COMPARAISON DES RÉSULTATS DES ESSAIS D'INTUMESCENCES EFFECTUÉS SUR LE MODÈLE RÉDUIT ET SUR LE MODÈLE MATHÉMATIQUE DU CANAL ORAISON-MANOSQUE

PAR J. A. CUNGE *

I. Introduction

Le canal partant du barrage de l'Escale, sur la Durance, alimente successivement quatre usines : Oraison, Manosque, Sainte-Tulle-II et Beaumont.

Ces aménagements se divisent en quatre tronçons et un modèle réduit du tronçon Oraison-Manosque a été construit pour étudier la propagation des intumescences dans les ouvrages en aval de l'usine d'Oraison.

La description des aménagements et du modèle réduit est donnée en détail par la communication de MM. Riquois et Ract-Madoux au XI^e Congrès de l'AIHR à Leningrad. Dans cette communication, on peut aussi trouver la description de problèmes hydrauliques liés à la propagation d'intumescences dans le canal de fuite de l'usine d'Oraison. Le modèle réduit distordu du tronçon Oraison-Manosque a été construit par la SOGREAH. Nous nous sommes proposé de construire un modèle mathématique correspondant à ce modèle réduit. Nous avons voulu comparer les résultats des essais relatifs aux intumescences dues aux manœuvres brusques des usines, effectués sur les deux modèles.

Cet article débute par une introduction qui a pour but de décrire le problème du calcul des ondes raides, comme il se présente aux constructeurs de modèles mathématiques. Ensuite, nous décrivons le canal lui-même et le modèle mathématique. La troisième partie est consacrée au compte rendu du réglage du modèle mathématique. La quatrième donne la comparaison des résultats de calcul avec les observations effectuées sur le modèle réduit.

* Ingénieur à la SOGREAH.

Enfin, la comparaison est faite entre un essai effectué dans la nature et sa reproduction par les modèles réduits et mathématiques.

Nous tenons à remercier ici M. Riquois, directeur de la Région d'Équipement Hydraulique - Alpes-IV, pour nous avoir permis de publier les résultats du modèle réduit et des essais nature, et, à MM. Morenon, chef du bureau du génie civil de l'E.d.F. Alpes-IV, et Lachal, ingénieur à l'E.d.F., pour nous avoir aidés et guidés dans l'exploitation du modèle réduit.

II. Modèles mathématiques et ondes à front raide dans les canaux des usines

Nous nous proposons de présenter la comparaison entre le calcul des ondes effectué à l'aide d'un modèle mathématique et les observations faites sur un modèle réduit distordu. Cela limite très nettement notre étude aux considérations des équations de Saint-Venant et éventuellement aux conséquences auxquelles nous sommes amené au cours de leur intégration. Commençons donc par rappeler les hypothèses sur lesquelles ces équations sont construites; pour un canal découvert ayant une faible pente longitudinale, on peut appliquer les équations de Saint-Venant si :

- les éléments de surface des parois et du fond du canal font des angles faibles avec son axe;
- les caractéristiques de courant ne varient pas très rapidement avec le temps;
- les lignes de courant sont pratiquement parallèles à l'axe du canal (les vitesses aux différents

points du même profil sont parallèles entre elles);

- les vitesses sont horizontales;
- la courbure de l'axe du canal est faible.

L'écoulement qui satisfait à ces conditions est appelé *graduellement varié* et se caractérise surtout par le fait que la pression dans une section du canal varie de façon hydrostatique. Les équations qui décrivent cet écoulement sont généralement connues sous le nom d'équations de Saint-Venant et s'écrivent :

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (Sv)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -g \left[\frac{\partial y}{\partial x} + Kv |v| \right]; \dots$$

où :

x désigne la distance dans l'axe du canal;

t désigne le temps;

$y(x, t)$ désigne la cote du plan d'eau;

$S(x, y)$ désigne l'aire de la section mouillée;

$B(x, y) = \partial S / \partial y$ désigne la largeur du canal;

$K(x, y)$ désigne un coefficient de résistance.

Ces équations contiennent une sixième hypothèse : que la résistance offerte par les parois et le fond du canal en régime graduellement varié, est définie par la même formule qu'en régime uniforme.

Les équations (1), avec ces six hypothèses, sont à la base de l'utilisation des modèles réduits distordus d'une part, et des modèles mathématiques d'autre part. Elles sont tout à fait justifiées tant que l'écoulement reste graduellement varié et leurs applications aux problèmes de crues ou d'intumescences longues ne pose pas d'objections.

Au contraire, quand il s'agit des canaux d'usines hydro-électriques, la question de la validité doit être sérieusement considérée. Prenons le cas d'une intumescence provoquée par la fermeture relativement lente des turbines ou d'une vanne sur un canal.

Au début du phénomène, toutes les conditions nécessaires à l'application des équations de Saint-Venant sont réunies; mais le phénomène qui nous intéresse, à savoir la propagation des intumescences positives, peut se développer ensuite selon deux voies bien différentes :

- soit l'écoulement reste graduellement varié et l'intumescence se propageant le long du canal forme une onde longue;
- soit l'onde se raidit de plus en plus, l'écoulement perd avec le temps son caractère graduellement varié et à la fin marque même une discontinuité plus ou moins franche de la ligne d'eau.

