APPROCHE PRATIQUE DE LA SIMULATION D'INSTALLATIONS HYDRAULIQUES

PAR Mme N. LILES *,
Mlle A. MARGNAC ** ET
J. RABAUD ***

1. — Introduction

La simulation d'aménagements hydrauliques et son cas particulier traitant d'installations hydro-électriques ont fait l'objet de multiples études et sont encore le but de nombreux travaux. Nous ne voulons pas reprendre encore ce que d'autres ont souvent et brillamment développé.

A la plupart de ces communications, on peut faire le reproche d'être trop hermétiques et trop savantes; l'exploitant en déduit trop souvent qu'elles lui sont inabordables. Pour s'opposer à cette tendance regrettable, nous avons voulu faciliter la liaison entre le chercheur et l'utilisateur en définissant mieux les démarches et les rôles respectifs de chacun.

Il est bien évident que plusieurs problèmes d'exploitation ou de conception peuvent voir leur résolution facilitée et accélérée par l'utilisation d'un modèle. Ce sont par exemple :

- l'étude du comportement de l'installation sous diverses contraintes (déclenchements, crues,...);
- l'étude du comportement en télérégulation;
- la recherche de lois de manœuvre optimales;

- la recherche de lois d'asservissement;
- l'ajustement du dimensionnement d'une partie de l'installation.

D'autre part, une constatation souvent rebattue porte sur le fait que la nature n'a pas voulu normaliser les chutes. En général, chacune est unique et son aménagement est, lui aussi, unique. Il est donc vain de vouloir trouver un modèle qui pourrait être généralisé à tous les cas. Nous avons préféré un système d'éléments simples suffisamment généraux qui, raboutés de façon adéquate, permettent de reconstituer toutes les installations.

Les travaux qui ont servi de base à cet article visent à résoudre des problèmes qui nécessitent une simulation d'ensemble; en particulier, on néglige les phénomènes locaux ou transitoires sans grande influence sur les autres éléments. Notre propos est d'abord de mieux définir le processus de la formulation du problème. On décrira ensuite les moyens dont nous disposons et les hypothèses dans lesquelles nous avons pour le moment résolu les problèmes. Avant deux exemples pratiques, on exposera enfin comment choisir le moyen utilisé et comment nous avons normalisé la préparation du travail.

2. — Comment poser le problème

2.1. Articulation.

Fonctionnellement, trois personnes interviennent dans la simulation d'une installation hydraulique :

* Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Service ERCA, Groupe simulation.

** Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Service ERNUTH, Laboratoire National d'Hydraulique.

*** Electricité de France, Direction de la Production et du Transport, Service de la Production hydraulique, Division matériel.

l'exploitant, l'hydraulicien et le calculateur. Il importe de bien les différencier pour mieux appréhender le rôle et le travail de chacun.

L'exploitant définit le problème et fournit les renseignements nécessaires à sa résolution. Il doit donc :

- présenter l'étude demandée;
- rassembler un schéma global de l'installation et les plans donnant les cotes, dimensions ou coefficients;
- effectuer éventuellement un essai préalable bien défini pour accélérer l'approche de la représentativité du modèle.

L'hydraulicien met en équations le problème. Il doit d'autant plus envisager les différents cas de figures possibles que la simulation ne se fait pas sur un modèle physique. Son rôle de charnière est essentiel car il définit à l'exploitant un ensemble programmable cohérent.

L'idée directrice qui permet de déterminer quelles données sont nécessaires est que celles-ci doivent permettre de reproduire les régimes permanents de l'installation. A titre d'exemple, quand l'écoulement dans un élément peut être libre ou en charge, il faut savoir à quels débits correspondent ces régimes.

Le rassemblement des données et leur critique est une partie très importante de la mise en œuvre du modèle mathématique car une erreur peut ne pas empêcher le programme de fonctionner, en donnant des résultats qui peuvent sembler bons. Au stade du fonctionnement, seule une erreur assez grossière est décelable et il n'est pas toujours facile, non plus, d'en trouver l'origine.

Le calculateur enfin, choisit la méthode de résolution et met en œuvre l'instrument de calcul. Il doit indiquer les limites imposées par la machine ou la programmation. Ces restrictions peuvent être dues au type ou à la taille de la calculatrice; elles peuvent aussi être dues à l'ignorance d'une méthode de résolution adéquate.

