

Le calcul des coups de bélier par machine électronique

An electronic computer method of calculating water hammer

PAR Ch. DUBIN

INGÉNIEUR EN CHEF A LA COMPAGNIE GÉNÉRALE DES EAUX

Rappel des éléments et philosophie de la méthode Bergeron.

Emploi de la calculatrice électronique pour la résolution des équations aux différences finies fournissant les points de l'épure.

Application de la méthode, servie par la calculatrice, au calcul des coups de bélier dans les réseaux maillés de distribution d'eau.

Recapitulation of the basic principles and theory of the Bergeron method. Use of an electronic computer to solve finite difference equations giving the points on a diagram.

Application of the method, using a computer, to calculate water hammer in water supply mesh networks.

La méthode que nous allons exposer n'a pas la prétention de remplacer la méthode BERGERON, car c'est la méthode BERGERON elle-même, exploitée par des moyens que la technique moderne met à notre disposition.

On pourrait d'ailleurs philosopher longtemps sur ce propos liminaire car il est évident que la machine électronique ne sait pas faire les constructions graphiques caractéristiques de la méthode BERGERON. Elle les traduit en opérations algébriques destinées à déterminer les valeurs successives des hauteurs et des débits en différents points d'une installation.

On pourrait tout aussi bien dire que la machine résout les équations aux différences finies remplaçant les équations différentielles du phénomène que nous ne savons pas résoudre.

Mais on voit qu'il n'y a là qu'une question de définition, car les constructions des épures Bergeron ne sont elles-mêmes que la traduction graphique de ces équations aux différences finies.

Néanmoins, dans ce qui va suivre, nous raisonnerons en partant des méthodes graphiques. Car celles-ci se sont aujourd'hui si bien implantées dans les habitudes du spécialiste du coup de bélier qu'il est souvent plus simple de raisonner sur ces constructions graphiques que de remonter

aux équations différentielles qui sont à leur origine. En particulier, la méthode des observateurs liés à une onde de pression nous paraît aujourd'hui tellement claire et intuitive qu'il nous est désormais difficile de nous en passer.

Si nous insistons sur tout ceci, c'est que certains spécialistes au courant de nos travaux nous ont posé la question : « Employez-vous la méthode graphique ou les équations différentielles? »

La question nous paraît sans intérêt. Il est probable que si la machine savait parler, elle nous répondrait :

« Je résous des équations différentielles. »

Il n'en est pas moins vrai que nous lui avons imposé ces résolutions à travers l'optique de la méthode graphique.

Construction du point courant d'une épure

Supposons connus les états (hauteur, débit) dans un ouvrage à l'instant t en deux points A et B de cet ouvrage. Nous voulons en déduire l'état à l'instant $t + \Delta t$ du point M, milieu de A B par exemple.

La méthode consiste à faire partir en sens inverse et à l'instant t deux observateurs de A et de B qui se rencontrent en M à l'instant $t + \Delta t$.

Pour l'observateur parti de A, les états qu'il peut constater en M peuvent être représentés par une courbe α liée au point a représentatif de l'état en A à l'instant t .

Si le point M est un point courant et qu'il n'y ait pas de perte de charge entre A et M, cette courbe est une droite Bergeron passant par a (fig. 1).

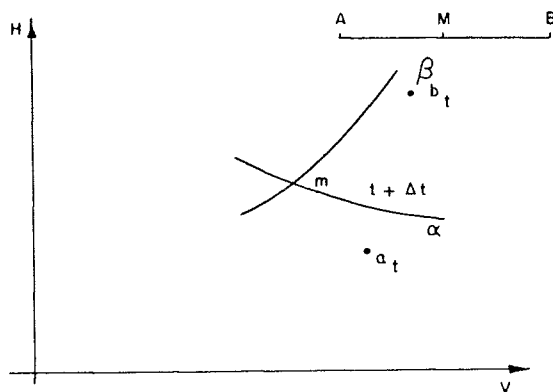


FIG. 1

S'il y a perte de charge, ce sera une parabole liée à la droite Bergeron passant par a .