Le mode de développement dépend de plusieurs facteurs tels que la résistance des parois et du fond du canal, sa longueur, les transitions rencontrées sur son chemin par l'intumescence, la vitesse de fermeture des vannes, etc.

Nous ne nous occupons pas du problème des ondes négatives, puisqu'elles ne peuvent pas devenir raides, bien au contraire, leur longueur augmentant toujours avec le temps.

A priori, il est très difficile de prévoir quelle sera la transformation de l'onde et, si l'on construit un modèle, c'est précisément en grande partie pour le définir. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue le fait qu'à partir du moment où l'écoulement n'est plus graduellement varié, les équations (1) ne sont plus valables et qu'en principe, on ne peut plus les utiliser directement pour interpréter les phénomènes. Si l'intumescence est courte dès le début à cause d'une manœuvre brusque, nous avons une discontinuité presque immédiatement. Elle peut, en fonction des facteurs mentionnés, disparaître avec le temps ou rester stable et se propager telle quelle.

Le phénomène qui nous intéresse est, bien sûr, celui des ondes raides. Leur formation peut s'expliquer tout en restant dans le domaine de la validité des équations de Saint-Venant. Examinons une onde ayant une courbure faible : chaque point du profil se déplacera vers la droite avec une vitesse de propagation approximativement égale à :

$$W = u \pm \sqrt{\frac{gS}{B}}$$

où :

u est la vitesse d'écoulement;

S l'aire de la section mouillée;

B la largeur du canal à fleur d'eau.

a/

Il est évident qu'au moment t_1 la vitesse W_1 du point 1 est plus grande que la vitesse de propagation du point 0 et qu'à son tour $W_2 > W_1$. Si rien ne s'oppose à cette distribution des vitesses, le point 1 rattrapera 0 et ensuite le point 2 rattrapera les points 0 et 1, etc., jusqu'à ce que l'onde soit tout à fait raide et qu'enfin elle déferle en formant un rouleau capable de dissiper le surplus d'énergie de l'onde. En réalité, le phénomène est encore plus complexe, puisqu'à partir du moment où l'onde se raidit, les équations (1) ne sont plus valables, notamment quand il s'agit des hypothèses 2, 3 et 4 : on ne peut plus négliger les vitesses verticales. Les observations faites sur des canaux naturels et sur les modèles non distordus, montrent qu'à côté ou à la place d'un rouleau-dissipateur d'énergie, il se forme des ondulations de surface derrière le front d'onde, que l'on appelle ondes de Favre. Il est bien évident que ni le modèle mathématique ni le modèle réduit distordu ne peuvent décrire le phénomène complet. Toutefois, le modèle réduit distordu donne

la vitesse de propagation du front de l'onde et le niveau atteint par le corps de l'onde. Il ne peut pas donner les niveaux maximaux atteints par les ondulations de Favre. Ces résultats étaient vérifiés dans la pratique et on les trouvait approximativement bons (aux ondulations de Favre près).

Ainsi, les ondes que l'on a pris l'habitude d'appeler « raides » sur le modèle réduit, sont une bonne approximation globale du phénomène réel. On le sait grâce aux comparaisons effectuées avec les observations de la nature.

Les constructeurs de modèles mathématiques ont eu beaucoup de difficultés quant à la reproduction de ce phénomène. Mise à part la question de la terminologie, sur laquelle nous allons revenir ensuite (quelle onde mérite d'être appelée raide?), la technique des mathématiques appliquées se heurte à une difficulté de principe : dès que les équations ne sont plus valables, on ne peut plus les utiliser, puisque les résultats deviennent franchement faux. Il faut trouver une méthode nouvelle.

Les équations (1), constituent un système d'équations aux dérivées partielles, non linéaires, de type hyperbolique. Cette définition correspond aux phénomènes physiques qui peuvent être décrits par ces équations et il est nécessaire de bien savoir ce qu'elle veut dire. La non-linéarité des équations, du point de vue purement mathématique, mène à la conclusion suivante : si les coefficients dans (1) et les conditions initiales au temps t_0 satisfont aux conditions de continuité, nous pouvons nous assurer de l'existence des solutions (c'est-à-dire des vitesses et des niveaux) continues aux temps suivants, mais seulement pendant une période limitée. A partir d'un certain moment, les solutions continues disparaissent et la méthode d'intégration qui était valable jusqu'ici ne l'est plus. On a affaire à une discontinuité qui se propage selon une loi nouvelle, différente de celle qui définissait la propagation des intumescences continues. Autrement dit, la non-linéarité signifie que les discontinuités peuvent se produire là où le phénomène était continu au début et *vice versa*, les discontinuités initiales pouvant très bien disparaître au cours du temps.