2.2. Hypothèses de calcul.

Toutes les hypothèses que l'on sait mettre en équations — équations que l'on sait, par ailleurs, résoudre sur la calculatrice — sont permises. Une limite des procédés est donc due à la connaissance physique du phénomène et aussi à la connaissance d'un moyen mathématique de résolution.

Pratiquement, la difficulté n'est pas là. Elle se trouve plutôt dans l'évaluation des phénomènes qui influencent réellement l'étude proposée. On sait représenter des écoulements en rivière (ce qui prouve la finesse du procédé de calcul), mais on a déjà obtenu des résultats suffisamment précis en négligeant les intumescences sur des canaux dont l'importance relative dans l'installation était faible.

Pour préciser ce point, on a pu, lors d'une simulation d'un ensemble comprenant deux retenues, un apport intermédiaire, trois galeries et deux cheminées d'équilibre, négliger les pertes de charge dans la conduite forcée. La précision relative par rapport aux valeurs mesurées est néanmoins meilleure que 5 % pour la représentation d'un déclenchement.

2.3. Décomposition et taille des problèmes.

Un aménagement hydraulique peut toujours être subdivisé en un certain nombre d'éléments simples (un canal de section constante et sans discontinuité — une cheminée d'équilibre...). Cette décomposition est intéressante car elle permet de sérier les hypothèses de calcul, les équations et les données nécessaires. D'autre part, on peut espérer pouvoir reconstituer n'importe quelle installation en juxtaposant des sous-programmes. A la limite, on peut compter avoir un jour suffisamment de schémas modulaires dans lesquels les caractéristiques physiques seront affichées sous forme de données; chacun de ces schémas représentera un élément simple; la mise bout à bout dans un ordre donné des programmes représentatifs de ces schémas permettra de figurer toutes les installations classiques.

A la restriction due à l'écriture ou à la résolution des équations s'en ajoute alors éventuellement une seconde, due à la capacité de la calculatrice. On peut aussi parler de taille du problème, proportionnelle en première approximation au nombre d'éléments simples introduits.

3. — Les moyens

3.1. Calcul numérique.

3.1.1. PRINCIPES.

Pour constituer un modèle mathématique capable de résoudre numériquement le problème posé, il faut tout d'abord représenter théoriquement le phénomène, choisir ensuite une méthode d'intégration qui lui soit adaptée et enfin connaître les valeurs numériques initiales des différentes variables utilisées.

a) Représentation théorique.

Lorsqu'un réseau comprend un ensemble complexe de canaux, galeries, cheminées d'équilibre, vannes..., les parties les plus importantes sont les canaux; les autres systèmes n'en constituent que les conditions aux limites. Sur chaque branche du réseau, le mouvement de l'eau est régi par les équations de Barré de Saint-Venant.

b) Analyse - Méthodes d'intégration numériques.

Le plan d'intégration est le plan (x, t) , x étant l'abscisse curviligne le long du canal et t le temps. On sait que les pentes des caractéristiques dans le plan (x, t) , sont données par les formules :

$$C_{\epsilon} = U \pm \sqrt{\frac{gS}{L}}$$

où : U représente la vitesse moyenne dans la section;

S la section mouillée;

L la largeur au miroir.

Par un point intérieur au champ d'intégration, il passe deux caractéristiques. Aux limites, on doit s'imposer une, deux ou zéro conditions selon que

l'écoulement est fluvial ou torrentiel. Le tableau ci-dessous rappelle les différents cas possibles :

Écoulement Flow	Fluvial Streaming flow		Torrentiel Shooting flow	
	Amont Upstream	Aval Downstream	Amont Upstream	Aval Downstream
Caractéristiques Characteristics				
Conditions à imposer Conditions required	1	1	2	0

On utilise un maillage fixe dans le plan (x, t) et on cherche les courbes caractéristiques passant par les différents nœuds du maillage. En ces points, on se propose de calculer de proche en proche en partant des conditions initiales les valeurs des fonctions inconnues. Le point $P_{i,j}$ nœud du réseau a pour coordonnées :

$$x = i \Delta x$$

$$y = j \Delta t$$

L'intégration du système se fait par la méthode des différences finies. Il existe essentiellement deux types de méthodes de résolution : ce sont les méthodes explicites et les méthodes implicites (*).

