De l'hydroélectricité à la mécanique de fluides « tous azimuts » :

Evolution des activités scientifiques et industrielles de la mécanique des fluides-hydraulique à Grenoble

Maurice Bouvard

Docteur ès Sciences

Docteur « Honoris Causa » de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich
44, rue Thiers, 38000 Grenoble (Tél. : 76 87 08 84)

1. La création de l'« école des ingénieurs hydrauliciens » en 1929

1.1. Les premiers pas de l'hydroélectricité en France

L'énergie hydroélectrique était entrée dans une première phase de son développement surtout aussitôt après la première guerre mondiale, mais avec une série de restrictions imposées par les techniques d'alors : en particulier on ne dominait pas encore les problèmes posés par le transport de l'énergie électrique d'où la nécessité d'installer les usines qui allaient bénéficier de cette précieuse énergie au lieu même où elle serait produite. C'est alors que furent construites toute une série d'installations (pas toujours très heureuses au point de vue esthétique, mais il n'y avait pas encore d'écologistes) dans les vallées voisines de Grenoble : Romanche, Drac, Isère. A l'inverse de l'énergie, la matière première venait d'assez loin (Camargue pour la Bauxite).

Plus paradoxalement peut-être, la « matière grise » préalable au développement des installations hydroélectriques n'existait pas encore en France (en tous cas pas à une échelle suffisante), alors que les Ingénieurs Suisses s'étaient taillés une très flatteuse réputation dans ce domaine, en particulier ceux issus du fameux « Poly » de Zürich. Ils acquirent aussi très vite la solide réputation de ne pas lâcher prise facilement une fois installés sur place, du premier topographe au dernier serreur de boulons des machines hydrauliques, une fois montées. Leur compétence, leur conscience professionnelle, et leur énergie étaient proverbiales. En particulier le Père « Suter » (une figure légendaire) s'était fait installer — à Ugine — un fréquencesmètre dans sa chambre à coucher, lui permettant de réveiller les exploitants lorsqu'il constatait au cours de ses insomnies que la fréquence du courant produit n'était pas exactement à 50 hertz.

1.1.1. Un texte législatif fondamental : La loi de 1919

Une importante pièce manquait cependant, avant que l'hydroélectricité puisse prendre son essor : c'est le cadre législatif et réglementaire dans lequel allait s'insérer l'or-

ganisation à mettre en place, et ses liaisons avec l'économie et l'administration régionales. D'où une importante loi qui allait voir le jour en 1919. Elle précisait les conditions dans lesquelles les industriels pourraient obtenir la « concession » d'un site donné, les garanties qu'il devait apporter au point de vue économique et technique. Elle créait d'autre part un corps de contrôle des concessions, basé pour la région à Grenoble. L'activité des services en cause, constitués d'ingénieurs de très haut niveau, s'est avérée très profitable pour le fonctionnement des multiples structures à mettre en place pour le lancement d'une foule d'activités techniques entièrement nouvelles.

1.2. Le développement de Grenoble vers l'hydroélectricité

Le système à mettre en place devait s'étendre à de multiples activités, notamment vers des problèmes de formation des cadres spécialistes des nouvelles techniques qui n'allaient pas manquer de proliférer.

C'est malheureusement une question assez souvent très sous-estimée, mais qui cette fois allait être traitée avec tout le sérieux et l'importance qu'elle mérite.

1.2.1. Un préalable : La formation des spécialistes des techniques nouvelles

La Faculté des sciences de Grenoble s'était depuis longtemps intéressée aux problèmes de géologie appliquée qui allaient évidemment trouver un champ d'action beaucoup plus vaste. Les géologues de Grenoble ont immédiatement porté un grand intérêt au développement de leurs activités, compte tenu du rôle déterminant que joue la géologie dans les études et la réalisation des ouvrages hydroélectriques. Dans le cadre des contraintes souvent élevées transmises par les ouvrages hydrauliques sur les fondations, et des effets parfois très pernicieux de l'eau infiltrée sur l'équilibre des ouvrages, la qualité du terrain sous ces deux aspects joue dans ce cas beaucoup plus que dans celui de beaucoup d'ouvrages de Génie Civil un rôle déterminant. Aussi les géologues universitaires de Grenoble : Professeurs KILIAN, GIGNOUX, MORET, ensuite R. BARBIER, ont-ils apporté une puissante aide au développement de ce type

largement nouveau d'études. En plus, les nouvelles structures ainsi créées ont pu mettre leur nouvelle expérience au service du développement des activités de Génie Civil analogues sous l'aspect technique, mais à propos d'ouvrages qui n'étaient pas forcément en rapport avec des aspects hydrauliques (tunnels routiers notamment).

En raison du caractère très vaste et très varié des techniques mises en jeu par les nouvelles installations hydroélectriques, ce sont des secteurs complets d'activités qui ont vu le jour.

A l'amont, la nécessité de créer des pôles de compétence dans les techniques nouvelles avait entraîné dès la fin du siècle précédent la création de formations spécialisées en électrotechnique. C'est à Grenoble qu'ont été donnés les premiers cours d'électricité industrielle, à la Faculté des Sciences, un peu avant la fin du siècle précédent, avec la participation du Professeur BARBILLION.

La tendance à la spécialisation des formations, à mesure qu'elles s'approfondissent a joué là aussi son rôle habituel, jusqu'à déboucher en 1929 sur la création de l'« Ecole des Ingénieurs hydrauliciens de Grenoble ».

Ainsi, la France s'est trouvée la première au monde à bénéficier d'enseignements spécialisés en Hydraulique, avec d'abord la section « Hydraulique » de l'Institut Electrotechnique de Toulouse, créée, elle en 1910. On peut rétrospectivement s'en féliciter, pour des raisons qui semblent évidentes alors que les formations en Mécanique des fluides ont maintenant atteint leur pleine maturité.

