

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 89 (1971)  
**Heft:** 24: 2. Sonderheft zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. Charles Jaeger

**Artikel:** Cavitation dans un milieu corrosif  
**Autor:** Martin, Jean A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-84880>

### **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:** 13.07.2025

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

Par Jean A. Martin, ing. dipl. EPUL, c/o Allis Chalmers, York, Pa. USA

## Avant-propos

Le professeur Charles Jaeger est connu pour son encyclopédisme. C'est pourquoi je me permets de lui dédier cette petite dissertation dont le sujet est assez lointain de ses préoccupations courantes: je sais que cela ne m'abrite pas pour autant de sa critique.

Ayant la chance de connaître Monsieur Jaeger personnellement, je lui suis redevable pour une bonne part de mon enthousiasme pour la chose hydraulique, et de mon accès dans les milieux anglo-américains de la profession. C'est donc avec gratitude et fierté que je salue ici un compatriote éminent et un ami très cher.

## Introduction

Nous entendons par

*Cavitation*, une érosion de nature mécanique provoquée par les très hautes pressions et déformations dues à l'implosion de bulles de vapeur en contact avec la surface d'un matériau. Ces pressions sont momentanées et oscillatoires. On comprend donc que la résistance d'un matériau à la fatigue se compare directement à sa résistance à la cavitation.

*Corrosion*, une érosion de nature électro-chimique due à la fermeture d'un circuit galvanique dans un milieu électrolytique. La résistance d'un matériau à la fatigue est influencée par la corrosion.

Le facteur économique entrant dans le choix d'un matériau convenable est d'autant plus important que les dimensions physiques sont plus larges. Dans le cas des turbines hélices, par exemple, il est rare de trouver des roues de plus de 5 m de diamètre qui soient entièrement en acier inoxydable: on s'arrange à protéger les parties exposées à la cavitation seulement. Le manteau de la roue est un cas particulièrement intéressant. Le protéger contre toute attaque par cavitation est une opération coûteuse (francs suisses 15 000/m<sup>2</sup> est un ordre de grandeur pour un revêtement d'acier inoxydable). Par ailleurs, la nécessité de maintenir des jeux faibles entre les pales et le manteau pour assurer un rendement élevé d'une part, et d'autre part la forte courbure du fond inférieur au droit des directrices, augmentent les chances de cavitation dans le voisinage du manteau. On espère cependant que l'intensité du dommage sera suffisamment faible pour que le coût de l'entretien d'un manteau en acier ordinaire soit moindre que celui de l'achat d'un blindage en acier inoxydable. Cette réflexion s'est avérée justifiée dans bien des cas. Il y a toutefois des exceptions qui étonnent.

Dans une communication faite à l'«ASME Fluids Engineering and Applied Mechanics Conference», Northwestern University, Evanston, Illinois, du 16 au 18 juin 1969 [1] \*), M. Warren Whippen rapporte le cas de turbines hydrauliques installées sur l'Arkansas River. Le manteau de ces turbines a été érodé à une vitesse imprévue, jusqu'à 5 mm/an à certains endroits. L'examen de ces turbines, ainsi que celui de la composition chimique de l'eau de l'Arkansas River, avaient conduit Monsieur Whippen à soupçonner une influence de la qualité de l'eau sur le dommage par cavitation. Encore fallait-il la chiffrer. Le présent travail décrit la technique utilisée à cet effet.

\*) Les chiffres entre [ ] renvoient aux références citées en fin d'article.

## Le choix de la méthode

Il existe plusieurs méthodes de laboratoire, dites «accélérées», pour l'étude de la résistance des matériaux à l'érosion par cavitation. Une revue complète et critique de ces méthodes fait l'objet d'un article remarquable [2] auquel nous renvoyons le lecteur intéressé.

Parmi ces techniques nous avons retenu celle dite «magnéto-strictive» qui consiste à utiliser un élément vibrant à haute fréquence, supportant l'éprouvette, dont la face immergée dans le contenu d'un récipient de verre subit une cavitation contrôlée. La figure 1 montre un schéma de principe de l'équipement utilisé. Nous avons préféré cette méthode pour les raisons suivantes:

- L'équipement nécessaire se compose d'appareils de série. Il est compact, transportable et relativement peu coûteux.
- L'intensité de la cavitation est parfaitement contrôlable par le réglage de l'amplitude de vibration. Ce facteur est important lorsque l'on veut faire ressortir l'influence de la corrosion sur la cavitation.
- Bien qu'il n'existe pas encore de méthode codifiée pour les essais de résistance à la cavitation, les essais les plus systématiques, et présentant les meilleures corrélations entre les divers paramètres en cause, ont été obtenus à l'aide d'instruments semblables.
- En particulier, les travaux de pionnier réalisés et publiés par l'«Hydronics Inc.» [2], [3], [4] pouvaient servir de guide pour l'établissement d'un programme d'essais rigoureux, ainsi que d'un point de repère pour l'interprétation des résultats. Grâce à l'utilisation des connaissances déjà acquises, - et sur lesquelles nous revenons au paragraphe suivant -, nous allons obtenir rapidement des résultats significatifs.