On peut les schématiser de la façon suivante :

Méthodes Method	Explicites Explicit	les dérivées en x sont prises à l'étage x - derivatives taken at stage	Implicites Implicit
Schémas Scheme		et and	
Conditions de stabilité Stability condition	$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\max c_e }$		Coefficient de pondération θ des dérivées en x entre t et $t + \Delta t$: $\theta > 0,5$ Weighting coefficient θ for x -derivatives between t and $t + \Delta t$: $\theta > 0,5$

Le choix de la méthode à utiliser dépend uniquement du phénomène à étudier; si ce phénomène est long (phénomènes de crues) on prendra une méthode implicite qui n'est pas astreinte à un critère de stabilité limitant le pas. S'il s'agit d'étudier des phénomènes beaucoup plus courts, on préférera alors utiliser une méthode explicite.

c) Conditions initiales.

Les conditions initiales à connaître sont les lignes d'eau et les débits correspondants, sur tout le réseau.

3.1.2. MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE MATHÉMATIQUE.

L'analyse numérique étant achevée, il s'agit d'élaborer le modèle mathématique qui fournira les résultats recherchés.

a) Entrées.

Ce modèle a besoin, pour pouvoir fonctionner, de données de deux types :

- données géométriques et hydrauliques;
- données initiales : lignes d'eaux et débits.

Après s'être assuré des données, il est obligatoire d'établir un organigramme qui sera la représentation rigoureuse et détaillée des différentes phases du calcul.

b) Les sous-programmes.

1. Les sous-programmes de résolution du point courant dans les canaux sont utilisés très souvent. Nous avons donc écrit un certain nombre de programmes « standard » qui résolvent de façon explicite ou implicite l'écoulement dans les canaux.

2. En ce qui concerne les conditions aux limites, il n'existe pas de programme « standard » car ces conditions sont différentes d'une étude à l'autre.

Mais dès qu'elles peuvent se formuler mathématiquement, il est facile de les transcrire pour le calcul numérique et d'obtenir ainsi des sous-programmes qui, ajoutés à ceux calculant les points courants des différents canaux, permettront la résolution complète du réseau.

Les sous-programmes étant établis, les données définies et vérifiées, le programme peut alors être assemblé.

A ce stade, toute une série de contrôles s'effectue : contrôle de perforation, contrôle d'écriture, contrôle d'assemblage (les erreurs d'assemblage sont limitées si l'on écrit un organigramme).

Tous ces contrôles sont diagnostiqués par la machine et les causes d'erreurs peuvent se retrouver facilement. Ce sont des contrôles « techniques » de la mise au point du modèle mathématique.

Lorsque le modèle mathématique est mis au point « techniquement », il faut de plus le mettre au point « physiquement », c'est-à-dire l'étalonner.

L'étalonnage se fait en comparant les grandeurs hydrauliques calculées à celles mesurées si elles existent. Cet étalonnage peut entraîner par exemple une modification du coefficient de frottement, qui entraînera elle-même de nouvelles vérifications.

c) Sorties.

On peut obtenir des résultats sous différentes formes, la façon la plus pratique est de faire tracer des courbes.

On peut également sortir des tableaux de chiffres qui demandent un dépouillement plus long mais donnent des résultats plus précis.

d) Accès aux calculatrices. Puissance. Capacité.

Nous avons accès à deux calculatrices : la CAB 500 et la CDC 6 600.

On peut les comparer dans le tableau placé à la page suivante.

On utilise en général la CAB 500 au moment de la mise au point d'un programme, car grâce à son accès direct on peut suivre pas à pas la marche des calculs et intervenir à tout moment.

Mais sa capacité est limitée et tous les problèmes ne peuvent pas se traiter en CAB 500.

La gestion d'une calculatrice comme CDC 6 600 ne permet plus un accès direct et la mise au point d'un programme est plus longue, car il faut attendre les résultats pour pouvoir corriger ou modifier un programme.