1.2.2. Les problèmes en cause

Ces techniques restaient encore assez limitées dans leur ampleur. La mécanique des fluides en cause concernait surtout les fluides incompressibles, essentiellement l'eau, et l'air (considérée comme tel, au moins dans cette première phase d'études), et pour des questions encore simples, n'ayant rien à voir avec ceux que pose l'hydrodynamique moderne. Les problèmes d'alors portaient surtout sur les pertes de charge des écoulements dans les grandes canalisations hydrauliques. Au-delà des expressions courantes telles que la formule de Strickler, ces études ne demandaient pas une très grande précision. Les travaux de PRANDTL-NIKURADSE-VON KARMAN ont apporté une importante contribution à la solution de ces questions, mais la prochaine étape sera très difficile à franchir. Les pertes de charge ne sont — sauf cas très particulier — pas très élevées dans les canalisations industrielles courantes. L'étude des surpressions dues aux « Coup de bélier » avait réalisé de très gros progrès — au-delà des équations de base établies par ALLIÉVI antérieurement — à la suite de la publication de l'excellent ouvrage de P. BERGERON : « Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité », qui résolvait la question du calcul des valeurs en cause elles-mêmes (vers 1935) par les célèbres « Epure » qui portent son nom. Peut-être même pourrait-on affirmer que le sujet a été dans certaines limites « épuisé » : on n'a encore rien trouvé de mieux au point de vue des équations de base du phénomène, et peut-être même n'en a-t-on pas besoin, dans la mesure où la précision des résultats ainsi obtenus est suffisante dans la limite des applications techniques. L'ordinateur a pris évidemment le relai des épures pour aboutir aux valeurs numériques, même si celles-ci gardent leur valeur pédagogique pour la formation de l'intuition. Les « oscillations en masse » qui se produisent à la mise en régime des canalisations en

charge ne posent guère de problèmes de calcul à proprement parler (sauf leur traitement — assez simple d'ailleurs —, aussi par des épures).

1.2.3. Influence globale : La mutation socio-économique

La création de l'Ecole en 1929 allait coïncider avec la grande crise économique de l'époque, laquelle a interdit tout développement industriel d'envergure à partir de 1930, et pratiquement (pour d'autres raisons...) jusqu'en 1945. Du moins allait-elle permettre de créer une infrastructure, particulièrement précieuse lorsque la reconstruction a pu se développer.

Cela s'est confirmé dans de nombreux secteurs, tels que les fabrications de matériel hydraulique. On ne peut pas ne pas citer à ce titre la construction des machines hydrauliques, avec la création des Ateliers N.B.P.P. qui allaient devenir « Neyrpic » et prendre au niveau mondial une part prépondérante — le premier semble-t-il — dans la fabrication des turbines hydrauliques et en général du matériel hydromécanique. Je me souviens encore de ce que j'avais appris dans un excellent cours donné en 1944 par M. CHENAIS (Ingénieur à N.B.P.P) sur la régulation, en particulier celle des machines hydrauliques. A ces activités ont été associées celles du « Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique », devenu sous l'impulsion de P. DANIEL un des tout premiers et des plus prestigieux laboratoires de recherche au monde en Hydraulique appliquée. « BOUCHAYER et VIALLET » a lui aussi rénové les techniques de fabrication des conduites à forte pression, avec la fabrication du type auto-fretté. Le rôle des « Petits constructeurs » d'équipement hydraulique (turbines, matériel divers) ne doit pas non plus être sous-estimé.

La construction d'ouvrages de Génie Civil — barrage de Bissorte, du Sautet, du Chambon vers 1935 — a suscité toute une série d'activités nouvelles, précédées ou accompagnées par la création de bureaux d'études des projets en cause. L'application de la loi de 1919 (citée ci-dessus) a permis aux services de contrôle de l'Etat de bénéficier du concours de personnalités de tout premier plan.

Surtout ces activités « hors tradition » ont porté à des fonctions socialement importantes des dirigeants des structures industrielles, intervenant sous de multiples aspects, de très haute qualité et avant tout novateurs aussi bien sous l'aspect social que technique.

Cet aspect s'est étendu à d'autres activités « induites » par la construction des nouveaux ouvrages hydroélectriques. On ne savait pas encore bien transporter à haute tension donc à grande distance l'énergie électrique qu'ils produisaient en abondance. Aussi les installations grosses consommatrices d'énergie devaient-elles s'installer près du lieu de production.

L'installation à Grenoble de constructeurs d'équipements électriques (appareillage) a suivi le mouvement général. Signalons à ce propos que M. MERLIN, fondateur et Directeur des établissements Merlin-Gerin (fils d'un coiffeur...), et le doyen WEIL ont été les créateurs un peu avant 1960 de la « Promotion Supérieure du travail » (PST, ancêtre de l'actuel CUEFA). Structure essentielle d'un système de formation moderne, celle-ci allait jouer un rôle de tout premier plan dans la mise en place d'un système de sélection plus ouverte, moins dépendante de l'origine sociale des candidats et dont elle constituait alors la « seconde instance ».

Toujours sous l'effet des contraintes techniques de l'époque, les usines d'électrochimie grosses consommatrices d'énergie se sont elles aussi installées autour des vallées alpines grenobloises. Il se trouve que la Romanche représente une puissance hydraulique au mètre linéaire parmi les plus fortes de France. Sans doute l'environnement n'y a-t-il pas beaucoup gagné (il suffit d'aller encore aujourd'hui de Grenoble à Bourg d'Oisans par la route pour s'en convaincre), du moins cette activité a-t-elle présenté à l'époque de très gros avantages sous des aspects très variés.

2. La maturité de l'hydroélectricité et de l'hydraulique françaises

2.1. Un système totalement « Autonome »

2.1.1. Le démarrage, la reprise d'activité en 1945

Les Ingénieurs Hydrauliciens de Grenoble ont pu dès que la situation est redevenue « normale » prendre leur part, en liaison bien sûr avec leurs collègues originaires d'autres Ecoles techniques supérieures, à l'étude des problèmes correspondant à leur formation, et notamment à la mise en valeur du « Gisement hydroélectrique » français.