## Les résultats déjà acquis

Nous fondant sur les travaux cités plus haut nous rappelons les lois expérimentales auxquelles se rattache notre recherche:

- A amplitude de vibration égale, la vitesse de perte de masse de l'éprouvette soumise à la cavitation est une fonction du temps, ayant la forme typique de la figure 2. On repère quatre zones dites 1) d'incubation, 2) d'accumulation, 3) d'atténuation et 4) stabilisée. Il a été démontré que les résultats de la zone stabilisée sont statistiquement les plus cohérents.

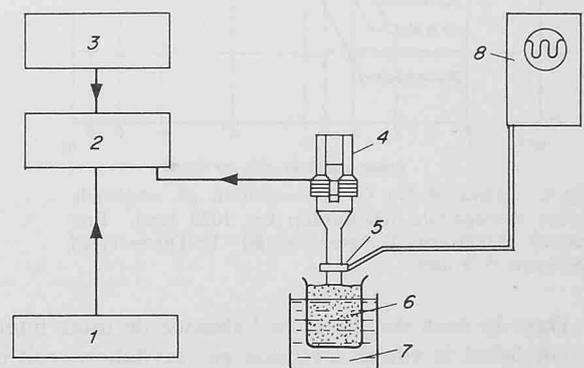


Fig. 1. Schematic diagram of cavitation-damage apparatus. 1 Power supply, 2 200 Watt amplifier, 3 Audio oscillator, 4 Transducer stack, 5 Displacement pick up coil, 6 Test liquid, 7 Constant temperature bath, 8 Oscilloscope

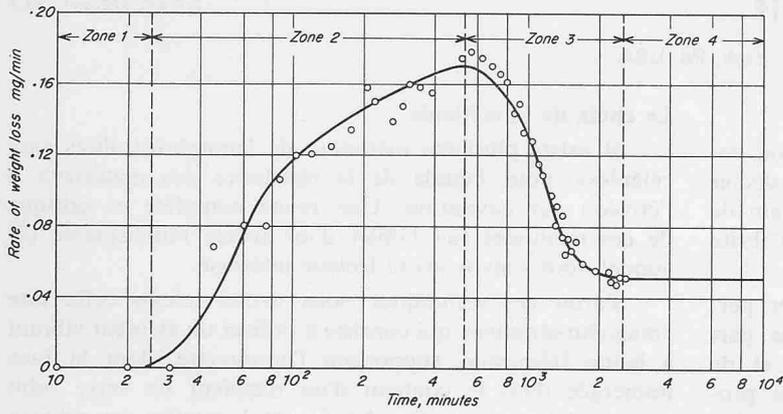


Fig. 2. Four zones of cavitation-damage rate. Material: 304-L Stainless steel; Liquid: water at 80 ° F; Double amplitude: 0,00125 inch; Frequency 16 000 cps; Diameter of specimen: 0,625 inch

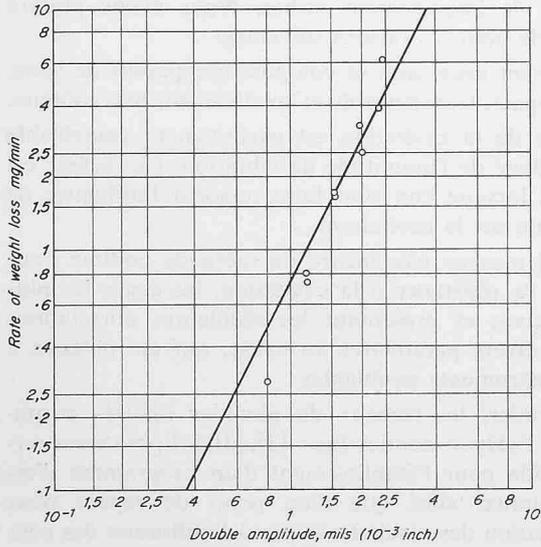


Fig. 3. Cavitation-damage rate versus amplitude for ASME standard magnetostriction apparatus. Material: 1100-0 Aluminium; Liquid: distilled water at 80 ° F; Frequency 6500 cps; Diameter of specimen: 0,625 inch