Dans le cas plus général où le point M serait un obstacle, la courbe α traduira la condition hydraulique imposée par cet obstacle.

De même, pour l'observateur parti de B, on aura une courbe β liée au point b représentatif de l'état B à l'instant t .

L'état en M à l'instant $t + \Delta t$ sera représenté par l'intersection des courbes α et β .

Algébriquement, la courbe α aura pour équation :

$$F_1(x, y, x_a, y_a) = 0$$

qui indique que les paramètres variables dont dépend la courbe sont des fonctions de x_a et y_a coordonnées du point a .

De même, la courbe β aura pour équation :

$$F_2(x, y, x_b, y_b) = 0$$

Ces deux équations donneront finalement :

$$x_m = \varphi(x_a, y_a, x_b, y_b)$$

$$y_m = \psi(x_a, y_a, x_b, y_b)$$

Citons quelques exemples d'établissement de ces équations dans le cas d'une conduite à caractéristique unique où nous poserons :

$$H = y \quad \text{et} \quad a q/g s = x.$$

Si nous négligeons la perte de charge, nous aurons :

$$F_1 = x + y - x_a - y_a = 0$$

et :

$$F_2 = x - y - x_a + y_a = 0$$

La résolution de ce système du premier degré ne présente aucune difficulté.

Si nous tenons compte de la perte de charge, les équations seront légèrement plus compliquées et nous aboutirons finalement à la résolution d'une équation du second degré.

Enfin, dans le cas où le point M représente un obstacle, on devra tenir compte de la caractéristique de cet obstacle. Si celle-ci est connue théoriquement, il n'y aura pas de difficulté à poser l'équation. Si elle n'est connue qu'expérimentalement, comme dans bien des cas, il sera toujours possible d'en obtenir une représentation algébrique convenable.

Dans tous les cas, le système $F_1 F_2$ pourra être résolu, soit directement, soit par approximations successives.

Toutes ces opérations, la machine électronique les résout en des temps records sans la moindre difficulté.

Il suffit d'envoyer en mémoire, soit la valeur des coordonnées x_a, y_a et x_b, y_b , soit les valeurs de fonctions bien définies de celles-ci, et la machine en tire par des opérations simples les coordonnées x_m et y_m et par la suite les fonctions de ces coordonnées qui seront à leur tour envoyées en mémoire pour être réutilisées dans la suite des calculs, lorsque la détermination de l'état en un certain point exigera la connaissance de l'état en M.

A mesure que se dérouleront les calculs, la connaissance de certains états antérieurs ne sera plus utile. Les mémoires correspondantes seront alors effacées et pourront servir à recueillir de nouveaux résultats nécessaires pour la suite des calculs.

Dans un avenir proche, on nous promet des machines qui, en liaison avec des appareils graphiques ou des oscillographes cathodiques, nous donneront directement les courbes traduisant les calculs successifs des coordonnées x et y .

Contentons-nous, pour l'instant, du stade actuel où nous obtenons les résultats sous forme de tableaux de coordonnées à partir desquels on peut rétablir toutes les courbes caractéristiques pression-vitesse ou pression-temps que l'on désire.

D'ailleurs, la plupart du temps, ces courbes sont inutiles pour le spécialiste, celui-ci n'ayant, en général, besoin que de certaines coordonnées critiques (pression maxima ou minima par exemple).

Telle est, esquissée dans ses grandes lignes, la méthode de calcul par machine électronique des coups de bélier.

Avons-nous, du même coup, supprimé les épures Bergeron? Assurément pas, car tout le monde n'aura pas sous la main les machines voulues pour user de ces méthodes. Mais nous pensons que ceux qui devront encore démêler l'écheveau parfois inextricable des droites Bergeron penseront avec mélancolie à ceux qui confient ce travail ingrat aux machines à tambour magnétique et obtiennent en quelques minutes les résultats d'une épure qui aurait demandé parfois plusieurs jours de graphique ingrat.