Cette activité s'est étendue sur une quarantaine d'années, et jusqu'à la réalisation de projets « à buts multiples », notamment dans le midi de la France. On constate en effet que, sous l'aspect économique, la valeur des usages énergétiques de l'eau n'est pas la plus importante, et que son utilisation au point de vue agricole et encore plus aux usages domestiques ou alimentaires est beaucoup plus valorisante. Aussi les ouvrages en cause portaient-ils sur des installations à buts multiples en ce qui concerne le Rhône : alimentation en eau potable et industrielle, usages agricoles et navigation. L'aménagement complet du plus grand fleuve français sur près de 300 kilomètres entre la frontière suisse et la Méditerranée constitue une œuvre dont les ingénieurs français peuvent être légitimement fiers. Le Rhin franco-allemand a été aménagé sur la totalité du tronçon qui sert de frontière aux deux pays. Certains des problèmes n'étaient pas simples : on constate que la canalisation (donc la fixation du lit, avec la réduction considérable de largeur qui en résulte) entraîne l'érosion des fonds. Dans le cas particulier celle-ci atteignait près de 10 centimètres par an. C'est apparemment bien faible mais en réalité intolérable, d'abord sous l'angle de la physique. Cet abaissement entraîne celui de la nappe phréatique, puis le déchaussement des fondations des ouvrages transversaux (ponts) ou longitudinaux (digues). Aussi le droit international a-t-il réglementé les principes essentiels de ce type de voisinage, en le subordonnant à des accords précis. Resterait bien sûr le simple aspect des relations de bon voisinage entre deux pays riverains. Et voilà le cadre technique d'un problème mâtiné de questions d'apparence totalement extérieures au sujet, les deux aspects ajoutant (ou plutôt multipliant) leur mutuelle complexité.

L'aménagement de la Durance et du Verdon comprenait aussi une très importante part hydroagricole, la retenue de Serre-Ponçon (la plus importante de France, avec ses 1 200 millions de mètres cubes) ayant mis fin aux catastrophes que représentaient les « Pénuries agricoles » en Durance. L'aménagement du Verdon, avec de nombreux barrages, a permis à la « Société du Canal de Provence »

d'alimenter une partie du bassin méditerranéen en eau potable et industrielle. Ces ouvrages constituaient un indispensable préalable au développement industriel et touristique de la région en cause.

Les réalisations hydroélectriques les plus récentes ont porté sur les « Stations de Transfert d'Energie par Pompage » (STEP), avec notamment l'aménagement de Grand'Maison, la plus puissante installation de ce type en France. Les machines hydrauliques doivent être placées pour des raisons de cavitation des écoulements (un problème fondamental pour les machines de ce type) à un niveau très en dessous de la cote de restitution aval, assurant l'indispensable mise en pression des écoulements. La longueur des arbres qui relient les turbines-pompes et les alternateurs-moteurs dépasse la vingtaine de mètres. De ce fait la hauteur des « pans droits » de l'excavation est importante et supérieure à quelque vingt-cinq à trente mètres. Les parois se déforment alors sous l'effet de la libération de contraintes dans le rocher. La « convergence » en cause atteignait 10 centimètres environ. L'ordre de grandeur de ces déformations a été retrouvé par les calculs sur ordinateur, évidemment relativement complexes. Mais cette déformation avait faussé la verticale de l'axe des machines, laquelle doit être respectée avec une grande précision. Aussi plusieurs groupes ont dû être démontés et remontés pour respecter les tolérances ainsi imposées. Surtout, la position des machines était réglée après que les déformations du rocher aient atteint la plus grande partie possible de leur valeur finale. Mais chacune des opérations de démontage-remontage doit s'étendre sur de nombreux mois.

2.2. Evolution globale de la formation à l'ENSHG. Quelques retombées importantes

Cette période de la « Grande Hydraulique » a bien entendu été accompagnée par l'adaptation progressive des programmes d'enseignement de l'Ecole, sous la pression du progrès des techniques et des moyens d'étude disponibles. L'un d'eux présente une énorme importance : il s'agit du développement des méthodes numériques, très adaptées à l'étude de certains problèmes de la mécanique de fluides et de la mécanique des structures. Nombre de chapitres de ces disciplines en ont été complètement bouleversés. Une grande place doit désormais leur être consacrée dans les programmes de formation.

2.2.1. De l'équipement du gisement hydroélectrique à l'exploitation des ouvrages. La DTG

Electricité de France avait dès la nationalisation installé et développé à Grenoble un organisme à compétence nationale, en raison des connaissances et des moyens préexistants dans la région à la nationalisation. Il s'agit de la « Division Technique Générale » de la Direction de l'Exploitation des ouvrages hydrauliques français en général. Il avait une compétence pluridisciplinaire, s'étendant aussi bien à l'hydraulique (notamment : mesure du rendement des turbines par la « méthode thermodynamique », mise au point avec la collaboration du Professeur WEIL, de la Faculté des Sciences de Grenoble), qu'à la résistance des structures (en particulier à l'auscultation de l'ensemble des barrages français), ou aux problèmes rencontrés dans le réseau français de production-transport d'énergie électrique.

L'existence d'un tel organisme représentait une pièce maîtresse dans une discipline telle que l'hydraulique, où l'expérience joue toujours (nous reviendrons sur ce point dans la suite de cet exposé) un rôle fondamental. L'Ecole a pu bénéficier sous plusieurs aspects (enseignement direct, projet) de la présence d'experts particulièrement qualifiés et surtout en prise directe avec ces aspects.

Par ailleurs, les thèmes correspondant à la mission hydroélectrique de l'Ecole ont subi une double évolution. Ils portaient initialement sur les problèmes posés par la construction de nouveaux ouvrages, mais ceux-ci ont été relayés par les aspects découlant de la mise en service des installations nouvelles. L'activité correspondant aux premiers diminuait, mais celle dépendant des seconds croissait constamment, élargissant en permanence le champ d'expérience qui transitait par la DTG. Aussi cette composante de l'environnement de l'Ecole a-t-elle joué un rôle précieux au titre des relations qu'elle se devait de développer avec les industriels.