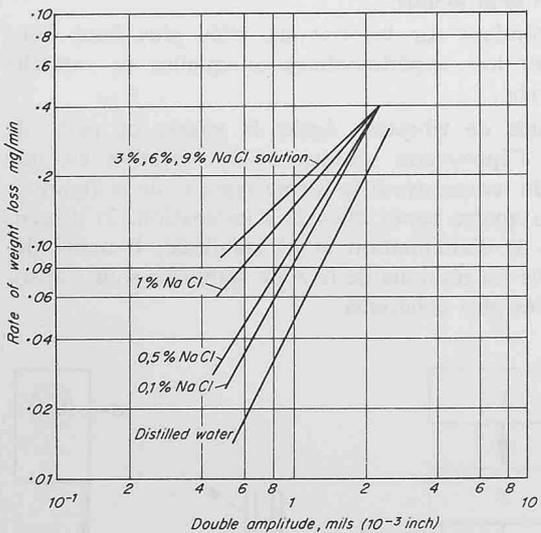


Fig. 4. Effect of Na Cl concentration on amplitude versus damage-rate relationship for 1020 steel. Frequency 15 000 cps; Temperature: 80 ° F; Diameter of specimen: 5/8 inch

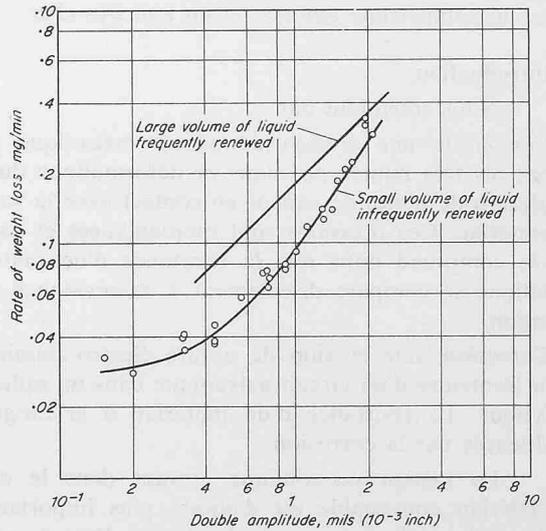


Fig. 5. Effect of corrosion-product contamination of 3 percent Na Cl solution on damage rate versus amplitude relationship for 1020 mild steel. Frequency: 15 000 cps; Temperature: 80 ° F; Diameter of specimen: 5/8 inch

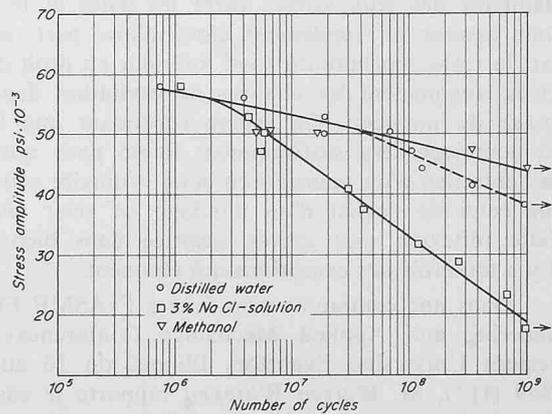


Fig. 6. High-frequency corrosion fatigue of SAE 1020 steel. Frequency: 14 000 cps; Temperature: 76 ° F

- Dans la zone stabilisée, en l'absence de toute interaction corrosive, la vitesse d'érosion par cavitation croît comme le carré de l'amplitude de vibration  $\Delta M/\Delta t = kA^2$  (figure 3). Le carré de l'amplitude devient ainsi une mesure de l'intensité de cavitation produite par l'appareil magnétostrictif.

- Dans un milieu corrosif les quatre zones existent toujours. Toutefois, dans la zone stabilisée, la relation linéaire entre le carré de l'amplitude et la vitesse d'érosion est détruite (figure 4).

