lentement le long de l'axe du cours d'eau. Les instruments à l'aide desquels on a bâti cette théorie sont le théorème de Bernoulli et les équations d'Euler, classiques l'un et les autres. Ils sont à l'exacte mesure du problème posé, qui fut entièrement résolu en première et même en seconde approximation.

L'ensemble des résultats théoriques et des résultats expérimentaux connus vers la fin du siècle satisfaisaient très largement aux exigences encore modestes de l'hydraulique technique d'alors. En relisant les ouvrages de l'époque, on a bien l'impression qu'un équilibre régnait entre l'hydraulique générale et l'hydraulique technique, entre ce que l'une enseignait et ce que l'autre désirait connaître.

*

[1]) Leçon inaugurale donnée le 15 janvier 1944 à l'Ecole Polytechnique Fédérale.

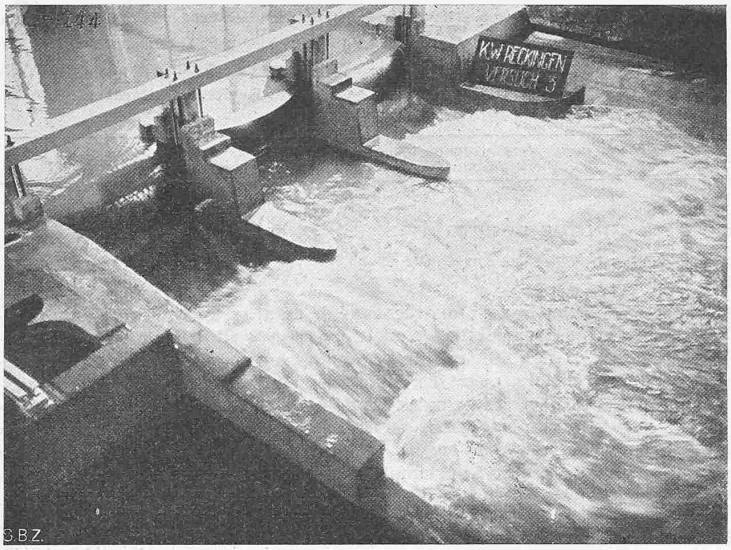


Fig 1. Modèle du barrage de Reckingen. Principaux types de discontinuité: déversoirs, écoulement par vanne de fond, ressaut hydraulique, élargissement de section

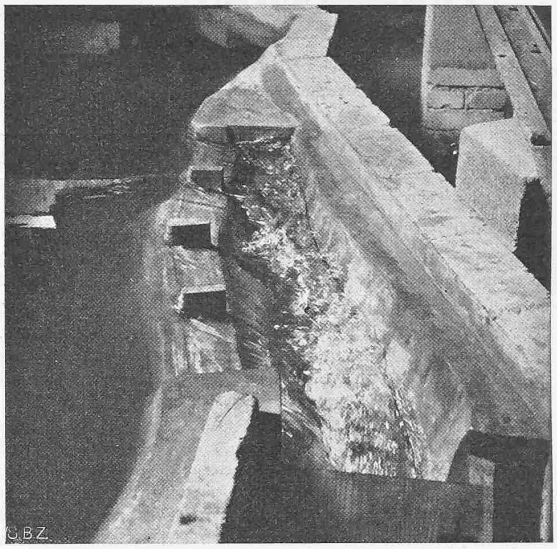


Fig. 2. Modèle du déversoir latéral du Boulder Dam Déversoir avec collecteur latéral

Ce fut le rapide développement des constructions hydrauliques, dès la fin du XIXe siècle, qui provoqua la rupture de cet équilibre. Alors que les grands hydrauliciens du milieu du XIXe siècle étaient avant tout préoccupés par l'étude des écoulements uniformes et graduellement variés, leurs successeurs immédiats se trouvèrent brusquement en présence des très nombreux problèmes que soulève l'existence des discontinuités dans les cours d'eau et les canaux et des multiples possibilités du mouvement varié.

Examinons par exemple la fig. 1. Il s'agit d'un barrage mobile à trois ouvertures, reproduit au modèle dans un laboratoire. Cette figure nous permet de reconnaître les principaux types d'écoulement qui préoccupèrent les ingénieurs hydrauliciens dès qu'ils se mirent à bâtirent des centrales hydro-électriques. Nous reconnaissons des vannes avec un écoulement en déversoir passant par dessus la vanne et un second jet liquide passant sous la vanne. Plus à l'aval, l'eau bouillonne: nous avons un tourbillon liquide et un ressaut hydraulique avec brusque changement de régime. A l'amont de ressaut, l'écoulement est torrentiel, la vitesse de l'eau y dépasse la vitesse de propagation des ondes; à l'aval, le régime est tranquille, la vitesse y est inférieure à la vitesse des ondes. Enfin, en aval de l'ouverture du milieu, nous observons un brusque élargissement de la section. La vanne est fermée, et la vitesse moyenne de l'eau est nulle entre ces deux piles, où nous observons un tourbillon à axe vertical.

Nous pouvons résumer nos constatations en disant que la technique moderne crée sur les cours d'eau des discontinuités du lit: déversoirs, vannes de fond, élargissement de sections, ou provoque des discontinuités de régime, tel le ressaut hydraulique. Les bouillonnements et tourbillons liquides qui accompagnent nombre d'écoulements discontinus sont le signe certain d'une très forte turbulence du liquide. L'une des tâches de l'hydraulique technique du XXe siècle sera de trouver un mode de calcul des discontinuités hydrauliques.