2.2.2. Développement des études hydrologiques

Dès sa création, l'Ecole avait pu bénéficier des connaissances particulièrement précieuses du Professeur PARDÉ en hydrologie. Véritable ordinateur vivant, il connaissait les caractéristiques d'un nombre invraisemblable de rivières à l'échelle mondiale, leur régime, leurs crues, etc..., et d'une puissante intuition dans l'analyse des problèmes ainsi posés.

Il avait jeté les bases de l'enseignement à l'Ecole de thèmes qui se sont trouvés complètement transformés et renouvelés par le développement de l'utilisation de l'ordinateur. Du moins le Professeur PARDÉ avait-il préparé les bases des études des « Fleuves et Rivières » (c'était le titre d'un de ses livres), qui ont pu prendre l'ampleur qu'elles méritaient dès que l'usage de ce nouvel outil s'est généralisé, en rendant de considérables services. Il ne joue certes qu'un rôle très limité au début du problème, constitué par les mesures, par exemple les débits en rivière. Mais tout ce qui est en aval a été complètement transformé et largement facilité : stockage, analyse, classement, extrapolation, interprétation des valeurs obtenues, valeurs statistiques, etc... etc... Mais, quels que soient les perfectionnements apportés par l'usage de l'ordinateur, les discussions entre hydrologues montrent à quel point les connaissances physiques à la base de ce type de phénomène restent irremplaçables.

Ce type d'études s'est par ailleurs développé à une très grande échelle du fait de l'importance croissante des problèmes posés par l'approvisionnement en eau des populations et l'évolution des craintes vis-à-vis des dangers que représentent les crues des rivières.

Si le régime des crues des cours d'eau n'a, semble-t-il aucune raison de changer, les dégâts qu'elles provoquent croissent évidemment, à la mesure de la densité et de la valeur de l'occupation du territoire. Mais cet aspect physique se double d'un aspect psychologique, et l'opinion publique ne comprend pas toujours que l'accroissement des moyens dont l'homme dispose pour contrôler certaines calamités ne s'applique pas avec la même efficacité aux dégâts provoqués par les crues.

Le problème de base que pose l'hydrologie, qui consiste à évaluer les débits des rivières à partir de la mesure des précipitations, pourra sans doute s'améliorer, mais le nombre des paramètres et leurs formes d'intervention sont

tels qu'aucun d'eux ne pourra sans doute jamais être déterminé assez exactement ni ses effets appréciés avec une précision de nature à évaluer le « transfert » pluie-débit, ses lois de probabilité, avec une précision bien meilleure qu'aujourd'hui.

Par contre l'utilisation de l'ordinateur pour la résolution des équations des mouvements transitoires que constitue l'écoulement des crues permettra sans doute de déterminer dans d'assez bonnes conditions la façon dont elles se propagent. Ajoutés à l'amélioration des prévisions météorologiques, ces moyens permettent de prévoir dans des conditions bien meilleures les inondations, et par conséquent de mieux s'en protéger.

Un des sous-aspect des problèmes d'hydrologie est représenté par le transport des sédiments. Mais les difficultés à apprécier et modéliser les mécanismes en cause ne sont pas près d'être éclaircies. On retrouve souvent la turbulence à la base de ces mécanismes, mais avec un degré de complexité qui ne conduit pas à l'optimisme sur l'amélioration des résultats à espérer.

Ces phénomènes se retrouvent pourtant à la base de questions très importantes. On a même constaté des analogies parfois profondes entre la suspension des globules dans le sang et le transport du sable dans les cours d'eau.

2.2.3. Une activité « étrange » : le développement des études maritimes à Grenoble

La localisation d'études maritimes approfondies et très spécialisées dans un pays de montagne, à grande distance des côtes, constitue un paradoxe qui mérite une explication. Celle-ci est simple. A une certaine époque, les responsables industriels français au niveau le plus élevé ont éprouvé des craintes quant à l'approvisionnement de la France en énergie électrique, du fait de la pauvreté de ses ressources en énergie primaire. L'aménagement du gisement d'énergie marémotrice pouvait constituer le relai permettant d'approvisionner notre pays en attendant la mise en service d'autres sources d'énergie. Les ressources mondiales en énergie primaire (pétrole) ne semblaient pas considérables, et la mise en valeur de l'énergie nucléaire paraissait encore bien lointaine. L'exploitation du site marémoteur des îles Chausey (Mont-Saint-Michel) aurait pu constituer un relai idéal. Une question se posait cependant : les marées ont une amplitude tout à fait exceptionnelle dans le site, mais celle-ci était encore mal expliquée à l'époque. Entre autres une grave question restait posée : le fonctionnement même des ouvrages ne va-t-il pas supprimer ou au moins réduire l'amplitude des variations de niveaux, base même du phénomène à mettre en valeur.

La construction d'un modèle physique — reproduisant les phénomènes à une certaine échelle — paraissait seule pouvoir donner la réponse. Un obstacle surgissait immédiatement : des analyses théoriques montraient que l'accélération de Coriolis due à la rotation terrestre, pouvait contribuer à expliquer l'amplitude locale du mouvement des marées. Mais la simulation physique du mouvement exigeait que la maquette en cause représente cette « singularité » par la mise en rotation du modèle. D'où la construction à Grenoble de la plaque tournante « Coriolis », de 14 mètres environ de diamètre. C'était une « première » au niveau mondial, pleine de difficultés de toute nature. La rotation, la planéité du mouvement, devaient être réglées avec une très bonne précision mécanique. Il restait à mettre sur pieds l'Etat-Major scientifique qui

pourrait prendre en charge la construction du modèle et son exploitation. L'étude était ambitieuse et le programme comportait de sérieux aléas. Le choix de Grenoble semblait a priori étrange, mais en fait il n'a pas soulevé la moindre objection. La disponibilité en « matière grise » constituait le paramètre fondamental ; or les références régionales résultant du regroupement des spécialistes de l'hydrodynamique, de la construction de modèles physiques, de l'expérimentation sur maquette, de l'hydraulique théorique et appliquée, ne se retrouvaient pas en France hors de la région grenobloise. Il a fallu néanmoins « fédérer » en une structure unique ces diverses compétences, réparties entre Sogréah, l'Université de Grenoble avec d'éminents spécialistes de l'hydrodynamique tels que les Professeurs CRAYA, KRAVTCHEKOV et SANTON, et le CNRS. Le résultat a été que les problèmes « directs » dont on recherchait la solution ont été résolus : l'aménagement de la baie malgré son importance ne risque pas de réduire l'amplitude des marées, celle-ci étant due à la forme en plan très particulière de la côte, spécialement au voisinage de la presqu'île du Cotentin. En outre la « Plaque Coriolis » (mise en service vers 1959), tourne encore, en ayant permis entre temps de résoudre de nombreux problèmes à l'échelle mondiale. Aussi, Grenoble y a-t-il gagné — définitivement semble-t-il, et en dépit de sa position géographique — une solide réputation à l'échelle mondiale dans le domaine fort important de l'hydraulique maritime.