Dans le domaine où les solutions restent continues, nous connaissons une méthode d'intégration numérique des équations (1) : la méthode exacte des caractéristiques. Le fait que les équations soient hyperboliques assure l'existence de deux familles de caractéristiques dans le plan (x, t) . Chaque point de ce plan est l'intersection de deux courbes caractéristiques :

b/

Physiquement, cela veut dire que si nous provoquons une perturbation quelconque au moment t et au point x , nous aurons deux ondes se propageant le long de deux caractéristiques qui se cou-

pent à ce point : une onde vers l'amont (contre la direction de l'axe X par exemple) et l'autre vers l'aval. La vitesse de propagation de chaque onde est définie par l'équation de la famille de caractéristiques le long de laquelle l'onde se propage. Considérons un segment de l'axe X :

c/

avec deux points a et b éloignés d'une distance Δx . Nous connaissons la vitesse et les niveaux aux points a et b . Ces points sont les points de départ de deux caractéristiques : $C+1$ et $C-2$, qui se coupent en un certain point C . Cela signifie que l'influence de a et b ne se fera sentir au point C qu'au moment $t + \Delta t_1$, Δt_1 étant le temps nécessaire pour l'arrivée d'une onde de a et b au point C . La procédure normale d'intégration le long des caractéristiques consiste, en partant de a et b , à déterminer la position du point C . La connaissance des niveaux et les vitesses en a et b et des coordonnées $(X_c, t + \Delta t_1)$ du point C , nous permet de trouver le niveau et la vitesse au point C . De même, nous pouvons, en partant des points b et d , définir la solution en f , etc.

Cette méthode est rigoureuse, puisque la solution au point C ne dépend que des conditions sur le segment a, b . Elle a un inconvénient : les caractéristiques ne sont pas des lignes droites parallèles, et si nous partons au temps t des points a, b, d, e , séparés l'un de l'autre par la même distance Δx , nous obtiendrons les points c, f, g séparés par des distances irrégulières. Pour parer à cet inconvénient, l'on emploie les méthodes aux différences finies. Ces méthodes ne sont pas rigoureuses et quand on les utilise, il existe toujours une erreur due au remplacement des dérivées par les différences finies.

Toutefois, cette erreur peut être grande ou petite et nous pouvons faire en sorte de la réduire, bien que cela ne soit pas toujours simple. Par exemple, nous avons la même série de points a, b, d, e et nous voulons déterminer l'état du canal au temps $t + \Delta t$, c'est-à-dire calculer les niveaux et les vitesses aux points c, f, g . Il est évident que si la méthode de calcul est telle que le point C se calcule à l'aide des points a et b , il faut que les deux caractéristiques issues de a et b , se coupent aussi près de C que possible, sinon nous commettons une erreur par rapport à la méthode des caractéristiques, la seule rigoureuse.

d/

Trois possibilités se présentent :

- C est à l'intersection même des deux caractéristiques et la solution est exacte;
- C est situé à l'intérieur du domaine limité par les deux caractéristiques :

Nous commettons une erreur d'autant plus grande que la différence δt est grande;

- C est situé en dehors du domaine défini par les deux caractéristiques :

Dans ce cas, tout dépend de la méthode employée. Si c'est la méthode implicite, le calcul est possible, mais on commet une erreur d'autant plus grande que δt est grand. Si c'est la méthode explicite, le calcul devient instable presque immédiatement.

Nous ne pouvons pas assurer la première possibilité pour tous les points à la fois. Donc, nous avons des erreurs qui se font sentir généralement de la même façon : l'onde calculée à l'aide d'une méthode aux différences finies est pratiquement toujours moins raide qu'une onde calculée par la méthode des caractéristiques et plus δt est grand, plus cette atténuation est importante. Nous ne pouvons que diminuer cette erreur par un choix judicieux des grandeurs Δt et Δx . Nous savons que la tangente à la caractéristique au point a est :

et au point b :

Ainsi, nous pouvons déterminer *a priori* la position approximative du point C dans le plan (X, t) . Si nous admettons Δx , nous pouvons déterminer optimal :

$$\Delta t \approx \frac{\Delta x}{\sqrt{gh} + |v|} \approx \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}}$$

Ce choix du pas de temps nous assure que l'atténuation de l'onde sera minimale. Les exemples qui suivent le démontreront bien. Ainsi la première condition de la reproduction d'une onde par la méthode des différences finies est de bien choisir la relation $\Delta t/\Delta x$.

Tout ce qui précède est valable dans le domaine où les solutions continues existent. La situation change entièrement pour les cas où l'onde se raidit et où la discontinuité apparaît. Nous avons bien vu que les ondes se propagent le long des caractéristiques. Revenons à notre premier dessin. Dans le plan (x, t) , cette situation peut être interprétée par les trois caractéristiques :

h/

i/

Au point (b, t_2) les deux caractéristiques de la même famille se coupent. Cela veut dire qu'il n'y a plus de solution unique continue pour nos équations, que les points 0 et 1 vont désormais se propager ensemble le long d'une nouvelle courbe, selon une nouvelle loi, sous la forme d'une onde discontinue ou onde de choc, et nous appelons cette onde une onde raide. Pour pouvoir calculer ses éléments et sa vitesse de propagation, il faut admettre normalement de nouvelles hypothèses quant à sa forme. Le calcul par la méthode des caractéristiques est possible, mais difficile, le programme est compliqué et peu pratique.