Cette impression est confirmée par la fig. 2, où nous voyons, reproduit au modèle, un déversoir latéral avec collecteur latéral. Ici, nous avons affaire à un autre type de discontinuité, avec prélèvement latéral, c'est à dire avec débit variable le long de l'axe du cours d'eau. Nous attirons à nouveau l'attention sur les bouillonnements de la surface liquide.

La fig. 3 nous introduit dans un tout autre domaine: il s'agit de l'étude du confluent de la Sarine et de l'Aar — qui charrient toutes deux des matériaux solides et dont le lit est encombré de bancs de sable. Nous nous trouvons ici en présence d'une autre type de problèmes que l'hydraulique technique devrait résoudre.

Le lien entre cette dernière figure et les précédentes apparaît si l'on se rend compte qu'un fleuve ne peut charrier des matériaux et rouler ses bancs de gravier que si l'écoulement est turbulent.

La turbulence de l'eau, nous la rencontrons donc partout: aux discontinuités des cours d'eau, dans les ressauts hydrauliques, dans les cours d'eau charriant des matériaux. Mais, elle agit aussi dans les grandes conduites industrielles.

Comment l'hydraulique technique réagit-elle en présence de toutes les tâches nouvelles qui lui incombaient et qu'elle devait d'urgence résoudre? Ce n'est certes point critiquer l'hydraulique technique d'avouer qu'à la fin du XIXe siècle et au début du XXe, elle commença par s'égarer. Nombre d'hydrauliciens pensèrent alors que tous les problèmes posés étaient et resteraient sans solution théorique. La seule base pour des progrès réels ne pouvait être que l'expérience lentement acquise par les ingénieurs-constructeurs eux-mêmes. Et l'on commençait à rédiger des formulaires, où le spécialiste averti pourrait trouver *la* formule empirique et *le* coefficient tiré de l'expérience, ou de l'expérimentation, qui lui permettraient de résoudre son problème particulier. Avec le recul que donnent les années, on songe un peu aux lexiques chinois où, seul, le mandarin lettré sait retrouver le signe mystérieux de l'eau, de la mer, de ce qui s'écoule.

En réalité, la solution était ailleurs. Au XXe siècle, tout comme au XIXe siècle, elle ne peut être trouvée qu'en confrontant les problèmes de l'hydraulique technique et les résultats de l'hydraulique générale. Nous allons voir comment.

Pour étoffer et concrétiser notre exposé, nous examinerons d'abord *le cas des discontinuités* en hydraulique, puis, nous rechercherons quelle est l'influence de la turbulence sur *les écoulements en conduites forcées* et sur les cours d'eau chargés *de débits solides*. N'est-il point paradoxal que deux problèmes aussi dissemblables que ceux que je viens de mentionner en dernier lieu — les conduites industrielles en charge et les cours d'eau — puissent avoir des rapports quelconques? Il en est bien ainsi par suite de l'action prépondérante de la turbulence.

*

Prenons d'abord, pour fixer les idées, les divers cas de discontinuité avec turbulence prononcée. L'équation de Bernoulli n'est alors plus valable sans qu'on y apporte une modification importante en raison des pertes d'énergie qui se produisent dans le mouvement tourbillonnaire. Quant aux équations d'Euler, on ne peut plus les utiliser, car on ignore totalement quelle est la direction des vitesses à un instant donné et en un point du mouvement tourbillonnaire. Les théorèmes qui permettent d'aborder l'étude des mouvements graduellement variés sont ici sans efficacité.

La solution des difficultés a été fournie par l'application des équations des quantités de mouvement projetées. Tout comme les équations d'Euler, ces équations dérivent des théorèmes de Newton. Elles permettent d'exprimer, pour une masse d'eau d'une certaine étendue, des relations analogues — quoique moins précises et moins détaillées — à celles qu'on peut écrire au moyen des équations d'Euler pour une masse liquide élémentaire. On peut, grâce à un raisonnement classique en mécanique, négliger tout ce qui se passe à l'intérieur de la masse tourbillonnante et ne considérer que ce qui se passe sur son pourtour. C'est ainsi qu'on arrive à déduire la valeur globale des pertes d'énergie ou de charge dans la masse en mouvement tourbillonnaire, sans cependant rien connaître du mécanisme de détail.

Ce sont Poncelet et Bélanger qui, dans la première moitié du XIXe siècle, utilisèrent les premiers le théorème des quantités de mouvements pour le calcul du ressaut hydraulique. Bresse