- Pour obtenir des résultats cohérents dans la zone stabilisée en présence de corrosion, l'électrolyte doit être

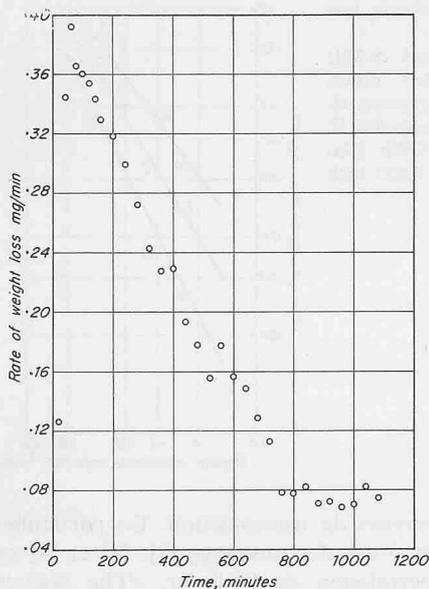


Fig. 7. Liquid: Distilled water

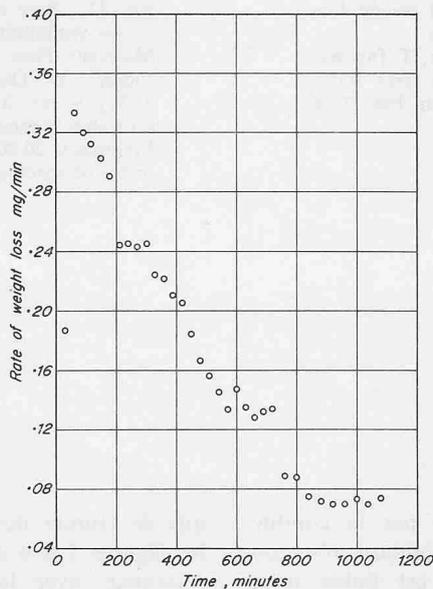


Fig. 8. Liquid: Tap water

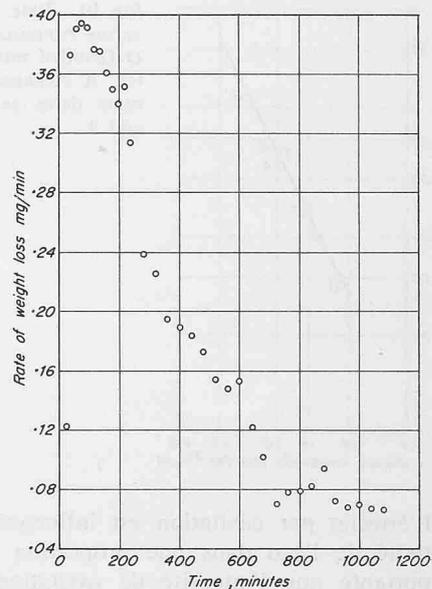


Fig. 9. Liquid: Arkansas river water

Fig. 7, 8 and 9. Rate of weight loss. Material: Nickel B 162, hand polished, stress relieved; Temperature: 80 ° F; Amplitude 25 μm; Frequency 20 000 CPS; Diameter of specimen 0,625 inch

fréquemment renouvelé car les produits de corrosion eux-mêmes contaminent le liquide, changeant les propriétés électrochimiques de départ (figure 5).

- L'effet de la corrosion varie selon l'intensité de la cavitation. A haute intensité l'effet de la corrosion est négligeable, faute de temps pour se développer; la vitesse d'érosion rejoint la loi du carré de l'amplitude. A faible intensité de cavitation, par contre, l'effet de la corrosion est considérable (figure 4). Ce n'est pas un facteur additif à la cavitation simple, mais multiplicatif, la raison principale étant une détérioration de la résistance du matériau à la fatigue sous l'action de la corrosion (figure 6).

#### Les essais «Allis-Chalmers»

Fort des considérations décrites au paragraphe précédent nous avons établis et réalisé le programme d'essais suivant:

##### Première phase

Afin d'établir l'existence de la loi d'érosion proportionnelle au carré de l'amplitude, en l'absence de toute influence de la corrosion, nous avons utilisé des éprouvettes de Nickel commercialement pur B 162 (norme ASTM). Les courbes de vitesse d'érosion en fonction du temps ont été établies, dans de l'eau distillée, pour quatre amplitudes de vibration différentes, à savoir respectivement 16 μm (.64 mil), 20 μm (.80 mil), 25 μm (1.0 mil), 31 μm (1.25 mil). A l'amplitude de 25 μm, l'essai a été répété

