Informatique, hydraulique numérique, hydroinformatique

Que devrait savoir un hydraulicien à la fin des études en 1995 ?

J.A. Cunge

Laboratoire d'Hydraulique de France - LHF
6, rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France

Première prémisse des thèses développées dans ce qui suit est, qu'un hydraulicien doit connaître, à la fin de ses études supérieures, l'hydraulique. Cette apparente lapalissade est malheureusement souvent mise en défaut par la réalité quotidienne et notamment par les tentatives louables, mais selon l'avis de l'auteur erronées, de préparer les jeunes ingénieurs à l'évolution des sciences et des technologies et de leur conséquence par un enseignement encyclopédique très large thématiquement, mais forcément moins profond.

L'Université (sous ce terme on englobe toute la formation supérieure, y compris les Grandes Ecoles françaises) a une part essentielle dans la création de la société occidentale post-industrielle. Elle a pu jouer ce rôle parce qu'elle était largement indépendante, souvent en refusant de se soumettre aux exigences immédiates du marché du travail ou des biens du monde extérieur. Je défends la thèse que l'Université est le seul endroit où le futur ingénieur peut apprendre à acquérir les connaissances profondes, spécialisées dans un domaine, même si ce domaine est

étroit. Jamais il n'aura cette possibilité ultérieurement. Je prétends aussi qu'il n'est pas possible de lui enseigner plusieurs métiers en l'espace de trois à cinq années d'études. Et enfin, je pense qu'il est infiniment plus facile pour un ingénieur de changer la spécialisation, la carrière, l'orientation voire le métier s'il possède d'une part une très large culture générale (il s'agit d'être **cultivé** : connaître la littérature — celle de son pays mais aussi celles d'autres nations —, connaître l'histoire, les langues, les us et coutumes ainsi que les civilisations et les traditions culturelles) et d'autre part une connaissance approfondie et fondée sur des bases théoriques et expérimentales solides d'un métier, d'un domaine spécialisé, dans notre cas de l'hydraulique. Car, finalement, toutes nos sciences et technologies ont, en dernière instance, des fondements communs qui ne sont pas tellement anciens. De plus, les méthodologies de compréhension et d'assimilation ne sont pas bien différentes. Cela m'incite à défendre l'idée qu'étudier une méthode de comprendre est plus importante qu'un poli

Data processing, Computational Hydraulics, Hydro-informatics What should know Hydraulics Engineer at the end of his studies in 1995 ?

The author develops a point of view concerning the ensemble of knowledge in the field of hydroinformatics which should be assimilated by a Hydraulics Engineer during his university studies. This will be considered in relation to the basic hydraulics knowledge which must be learnt. The point of view stems from the author's teaching experience at the ENSHMG (Ecole nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble) as well as from 30-Years experience of informatics applications in hydraulics. Beginning with to-day's situation main lines of teaching programmes of hydroinformatics will be proposed on undergraduate and graduate-specialisation levels. Special attention will be given to the network of European Universities and Institutes, their complementarity and to the possibility of following very complete curricula of hydroinformatics studies and specialisations within EEC.

superficiel. Et que la seule manière de l'apprendre consiste à aller très loin dans un domaine car, de plus, cette démarche fournit une assurance et une maturité, une position fondée sur des bases autrement solides qu'une simple persuasion de soi-même qu'on est le plus fort.

Où sont les relations entre l'informatique et l'hydraulique dans ce contexte et que demandera la vie professionnelle d'un hydraulicien ?

Nous vivons dans une société post-industrielle et nous sommes déjà entrés dans une époque où les technologies d'information et leurs dérivées dominent les circuits décisifs, non seulement de la production ou services, mais aussi des relations culturelles au sens large du terme.

Dans cette situation, les sciences et les techniques expérimentales deviennent de plus en plus importantes, à condition toutefois qu'elles sachent trouver leur place dans cet environnement et l'utiliser pour la transformation de leurs outils sans pour autant abandonner leur fond.