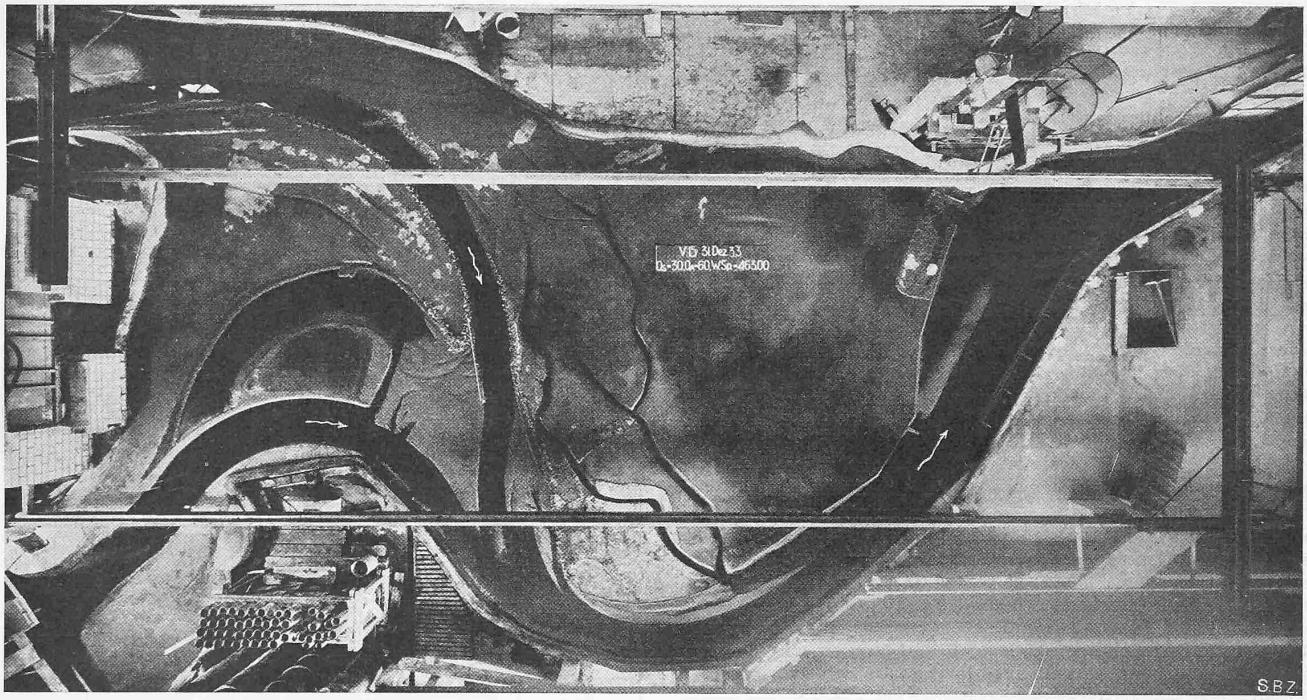


Fig. 3. Etude au modèle du confluent de la Sarine et de l'Aar

reprit plus tard et développa magistralement ce même théorème. Il est pour le moins étrange que cette inovation essentielle soit tombée par la suite presque dans l'oubli. Lorsqu'on vit réapparaître ce même théorème en hydraulique, on l'accueillit comme s'il se fut agi d'une découverte nouvelle et on se crut obligé à lui donner un nom nouveau. Ce second baptême n'était certes pas nécessaire.

Donc, on peut, en hydraulique technique, calculer en première approximation ce qui se passe aux environs d'une discontinuité en appliquant simultanément une forme plus générale du théorème de Bernoulli et en substituant l'équation des quantités de mouvement aux équations d'Euler.

On pourrait dire que le théorème des quantités de mouvement permet d'exprimer, pour une masse d'eau d'une certaine étendue, des relations analogues à celles que les équations d'Euler permettent d'écrire, avec certes plus de précision, pour une masse élémentaire.

Un troisième théorème vient parachever le tableau des écoulements liquides, c'est le théorème de l'extremum de l'énergie. En 1849, Bélanger, l'un des fondateurs de l'hydraulique moderne, avait énoncé un principe du débit maximum. Il faut entendre par là que, pour une charge donnée, le débit du courant liquide varie avec la profondeur d'eau. Bélanger constata que, sur un déversoir dénoyé à large crête, la hauteur d'eau qui s'établit naturellement est celle qui rend le débit maximum. Flamant reconnut, dès 1900, qu'en ce même point, à débit donné, on a la hauteur de charge minimum. Ce second énoncé, qui passa inaperçu à l'époque de Flamant, fut retrouvé en 1919 par Böss. Or, il se trouve que l'énoncé de Bélanger-Böss est valable non seulement pour le cas du déversoir à large crête, où les filets liquides sont rectilignes et parallèles, mais aussi dans de nombreux cas, où les filets liquides sont incurvés et de direction quelconque. Le théorème du minimum de la charge et du maximum du débit peut être élargi: il devient un théorème d'extremum de l'énergie et — ce qui était moins attendu — un théorème du minimum de l'impulsion totale. Il marque le passage du régime torrentiel au régime tranquille ou inversement; il permet de distinguer les écoulements dénoyés, indépendants du régime aval et les écoulements noyés, qui en dépendent. Mais il s'agit, ici encore, d'un théorème d'ensemble qui ne permet point, par lui-même, de tracer les filets liquides. Dans les problèmes du déversoir, où les équations d'Euler permettent de suivre ce tracé, il donne une condition aux limites indispensable.

Grâce à l'application des trois théorèmes que nous venons de rappeler; théorème de Bernoulli généralisé, équation des quantités de mouvement et énoncé de Bélanger-Böss généralisé, l'hydraulique des écoulements discontinus a, depuis une dizaine d'années, fait de remarquables progrès. La plupart des problèmes qui, au début du siècle, étaient abordés par des méthodes de calcul très imparfaites et peu satisfaisantes, où l'abondance de «coefficients correcteurs» cachait les défaillances du raisonnement et l'incorrection des hypothèses de calcul, sont à l'heure actuelle résolus de façon satisfaisante, en première approximation au moins. C'est ainsi qu'on sait, à l'heure actuelle, traiter les écoulements dans les lits à pente variable et calculer les divers types de déversoirs dénoyés ou noyés, à large crête, à crête arrondie ou en mince paroi et les barrages à seuil haut. La théorie du ressaut hydraulique ordinaire a été complétée par l'étude théorique et l'étude expérimentale du ressaut à l'aval des seuils. L'étranglement d'un lit rétréci par des piles de ponts ou par un barrage à seuil bas et le canal Venturi peuvent être traités par des méthodes analogues. On nous donne également une théorie satisfaisante des écoulements à débit variable dans des canaux de largeur constante ou de largeur variable. Ces diverses théories ne sont point l'oeuvre d'un savant ou d'une école. On les doit à la collaboration plus ou moins consciente de nombreux savants, en divers pays d'Europe et d'Amérique, qui, à une époque récente, se préoccupèrent de rattacher à l'hydraulique générale l'étude des discontinuités hydrauliques.