(*) Communication S.H.F., Grenoble, juin 1967 : « Quelques applications de modèles mathématiques à l'étude des écoulements non permanents dans un réseau ramifié de rivières ou canaux. »

CALCULATRICES	CAB 500	CDC 6 600
Langage	PAF	FORTTRAN
Capacité de mémoire en mots (*)	16 384	131 072
Temps nécessaire à l'écriture ou lecture d'un mot.	10 ms	1 μ s
<i>Entrées :</i>		
Clavier	×	×
Lecteur de carte		×
Lecteur de bande	×	×
Bandes magnétiques		×
<i>Sorties :</i>		
Machine à écrire	×	×
Imprimante		×
Perforateur carte		×
Perforateur bande	×	×
Films (tracés de courbes) ..		×
Dériveur bande		×
(*) On appelle mots, la quantité d'informations que la mémoire peut enregistrer (écriture) ou fournir (lecture) en une opération.		

3.2. Calcul analogique.

3.2.1. PRINCIPES.

L'étude des problèmes envisagés peut également se faire sur calculateur analogique. Le but poursuivi jusqu'alors a été de trouver un modèle général, capable d'englober la plupart des cas pratiques susceptibles d'être rencontrés et aussi compatibles avec les possibilités du calculateur. Un effort a été fait pour essayer d'automatiser le traitement de ces problèmes. Ceci afin de pouvoir réduire les temps de préparation et de mise au point de chacune des études, au bénéfice du temps d'exploitation.

a) *Modèle.*

Pour cela on a choisi de prendre en compte un modèle mathématique général représentatif d'installations possédant une retenue, un certain nombre de galeries (de 1 à 3), des cheminées d'équilibre à étranglement, épanouissement et déversoirs (également un maximum de 3 cheminées) ou bien une cheminée différentielle. Quand une installation est susceptible d'être représentée par tout ou partie de la formulation du modèle mathématique général, sous réserve que soient précisées les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, la loi d'ouverture des turbines, et les coefficients de perte de charge, on va pouvoir faire subir aux équations retenues une suite de transformations rapides jusqu'à la phase d'exploitation sur le calculateur.

b) *Préparation.*

Le principe de la représentation d'un système physique sur calculateur analogique est de remplacer les variables physiques par des tensions électriques. Ces tensions électriques sont limitées à des variations comprises entre $+100$ et -100 V. Aussi faut-il faire subir aux équations physiques une suite d'opérations préliminaires nécessaires pour leurs

traitements sur calculateur analogique; par exemple, il faut introduire des facteurs d'échelle dans les équations physiques. Ces opérations se font automatiquement sur calculateur digital par l'utilisation du programme APACHE (Analog Programming And Checking). Les données nécessaires pour ce programme numérique se décomposent en trois parties :

- énumération de tous les paramètres et de leurs valeurs;
- énumération des variables physiques, de leurs valeurs maximales et éventuellement des valeurs initiales;
- écriture des équations physiques.

Les sorties du programme donnent pour chaque équation physique, « l'équation machine » correspondante, c'est-à-dire l'échelle propre à chaque variable, les potentiomètres à introduire dans le calculateur avec leurs valeurs, les valeurs en volts des conditions initiales à imposer et les tensions de sortie de chacun des amplificateurs correspondant aux valeurs choisies comme conditions initiales. Ceci permet le test statique du montage.

3.2.2. MISE EN ŒUVRE.

a) *Câblage.*

Ensuite, il faut concrétiser le modèle mathématique sur un panneau de câblage. La méthode retenue a été de faire un câblage complet en prévoyant différents blocs fonctions des portions élémentaires des systèmes physiques avec la possibilité de les relier entre eux par un certain nombre de commutations. Enfin, pour terminer la phase de préparation, on réalise l'affichage des potentiomètres au moyen d'un ruban perforé qui sert également au test statique avec adressage des divers éléments (amplificateurs, multiplieurs,...).

b) *Exploitation.*

On est alors en mesure de passer à la phase d'exploitation du modèle analogique qui est indépendante de l'automatisation du processus et ne le restreint pas. L'exploitation est simple : on a accès au calculateur à tout moment pour changer tous les paramètres désirés. Le calcul se fait continuellement en fonction du temps.

Les résultats sont enregistrés simultanément sur des axes XY. Ils se présentent sous forme de courbes généralement en fonction du temps, mais peuvent également être en coordonnées différentes, par exemple : débit-hauteur d'eau dans la cheminée (diagramme de Bouvard et Molbert). Les courbes sont tracées sur papier millimétré de format 25×60 cm.