Notre thèse est de dire que l'hydraulique est importante car ce que nous avons (dans le domaine matériel au moins) de plus précieux sur la terre est l'eau et, par conséquent, la science et les technologies de l'eau sont à classer parmi les plus importantes. Et que les conséquences d'erreurs dans ce domaine, sans parler de bêtises voire de bavures, sont infiniment plus graves que celles qu'on commet dans les circuits économiques, les réseaux aériens, les industries spatiales, etc... On doit chercher dans les interactions existantes et futures entre ce domaine et les technologies d'information environnantes la réponse à la question concernant la formation des ingénieurs hydrauliciens de l'an 2000.

Afin de pouvoir extrapoler, nous pouvons commencer par un historique des relations entre l'hydraulique et l'informatique puis entre l'hydraulique et les technologies d'information. Nous utiliserons, à cette fin, le canevas de la modélisation numérique en hydraulique.

Au début des années 60, l'hydraulique classique résistait à l'introduction de l'informatique — d'abord « par décret », c'est-à-dire tout simplement en la refusant. Ensuite en opposant les modèles réduits aux modèles mathématiques, en fournissant ainsi une arme formidable aux extrémistes de l'autre bord (celui de l'informatique) qui claiironnaient la fin de l'expérimentation et des modèles physiques. Le paysage s'est modifié vers le début des années 1970 : on assistait alors à l'apparition du premier système de la troisième génération de modèles, des outils capables de modéliser des écoulements (dans des rivières, des zones côtières, etc...) complexes d'une manière indépendante de leur localisation géographique — ces programmes n'étaient plus liés à un lieu géographique. Ces programmes ne pouvaient être ni développés ni utilisés par n'importe qui : il fallait avoir une triple compétence à cette fin (hydraulique, numérique, informatique). C'est ainsi qu'on assistait à la naissance d'une nouvelle branche de l'hydraulique — l'hydraulique numérique (computational hydraulics) — qui, tout en faisant pendant à l'hydrodynamique numérique, introduit une véritable révolution dans les habitudes et les techniques de la profession.

Cette période était suivie d'une évolution très rapide des matériels informatiques et de la chute brutale du coût de calcul, d'abord avec les ordinateurs centraux (« main frames ») puis avec l'avènement des micro-ordinateurs. Alors une sorte de bifurcation s'est produite dont les suites sont toujours présentes et c'est précisément là qu'il faut que nous nous arrêtions pour tenter d'extrapoler vers l'avenir, toujours difficilement prévisible.

D'une part on a assisté à une explosion des programmes de toutes sortes fabriqués par des amateurs sans compétences dans l'informatique ou les mathématiques appliquées. En effet, les micro-ordinateurs sont accessibles à tous : apprendre des rudiments de la programmation est une chose nécessaire dans notre société et, en plus, ce n'est pas difficile. Un micro coûte moins cher qu'une installation expérimentale et les sorties graphiques permettent de préparer facilement des publications, des thèses, des articles. La voie était et reste ouverte à une inflation.

D'autre part, des systèmes de modélisation de 4^e génération sont nés. Dans ces systèmes, l'algorithme numérique de simulation dépasse rarement 15 % à 20 % du volume du logiciel. Ces systèmes, comprenant des interfaces graphiques, de pré- et de post-processeurs, orientés vers l'utilisateur ne peuvent être ni conçus ni développés par des amateurs. Le coût d'investissement d'un système de simulation de propagation des ondes dans les rivières (e.g. **MIKE 11** du Danish Hydraulic Institute) ou de prévision de crues en temps réel (e.g. **SPH/HFS** du Laboratoire d'Hydraulique de France) varie entre 5 et 10 millions de francs. Ces chiffres sont ahurissants pour les chercheurs en hydraulique, mais tout à fait normaux et acceptables dans le domaine des technologies d'information. N'oublions pas qu'un système portable sur des stations de travail comme **SPH/HFS** compte presque 50 000 instructions en langages **FORTRAN** et **C**.

Etant donnée la société dans laquelle nous vivons et les progrès constants dans le domaine des technologies d'information, des télécommunications et d'innovation, on ne peut actuellement prévoir laquelle des deux branches évolutionnaires est condamnée à terme. D'ailleurs, dès maintenant une nouvelle branche de technologie émerge, une branche qui englobe les dimensions sociales entourant l'hydraulique.