En résumé, on pourrait, en utilisant avec discernement les trois théorèmes principaux de l'hydraulique générale des cours d'eau, écrire à nouveau un chapitre d'hydraulique technique qui traiterait de façon homogène des diverses discontinuités que l'ingénieur hydraulicien rencontre le long d'un cours d'eau naturel ou sur un canal artificiel. Ce chapitre serait la suite naturelle du chapitre classique des écoulements graduellement variés.

*

Le théorème des quantités de mouvement projeté évite les difficultés provenant de la turbulence en se contentant de considérer ce qui se passe sur le pourtour de la masse. Or, dans nombre de problèmes il serait précisément nécessaire de connaître le plus exactement possible ce qui se passe à l'intérieur de la masse liquide. Pour y parvenir, il faut donc suivre de tout autres raisonnements dont nous allons donner un exemple.

Le physicien anglais Reynolds s'était demandé, vers la fin du siècle dernier, de quelles variables un écoulement dans un tuyau peut dépendre et il avait conclu que ces variables devaient être la vitesse moyenne du liquide, le diamètre de la conduite et le coefficient de viscosité cinématique. Au moyen de ces trois grandeurs physiques, il a formé un quotient sans dimensions, le nombre de Reynolds. Par la suite, on a reconnu que tous les écoulements en charge peuvent effectivement être représentés en prenant le nombre de Reynolds comme variable, ce qui confirmait d'éclatante façon les vues théoriques de Reynolds.

En particulier, l'on vérifia que les écoulements dans des tuyaux peuvent bien être représentés en fonction de cette variable.

La fig. 4 se rapporte à des écoulements d'eau ou d'air dans une même conduite de diamètre et de rugosité donnés. Les va-

riables sont la viscosité du liquide et sa vitesse moyenne. On constate que tous les points donnant le coefficient de rugosité $\lambda$ de Darcy en fonction de $R_e$ sont situés sur une même courbe lorsque la vitesse de l'eau ou la viscosité du liquide varient. La courbe a deux branches: l'une pour les écoulements laminaires, l'autre pour les écoulements turbulants.

Dans la fig. 5, on est allé plus loin, puisqu'on a fait varier, en outre, la rugosité relative des parois, c'est à dire le rapport du diamètre de la conduite à la rugosité absolue des grains formant la paroi. Les coordonnées sont à l'échelle logarithmique. On reconnit quatre régions distinctes sur ce diagramme:

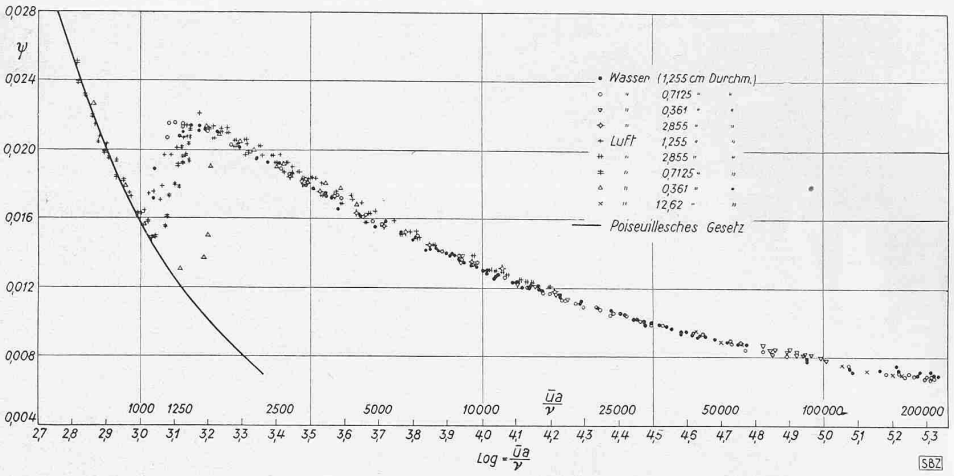


Fig 4. Courbe de Stanton et Pannell. Coefficient $\lambda$ de la formule de Darcy en fonction de $R_e$

a) écoulements laminaires de Poiseuille, sans turbulence; b) droite de Blasius, qui se rapporte aux écoulements turbulents dans des tuyaux extrêmement lisses; c) région intermédiaire correspondant au passage entre les écoulements laminaires et les écoulements turbulents; d) une famille de courbes au dessus de la droite de Blasius qui se rapportent aux écoulements dans des tuyaux rugueux qui varient avec la rugosité relative s/r.

Résultat essentiel: Si le nombre de Reynolds $R_e$ est grand, les courbes deviennent des horizontales et l'écoulement devient indépendant de ce nombre.