Le calcul est aussi possible à l'aide des méthodes aux différences finies, grâce à l'introduction de certains artifices. Nous ne pouvons pas calculer une onde en admettant qu'elle soit vraiment discontinue, c'est-à-dire de la forme :

Cette forme n'existe pas en réalité, bien entendu, puisque les vitesses verticales empêchent la propagation d'une telle onde. On a affaire, en effet, à un ressaut mobile, soit sous la forme d'un rouleau, soit d'un ressaut ondulatoire, soit d'une forme intermédiaire. Mais si nous voulons conserver l'hypothèse des vitesses horizontales, nous sommes amenés au schéma ci-dessus, lequel d'ailleurs est encore trop compliqué pour être directement représenté par les différences finies appliquées aux équations (1) telles quelles. Cette remarque est d'une grande importance pour la compréhension du phénomène : les hypothèses des équations (1) nous mènent à une onde d'une forme qui ne peut être décrite par (1). C'est une conséquence de la non-linéarité. Nous sommes donc amenés à introduire des artifices :

- soit la « pseudoviscosité » dans la méthode explicite;
- soit un choix spécial de coefficient dans la méthode implicite.

Ces artifices transforment la forme brusquement discontinue de l'onde en une forme continue, donc possible à calculer, mais proche de la forme raide :

Ainsi, nous obtenons une solution proche de la solution discontinue censée être représentative de la réalité. Nous avons bien vu que ce n'est pas toujours le cas, mais pour le moment il faut se contenter de cette représentation. Nous sommes donc, pour le calcul des ondes raides, en mesure de fournir les mêmes résultats que le modèle réduit distordu, pourvu que :

- le choix de la relation $\Delta t/\Delta x$ soit bien fait;
- les artifices permettant de remplacer la solution discontinue par une onde continue mais très raide, soient bien introduits dans le programme;
- le réglage du modèle mathématique soit effectué aussi bien que le réglage du modèle physique.

Il est bien entendu que quand nous parlons des ondes raides, nous pensons aux ondes de choc en terminologie de mécanique des gaz, ou au ressaut mobile se déplaçant à la vitesse super-critique par rapport à l'écoulement devant son front, en terminologie hydraulique.

Pour pouvoir estimer la valeur de l'approximation faite en appliquant la méthode des différences finies, nous n'avons que deux moyens :

- soit effectuer les calculs approximatifs à l'aide de la méthode des caractéristiques;
- soit comparer nos calculs aux résultats obtenus à partir des observations effectuées sur modèle réduit distordu. Cette comparaison est directe, puisque les résultats d'un tel modèle sont interprétés à l'aide des équations de Saint-Venant.

Nous avons choisi la deuxième possibilité et afin d'avoir une bonne comparaison, nous avons construit le modèle mathématique du canal d'Oraison.

III. Modèle mathématique du canal Oraison-Manosque

Le tronçon considéré comporte de l'amont vers l'aval, les ouvrages suivants :

- l'usine d'Oraison et la galerie de fuite;
- le canal de fuite de l'usine d'Oraison;
- le passage du Rancure;
- un tronçon du canal entre le passage du Rancure et le pont-canal Durance;
- le pont-canal Durance faisant office de déversoir latéral avec le partiteur (déversoir central) entre les branches de La Brillanne et de Manosque;
- un embranchement d'où partent les branches de La Brillanne et de Manosque;
- le siphon sous la voie ferrée de la branche Manosque;
- le tronçon du canal d'amenée à Manosque;
- l'usine de Manosque.

Le profil en long, les sections en travers et les caractéristiques hydrauliques de ces ouvrages sont donnés par les figures 1 et 2.

Nous avons représenté sur le modèle mathématique la partie du canal qui était reproduite par le modèle physique. La galerie de fuite d'Oraison n'a pas été reproduite et notre modèle débute à l'emplacement de la pointe 10 de mesure modèle, c'est-à-dire à la fin du raccordement entre le canal à berge 1/5 et le canal à berge 2/1. Le modèle mathématique comprend de l'aval vers l'amont, les tronçons suivants :

1. Le canal entre l'usine de Manosque et le changement de section 760 m en aval du siphon;
2. Le canal entre le changement de section et le siphon sous V. F.;
3. Le pont canal;
4. Le canal entre le pont canal et le passage du Rancure;
5. Le canal entre le passage du Rancure et l'usine d'Oraison.

Chaque tronçon a été divisé en un certain nombre d'intervalles égaux Δx représentés par les points normaux de calcul. Les résultats, c'est-à-dire les niveaux, les vitesses et les débits sont calculés pour ces points seulement. Les tronçons sont liés entre eux par les points spéciaux de calcul qui permettent de reproduire les ouvrages et leurs particularités.

L'usine de Manosque est représentée par une loi de $Q(t)$ donnant les débits en fonction du temps. Un sous-programme spécial impose ces débits au point O du calcul.

$$y_{39} + \frac{V_{39}^2}{2g} = y_{40} + \frac{V_{40}^2}{2g}$$

Technical drawing of a bridge structure with a canal and siphon. The drawing shows a cross-section of the bridge and canal. The bridge is labeled "pont-canal" and "canal-bridge". The canal is labeled "canal". The bridge structure is labeled "Brillanne branch" and "branche de Brillanne". The canal structure is labeled "Manosque branch" and "branche de Manosque". A siphon is labeled "siphon-syphon". The drawing includes a vertical axis labeled "y₄₆" and a horizontal axis labeled "y₄₅". The drawing is numbered "46" and "45".

$$Q_{46} = Q_{45} + Q_{\text{Brillanne}}$$
$$\frac{L}{q.S} \frac{dQ}{dt} = y_{46} - y_{45} - a \frac{Q|Q|}{S^2}$$

L longueur du siphon;

S section transversale du siphon;

Q débit passant par le siphon (évidemment $Q = Q_{45}$);

a coefficient de perte de charge.