2.2.4. Les Transferts Thermiques

Ces phénomènes jouent un rôle fondamental dans le transport de la chaleur par les fluides. Alors que les solides ne transfèrent l'énergie thermique que par conduction, évidemment sans transport de matière, les fluides sont sous cet aspect beaucoup plus efficaces puisque le phénomène fait alors intervenir le transport par convection directe de la chaleur. Aux limites du mouvement du fluide (obligatoirement des parois), l'échange thermique avec celles-ci est lui aussi plus intense du fait de la turbulence du mouvement du fluide. Malheureusement, l'analyse détaillée du phénomène dépasse en partie la portée des connaissances actuelles. Aussi tous les procédés théoriques et expérimentaux doivent-ils être regroupés pour aboutir à des solutions acceptables sous les aspects théoriques et expérimentaux. Les indispensables compétences en cause sont retrouvées en particulier (ce n'est évidemment pas par hasard) dans le service des « Transferts Thermiques » du « Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble » (CENG). Elles impliquent des connaissances tout particulièrement approfondies en Mécanique des Fluides. Plusieurs membres de ce service avaient reçu l'essentiel de leur formation scientifique et technique à Grenoble. Certains (Prof. DELHAYE) enseignent les phénomènes en cause à Paris (Ecole Centrale), et même aux USA.

2.2.5. Le CREMHYG

Il manquait à l'Industrie Française un outil pourtant fondamental dans le domaine de l'étude des machines hydrauliques. Ces études impliquent le regroupement durant la phase « projet » de tous les procédés que les connaissances en mécanique des fluides mettent à la disposition des ingénieurs et chercheurs : Théorie, études expérimentales à plusieurs étapes, analyse numérique, etc... Puis — et c'est un point sur lequel nous reviendrons à la fin de cet exposé — le résultat doit encore être testé en phase finale, avant

le lancement de la fabrication, dans des installations d'essais et de recherches. Celles-ci sont équipées de tous les dispositifs de mesure, les plus sophistiqués (lasers, etc...).

Alors que les constructeurs grenoblois de ce type d'équipement sont parmi les tout premiers au monde, il n'existait pas encore en France d'installation d'essai et de recherches des machines, ce qui obligeait à faire appel à des stations d'essai à l'étranger pour réaliser ces indispensables contrôles.

Cette situation peu compréhensible a cessé vers 1980, par la réalisation du « CREMHYG », Centre de Recherches et d'Etudes des Machines Hydrauliques de Grenoble, sous l'égide de l'Etat, des collectivités locales et du CNRS. Grâce au regroupement des compétences en matière de contrôle des machines récemment mises en service (cf. 2.2.1.), désormais grâce à ces nouvelles installations d'essai, il a été possible de franchir une étape dans le cadre de ce type d'études. Elles ont débouché notamment sur la mise au point des machines hydrauliques équipant les moteurs des fusées Ariane. Il sera sans doute inutile de souligner le soin et le degré de perfectionnement avec lesquelles les études de ce type d'équipement doivent être conduites.

2.2.6. Les turbines de Itaipu. Les Pivots

La primauté des constructeurs grenoblois de machines hydrauliques (Turbines) a été confirmée par leur participation (en collaboration avec le constructeur allemand « VORTH ») à la fourniture des turbines de Itaipu (sur la frontière entre le Brésil et la Paraguay), le plus puissant du monde, avec ses 18 groupes de chacun 700 Mégawatts (à peu près la moitié de la puissance d'une tranche nucléaire), allant même au delà de 800 MW en surouverture.

Une part la plus importante possible (au point de vue des intérêts des acheteurs sous l'aspect des « Transferts de Technologies » en tous cas), et jusqu'à 80 % en chiffre d'affaire a été construite au Brésil. Mais les pièces les plus délicates ont été fabriquées en Europe, et notamment les pivots. Ceux-ci supportent des charges considérables, de l'ordre de 3 à 4 000 tonnes. Hydrauliquement, le mécanisme de fonctionnement de ces pièces est assez curieux, et a entraîné de grosses difficultés de conception, de réalisation et de mise au point. La charge en cause est reportée non pas sur des surfaces les plus grandes possible, pour réduire la pression au contact des surfaces, mais sur des patins qui réduisent considérablement la surface portante du support. Par contre ils mettent en jeu un aspect dynamique fondamental. L'entraînement de l'huile (découlant de sa viscosité) par les patins du fait de la vitesse résultant de la mise en rotation du groupe par la turbine soulève celui-ci, de quelques microns seulement, mais assez pour que le frottement soit limité au domaine de l'huile, sans atteindre la partie métallique du support. Le détail du mouvement est complexe — donc difficile à calculer —, car il met en outre en jeu la variation de la viscosité de l'huile sous l'effet de son échauffement, la forme très particulière du patin, ainsi que la déformation des pièces sous l'effet de l'élévation de température du métal. Ces aspects très variés ont exigé la mise au point laborieuse de calculs complexes. Là encore, la collaboration de spécialistes de la mécanique des fluides et de la déformation des métaux a seule permis de dominer les difficultés en cause. Cela n'avait pas toujours été sans mal, et pendant plusieurs années on entendait souvent parler de certains pivots de groupes à axe vertical qui venaient de gripper...