Tel était, à peu près, l'état de nos connaissances en cette matière, lorsque Prandtl et son disciple et émule von Kármán s'intéressèrent à ce problème fondamental de l'hydraulique. Malgré la diversité des résultats trouvés avant eux, ils croyaient, l'un et l'autre, à une loi universelle de l'écoulement dans les conduites, loi qui devait être indépendante du diamètre de la conduite. En particulier, Prandtl faisait remarquer qu'il est physiquement impossible que l'écoulement le long de la paroi, qui seule influence directement tout le phénomène, puisse dépendre du diamètre.

Ce raisonnement fondamental se heurtait cependant aux mesures très précises de Blasius relatives aux écoulements en tuyaux lisses et plus particulièrement à une formule de Blasius qui faisait précisément dépendre la vitesse maximum du diamètre.

Evidemment, on ne pouvait incriminer les mesures elles-mêmes ni les résultats expérimentaux de Blasius. Aussi, Prandtl se posait le problème de la façon suivante: comment interpréter physiquement les résultats de Blasius et comment transformer mathématiquement sa formule expérimentale pour qu'elle soit en accord à la fois avec les faits observés et avec la théorie préconçue. Vous dire comment raisonna Prandtl serait difficile ici. Le raisonnement est en apparence limpide, un simple changement de variable. En réalité, il est très subtil et Prandtl passa quelque dix années à le parachever.

Qu'il nous suffise de dire ceci: à proximité de la paroi se développe une mince couche, un film liquide ou couche liquide de Prandtl, dans laquelle l'écoulement est laminaire et, par le fait, ne dépend que de la densité du liquide et de sa viscosité, elle-même proportionnelle à l'effort de cisaillement entre deux couches voisines, ainsi que le veut un énoncé dû à Newton. Prandtl a donc défini une vitesse fictive, fonction de cet effort de cisaillement à la paroi et de la densité. Par l'intermédiaire de cette vitesse fictive, il définit un nouveau nombre de Reynolds dans lequel figure soit l'épaisseur de la couche limite, pour les tuyaux lisses, soit la valeur absolue des rugosités de la paroi.

Il se trouve que tous les phénomènes relatifs aux écoulements en tuyaux lisses ou rugueux peuvent être exprimés en fonction de ce nouveau nombre de Reynolds-Prandtl. Pour le prouver, nous nous contentons de montrer la fig. 6 où l'on voit une courbe unique, relevée par Nikuradse, élève de Prandtl, courbe qui est fonctien du seul coefficient $\lambda$ de frottement et du nombre de Reynolds-Prandtl. Ce qu'il y a de remarquable à cette courbe, c'est que certains points ont été obtenus par la mesure directe du coefficient de frottement $\lambda$, alors que d'autres points ont été obtenus par la mesure de la répartition des vitesses, répartition qui, dans les théories de Prandtl-von Kármán dépend du coefficient $\lambda$. La courbe expérimentale de Nikuradse apporte

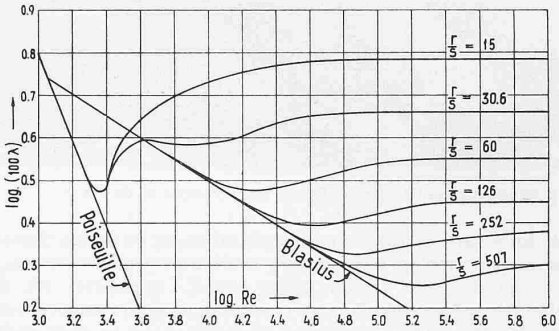


Fig. 5. Essais de Nikuradse. Variations de $\lambda$ en fonction de $R_e$ et de la rugosité relative s/D

une confirmation éclatante aux travaux théoriques de Prandtl et von Kármán.

Et nous voici bien loin de la pratique, et bien loin, semble-t-il, de l'hydraulique technique. Il n'en est rien, et c'est là que nous voulions en venir. Les mesures effectuées un peu partout (mais plus particulièrement en Italie et en Suisse) sur de grandes conduites industrielles, aboutissent à des résultats très complexes qui ne peuvent être interprétés qu'à la lumière des résultats théoriques auxquels sont arrivés Prandtl et von Kármán.

Si quelque lumière a été faite dans ce problème de l'écoulement en tuyaux, et dans les conduites industrielles qui est bien le problème fondamental de toute l'hydraulique technique, c'est grâce à la collaboration des théoriciens de l'hydraulique générale et des ingénieurs qui eurent pour tâche laborieuse de mesurer les pertes de charge dans les grandes conduites industrielles.

Quatre-vingt-dix ans se sont écoulés entre les mesures fondamentales de Darcy et celles très récentes de la Commission Suisse des grandes conduites. Telle est la mesure de l'effort conjoint de l'hydraulique théorique et de l'hydraulique technique.

*

Nous donnerions de l'hydraulique technique moderne et de ses rapports avec l'hydraulique générale une image bien infidèle, si nous ne disions quelques mots des essais sur modèle réduit, d'une part et des cours d'eau à fond mobile, d'autre part, et si nous ne faisions voir à quels principes généraux il faut les rattacher les uns et les autres.