61

Points 48-49 : RACCORDEMENT ENTRE LE PONT-CANAL ET LE CANAL.

Le schéma de ce point montre lui-même la simplification adoptée par rapport aux ouvrages réels :

o/

Nous avons premièrement négligé le déversoir central divisant le courant en deux branches : La Brillanne et Manosque. Ensuite, nous avons supprimé le déversoir latéral le long du pont canal entre les points 48 et 49. Toutefois, la loi de ce prélèvement a été admise de façon à reproduire la loi du déversoir réel. Nous allons considérer ce problème en détail dans le chapitre IV « Réglage du modèle ». Pour représenter ce schéma à l'aide du modèle mathématique, nous avons admis une loi de continuité entre les points 48 et 49 d'une part :

$$Q_{48} = Q_{49} + Q_d$$

où Q_d est une loi de déversement et sa définition est examinée dans le chapitre suivant, et une loi d'égalité des charges d'autre part :

$$y_{48} + \frac{V_{48}^2}{2g} = y_{49} + \frac{V_{49}^2}{2g}$$

Points 59-60 : PASSAGE DU RANCURE.

On peut admettre que le seuil du Rancure cause une perte de charge singulière dont l'importance dépend de la cote d'eau et du débit transité. Ainsi nous avons admis la loi de continuité $Q_{59} = Q_{60}$ des débits et des niveaux (en tenant compte de la perte de charge singulière) :

$$y_{60} = y_{59} + \alpha \frac{Q^2}{2g}$$

où α est le coefficient de perte de charge à déterminer.

Point 68 : AMONT DU MODÈLE.

Nous avons imposé les débits d'amont (ou de l'usine d'Oraison) en fonction du temps sous la forme $Q(t)$ à la section 68.

Par rapport au modèle réduit, nous avons fait un certain nombre de simplifications. Pour que notre

modèle puisse reproduire des phénomènes réels, il faut le régler, c'est-à-dire il faut ajuster les coefficients inconnus que nous avons introduits dans les formules. Ces inconnues sont :

- la perte de charge au siphon;
- celle du passage du Rancure;
- la loi du déversoir latéral.

IV. Réglage du modèle mathématique

Le réglage a pour but, en ajustant les pertes de charges singulières, de retrouver les lignes d'eau nature en *régime permanent*. Comme nous l'avons indiqué dans le Chapitre II, nous admettrons ensuite que la concordance reste valable pour les régimes transitoires. Nous insistons sur le fait que nous n'avons pas à ajuster les rugosités des canaux, comme c'était nécessaire pour le modèle réduit. Par le fait même que nous choisissons le bon coefficient de Strickler, la rugosité du canal est bien reproduite dès le début et les différences entre les lignes d'eau calculées et les lignes d'eau nature ne peuvent provenir que d'une mauvaise représentation des ouvrages.

RÉGLAGE DE LA PERTE DE CHARGE SINGULIÈRE AU PASSAGE DU RANCURE.

En ajustant le coefficient α dans la formule :

$$y_{60} = y_{59} + \alpha \frac{Q^2}{2g}$$

nous nous sommes basé sur les observations effectuées sur le modèle réduit (voir fig. 3). Nous avons établi une relation approchée entre le niveau au

3/ Oraison-Manosque, 1^{er} tronçon. Etude sur modèle du passage du Rancure.

Oraison-Manosque, 1st section. Rancure sill scale model results.

Tableau 1

COEFFICIENT DE LA PERTE DE CHARGE AU SEUIL DU RANCURE						
Cote au point 59 y_{50}	α admis	ΔH (m)				
		$Q = 225 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 115 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q = 343 \text{ m}^3/\text{s}$	
		valeur calculée valeur observée	valeur calculée	valeur observée	valeur calculée	valeur observée
346,50	$1,70 \cdot 10^{-4}$	0,44	0,110	0,13	1,0	1,0
346,60	$1,50 \cdot 10^{-4}$	0,38	0,095	0,11	0,90	0,92
346,70	$1,30 \cdot 10^{-4}$	0,32	0,090	0,10	0,78	0,85
346,80	$1,10 \cdot 10^{-4}$	0,28	0,080	0,09	0,66	0,80
346,90	$0,95 \cdot 10^{-4}$	0,24	0,060	0,08	0,56	0,75
347,00	$0,94 \cdot 10^{-4}$	0,21	0,055	0,07	0,52	0,70
347,10	$0,72 \cdot 10^{-4}$	0,18	0,045	0,06	0,50	0,65
347,30	$0,60 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,038	0,05	0,36	0,52
347,50	$0,48 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,030	0,04	0,30	0,45
347,70	$0,40 \cdot 10^{-4}$	0,10	0,025	0,03	0,24	0,35
347,90	$0,40 \cdot 10^{-4}$	0,10	0,025	0,03	0,24	0,32
348,10	$0,35 \cdot 10^{-4}$	0,09	0,022	0,02	0,21	0,25
348,30	$0,28 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,018	0,02	0,16	0,20
348,50	$0,25 \cdot 10^{-4}$	0,06	0,016	0,01	0,14	0,15
348,70	$0,20 \cdot 10^{-4}$	0,05	0,012	0,01	0,12	0,12
349,00	$0,18 \cdot 10^{-4}$	0,03	—	—	—	—

point 59 (en aval du passage) et le coefficient α pour le débit $Q = 225 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous admettons qu'elle est valable indépendamment du débit transité réellement. Cela se justifie comme première approximation, l'erreur étant relativement petite. Les valeurs du coefficient α et les erreurs commises en conséquence de cette simplification figurent dans le tableau ci-après.