Une possibilité intéressante du calculateur analogique qu'il faut signaler, consiste à simuler les phénomènes en temps accéléré. Dans le cas des ouvrages comportant des cheminées d'équilibre classiques, on a été amené à diviser le temps réel par un coefficient 20. On a alors un gain de temps intéressant sur l'exploitation.

c) *Hypothèses et taille.*

Le choix du modèle général qu'il est possible de représenter actuellement sur le calculateur analogique, répond aux critères suivants :

- Le système d'équation est un système différen-

tiel en fonction du temps. Le représentation d'ouvrages possédant un canal formulé par des équations aux dérivées partielles n'a pas été envisagée en analogique. Dans ce cas, on ne tient compte que des pertes de charge statiques dans le canal et on admet qu'il se remplit instantanément. On néglige donc le temps de remplissage et de vidange, les pertes de charge dynamiques, les intumescences. On admet encore que le canal est parcouru par un débit uniforme et que sa section mouillée est constante. Les galeries élémentaires sont supposées en charge; on écrit les équations dans les hypothèses de Bernoulli en mouvement non permanent. On suppose les galeries parfaitement rigides, ce qui conduit à admettre que les perturbations se traduisent par des mouvements en masse de l'eau. On assimile l'ensemble des conduites à une seule conduite parfaitement rigide dans laquelle on néglige les pertes de charge. On symbolise l'ouverture de la turbine en ne la corrigeant que par la hauteur de chute. On considère que le bassin de compensation est à cote constante.

— Le nombre maximal de galeries et de cheminées choisi correspond à une consommation raisonnable de matériel qui permet d'avoir un coût d'étude également raisonnable, mais il ne faut pas considérer que c'est une limite aux possibilités offertes par le calculateur. On peut simplement remarquer que jusqu'alors les demandes de représentation pouvaient amplement être satisfaites par l'ensemble du matériel que nous utilisons (PACE 231, R).

3.3. Avantages des modèles mathématiques.

Nous avons ainsi constitué un modèle mathématique destiné soit au calcul analogique, soit au calcul numérique. On peut se demander quelle est la validité de cet outil et, en particulier, quels avantages ou inconvénients il présente par rapport à un modèle physique.

L'inconvénient majeur des modèles mathématiques est qu'ils ne peuvent représenter que des phénomènes que l'on sait formuler.

Les avantages en sont :

- d'être plus maniable et de supporter un certain nombre de modifications éventuelles sans trop de difficulté, alors que le modèle physique correspondant devrait être partiellement reconstruit;
- de pouvoir traiter un réseau hydraulique important, alors que le modèle réduit serait plus limité;
- de ne pas poser de problème de similitude ni d'effet d'échelle, alors que sur un modèle physique l'effet de similitude peut entraîner des changements dans la nature des phénomènes étudiés.

4. — Mise en œuvre

4.1. Choix entre les moyens.

Le choix entre les moyens est parfois un problème délicat. On ne peut pas indiquer une règle qui résoudrait simplement l'alternative.

Si le problème est classique, ce qui signifie que l'installation résulte de l'assemblage d'éléments connus, traités avec les hypothèses courantes, le choix entre les moyens sera basé sur l'existence de programmes déjà établis pour l'une ou l'autre des machines analogique ou numérique et sur la commodité des entrées et sorties par rapport au problème posé.

Actuellement, et en se basant sur notre expérience, nous choisissons de simuler par le calcul analogique les installations en charge, relevant des hypothèses admises dans nos sous-programmes-types, et qui ne nécessitent pas une capacité de matériel anormale. Au contraire, tous les problèmes faisant intervenir des canaux seront simulés en calcul numérique. Pour les autres cas, on résout ce problème de choix dans chaque cas particulier, en n'omettant pas de faire intervenir l'accès à la calculatrice et la taille du problème. Une étude nécessitant un accès aisé sera plutôt traitée sur calculatrice analogique; la capacité des grosses calculatrices numériques étant pratiquement illimitée, celles-ci seront de préférence mises en œuvre pour des problèmes de très grosses tailles.