Tableau 1. Analyse chimique des eaux

	Eau distillée	Eau courante	Eau de l'Arkansas
Silice (SiO <sub>2</sub> )	0,26	4,4	5,0 ppm
Sodium (Na)	0,38	7,7	1680 ppm
Bicarbonate (HCO <sub>2</sub> )	9,8	31,7	213,5 ppm
Carbonate (CO <sub>3</sub> )	0	0	0 ppm
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	1,0	19,9	216,7 ppm
Chlore (Cl)	1,0	36,5	1701,6 ppm
Nitrate (NO <sub>3</sub> )	1,8	18,5	23,8 ppm
Solides en solution	4	102	3264 ppm
Dureté (Ca <sub>2</sub> Mg)	0	26,0	175 ppm
Non carbonate	0	36,2	244,9 ppm
Conductivité	12	200	6600 μmho/cm
pH	6,9	7,5	7,2

dans de l'eau potable et de l'eau prélevée dans l'Arkansas River. L'analyse de ces eaux fait l'objet du tableau 1. Les figures 7, 8 et 9 illustrent les mesures obtenues dans les trois eaux différentes, pour une amplitude de 25 μm. La figure 10 représente la courbe d'érosion en fonction de l'amplitude, dans la zone stabilisée. L'examen de ces courbes donne une idée de la précision des mesures, que nous jugeons satisfaisante:

- La bonne répétition des résultats ne montre pas d'effet de la qualité de l'eau sur le Nickel.
- La loi du «carré de l'amplitude» est bien vérifiée, comme on peut le voir sur la figure 10.

Les résultats de la première phase nous ont permis d'aborder avec confiance la deuxième étape de notre programme.

##### Deuxième phase

Cette fois nous avons utilisé des éprouvettes de l'acier doux utilisé pour la fabrication des manteaux de turbines. Cet acier répond aux normes ASTM A 201.

Afin de gagner du temps, et puisque nous étions intéressé seulement aux résultats obtenus dans la zone stabilisée, nous avons amené l'éprouvette rapidement dans cette zone en utilisant une amplitude de vibration élevée, à la suite de quoi nous avons fait varier l'amplitude conservant la même éprouvette ainsi «préconditionnée».

La figure 11, semblable à la figure 10, résume les résultats de l'acier ordinaire obtenus dans les trois eaux considérées. Cette fois les trois courbes sont nettement dissociées. La vitesse d'érosion dans l'eau distillée suit toujours la loi du carré de l'amplitude, alors que dans l'eau potable et dans l'eau de rivière la vitesse d'érosion est sensiblement accrue, de manière non uniforme en fonction de l'intensité de cavitation. Cette dernière remarque confirme la participation de la corrosion dans le mécanisme d'érosion.

#### Conclusion

La recherche que nous avons entreprise nous semble établir avec certitude les points suivants:

- L'expérience telle que nous l'avons conduite a confirmé les lois expérimentales précédemment établies.

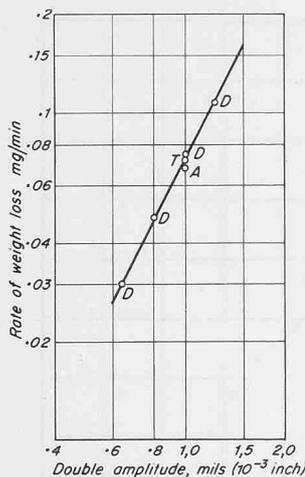
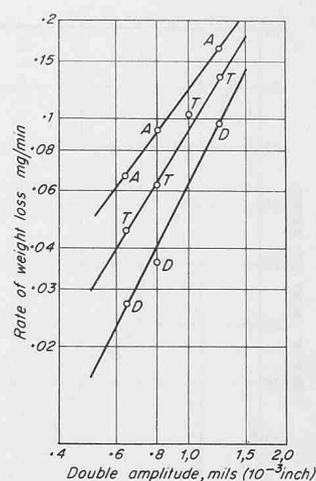


Fig. 10. Rate of weight loss versus Amplitude  
D Distilled water, T Tap water, A Arkansas river water same datas as in Fig. 7, 8 and 9

Fig. 11. Rate of weight loss versus Amplitude  
Material: Plate Steel A 201; Liquid: D Distilled water, T Tap water, A Arkansas river water; Temperature: 80°F; Frequency 20 000 CPS; Diameter of specimen 0,625 inch



- L'érosion par cavitation est influencée par la conductivité de l'eau dans une proportion d'autant plus importante que l'intensité de cavitation est faible (mais présente!). Rappelons que nous avons utilisé une méthode de cavitation accélérée, on doit donc s'attendre à ce que les intensités rencontrées dans la pratique soient effectivement plus faible, dans la plupart des cas.