RÉGLAGE DE LA LOI DU DÉVERSOIR.

Les lois de déversement au pont-canal obtenues à partir du modèle réduit sont tracées sur la figure 4. Elles donnent le débit déversé en régime permanent en fonction de la cote d'eau à l'emplacement de la pointe P 7 du modèle et en fonction du débit en amont du modèle. Cette définition est loin d'être satisfaisante, mais il faut admettre qu'en général, il n'y en a pas de meilleure pour les cas

semblables, où il faut choisir entre les deux possibilités suivantes :

- soit on construit un modèle réduit (non distordu si possible) d'un petit tronçon de canal avec déversoir latéral et on fait une série d'essais pour déterminer la loi de déversement;
- soit on admet une formule habituelle de débit pour le déversoir latéral en régime permanent.

Dans les deux cas, un doute subsiste : les lois de déversement sont-elles les mêmes en régime transitoire et en régime permanent?

Ce doute subsiste aussi dans notre cas, d'autant plus que nous avons fait des simplifications allant assez loin : suppression du déversoir central, concentration du débit déversé en un seul point. Nous avons négligé également les pertes de charge singulières dues aux formes compliquées de l'ensemble des ouvrages de la partition.

4/ Pont-canal sur la Durance.

$$Q_{\text{déversé}} = f(w, h).$$

w = vitesse d'approche calculée au profil P.9 modèle;

h = cote en P.7 modèle.

Durance canal bridge.

$$\text{Overspill } Q = f(w, h).$$

w = approach velocity computed for model section P.9;

h = level at model P.7.

h nature en P.7
 h prototype at P.7

Tableau 2

COMPARAISON DES LIGNES D'EAU NATURE ET DE CELLES DES MODÈLES EN FIN DE RÉGLAGE									
Ligne d'eau n° 1.				{ Oraison. 151 m³/s Manosque. 151 m³/s Brillanne. 0					
Points de mesure	1	2	3	4	5	6 MA	7	9	10
Cotes nature	345,80	346,29	346,77	346,81	346,90	346,96	347,65	—	—
Cotes modèle réduit	345,81	346,29	346,77	346,81	346,90	347,25	347,85	—	—
Cotes modèle mathématique	345,81	346,31	346,79	346,81	346,92	346,95	347,35	347,46	—
Différence avec la nature (m)	+ 0,01	+ 0,02	+ 0,02	0	+ 0,02	— 0,01	— 0,30	—	—
Différence avec le modèle réduit (m) ...	0	+ 0,02	+ 0,02	0	+ 0,02	— 0,30	— 0,50	—	—
Ligne d'eau n° 2.				{ Oraison. 265 m³/s Manosque. 114 m³/s Brillanne. 151 m³/s					
Points de mesure	1	2	3	4	5	6 MA	7	9	10
Cotes nature	346,31	346,67	347,04	347,07	347,15	347,20	347,66	347,81	347,91
Cotes modèle réduit	346,31	346,65	347,02	347,05	347,03	347,21	347,60	347,83	—
Cotes modèle mathématique	346,31	346,65	347,02	347,05	347,13	347,15	347,62	347,89	347,98
Différence avec la nature (m)	0	— 0,02	— 0,02	— 0,02	— 0,02	— 0,05	— 0,04	+ 0,07	+ 0,07
Différence avec le modèle réduit (m) ...	0	0	0	0	+ 0,10	— 0,06	+ 0,02	+ 0,06	—
Ligne d'eau n° 3.				{ Oraison. 265 m³/s Manosque. 151 m³/s Brillanne. 0					
Points de mesure	1	2	3	4	5	6 MA	7	9	10
Cotes nature	347,10	347,33	347,55	347,57	347,64	347,69	348,09	348,20	348,28
Cotes modèle réduit	347,10	347,32	347,53	347,54	347,58	347,77	348,13	348,29	—
Cotes modèle mathématique	347,10	347,33	347,58	347,58	347,65	347,67	347,12	348,32	348,38
Différence avec la nature (m)	0	0	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,01	— 0,02	+ 0,03	+ 0,12	+ 0,10
Différence avec le modèle réduit (m) ...	0	+ 0,01	+ 0,05	+ 0,04	+ 0,07	— 0,10	— 0,01	+ 0,03	—

Tableau 3

MANŒUVRES A L'USINE DE MANOSQUE												
	Etat	Manœuvre d'ouverture des turbines		Q Oraison		Q Brillanne		Q Manosque		Q déversé		Niveau
		réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.	
Essai 3 ...	initial	quasi instantanée sur le modèle	20 s	30	30	0	0	0	0	30	30	347,80
	final			280	280	0	0	0	0	280	280	—
Essai 6 ...	initial	sur le modèle	20 s	30	30	0	0	batardé		30	30	347,80
	final			280	280	0	0	batardé		300	300	—