L'essai sur modèle est devenu de nos jours la pièce maîtresse de l'hydraulique technique. Mais pour qu'un essai sur modèle soit de quelque utilité, il faut qu'on sache comment en interpréter les résultats. C'est la théorie de la similitude qui nous dit sous quelles conditions deux écoulements sont semblables et comment on peut passer d'une grandeur mesurée au modèle à la grandeur homologue de l'écoulement en nature. L'hydraulique générale connaît deux grandes lois de similitude: celle de Reynolds, applicable à des écoulements où la seule force physique active est la viscosité et la similitude de Froude, applicable à des écoulements où la seule force physique en jeu est la pesanteur. C'est en partant de ces données de l'hydraulique générale que les ingénieurs hydrauliciens ont mis au point leur technique des essais sur modèle.

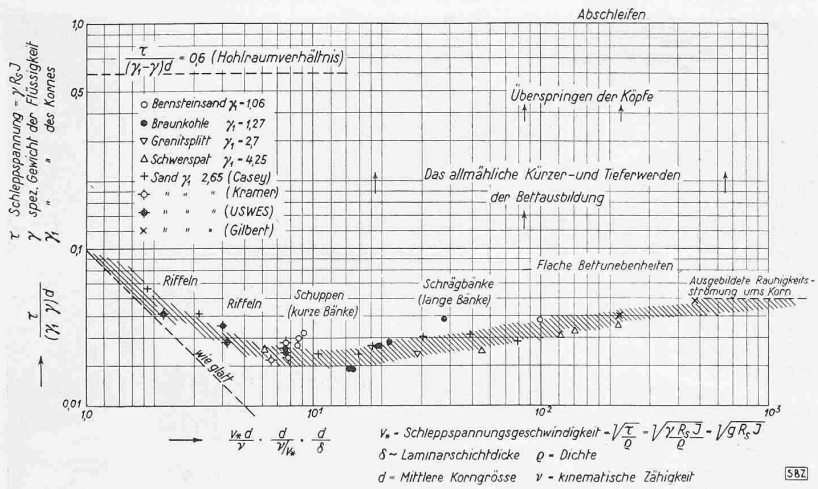


Fig. 7. Diagramme de Shields relatif aux écoulements avec débits solides

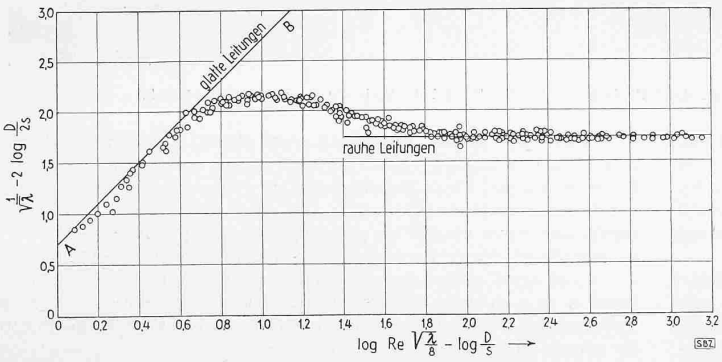


Fig. 6. Courbe de Prandtl-Nikuradse. Variations de $\lambda$ en fonction du log $R_e$*

Mais les liens entre les essais sur modèles et les théories de la turbulence sont encore bien plus étroits qu'il ne semble. Ce n'est point tout de voir réapparaître, dans la similitude de Reynolds, le nombre de Reynolds, défini précédemment, qui doit être le même au modèle et en nature. Lorsque l'on examine de plus près les récentes recherches sur les cours d'eau à fond mobile, on constate en outre, que les points de contact avec les théories de la turbulence développées par von Kármán, Gebelein et Taylor sont nombreux.

Si nous avions à entreprendre une étude plus détaillée des cours d'eau à fond mobile, nous rappellerions qu'on y distingue d'ordinaire le charriage des matériaux en suspension, le charriage des matériaux roulés et la formation des affouillements. On devrait aussi distinguer plus nettement les phénomènes qui ressortent de la similitude de Reynolds, de ceux qui dépendent les lois de Froude.

Dans les larges fleuves du continent américain, le volume des matériaux en suspension est énorme. Aussi, ne doit-on pas être étonné de l'importance que les hydrauliciens américains accordent à l'étude des phénomènes de la suspension. Ils ont résolument posé le problème de l'étude théorique de la suspension des matières. Le point de départ de leurs raisonnements est la loi de Laplace précisant que la répartition des molécules gazeuses dans une colonne verticale en équilibre suit une loi exponentielle. O. Brien a montré qu'une loi analogue est valable pour la concentration des grains matériels pesants en suspension dans un liquide. Depuis lors on cherche, d'une part, à retrouver cette loi exponentielle dans les mesures effectuées dans les cours d'eau, d'autre part, au moyen d'expériences et de mesures des plus ingénieuses, à établir des relations numériques entre le degré d'agitation ou de turbulence d'un liquide et les coefficients qui interviennent dans la loi de répartition exponentielle.

D'autres, enfin, tel le Japonais Hayami, qui travaille sur le fleuve Yantzé, ont poussé leurs études jusqu'à bâtir une théorie des fleuves charriant des matières en suspension, théorie qui fait état du calcul de la turbulence par la méthode des probabilités de Gebelein.

Etablir un lien entre les théories de la turbulence, telles qu'elles nous sont connues grâce aux travaux de Prandtl, von Kármán et Taylor, et le charriage des matériaux roulés, tel est également le but que s'est donné l'Américain Shields.

Retenons le résultat essentiel de la théorie de Shields, d'après lequel on peut reconnaître, dans le charriage des matériaux roulés, des domaines qui correspondent aux divers modes d'écoulement dans les tuyaux lisses ou rugueux avec turbulence partiellement ou totalement développée (fig. 7).