Nous allons cependant donner deux exemples d'application de ces méthodes devant lesquels le graphiqueur le plus audacieux aurait certainement reculé. Il s'agit de deux problèmes qui, à notre connaissance, n'ont jamais été abordés, sinon pour quelques études particulières.

Détermination du réservoir d'air optimum

Ce problème ayant fait l'objet d'un article détaillé dans *la Houille Blanche* (n° 6, 1955), nous croyons inutile d'en reprendre ici l'exposé et prions nos lecteurs que la question intéresserait de se reporter à la publication indiquée.

Coups de bélier dans les réseaux maillés

Le problème de la détermination d'un réservoir optimum est loin d'avoir épuisé les possibilités de la machine en matière de coups de bélier.

S'il nous est difficile d'imaginer qu'un calculateur livré à lui-même ait pu mener à bien un tel travail, celui-ci n'a exigé cependant qu'un nombre respectable d'épures dont chacune en elle-même n'est pas hors de portée d'un opérateur entraîné.

Nous allons entrer maintenant dans un domaine où l'épuration paraît irréalisable.

Nous ne diminuerons pas les mérites de la méthode BERGERON en disant que le cas le plus complexe qu'on ait pu rencontrer dans les traités est celui de l'arrêt brusque sur une conduite munie d'un branchement.

Que dire de l'étude du coup de bélier dans un réseau maillé?

Nous ne pensons pas être trop présomptueux en disant qu'une telle analyse n'a jamais été tentée jusqu'ici.

La machine, elle, relève le défi avec élégance.

Voici un réseau maillé assez simple qui a pu être analysé sans difficulté par le C.P.C. I.B.M. (fig. 9).

Dans ce réseau comportant deux usines, on cherchait à déterminer l'influence de l'arrêt brusque d'une seule des deux usines. La machine a

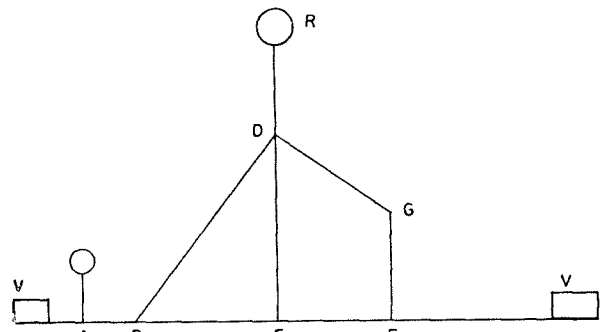


FIG. 8

donné les résultats que l'on peut traduire par exemple en diagramme pression-temps en un point quelconque du réseau (fig. 10).

Ce cas, pourtant simple, est déjà quasi-inaccessible à la méthode graphique ordinaire.

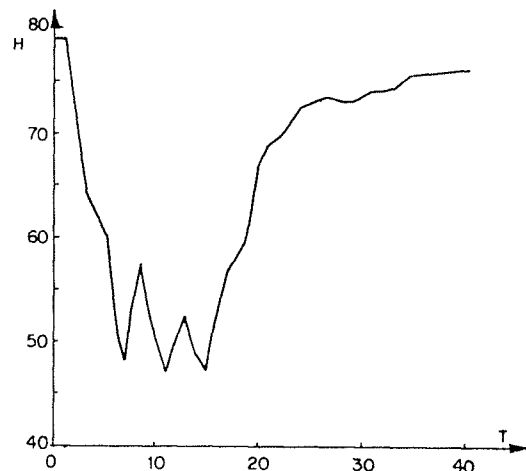


FIG. 10

Il avait été traité par le C.P.C. Avec la machine actuelle 650, les possibilités sont pour le moins décuplées. Nous avons pu établir le programme standard d'un calcul de réseau maillé comportant un nombre quelconque de pompes, de réservoirs d'air et de cheminées. Les problèmes délicats d'interférences de ces appareils pourront être étudiés sans difficulté. Peut-être la 650, avec ses 2.000 mémoires, est-elle encore trop juste pour que nous puissions affirmer qu'elle pourra traiter tous les réseaux. Mais n'oublions pas qu'en Amérique, la Société I.B.M. est déjà en avance de deux machines sur la 650 et que notamment la 700, sœur cadette de la 650, fonctionnera en France à la fin de cette année.