MANŒUVRES A L'USINE D'ORAISON													
	Etat	Manœuvre de fermeture		Q Oraison		Q Brillanne		Q Manosque		Q déversé		Niveau	
		phys.	math.	réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.	réd.	math.
Essai 5 ...	initial	quasi instantanée sur le modèle	20 s	265	265	115	115	150	151	0	0	ligne d'eau n° 2	
	final			265	265	115	115	0	0	150	150	—	
Essai 8 ...	initial	sur le modèle	20 s	265	0	0	0	158	151	107	114	ligne d'eau n° 3	
	final			265	0	0	0	0	0	265	165	—	

Pour améliorer le modèle, il faudrait :

- construire un modèle non distordu des ouvrages de la partition;
- faire une étude systématique des déversoirs latéraux pour déterminer des lois meilleures que celles qui sont admises habituellement pour le régime permanent.

En attendant, nous avons admis la loi empirique du débit déversé selon la formule :

$$Qd = -137,99 H^2 + 2574,40 H - 11\,593$$

où :

$$H = y_{49} - 340,11 + 0,2 v_{49} - 0,10 \\ = y_{49} + 0,2 v_{49} - 340,21;$$

y_{49} cote d'eau au point 49 de calcul;

340,11 cote du fond du canal au point 49;

v_{49} vitesse moyenne de l'eau dans la section 49.

Cette relation approximative, basée sur les courbes de la figure 4, a l'avantage de tenir compte de la vitesse d'écoulement, mais elle devient peu exacte pour les vitesses supérieures à 1,30 m/s.

RÉGLAGE DE LA PERTE DE CHARGE DU SIPHON SOUS V.F.

Nous avons dit que les ouvrages réels de partition sont trop compliqués pour qu'on puisse ajuster le modèle d'une façon tout à fait satisfaisante à l'aide d'un seul coefficient de perte de charge au siphon. Mais faute de pouvoir dissocier les facteurs différents, nous avons été amenés à le faire, tout comme pour le modèle réduit.

Nous avons effectué une série des calculs pour chaque ligne d'eau en régime permanent, en ajustant le coefficient de perte de charge. Les tableaux ci-après comparent les cotes des niveaux d'eau du modèle mathématique obtenues à la fin de ce réglage, aux cotes des niveaux d'eau du modèle réduit et aux cotes des niveaux d'eau nature.

Les tableaux ci-dessus permettent de constater que le modèle mathématique en régime permanent est satisfaisant, c'est-à-dire que sa précision est comparable à celle du modèle physique.

V. Comparaison des essais effectués sur le modèle physique et sur le modèle mathématique

Nous avons reproduit sur le modèle mathématique quatre essais d'intumescences qui avaient été effectués précédemment sur le modèle physique. Ce sont les essais 3 et 6, correspondant aux manœuvres de l'usine d'Oraison et 5 et 8, correspondant aux manœuvres de l'usine de Manosque. Le tableau 3 donne les conditions dans lesquelles ces essais ont été effectués.

Les figures 5, 6, 7 et 8 comparent, pour chaque essai, en différents points du canal, les résultats obtenus sur les modèles physique et mathématique.

Les points de comparaison ont été choisis aux

emplacements des pointes de mesure du modèle réduit.

On remarque que les résultats des modèles physique et mathématique sont en très bonne concordance. Certaines différences proviennent d'hypothèses différentes. Nous les explicitons ci-dessous (*).

ESSAI N° 5.

Les niveaux initiaux des modèles physique et mathématique sont identiques, sauf à la pointe 5. En ce point, le modèle physique donne un niveau initial plus bas dû à la mise en vitesse restante à l'aval du siphon sous V. F.

L'onde de fermeture à la pointe 1 est plus brutale sur le modèle mathématique; ceci provient de ce que sur le modèle physique, la chambre d'eau de l'usine de Manosque est surdimensionnée et donc adoucit l'onde.

ESSAI N° 8.

Mêmes remarques que pour l'essai n° 5.

ESSAI N° 6.

L'onde incidente est la même, sauf aux points 7 et 6 :

— au point 7 :

La différence provient du fait que sur le modèle physique, le raccordement entre la section courante du canal et le pont canal crée une perte de charge non négligeable. Celle-ci entraîne une réflexion de l'onde incidente à cet endroit (c'est-à-dire au point 7), par contre, sur le modèle mathématique, cette perte de charge a été, en première approximation, incluse dans celle du siphon sous V.F. Il n'y a donc pas de réflexion partielle au point 7 sur le modèle mathématique, ce qui explique la valeur plus faible de l'onde incidente du modèle mathématique en ce point.

— au point 6;

Le modèle mathématique donne une onde totale plus forte que sur le modèle physique. Ceci est dû à la représentation différente du déversoir qui écrête moins par le calcul que sur le modèle physique.

Le niveau final est plus haut sur le modèle mathématique; ceci est également dû à la représentation du déversoir sur le modèle mathématique.

ESSAI N° 3.

Mêmes remarques que précédemment en ce qui concerne le point 7.

L'onde qui transite à travers le siphon dans le canal d'amenée de Manosque se réfléchit sur la chambre d'eau de l'usine de Manosque. On remarque que cette onde réfléchie est en retard sur le modèle physique par rapport à celle donnée par le modèle mathématique. Ceci est dû au fait que la chambre d'eau modèle est beaucoup plus longue que la chambre d'eau nature. L'onde du modèle physique parcourt donc un chemin supplémentaire qui se traduit par le décalage observé entre les résultats donnés par les modèles physique et mathématique.