Cette remarque fondamentale de Shields devrait nous aider à dissiper un malentendu: dans nombre de pays, tels l'Allemagne, l'Italie, la Suisse, les Etats-Unis, des auteurs ont publié des formules que nous dénommerons — pour bien marquer q'uelles ne sont pas le fruit de l'empirisme seul — formules expérimentales, qui donnent le débit solide, charrié par un cours d'eau, en fonction des grandeurs caractéristiques hydrauliques de ce cours d'eau: tels, sa pente, son débit ou sa hauteur d'eau. On a souvent confronté ces diverses formules avec l'intention évidente de donner la palme à la meilleure d'entre elles. Cela n'est pas possible. Comment, en effet, comparer la formule du Laboratoire de Zurich, qui suppose que la turbulence est entièrement développée et que la pesanteur est la principale force qui entre en jeu, c'est à dire que la loi de le similitude valable est celle de Froude généralisée et les formules interprétant des essais faits sur des matériaux roulés très fins qui sont à classer dans un domaine tout différent du graphique de Shields?

Si l'on veut arriver à une solution d'ensemble, tant dans le domaine des matériaux en suspension, que dans celui des matériaux roulés, on doit, au départ, tenir compte des résultats fondamentaux de la théorie de la turbulence, résultats qui furent déjà à l'origine des recherches sur les conduites en charge.

Lorsque les hydrauliciens examinèrent pour la première fois, à travers une paroi vitrée, la formation des affouillements dans un sol meuble graveleux à l'aval d'un seuil fixe, ils constatèrent que ceux-ci changent brusquement et de forme et de dimensions et que ces formes diverse des saffouillements alternent de façon rhythmique. On commença par conclure que les affouillements en sol meuble modifient du tout au tout les lois de l'hydraulique.

Il fallut un bon quart de siècle pour se convaincre, d'abord qu'il n'en est rien, que les mêmes solutions multiples se produisent aussi sur radier fixe avec de l'eau limpide et qu'elles correspondent aux solutions multiples des équations de l'hydraulique des cours d'eau. On sait, maintenant, classer ces diverses solutions des écoulements hydrauliques et prédire, à peu près, quand et comment elles se produisent. On sait aussi que ces écoulements jouissent de propriétés très différentes, selon qu'ils sont noyés ou denoyés.

Si l'on voulait tracer un plan qui permette de démêler et de classer les résultats des mesures et des observations relatives aux affouillements, on pourrait peut-être se laisser guider par les idées générales suivantes:

Un affouillement en sol graveleux, de grains suffisamment grossiers, ne dépend que de la force de la pesanteur et du degré de turbulence. Lorsqu'il est arrivé à sa limite de stabilité, et que l'eau en provenance de l'amont est limpide, on se trouve en présence d'un phénomène d'hydraulique qui présente toutes les caractéristiques des écoulements obéissant à la loi de similitude de Froude. C'est à cette loi que doivent obéir les formules empiriques exprimant la profondeur limite des affouillements stabilisés, en fonction des données hydrauliques de l'écoulement, et c'est à cette même loi aussi que doivent obéir les temps et les durées, ce qui exclut toute comparaison entre des essais effectués en des temps qui ne sont pas homologues.

La seconde idée directrice serait qu'il n'est point possible d'interpréter des résultats d'affouillements sans reconnaître à quel type d'écoulement hydraulique ils appartiennent. En particulier, on se souviendra que tout écoulement noyé dépend des conditions aval et que tout écoulement dénoyé n'en dépend pas. Les variables qui influencent la profondeur d'affouillement ne seront donc pas les mêmes en régime noyé et en régime dénoyé.

*

Le sujet de notre exposé nous a obligés à une incursion dans des domaines très divers de l'hydraulique, qui embrassent une large part des progrès de cette science au cours des trente dernières années.

Il y a trente ans, on ne savait rien, ou presque rien, de tout ce que nous venons de passer en revue. Il y a trente ans, on

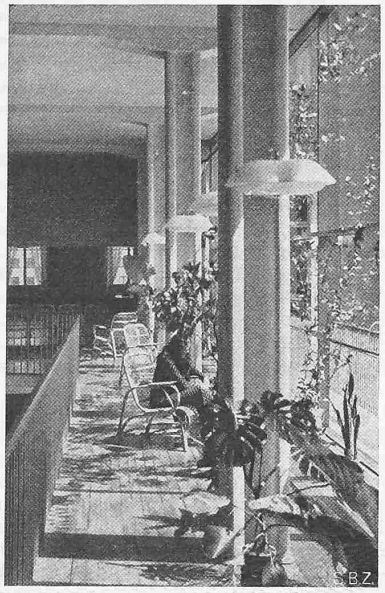

Fig. 5. Détail du grand hall

Fig. 4. Le grand hall dans l'aile nouvelle de l'Hôtel de Ville de Gothembourg, 1933/37

pensait que l'hydraulique progresserait par voie expérimentale empirique. Mais, les difficultés mêmes des problèmes à résoudre ont aiguillé les recherches vers de tout autres voies. L'hydraulique technique n'est pas devenue une science des coefficients; elle est redevenue, ce qu'elle n'aurait jamais dû cesser d'être, un chapitre de l'hydraulique générale.

Nous avons montré ce que l'hydraulique technique doit à l'hydraulique générale: cela tient en deux mots: presque tout. Mais, combien de fois les difficultés de l'ingénieur n'ont-elles pas été au départ des plus savantes spéculations des théoriciens!