2.3. *Un problème essentiel : L'incompressibilité des programmes face au nécessaire développement des connaissances. La première création des « Filières » à l'ENSH*

L'élargissement des domaines dans lesquels les étudiants devaient avoir au moins reçu des notions était devenu indispensable. Mais pour des raisons diverses il était exclu d'allonger la durée des études. Ce n'est de toutes façons pas forcément souhaitable : le bilan d'une année passée à l'Ecole de première formation est représenté par la différence entre ce qu'on y apprend et ce qu'on aurait appris si l'on avait été ailleurs. Après une scolarisation d'une certaine durée, cette différence pourrait fort bien s'avérer négative.

Aussi le programme de formation à l'Ecole a-t-il été diversifié à partir de 1973. Les trois premiers semestres (le programme complet de formation à l'Ecole en comprend six) sont communs. Puis il se différencie en deux filières : « Mécanique des Fluides Industriels » (MFI) d'une part, et d'autre part « Aménagement du Territoire » (AT).

L'évolution de la formation consécutive à celle des débouchés semble avoir pleinement justifié cette décision. Elle s'est d'ailleurs poursuivie par l'introduction de nouvelles filières, vers 1980 : « Génie Hydraulique et Ouvrages » (GHO), et « Ressources en Eau et Aménagement » (REA).

2.4. *Conclusions*

La situation vers 1980, à la fin de la période d'équipement hydraulique, est caractérisée par la présence d'« équipes » efficaces et « rodées » dans les structures industrielles qui constituent l'environnement de l'Ecole. Leur compétence est largement reconnue au niveau international, dans les instances spécialisées en hydraulique-mécanique des fluides-mécanique des solides. S'il y avait un nom à citer pour caractériser cet ensemble, ce serait sans doute celui de M. CASACCI, Directeur technique des Etablissements Neyrpic. Ingénieur des Arts et Métiers, il a su compléter sa formation d'Ingénieur par deux thèses successives soutenues devant les instances universitaires de Grenoble, l'une de Docteur-Ingénieur (centrée sur l'équilibre mécanique des coques), l'autre de Docteur ès Sciences. Il a ainsi pu associer dans l'exercice de ses fonctions, d'une part des connaissances scientifiques de haut niveau, à la base de ses activités industrielles, des progrès qu'il devait sans cesse patronner ou introduire dans la conception et la fabrication d'un type d'équipement fort complexe, d'autre part ses connaissances technologiques de tous les jours sur le détail du fonctionnement de machines où les problèmes d'entretien, de démontage, de fiabilité en général, jouent aussi un rôle fondamental. Il avait en outre accepté de présenter — jusqu'à sa mort en 1983 — un cours à l'Ecole sur la régulation des turbines, particulièrement apprécié justement en raison de la parfaite connaissance qu'il avait des divers aspects théoriques et industriels du sujet traité.

La diversité et la profondeur des compétences indispensables à l'exercice d'activités très variées, presque toujours complexes parce que du ressort de la mécanique de fluides, sont matérialisées dans notre région par une tradition déjà solide, concrétisée par l'existence d'équipes, d'institutions rodées, efficaces et de haut niveau, aussi bien universitaires qu'industrielles, dans la plupart des domaines liés à l'utilisation de l'eau ou des fluides en général.

Ces aspects sont particulièrement importants pour aborder les phases ultérieures du développement des activités scientifiques et industrielles en cause.

3. *Les facteurs de la complexité de l'hydraulique d'aujourd'hui. Perspectives*

3.1. *Un aspect scientifique : les connaissances de base. De la formule de Strickler au mécanisme des pertes de charge*

Lors de la première étape de l'enseignement de l'hydraulique à l'Ecole, il s'agissait de donner une idée certes aussi élaborée que possible des mécanismes à la base par exemple des pertes de charges en écoulement permanent, d'où les formules empiriques traditionnelles. Certaines sont encore d'usage courant aujourd'hui, notamment si la précision qu'on demande aux calculs en cause n'est pas très élevée, et si elles n'impliquent pas une modélisation plus fine des mécanismes fondamentaux. C'est encore le cas des problèmes par exemple des transports de sédiments en rivière, ne serait-ce que du fait d'une définition très imprécise des dimensions des matériaux qui constituent les lits de rivières. Mais ces méthodes sont devenues totalement inadaptées s'il s'agit de caractériser par exemple la turbulence des écoulements à la base de certains phénomènes fondamentaux. L'analyse raffinée du phénomène de couche limite devient indispensable dans beaucoup de problèmes industriels de grande importance, concernant notamment les échanges thermiques, spécialement dans les réacteurs nucléaires. C'est le cas aussi pour les écoulements à grande vitesse sur les évacuateurs de crues des barrages. Le processus de « cascade » de l'énergie des gros tourbillons vers les petits — où se fait la dissipation d'énergie — s'avère fondamental, même pour des applications relativement simples, parmi celles citées ci-dessus.

3.2. *Les conséquences du développement des grandes villes sur l'importance des ouvrages hydrauliques*

La construction de grands ouvrages pour le développement des infrastructures urbaines a fait surgir toute une série de nouvelles difficultés, d'origine hydraulique. Certes, ce n'est pas d'aujourd'hui que date la réalisation de grandes installations telles que le métro. Mais elle s'est heurtée à de gros problèmes, à Paris notamment, quand il s'est avéré indispensable de les compléter. La construction du métro au début du siècle constituait une très délicate performance technique : on a dû notamment utiliser la congélation du terrain pour traverser plusieurs fois la Seine en souterrain. Mais la construction de nouveaux réseaux de transport urbain se heurte — logiquement d'ailleurs — à plus de problèmes : ils ont dû être implantés plus en profondeur, (souvent en dessous du niveau de la nappe phréatique), notamment pour éviter de rencontrer ceux qui existent déjà, en grand nombre. Or le sous-sol de Paris est géologiquement assez mauvais, et il a en outre été creusé et surcreusé au cours des siècles, ce qui ne l'a pas arrangé. La perforation de nouveaux souterrains serait alors très coûteuse voire à la limite de l'impossible dans le cadre des ancien-

nes techniques. Heureusement les procédés en cause ont beaucoup progressé, spécialement ces vingt dernières années. Ils utilisent sur une grande échelle les techniques de traitement des sols, qui consistent à les consolider avant de les perforer. Mais l'emploi des procédés de ce type exige une technicité poussée, avec à la base de meilleures connaissances en écoulements souterrains, aussi bien de l'eau que les laitances d'injection. Une entreprise telle que Solétanche — avec ses nombreux spécialistes de l'hydraulique souterraine — a su prendre une place très enviable dans le développement au niveau mondial de ces techniques, notamment de la « Paroi moulée ».