Avec ses 80.000 mémoires, elle multipliera donc par 40 nos possibilités actuelles et nous pensons que la marge sera assez confortable

pour pouvoir lui confier même les réseaux les plus complexes.

DEUX REMARQUES SUR LES CALCULS :

La seule programmation du programme standard aura demandé plus d'un mois de travail à l'un de nos collaborateurs spécialiste de la 650. Mais ce travail est fait une fois pour toutes et le travail complémentaire destiné à poser un problème particulier à la machine est à la portée d'un technicien non averti des mystères de la 650.

Signalons aussi que le programme est établi en tenant compte des pertes de charge dans toutes les branches du réseau. Si bien qu'en faisant marcher la machine pendant un temps suffisant, on pourra assister à l'amortissement du régime varié vers un nouvel état stable qui n'est autre que le régime du réseau dans les nouvelles conditions. Ce nouveau régime aurait pu également être déterminé par le calcul Hardy-Cross traditionnel. Si bien que l'on peut dire que le calcul Hardy-Cross n'est autre chose qu'un résidu du calcul en régime varié. Ceci est amusant, mais sans grande portée pratique, car il ne viendrait à personne l'idée de calculer un régime stable en commençant par l'étude d'un régime varié.

Nous ne nous étendrons pas d'ailleurs sur le calcul des réseaux maillés en régime stable, d'abord parce que ce n'est pas dans le cadre du sujet de cette causerie et également parce que la S.H.F. a déjà entendu une conférence très intéressante de M. CARTERON sur la question (1).

(1) Cf. n° A, 1956, de la *Houille Blanche*.

Nous voudrions, avant de terminer, rendre à César ce qui est à César. Une grande partie des théories qui viennent de vous être exposées sont dues à notre collaborateur M. GUÉNEAU, notamment en ce qui concerne l'étude des coups de bélier dans les réseaux maillés. Il lui a fallu pour cela d'abord devenir un spécialiste de la machine I.B.M. 650, ensuite passer outre à un interdit de notre regretté professeur BERGERON. Celui-ci dit, en effet, dans une remarque de son livre :

« Il est inutile, pour faire des études partielles, de s'astreindre à fixer un sens de la vitesse d'écoulement qui soit positif... Il vaut mieux laisser ce choix de la vitesse tout à fait arbitraire que d'essayer de le systématiser, car dans le cas de plusieurs bifurcations en série (c'est bien le cas des réseaux maillés), cette systématisation devient impossible. »

Or, pour mettre un programme général au point, il y a bien fallu systématiser et M. GUÉNEAU a ainsi élégamment démontré qu'impossible n'était pas français.

Enfin, nous devons remercier chaleureusement la Société I.B.M. pour l'aide désintéressée qu'elle nous a apportée dans les recherches qui ont abouti aux méthodes que nous venons de vous exposer. Nous avons eu, je crois, l'honneur d'être les premiers à nous servir de la 650 française pour l'exploitation d'un problème concret. Que tous les collaborateurs d'I.B.M., MM. RIND, ROUDIL, SCHLUMBERGER, RENARD, qui nous ont apporté leur concours enthousiaste, veuillent bien trouver ici l'expression de notre gratitude.

DISCUSSION

Président : M. BERGERON

M. DE SAINT-VAULRY voudrait bien savoir comment, pour une pompe, dans le cas où l'on veut faire la détente de la pompe et son arrêt sans réservoir d'air, l'auteur introduit les qualités de la pompe, c'est-à-dire les caractéristiques : débit, pression et couple.

