

REPUBLIQUE DU SENEGAL



Ecole Polytechnique de Thies

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

EN GENIE MECANIQUE

TITRE:

SIMULATION NUMERIQUE

DES ECOULEMENTS EN REGIME TRANSITOIRE

DANS LES RESEAUX DE CONDUITES

AUTEUR : *TACHEFINE B.*

DIRECTEUR : *SARR A. PH.D*

JUIN 1989

A ma famille,

Aux amis,

A tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

A Mr. Amadou SARR, mon directeur de projet,
professeur

A Mr. Seyni TAMBA, professeur

A Mrs. Patrick ACCRO~~X~~MBESSY et
Gaga SIMPLICE, étudiants

A tous ceux, qui de près ou de loin ont
contribué à la réalisation de ce travail, j'adresse mes
sincères remerciements.

SOMMAIRE

Cette étude a pour principal objectif, la réalisation d'un programme de simulation des écoulements en régime transitoire dans les réseaux de conduites.

Afin de pouvoir traiter un réseau affecté par un tel régime, on utilise l'approche consistant à développer des modules de traitement basés sur la résolution des équations régissant le phénomène (équations de continuité et quantité de mouvement). Ces modules traduisent des modèles mathématiques qui décrivent fidèlement le comportement des différents éléments rencontrés sur les réseaux hydrauliques.

Dans ce rapport, il sera présenté ce qui suit :

- La dérivation des équations
- Les méthodes numériques utilisées
- Le calcul aux frontières
- La description du programme réalisé
- Les résultats de quelques cas traités
- Le listing du programme.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
Remerciements	
Sommaire	
Introduction	1
CHAPITRE 1 : Etablissement des équations de base	3
1-1 : Théorème de transport de REYNOLDS	4
1-2 : Equation de continuité	6
1-3 : Equation de quantité de mouvement.	11
CHAPITRE 2 : Méthodes numériques	17
2-1 : Méthodes des caractéristiques	18
2-2 : Différences finies	22
2-3 : Procédure de résolution.	24
CHAPITRE 3 : Calcul des frontières	25
3-1 : Réservoirs	26
3-2 : Pertes locales	28
3-3 : Branchements	29
3-4 : Vannes	31
3-5 : Pompes.	33
CHAPITRE 4 : Contrôle du transitoire	39
- Cheminée d'équilibre	40
- Chambre à air	41
- Valves.	42
CHAPITRE 5 : Utilisation et description du programme.	43
5-1 : Structure du programme	44
5-2 : Utilisation	46
CHAPITRE 6 : Cas traités	49
Exemple 1 Fermeture vanne lente	50
Exemple 2 Fermeture vanne brusque	52
Exemple 3 Pompe "turbinage"	54
Exemple 4 Pompe sans turbinage	56
Exemple 5 Effet cheminée - analyse	58
CONCLUSION	63
ANNEXE : Listing du programme	64

INTRODUCTION

Le transitoire, dans les installations hydrauliques constitue un danger permanent, qui peut survenir à tout moment suite aux diverses manipulations des éléments du réseau.

Le régime transitoire occasionne l'apparition de pressions très élevées ou très faibles, qui engendrent des conséquences désastreuses pour la survie de l'installation, il est source de plusieurs dégâts (détérioration des conduites) qui occasionnent des coûts d'équipements et d'entretien habituellement non prévus.

Son étude et sa maîtrise présentent des intérêts remarquables, lors de la conception et l'implantation des réseaux, en ce sens qu'elle permet, lors du dimensionnement d'en tenir compte pour le choix des diamètres des conduits ou pour l'installation d'éléments pouvant atténuer les effets indésirables.

La prévention du transitoire exige l'utilisation de gros diamètre et d'épaisseurs élevées, ce qui revient toujours cher mais néanmoins garantit une certaine sécurité vis à vis des conséquences qu'il peut entraîner.

Le transitoire est un phénomène complexe, qui prend naissance à la suite d'une variation de l'écoulement. Ce dernier possédant une certaine vitesse, qui fonction de sa masse lui communique une énergie cinétique qui peut s'annuler à la suite d'une manipulation sur le réseau.

En vertu de la loi de conservation de l'énergie, l'énergie initiale ne peut disparaître instantanément, en fait elle se transforme en énergie potentielle sous forme d'ondes de surpression et de vitesse, qui se propagent le long de la conduite avec une célérité fonction de l'élasticité du matériau et de la compres

sibilité du fluide.

Dans les réseaux hydrauliques, figurent divers éléments qui peuvent engendrer la variation de l'écoulement, donc création d'un régime transitoire, parmi ces éléments :

- les vannes qui occasionnent un phénomène transitoire dont la sévérité dépend des conditions de manipulation (ouverture-fermeture, brusque, continue, ou lente) et de la constitution du réseau.
- les pompes et turbines qui provoquent le transitoire par leurs démarrages, arrêts, ou pertes de puissance.

Avec l'apparition des ordinateurs, et le grand progrès enregistré dans le développement des méthodes numériques, la résolution des problèmes en transitoire a grandement évolué en passant du traitement graphique très limité au traitement numérique des cas les plus complexes.