4.2. Un essai d'automatisation du processus.

En se fondant sur l'expérience acquise à l'E.D.F. grâce à la collaboration entre la Direction des Etudes et Recherches et le Service de la Production Hydraulique à ce sujet, on a préparé un système de fiches intitulé « Simulation d'Installations Hydrauliques sur Calculatrices Analogique et Numérique ».

Cette brochure s'inspire des idées exposées ci-avant. Son but est de normaliser la présentation des problèmes classiques.

Pour ce faire, on expose sur des fiches séparées :

- comment diviser une installation en éléments simples;
- comment effectuer et présenter un essai préalable;
- ce que doit contenir le dossier d'étude;
- et, dans le cas des éléments simples pour lesquels existent des sous-programmes (retenue - canal - galerie - cheminée d'équilibre - conduite forcée - turbine) :
 - les notations et hypothèses retenues,
 - les équations utilisées,
 - les renseignements nécessaires.

Bien que ces fiches soient loin d'être complètes, qu'elles ne permettent pas de traiter n'importe quelle installation et que les hypothèses soient grossières, l'expérience prouve que leur utilisation permet de clarifier l'exposé d'un problème et même de servir de base pour une étude complexe.

5. — Exemples

5.1. Chavaroche.

L'ouvrage d'amenée comprend un canal à ciel ouvert suivi d'une galerie en charge avec cheminée d'équilibre et reniflard de forte section.

5.1.1. SCHÉMA DE L'INSTALLATION.

5.1.2. EQUATIONS UTILISÉES.

Canal :

Equation dynamique :

$$\frac{\partial V_c}{\partial t} + V_c \frac{\partial V_c}{\partial L_c} + g \frac{\partial Z_u}{\partial L_c} = -g \frac{V_c |V_c|}{K_S^2 R_h^{4/3}}$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial Q_c}{\partial L_c} + l_m \frac{\partial Z_u}{\partial t} = 0$$

avec :

- V_c vitesse de l'eau;
- Q_c débit;
- Z_u niveau de l'eau au point courant;
- L_c longueur du canal;
- l_m largeur au miroir;
- K_S coefficient de Strickler;
- R_h rayon hydraulique.

Galerie :

$$\frac{1}{g} \frac{dQ_{g_i}}{dt} \frac{l_{g_i}}{f_i} + Q_{g_i} |Q_{g_i}| \frac{\lambda_{g_i}}{2} \frac{l_{g_i}}{f_i^2 D_{g_i}} + Z_{aval} - Z_{amont} = 0$$

$$Q_{g1} = Q_r + Q_{g2} \quad Q_{g2} = Q + Q_c$$

$$\frac{dZ_r}{dt} = \frac{Q_r}{F_2} \quad \frac{dZ_c}{dt} = \frac{Q_c}{F_{c1} \text{ ou } F_{c2}}$$

avec :

- Q_{g_i} débit dans un tronçon i de la galerie;
- Q_r débit dans le reniflard;
- Q_c débit dans la cheminée;
- Q débit turbiné;
- Z_r niveau dans le reniflard;
- Z_c niveau dans la cheminée;
- l_{g_i} longueur du tronçon i ;
- D_{g_i} diamètre du tronçon i ;
- f_i section du tronçon i ;
- F_r, F_c, F_{c2} sections dans le reniflard et la cheminée;
- λ_{g_i} coefficient de perte de charge dans le tronçon i .

Conduite et turbine :

$$Q_{(t)} = M_{(t)} \sqrt{\frac{Z_c - Z_f}{h}}$$

- M loi d'ouverture en fonction du temps;
- Z_f niveau à la sortie de la turbine;
- h hauteur de chute nominale.

5.1.3. ETUDE.

Il s'agissait de déterminer les caractéristiques d'un servomécanisme de conduite permettant de réaliser l'égalité débit turbiné - débit entrant.

La représentativité du modèle a été approchée sur modèle analogique (en ne tenant pas compte du canal) puis vérifiée sur modèle mathématique, grâce à des mesures *in situ* lors d'échelons de débit turbine.

Réponse du niveau de la cheminée à une variation de débit turbine (installation en boucle ouverte).

Surge tank level response to a change in turbine flow (open-loop installation).