3.3. La variété et l'importance des usages de l'eau. Des systèmes à « coût (très) croissant ». Les conséquences. Exemples

Il est très difficile de citer tous les problèmes nouveaux dans lesquels le comportement des fluides joue un rôle croissant, d'abord l'eau et l'air, puis des fluides moins courants. Nous allons nous borner à en citer quelques uns parmi les plus importants.

— La limite physique des ressources en eau d'un pays. Les problèmes résultants.

Compte tenu du développement universel de l'urbanisation, les besoins en eau de toutes les populations urbaines croissent rapidement. Les grandes « conurbations » au niveau mondial seraient absolument invivables sans de grands réseaux d'eau potable, aussi bien que d'égouts. Quelle que soit la ville considérée, on doit évidemment partir de la ressource naturelle, que l'on exploitera bien entendu à « Coût croissant », corollaire de difficultés techniques elles aussi croissantes : on devra bien notamment aller chercher l'eau à des distances de plus en plus grandes. Le cas de plusieurs pays africains — assez pauvres en eau — se présente sous l'aspect suivant : ils avaient mis en valeur il y a une vingtaine d'années la moitié de leurs ressources naturelles en eau. L'exploitation de la seconde moitié sera beaucoup plus coûteuse que la première, et même marginalement infinie. Comme la population double au moins tous les trente ans, la situation dans quelque dix ans ne sera pas, au mieux, meilleure qu'actuellement. Mais après (théoriquement en tous cas), plus rien...

— Un problème d'apparence très extra-technique, mais ...

C'est là où la paramétrisation de cas réels implique la prise en considération d'aspects très extra-techniques, mais en fait qui lui sont étroitement connectés : c'est celui de la tarification des usages en cause. Le problème du Maroc sous cet aspect avait paru suffisamment fondamental pour faire l'objet d'une étude particulière, impliquant la prise en considération des aspects aussi bien techniques qu'économiques. Un cas similaire a conduit une des grandes villes du monde à une impasse totale : c'est celui de Buenos-Aires, où la tarification de l'eau potable était basée sur un système (très ancien) à forfait, sans mesure des quantités consommées. La situation actuelle est devenue tellement insupportable (la croissance de la demande bat tous les records, mais par contre l'eau doit venir de plus en plus loin, à grands frais), que les autorités en charge de ce problème viennent de lancer un appel d'offres international pour tenter d'instituer une tarification raisonnable sous les aspects techniques et financiers. La difficulté est d'autant plus grande que toutes les salles de bains d'un immeuble

sont regroupées sur la même conduite, les cuisines aussi, ce qui ne facilite pas l'installation de compteurs qui individualiseraient la desserte des appartements.

— La généralisation.

De toutes façons l'approvisionnement en eau potable présente une importance telle que certains de leurs aspects débouchent sur des points où les critères techniques, économiques, financiers sont étroitement imbriqués. Mais les administratifs en charge de ces problèmes sont souvent moins armés pour bien comprendre certains aspects tels que les suppressions dues aux phénomènes transitoires dans les canalisations.

Ainsi, la Société du Canal de Provence a établi un système de gestion un peu particulier qui comprend deux aspects fondamentaux, dont l'introduction dans la gestion des réseaux de distribution présente de gros avantages, notamment sous l'aspect technique pur :

- Un système de tarification « au coût marginal », inspiré d'un système analogue établi avec un plein succès par Electricité de France à propos de l'énergie électrique.
- Un système de « régulation dynamique » du débit utilisé par les usagers. Ce système est du type « à commande par l'aval », qui leur permet d'être largement maîtres du débit qu'ils utilisent.

Là encore, les questions techniques du ressort des mouvements transitoires dans les dérivations jouent un rôle prépondérant dans l'application des principes même de tarification.

— Un cas particulier : l'adduction d'eau d'Athènes. La SCP a été chargée d'établir le projet de développement de l'alimentation en eau de cette ville, à partir de la grande retenue artificielle du Mornos. L'ouvrage en question comprend une galerie de près de 10 kilomètres — mise en charge pour être en commande « par l'aval » — dans un terrain calcaire, karstifié en plus. La solution des problèmes techniques a impliqué des études partant de l'application de la théorie des écoulements à potentiel de vitesse pour préciser les conditions dans lesquelles les pertes d'eau à partir du tunnel de dérivation resteraient acceptables. Le calcul conduit sur ces bases a montré que ces fuites seraient faibles. Les valeurs obtenues ont par ailleurs été confirmées lors de la mise en eau des ouvrages.

3.4. Des problèmes particuliers

— Echanges thermiques et turbulence : le refroidissement des boogies du TGV. La question était importante, car elle permettait de préciser en particulier les températures maximales atteintes par les roulements. Le problème n'a pu être résolu que par des essais sur maquette, sans d'ailleurs soulever des difficultés particulières.

— Extension des études sur modèle : Avalanches, pollution thermique et chimique des grandes plaines. Là encore une analyse purement théorique du problème serait impossible, compte tenu de la complexité des écoulements à considérer. Au contraire les essais sur modèle permettent d'aboutir à des résultats confirmés par les résultats concrets.

— La cavitation des grands écoulements. Ils jouent parfois un rôle très important, notamment dans les écoulements des évacuateurs de crue des barrages. L'importance du phénomène a sans doute été sous-estimée, car il se manifeste pour des ouvrages de hauteur supérieure à quelque 50 mètres seulement. Suivant des études conduites en

particulier au Brésil, l'injection d'air dans les écoulements en cause résoudrait le problème, sans qu'on ait encore pu préciser le mécanisme de cette amélioration.