(*) Ces remarques sont dues à M. Benet, de la SOGREAH, constructeur du modèle réduit Oraison-Manosque, que nous remercions particulièrement pour sa coopération dans la construction du modèle mathématique.

Chute Oraison-Manosque (1^{er} tronçon). Essais d'intumescences. Comparaison des résultats du modèle réduit et du calcul sur ordinateur.

Oraison-Manosque (1st section). Translational wave tests. Comparison of physical and computer model results.

5/ Essai 3
Test 3

6/ Essai 5
Test 5

7/ Essai 6
Test 6

8/ Essai 8
Test 8

Oraison-Manosque (1^{er} tronçon). Comparaison des essais modèle et nature. Essai n° 3 du 15-9-64,

/9/ Oraison-Manosque (1st section). Comparison of model tests with prototype. Test n° 3 - 15-9-64.

Modèle réduit du canal d'Oraison.

Scale model of the Oraison canal.

VI. Vérification de réglage en régime transitoire

Cette vérification, pour le modèle réduit, a consisté à reproduire un certain nombre d'essais d'intumescences qui avaient été faits et mesurés dans la nature. Nous avons reproduit un essai nature, celui du 15 septembre 1964, sur le modèle mathématique. L'essai a consisté en une augmentation brusque de débit turbiné de 75 m³/s (état initial permanent) à 195 m³/s maintenu pendant 36 mn, et réduit brusquement à 8 m³/s. Pendant cette période, nous avons admis un débit constant de 75 m³/s s'écoulant par la branche de La Brillanne, tandis que la branche de Manosque était batardée. La figure 9 compare les résultats nature-modèle réduit-modèle mathématique aux points suivants :

Nature	PK 3,49	PK 0,33
Modèle réduit	Pointe 7	Pointe 10
Modèle mathématique .	Point de calcul n° 50	Point 68

La comparaison est satisfaisante, sauf pendant la courte période située juste après la fermeture des turbines de l'usine d'Oraison, où la concordance entre les deux modèles et la nature est mauvaise. Cela provient probablement du fait que ni le modèle mathématique ni le modèle réduit n'ont tenu compte de la galerie de fuite d'Oraison et ont débuté tous les deux en aval de la section de raccordement entre cette galerie et le canal.

VII. Conclusion

Les résultats obtenus à l'aide de modèle mathématique du canal Oraison-Manosque sont tout à fait comparables aux résultats obtenus à l'aide du modèle réduit distordu.

Il ne semble pas y avoir de raisons techniques ou théoriques contre l'emploi des modèles mathématiques au lieu des modèles distordus des canaux, surtout où des raisons économiques ou autres ne s'y opposent pas.

Abstract

Comparison of physical and mathematical model test results on translation waves in the Oraison-Manosque power canal

by J. A. Cunge*

The first part of the article discusses the difficulties encountered in the development of mathematical models for the study of steep-fronted translation waves in power canals. The assumptions behind St. Venant's equations are briefly reviewed.

The non-linear nature of these equations is brought out and also the consequences which this entails, in particular, the fact that after a certain time there can be no continuity in their solution. The steepening of the wave invalidates the flow theory which ignores vertical acceleration. The use of the method of characteristics to compute the moving hydraulic jump is rejected after a discussion of the difficulties involved in its application to practical cases. Finite difference methods can however be used for this type of computation.

The section of the Oraison canal represented by the scale and mathematical models contains several transitions, including sills, a lateral spillweir, a flow divider and a syphon. Although it was possible to express the roughness of the running sections of the canal in the mathematical model with the aid of known Strickler coefficients, adjustments had to be made for the individual head losses at the transitions. As the sketches in part III show, a schematic method was devised using a generalised head loss term. Thus, for example, the separate head losses at the flow divider, the canal fork and the syphon, were replaced by a single head loss applied to the syphon. The adjustment consisted in reproducing the natural water surface under steady flow conditions. Table 2 compares the natural flow profiles with those obtained from the computer and scale models under steady flow conditions. The adjustment of the two models can be assessed from these results.

With the mathematical model thus adjusted, 4 earlier scale model tests on translation waves were put through the computer. Table 3 gives the test conditions. The results obtained on both models in each test, at various points in the canal, are given in figures 5-8.

Lastly, a prototype test, carried out on 15th September 1964 in the first reach of the Oraison canal, was reproduced on each model. Figure 9 compares the computed levels with those recorded on the prototype and the scale model. The comparison is satisfactory on both models, except during a short period just after turbine shut-down at about 10 a.m. This is due to the fact that neither model was designed to allow for the effect of the Oraison power station tailrace tunnel.

The conclusion is that the computer model results are quite comparable with those yielded by a distorted scale model. The use of mathematical models in preference to distorted scale models would seem to be technically justified in all cases where it is not overruled by economic or other considerations.

* Engineer at SOGREAH.

ORAISON : CANAL D'AMENÉE (5 km en amont de l'usine).

Intumescences positives d'aval provoquées par la disjonction des groupes : coupures de 210 m³/s. (Photo I.G.N.)