Les coefficients de la loi d'asservissement ont été tout d'abord estimés sur calculateur analogique sans tenir compte du temps de propagation dans le canal, puis précisés sur le calculateur numérique.

Loi d'asservissement :

$$Q = k \left[\frac{1 + T_1 p}{1 + T_2 p} (Z_b - Z_{b0}) + \frac{k_1}{k} \frac{T_p}{1 + T_p} Z_c \right]$$

avec :

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,3 \quad k = 200 \quad k_1 = 6 \quad T = 600 \text{ s}$$

Réponse du niveau à une variation de débit turbine (installation bouclée).

Level response to a change in turbine flow (closed loop installation).

5.1.4. TEMPS DE PRÉPARATION ET DE CALCUL.

- Rassemblement des données..... 2 jours
- Mise au point du programme..... 15 jours
- Exploitation sur calculatrice..... 8 jours
+ 4 h de temps machine

5.2. Pressy.

La caractéristique principale de l'aménagement de Pressy est de posséder une cheminée d'équilibre différentielle et à chambres d'expansion. L'ensemble de l'ouvrage en charge a été simulé sur calculatrice analogique.

5.2.1. SCHÉMA DE L'INSTALLATION.

5.2.2. ORDINOGRAMME.

5.2.3. RÉSULTATS.

5.2.4. REMARQUES.

Malgré les simplifications :

- retenue à niveau constant;
- mouvements en masse dans la galerie;
- pas de perte de charge dans la conduite forcée;
- turbine orifice,

la simulation sur calculatrice recoupe bien les résultats d'essais.

Trois différences apparaissent :

- Les conditions initiales ne sont pas les mêmes pour les deux courbes. Ceci est dû au fait que nous avons choisi le coefficient réel de pertes de charge en galerie, alors que les premiers essais étaient basés

sur un coefficient projeté (plus faible). La conséquence essentielle est que le niveau de la cheminée, partant de plus haut, monte plus haut lors du déclenchement.

— Dans le cas où le niveau dépasse le seuil du déversoir supérieur, on n'a pas pu programmer une loi en $Q = a (Z_c - Z_n)^{3/2}$ (le système était alors instable). Ceci change la forme du sommet de la courbe.

— Enfin, pour la prise de charge, on n'observe pas, sur la simulation analogique, le décrochement observé sur la maquette. Ce décrochement est simplement dû au fait que le niveau dans le déversoir passe au-dessous du changement de section; la section diminue et ceci accélère le mouvement du plan d'eau. Dans le cas de la simulation, on reste très voisin de cette cote sans l'atteindre; le mouvement est alors très amorti.

5.2.5. TEMPS DE PRÉPARATION ET DE CALCUL.

- Rassemblement des données..... 1 jour
- Mise en équation des points particuliers, confection de l'ordino-gramme. 1 jour 1/2
- Programmation (utilisation de sous-programmes et de schémas de câblage prêts à l'emploi)..... 1/2 jour
- Mise au point et exploitation sur calculatrice. 1 jour 1/2

6. — Conclusion

Cet article avait seulement la prétention de montrer le processus que nous avons choisi et normalisé pour la simulation d'installations hydroélectriques.

Nous voulons, pour terminer, insister sur le fait que la démarche retenue ne limite en rien les améliorations et les extensions possibles. En effet, il suffit, pour l'exploitant, de bien définir son installation et l'étude demandée; l'hydraulicien forme alors les équations qui représentent le phénomène dans son contexte. Le programmeur enfin, et pour autant qu'une méthode de résolution adaptée au problème le lui permette, programme et met en œuvre la simulation. On pourrait, dans le cadre d'études particulières, tenir compte par exemple des équations complètes des turbines (régimes transitoires), des basculements de retenue ou des coups de bélier. Il faut cependant avoir toujours à l'esprit le but de l'étude et se limiter aux phénomènes les plus influents.

Plusieurs études ont montré que le processus était au point et que la représentation analogique ou numérique permettait de bien analyser, et avec une très bonne précision, une installation hydraulique, si complexe soit-elle. Une difficulté, nous semble-t-il, réside dans l'établissement de la liaison qui permettrait à des personnes diversement spécialisées, de collaborer efficacement. Nous souhaitons que notre travail apporte un élément de réponse à ce problème.

Bois gravé du XVI^e siècle.