— L'érosion due à la puissance des jets : les plus importants des écoulements de ce type portent sur des barrages de 300 mètres de hauteur et plusieurs dizaines de milliers de mètres cube par seconde, injectant ainsi 10 millions de kilowatts par centaine de mètres de hauteur et dizaine de milliers de m^3/sec . On constate alors que l'impact du jet sur le rocher même d'excellente qualité provoque de très importants affouillements du rocher, pouvant atteindre une profondeur considérable.

— L'« Hydraulique des côtes » soulève également de très importants problèmes, notamment en ce qui concerne des conditions d'équilibre de la zone côtière. On constate notamment que la construction de barrages réservoirs sur le continent entraîne le recul de la côte dans la zone du débouché des cours d'eau ainsi aménagés. Là aussi la position du rivage résulterait d'un équilibre entre la capacité d'évacuation des sédiments par le mouvement de la mer, et les apports de sédiments par les cours d'eau. Or celle-ci peut elle-même se trouver réduite dans de notables proportions par aménagement d'une retenue qui diminue la quantité de sédiments transportés en aval du barrage et ensuite rejetés à la mer.

— Le cœur artificiel. Il s'agit d'un chapitre évidemment tout différent (pas totalement en ce qui concerne le mouvement des globules dans le sang) de ceux évoqués ci-dessus, mais que l'Ecole a été amenée à considérer. Sous l'impulsion en particulier de Monsieur VADOT, l'Ecole avait confié à un groupe d'étudiants un projet de fin d'études portant sur le cœur artificiel. Un des étudiants qui avait participé à cette étude a été suffisamment intéressé par ce qu'il avait fait pour se lancer dans les études médicales après avoir terminé son travail....

3.5. Le « dernier né » : Magnétohydrodynamique, GIS-MADYLAM. L'entrée du Professeur MOREAU à l'Académie des Sciences

Le dernier né de cette longue évolution a sans doute été représenté par la création du GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) — Madylam (Magnéto-Dynamique des Liquides et Applications à la Métallurgie). Placé dès sa création sous la responsabilité du Professeur MOREAU, celui-ci a conduit les activités en cause dans des conditions et avec une efficacité telles qu'il vient d'être élu à l'Académie de Sciences. Très doué (J'ai entendu son Maître le Professeur CRAYA me l'affirmer il y a une trentaine d'années), moulé dès sa formation initiale dans la diversité des méthodes utilisées en Mécanique des fluides, il a été de ce fait mis en contact davantage, mieux, et plus tôt que les autres avec ses aspects, ses difficultés et même ses traquenards. Ayant ainsi reçu toute sa formation supérieure à l'Ecole dont il a été l'élève, puis le Professeur, enfin le Directeur, cette distinction dont il est superflu de souligner l'importance est forcément garante des principes, de la qualité et de l'efficacité tant de la formation que des recherches conduites en son sein.

4. Conclusions

4.1. Le « spectre » des phénomènes de mécanique des fluides

L'« étirement » permanent des problèmes posés par la mécanique des fluides entre de très difficiles théories et les

indispensables compléments expérimentaux se poursuit et même s'accroît. Le développement de techniques nouvelles — les vols spatiaux par exemple — fait souvent apparaître des problèmes entièrement nouveaux, soit par leur aspect très particulier — la rentrée des fusées spatiales dans l'atmosphère — soit par la rénovation de leur environnement : La nécessaire miniaturisation, la garantie de service que doit présenter le matériel équipant les vols spatiaux, posent de tout nouveaux problèmes.

Un aspect important semble bien néanmoins se confirmer : AUCUN problème de Mécanique des fluides ne pourrait se résoudre par application d'une seule catégorie de solutions. C'est strictement évident quant à l'utilisation de procédés purement expérimentaux : un résultat ne peut se généraliser sans faire appel à une théorie plus ou moins approximative, dans des limites à définir. Mais il semble bien qu'on puisse aussi affirmer l'inverse. La plupart des théories impliquent des approximations, des hypothèses, qui restreignent toujours la généralité et la précision du résultat, dans des conditions que seule l'expérience permet de déterminer. L'utilisation de l'ordinateur a certes élargi dans d'énormes proportions le nombre de cas où le calcul donne de bons résultats. Mais les spécialistes les plus éminents de ces méthodes affirment qu'une limite survient toujours à la précision du résultat.

A vue humaine, cet aspect a toutes les chances de durer longtemps : certaines des énigmes posées par le mouvement des fluides semblent trop profondes pour être résolues autrement qu'à très long terme. On a peu de chances de voir surgir en Mécanique des Fluides une « loi d'Ohm » qui permettrait de résoudre les problèmes équivalents reliant les débits (intensité du courant ou débit du fluide) et de potentiel (tension ou charge du fluide).

4.2. Deux fluides à la base de la vie : l'air et l'eau

Ils jouent un rôle dans la vie - au sens le plus profond du terme - tel que la connaissance des très difficiles particularités de leur comportement présentera toujours une importance considérable, en plus incontournable.

Mais alors une nouvelle complication surgit : les problèmes à l'interface air-eau.

4.3. La solution pour résoudre les problèmes en cause

La seule formule qui permettrait de faire face aux nombreux défis ainsi lancés consiste à persévérer dans les méthodes qui ont été à la base du développement des formations spécifiques données à l'Ecole, certes insérées à l'intérieur d'une culture non seulement scientifique mais aussi générale de haute qualité, incorporant par ailleurs les aspects techniques et appliqués, aussi bien théoriques qu'expérimentaux. On ne peut absolument pas les séparer en mécanique des fluides. Plusieurs des problèmes en cause présentent des aspects globaux, vitaux au sens même étroit du terme, dont les répercussions sociales et humaines sont considérables.

L'environnement social, scientifique et technique de l'Ecole, ses liaisons avec la Recherche, appliquée notamment, le milieu économique, joueront un rôle d'importance croissante dans le maintien et le développement de son efficacité.