A une époque où la pollution industrielle des eaux s'accroît malheureusement, il est bon de se souvenir que l'endurance des matériaux moins nobles est fâcheusement compromise s'ils ne sont pas dûment protégés contre la corrosion.

P.S. Le lecteur nous pardonnera l'usage des unités et entêtes anglaises qui accompagnent les illustrations que nous avons empruntées directement à la littérature. Il nous a paru plus important de préserver l'authenticité des sources

que de risquer des erreurs de transposition. En particulier les figures 1 à 6 sont tirées des ouvrages [2], [3] et [4] en référence, avec la permission de l'éditeur, «The Society of Naval Architects and Marine Engineers» (SNAME), New York, et des auteurs.

#### Références

- [1] Warren G. Whippen: Cavitation Effects in Pumps, Pump-Turbines and Turbines, extrait du volume «Cavitation State of Knowledge», p. 163—165, publié par l'ASME, 1969.
- [2] Eisenberg, Preiser, Thiruvengadam: On the Mechanism of Cavitation Damage and Methods of Protection, «Trans. SNAME», Vol. 73 (1965), p. 241—286.
- [3] Preiser, Thiruvengadam: On Testing Materials for Cavitation Damage Resistance, «Journal of Ship Research», Vol. 8 (1964), No. 3.
- [4] Waring, Preiser, Thiruvengadam: On the Role of Corrosion in Cavitation Damage, «Journal of Ship Research», Vol. 9 (1965), No. 3.

## Calcul de la propagation des crues dans un cours d'eau avec submersion de champs d'inondation

DK 627.51

Par A. Chervet, Ingénieur aux Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) à Zurich

### 1. Introduction

Le problème de la propagation de crues dans un cours d'eau en tenant compte de la possibilité de submersion de plaines d'inondation nous a été soumis dans un mandat transmis à la VAW par Electro-Watt, Ingénieurs-Conseils SA à Zurich. Il s'agissait de mettre au point un programme de calcul pour ordinateur reproduisant les inondations de la vaste plaine basse du Loukkos au Maroc durant une période de crues de ce fleuve débouchant sur l'océan Atlantique et subissant ainsi les influences de la marée. Pour traiter ce cas complexe d'écoulement non-stationnaire où les méthodes usuelles de calcul des crues ne pouvaient être appliquées [1], nous avons construit un modèle mathématique. Ce modèle est composé d'un chenal principal, formé par le lit du fleuve où l'on admet que l'écoulement est régi par les équations de Saint-Venant en tenant compte des échanges latéraux tandis que les champs d'inondation de chaque côté du fleuve servant avant tout à la rétention de l'eau débordant du chenal principal sont pris en considération par des équations de continuité uniquement. En effet ces zones d'inondation ont été subdivisées en casiers ou compartiments dont les limites sont pour autant que possible formées par des obstacles naturels, dans lesquels une équation de continuité permet de déterminer le niveau d'eau horizontal lorsque les échanges aux limites du casier sont connus. Cette façon de reproduire la nature par un tel modèle mathématique

ayant déjà été utilisée de manière très semblable pour calculer la propagation de crues dans le Rhin par M.-B. Abbott et F.-H. Verhoog [2] ou dans le delta du Mékong par A. Preissmann et J.A. Cunge [3], nous étions en droit d'espérer obtenir des résultats satisfaisants à l'aide de cette méthode. Toutefois, les crues naturelles du Loukkos n'ayant été observées que de façon très sommaire jusqu'à l'année dernière, elles ne permettaient pas de contrôler la validité des différentes hypothèses admises lors de l'élaboration de ce programme de calcul. Dans le cadre de ses programmes de recherches, la VAW a jugé intéressant de reproduire dans un canal d'essais une maquette d'un cas idéal de chenal avec plaines d'inondations permettant d'effectuer les mesures nécessaires pour justifier le choix de cette méthode de calcul. Les comparaisons présentées entre mesures en modèle et calcul fournissent une bonne confirmation pour le modèle mathématique utilisé.

### 2. Description de la méthode de calcul et mise en équations du problème

#### 2.1. Le chenal principal

La méthode utilisée pour calculer l'écoulement dans le chenal principal est basée sur la résolution des équations différentielles du mouvement graduellement varié selon un schéma d'approximation par différences finies sous forme explicite combiné avec un schéma de caractéristiques locales. On calcule