La simulation numérique a atteint aujourd'hui sa maturité et nous pouvons, dans le domaine des ressources en eau, mettre en œuvre des modèles capables de prévoir assez bien le comportement physique de tel ou tel phénomène dans l'avenir sous l'influence de telle ou telle modification des conditions d'aujourd'hui. Mais le but de la modélisation est d'inculquer un nécessaire état de conscience, de tracer clairement nos responsabilités personnelles et sociales, de nous confronter avec les conséquences de nos actions et notamment avec les conséquences de ces actions pour la nature.

La simulation est un moyen de défi de l'individu ou de la société en les confrontant avec l'alternative : « si nous faisons **ceci**, les conséquences seront telles et si nous faisons **cela**, d'autres conséquences s'ensuivront ». Le problème de communication entre le monde d'experts et celui des déci-

deurs restait entier jusqu'à la moitié de la dernière décennie. Depuis quelques années, la situation s'améliore et en particulier dans notre domaine « l'eau », on assiste à une transformation révolutionnaire des concepts qui a mené à la création d'une branche nouvelle de la technique : *hydroinformatique* (cf. Abbott M.B. « Information technology and aquatic environment : hydroinformatics », Intern. Inst. for Hydraulic & Environmental Engineering, Delft, 1990). L'hydroinformatique est le sujet de la communication de Monsieur Abbott qui sera présentée juste après la nôtre et le lecteur pourra y trouver des définitions plus précises du sujet. Ici, il suffit de dire que les futurs systèmes informatiques d'aide à la décision dans le domaine des ressources en eau engloberont aussi bien les aspects sociaux, légaux, écologiques et de l'environnement que de l'hydraulique.

Cette brève revue historique nous montre qu'un utilisateur ne pourra plus savoir que contient et que comprend le système hydroinformatique dont il se sert. Une situation très grave commence à se dessiner qui devrait avoir une influence directe sur le contenu des connaissances requises d'un hydraulicien. Commençons par un problème légal : un ingénieur Conseil qui utilise un logiciel pour dimensionner les ouvrages, — est-il responsable légalement des erreurs que contient ce logiciel ? (Notons qu'une chose telle qu'un logiciel sans erreurs de programmation ou numériques n'est pas de ce monde). Il suffit de lire la première page de n'importe quel logiciel réputé « généralement utilisé » pour y trouver la déclaration de son auteur rappelant qu'il décline toute responsabilité d'erreurs qu'on puisse y trouver. Nous savons très bien que le dernier né de la série AIRBUS dépend des logiciels embarqués (plusieurs centaines de milliers d'instructions). Qui est responsable des erreurs ? Le constructeur de l'avion ou l'auteur de logiciel ? Un anesthésiste suit une dizaine d'années d'études avant de prendre la responsabilité de la vie d'un patient, mais par ailleurs, lors d'une opération, la vie de ce patient dépend étroitement des ordinateurs dont les logiciels ont été écrits par des programmeurs dont les qualifications sont très différentes et qui, en plus, dans la majorité des cas, ne sont pas conscients des conséquences de leur travail.

Mais, par ailleurs, on ne peut plus désormais fabriquer des logiciels opérationnels sur le coin d'une table, dans un bureau d'un hydrologue d'arrondissement ou d'un chercheur à l'université. Pour une part car — qui pourra effectivement répondre des erreurs dans un tel logiciel ? D'autre part parce que les logiciels de plusieurs dizaines de milliers d'instructions ne peuvent être développés que par des professionnels de l'informatique, selon les règles d'art du génie du logiciel, sur des spécifications techniques et selon un cycle de production déterminé par l'expérience des industriels en systèmes informatiques. Bien sûr, il faut que l'hydraulique trouve sa place dans le processus et que le produit soit fiable et donne des résultats techniquement corrects.