Ainsi, peu à peu, l'équilibre s'est rétabli entre la discipline-mère, l'hydraulique générale, et son rejeton indiscipliné, l'hydraulique technique. Cette rencontre a été riche en résultats, en succès tangibles. Mais elle est aussi une satisfaction pour notre esprit qui, nous disent les philosophes, tend par nature à l'unité de pensée et désire l'ordre dans la hiérarchie des problèmes.

C'est ainsi que notre conclusion peut rejoindre notre introduction et que, pour nous, Léonard de Vinci, premier des grands hydrauliciens de notre époque, reste aussi le symbole de l'unité de pensée nécessaire au chercheur.

## L'œuvre de l'architecte suédois Gunnar Asplund

Composé presque uniquement de planches luxueusement reproduites, dont les légendes ont été traduites en français, un superbe ouvrage, paru en Suède, ne s'adresse pas seulement au public scandinave mais à tous les milieux qu'intéresse l'architecture contemporaine[1]).

[1]) **Gunnar Asplund, Architecte, 1885—1940.** Plans, dessins et photographies publiés par la Fédération des Architectes Suédois, sous la direction de *Gustave Holmdahl, Sven Ivar Lind* et *Kjell Ödeen,* avec une introduction de *Hakon Ahlberg.* 240 pages, 43 figures, avec 148 planches en noir et 7 en couleurs. Stockholm 1943, Kungsgatan 32, A. B. Tidskriften Byggmästaren.

Asplund, en effet, fut en Suède le représentant le plus éminent de l'école moderne. Non pas qu'il ait été un homme à programme! Au contraire, il fut en chaque période de son évolution, un peu comme notre Karl Moser, le meilleur interprète des tendances regnantes, marchant toujours avec son temps, et fasciné par chaque nouvelle possibilité d'expression que lui offrait le développement rapide de l'architecture.

Ce qui rend son œuvre si attachante, c'est cette conception léonardesque de l'art qu'on retrouve chez quelques-uns des plus grands créateurs de notre époque, comme chez un Strawinsky ou un Picasso: de chaque problème épuiser toutes les conséquences et tirer le maximum d'expression, quitte à se créer chaque fois une langue nouvelle.

On peut évidemment ne pas toujours goûter la manière dont Asplund s'est exprimé dans ses premières œuvres. Mais force est de reconnaître dans chacune de ses créations importantes l'unité et la grandeur qui découlent d'une idée centrale, développée avec maîtrise et rigueur, autour de laquelle tout l'édifice est conçu, des grandes lignes jusqu'aux moindres détails. Chez Asplund, d'ailleurs, rien d'indifférent. Dès le début, tout ce qui sort de ses mains est empreint d'un haut souci de qualité. Quelles que soient les voies suivies, il n'oublie jamais que le but dernier de l'architecture est d'être belle. Certes, il procède organiquement, ses plans sont parfaitement étudiés et résolus. Mais le souci esthétique reste toujours dominant dans ses recherches. Et c'est principalement pour cela que ce livre vient à son heure.

Ainsi, après des œuvres de caractère romantique comme le cinéma Skandia, ou classiciste comme la Bibliothèque Municipale de Stockholm (fig. 1), Asplund, nommé architecte en chef de l'Exposition de Stockholm 1930[2]), en fit le point de départ et la première réalisation de toute l'architecture moderne suédoise (fig. 2).

Mais, fidèle à sa nature, il n'allait pas en rester là. Bientôt, au style démonstratif et léger de cette exposition et de quelques autres travaux — les Magasins Bredenberg, l'Hôtel de Ville de Gothembourg

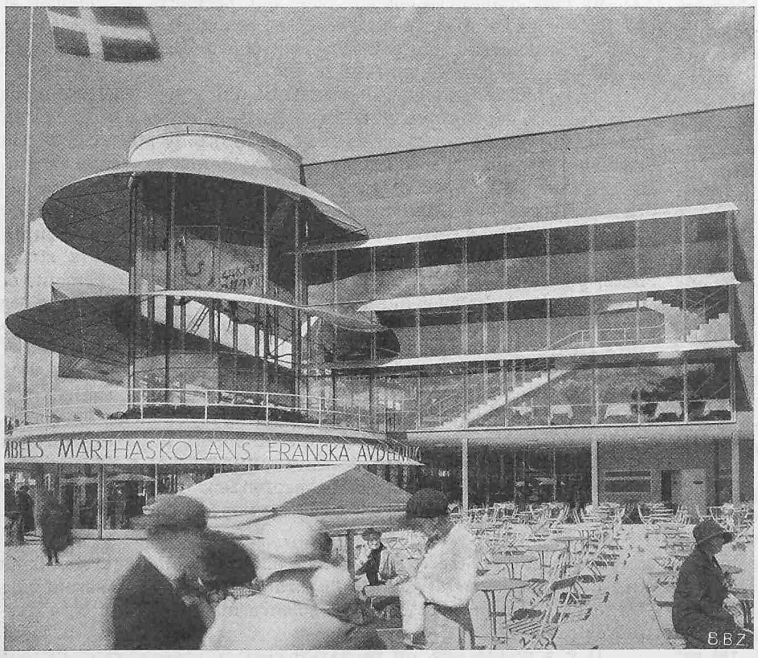


Fig. 2. Exposition de Stockholm 1930, le Grand Restaurant

[2]) Voir SBZ vol. 96, p. 143* et 329* (1930).