M. DUBIN répond que l'on recherche approximativement le tronçon de la courbe intéressé par le fonctionnement et qu'on établit, ensuite, une équation empirique de ce tronçon, de la forme :

$$y = A + Bq + Cq^2$$

Quand les vitesses sont négatives, les collines changent de forme et l'équation caractéristique admet des coefficients différents, mais « l'intelligence » de la machine permet de faire très facilement la substitution nécessaire.

En ce qui concerne la répartition du couple, M. DUBIN indique qu'il n'a pas encore fait d'épures en tenant compte des inerties des pompes, dans l'étude des coups de bélier, car les pompes qu'il utilise ont des inerties

presque négligeables. La question peut être traitée et elle apporterait, d'ailleurs, un coefficient favorable.

M. ARNAUD (SOGREAH) signale qu'avec la machine 650, on peut, à partir de points expérimentaux, obtenir des formules d'interpolation bien choisies pour pouvoir construire avec précision les courbes expérimentales.

M. ESCANDE demande si, la machine étant dans la position correspondant au réseau maillé, on peut étudier toutes les manœuvres, par exemple celle consistant à faire déclencher une station puis une autre, comme si l'on avait un réseau expérimental.

M. DUBIN répond qu'il suffit pour cela de changer la perforation d'une carte.

M. ESCANDE pose une deuxième question : si l'on voulait faire, par la méthode graphique, le calcul d'un réseau maillé, on serait amené à arrondir un peu les longueurs. Faut-il faire la même chose avec la machine ?

M. DUBIN répond qu'on est amené, aussi, à arrondir

avec la machine, dans la mesure où l'on désire réduire le nombre de points et, par conséquent, le temps des opérations : il faut noter, toutefois, que cette réduction de temps n'est pas à l'échelle humaine mais à celle, bien inférieure, de la machine.

M. le Président conclut en ces termes :

« Je suis heureux de remercier et de féliciter, au nom de tous et surtout en mon nom personnel, M. DUBIN et son collaborateur, M. GUÉNEAU qui, par une interprétation élégante de la méthode graphique, sont arrivés à discipliner la machine et à faire tellement rapidement les calculs que cela leur a permis d'arriver à des conclusions définitives et à la portée de tout le monde, en particulier sur la détermination des réservoirs à air, qui est un problème très courant.

« Une personne avertie du calcul de la méthode graphique peut calculer un réservoir à air assez rapidement, mais il n'en est pas moins vrai qu'il n'existe pas beaucoup de personnes qui sont assouplies à cette méthode et que beaucoup d'erreurs se sont dites sur les réservoirs à air.

« En effet, on a voulu, pour utiliser une méthode analytique, essayer de traiter le problème des réservoirs à air par les mouvements en masse. Cela a conduit à des erreurs fâcheuses, parce que, d'une part, on ne tient pas compte de l'élasticité de la conduite et de l'eau

emmagasinée dans cette conduite, ce qui introduit des erreurs acceptables au moment de la dépression mais qui peuvent devenir considérables au moment de la compression. D'autre part, sans dispositif particulier, la surpression en retour est toujours supérieure à la dépression, c'est-à-dire que le résultat est plus mauvais qu'avec un clapet de non-retour qui limiterait la surpression à une valeur égale à la dépression, d'où la nécessité de prévoir un étranglement avec pertes de charge au retour, élément dont il est pratiquement impossible de tenir compte par une méthode analytique.

« Je suis donc heureux de voir qu'en résolvant le problème dans son ensemble, avec la machine électronique, d'une part, personne ne fera plus ces erreurs, et, d'autre part, cela a mis en évidence — ce que certains savaient, mais que quelques-uns ignoraient — qu'il y avait un étranglement optimum qu'il était bon de déterminer, ce que vous avez fait.

« Je conclurai sur une remarque.

« J'ai retrouvé, dans la correspondance de mon père, une lettre d'ALLÈYI, dans laquelle il lui disait : « Vous faites du cinéma, moi je fais du bas-relief. »

« Il est intéressant de voir maintenant que grâce à la méthode graphique, les conclusions d'une série de films permettent de réaliser un bas-relief, impossible à faire avec les méthodes analytiques. »

(Applaudissements.)