Mais il est inconcevable qu'on puisse enseigner aux étudiants en hydraulique le métier de la fabrication de tel produit. On ne peut même pas leur inculquer ou leur

enseigner la capacité de préparer les spécifications détaillées pour ces produits. Par ailleurs, ce sont eux qui auront à répondre des résultats des études, des conséquences des aménagements et des décisions. L'ingénieur hydraulicien de l'an 2000 aura essentiellement à préparer les options pour les décisions, à éviter les catastrophes et à répondre devant les décideurs (dont l'opinion publique fait une part de plus en plus importante) des conséquences matérielles des aménagements. En ce qui concerne l'hydroinformatique en général et la modélisation en particulier, puisque l'ingénieur n'aura plus la possibilité de vérifier les logiciels utilisés, ni même de savoir vraiment quel est leur contenu, — comment pourra-t-il savoir si les résultats sont bons ? Uniquement par l'analyse de ces résultats du point de vue physique, par comparaison avec les hypothèses, avec les fruits de son expérience du terrain ou de son intuition. Voilà pourquoi il nous semble nécessaire de dispenser un enseignement approfondi de l'hydraulique aux hydrauliciens en insistant sur la pratique, la physique, le terrain et l'expérience.

L'informatique devra être enseignée comme à tous les ingénieurs pendant le cursus normal de l'université — chacun doit savoir programmer au niveau d'un amateur et avoir les connaissances de base de calcul numérique. De ce point de vue, les programmes d'aujourd'hui sont plutôt satisfaisants. Ce qui manque, par contre, est un cours fait par des professionnels du génie des logiciels et de la programmation, orienté vers l'explication des étapes de création d'un logiciel, des significations des spécifications techniques dans ce domaine, d'estimation de temps et de coûts. Il ne s'agit pas d'enseigner comment le faire car il est illusoire de croire qu'un hydraulicien deviendra un informaticien, sauf au prix d'une véritable reconversion dont la durée minimale aujourd'hui est d'une année à plein temps et encore avant l'âge de 35 ans de préférence — c'est un autre métier ! Mais il faut que les hydrauliciens, à la fin de leurs études classiques, puissent comprendre les informaticiens et savoir quel est le prix des progrès technologiques.

Il ne s'agit pas non plus d'espérer qu'à la fin des études classiques, un hydraulicien saura modéliser les phénomènes, qu'on puisse lui enseigner ce métier-là pendant ses 3 ans d'études. Par contre, il doit avoir une bonne idée de ce qu'est la modélisation et des pièges, des erreurs, des illusions que présentent souvent ses résultats : « On demandera à un ingénieur de résoudre des problèmes en utilisant les logiciels standard disponibles dans l'organisation où il travaille. Dans bien des cas, ces logiciels ont été développés avec la prétention que l'utilisateur n'aura pas besoin des connaissances numériques ou informatiques pour s'en servir. Toutefois il n'est pas rare que les résultats soient faux et difficilement reconnaissables comme tels. Ainsi l'utilisateur doit être capable de faire l'évaluation des résultats par rapport à leur signification physique et numérique » (« Computational Hydraulics », C.B. Vreugdenhil. Springer Verlag 1989). Cette phrase définit assez exactement ce qu'il faut qu'un ingénieur hydraulicien sache faire. Un cours plus des exercices utilisant un certain nombre de logiciels de modélisation disponibles sur le marché sont

nécessaires : les exercices orientés vers l'évaluation des résultats, dans l'esprit énoncé plus haut, doivent satisfaire cette exigence.

La question se pose pour ceux qui doivent passer une partie de leur vie professionnelle à employer des logiciels pour des problèmes très complexes ainsi que pour ceux qui auront à les développer en travaillant en équipe avec les informaticiens et les numériciens. Quelle formation doit-on leur donner ? Que doivent-ils savoir ?

Dans ce domaine aussi les temps d'improvisation, sauf peut-être pour quelques-uns d'extrêmement doués, sont révolus. Il faut une formation rigoureuse et complète et les embryons de telles formations existent aujourd'hui en Europe et aux Etats-Unis. Malheureusement pas en France, de façon cohérente, dans le domaine de l'hydraulique. Nous estimons que le minimum consiste en une formation post-universitaire (donc après l'obtention du diplôme d'ingénieur), à plein-temps, pendant une année et de préférence prolongée d'un projet conduit au sein d'une équipe qui développe des systèmes hydroinformatiques *professionnellement*...

Les programmes les plus connus qui s'approchent de ces caractéristiques sont :

- « Computational and experimental hydraulics » de International Course in Hydraulic Engineering offert par International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering de Delft. Il s'agit de l'enseignement très complet d'une année sanctionné d'examens menant à un diplôme. L'Institut commence à promouvoir l'idée d'un stage-projet mentionné plus haut, d'une durée de 6 mois et menant au titre de « Master of Science ».
- Un cours pour les étudiants préparant la maîtrise et le doctorat (« post-graduate ») intitulé « Computational Hydraulics » enseigné à « The University of Iowa, Iowa City, USA » par Monsieur Holly. Ce cours, très complet, comprend quelques 80 heures de cours, plus des exercices menés en utilisant des logiciels industriels, plus des projets de recherche pour les étudiants qui choisissent le sujet de leur thèse dans ce domaine.
- Un cours analogue à l'Université de Michigan enseigné par Monsieur Katopodes.

En ce qui concerne l'avenir, l'« International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering de Delft » lance à partir de 1991 « International Course in Hydroinformatics » avec l'objectif « to create a common European conceptual and methodological framework within the science and technology of the aquatic environment ». Les fondements du contenu et de la forme du cours ont été décidés lors d'une réunion de deux jours d'une dizaine d'experts de 6 pays. Monsieur Abbott, dans sa communication, en parlera sans doute en détail.

Pour conclure, des idées-clés suivantes sont soumises à la discussion :

- Une formation approfondie dans l'hydraulique, pendant le cursus de base est souhaitable, avec l'accent mis

sur le côté physique des problèmes. Elle pourrait être réalisée soit par une plus étroite spécialisation, soit par l'introduction partielle du système américain des Unités de Valeur au choix permettant, à ceux qui le désirent, de se spécialiser en hydraulique.

- Un ingénieur hydraulicien doit savoir programmer et se servir des ordinateurs du type « station de travail UNIX » au niveau d'un utilisateur non spécialiste. Il doit par ailleurs avoir des connaissances de bases dans le domaine des méthodes numériques appliquées aux équations de la physique.

- Un cours général d'introduction à l'hydraulique numérique puis d'hydroinformatique, du type de celui de l'Université Technique de Delft cité plus haut, devrait être enseigné en dernière année d'étude. Ce cours devrait absolument être accompagné des travaux pratiques conçus autour de l'utilisation des logiciels industriels disponibles sur le marché et orienté vers la recherche des limites d'application de ces logiciels, d'interprétation et de critique de leurs résultats. Cela peut être obtenu par un encadrement venant de l'extérieur de l'université et/ou par les séminaires.

- Chaque ingénieur-hydraulicien devra suivre un cours sur les problèmes de la conception et du développement des logiciels, mettant l'accent sur le cycle de la production et de vieillissement, sur les spécifications techniques et sur leurs différents niveaux ainsi que sur l'adéquation entre les qualifications et les tâches dans le cycle de production. Ce cours devra consacrer un temps nécessaire aux problèmes des coûts, de la quantité de main-d'œuvre et de temps nécessaires pour le développement.

- Une spécialisation post-diplôme d'ingénieur en hydroinformatique devra être accessible et « publicisée » au moins un an avant la fin des études auprès des étudiants ainsi qu'auprès de jeunes ingénieurs pendant les 5 premières années après le diplôme. Cette spécialisation doit être orientée d'abord vers la formation des utilisateurs avertis des technologies d'information en hydraulique — un bon point de départ serait un cours tel que celui dispensé à IIHEE à Delft ou celui d'Iowa. De plus, ceux qui voudraient travailler dans des équipes mixtes (informaticiens, hydrauliciens, biologistes, sociologues, etc... qui élaborent des logiciels et des systèmes hydroinformatiques) devront pouvoir prolonger cette spécialisation par un stage et diplôme.

Notons que le marché du travail ne pourrait sûrement pas absorber les diplômés ainsi formés si chaque pays européen voudrait assurer une filière complète de cette formation. On peut discuter sur les besoins de chaque pays en cadres hydrauliciens généralistes. Mais il est clair que le nombre des centres de formation spécialisée post-diplôme serait limité en Europe. La difficulté consistera en création de réseaux d'information et des relations entre ces centres et les écoles d'hydraulique, ou de ces centres de recyclage et d'éducation permanente disséminés à travers le continent.