Parmi les méthodes numériques disponibles, celle des caractéristiques est devenue le meilleur outil d'analyse, grâce à sa précision et à la possibilité de traitement des frontières les plus compliquées.

Cette étude, basée sur la méthode des caractéristiques a pour but de réaliser un outil de travail permettant de simuler les différents cas de figures en transitoire, qui peuvent avoir lieu dans un réseau contenant des éléments habituels.

A part son intérêt pratique dans la conception des réseaux, elle permet, parallèlement à des expériences menées en laboratoire, d'avoir un outil de comparaison avec les résultats théoriques. Enfin elle pourra constituer un outil efficace, pour le traitement de grands réseaux sur lesquels l'expérience s'avère toujours difficile.

CHAPITRE 1

Établissement des équations de base.

Dans ce chapitre, les équations de base décrivant le régime transitoire dans les écoulements en conduite seront déduites en utilisant l'approche classique du théorème de transport de REYNOLDS.

Les équations développées sont:

- l'équation de continuité
- l'équation de la quantité de mouvement.

1-1: Théorème de transport de REYNOLDS

Ce théorème permet de lier les variables d'un système à celles du volume de contrôle choisi.

Hypothèses :

- le volume de contrôle est variable
- toute la masse du système est contenue dans le volume de contrôle.

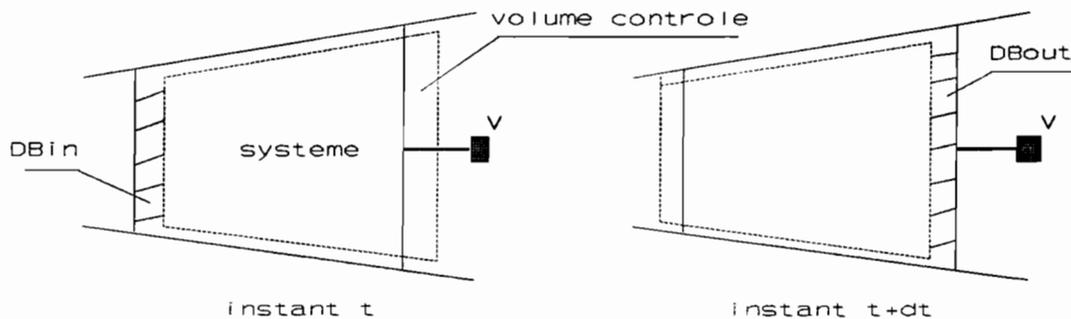


fig1 . Systeme et volume de controle.

Soit B une propriété extensive du fluide et b la propriété intensive correspondante, on a par définition :

$$b = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta m}$$

Soit B_{vc} la valeur de B relative à la quantité de fluide contenue dans le volume de contrôle, on a :

$$B_{vc} = \int_{v.c} w B dV$$

avec m :masse ; w :masse volumique, dV :élément de volume

Suivant la figure précédente on peut écrire les relations suivantes qui lient une variable du système à celle du volume de contrôle .

à l'instant t :

$$B_s(t) = B_{vc}(t) + \Delta B_{in}.$$

à l'instant $t+\Delta t$:

$$B_s(t + \Delta t) = B_{vc}(t + \Delta t) + \Delta B_{out}.$$

Soit $\frac{dB_s}{dt}$ le taux de variation de la propriété B dans le

système.

$$\frac{dB_s}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B_s(t + \Delta t) - B_s(t)}{\Delta t}$$

En remplaçant $B_s(t + \Delta t)$ et $B_s(t)$ par leurs valeurs on trouve:

$$\frac{dB_s}{dt} = \frac{dB_{vc}}{dt} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{out}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{in}}{\Delta t}$$

avec $\frac{dB_{vc}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} w \beta dV$ et $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta t} = (w \beta A V_s)$

$$\frac{dB_s}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} w \beta dV + (\beta w A V_s)_{out} - (\beta w A V_s)_{in}.$$

V_s représente la vitesse de l'écoulement à l'entrée ou à la sortie, mesurée par rapport au volume de contrôle. Comme le volume de contrôle est variable on a: $V_s = V - W$

avec V : vitesse du fluide et W : vitesse de la surface de contrôle à la section d'entrée ou à la section de sortie.

L'équation précédente devient:

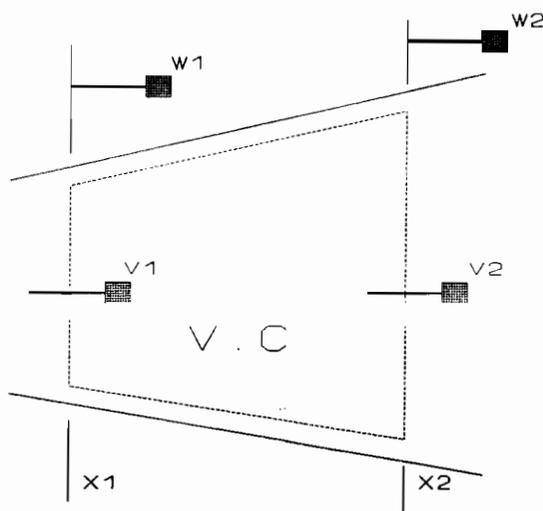
$$\frac{dBs}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V.C} w B dV + [BwA(V-W)]_{out} - [BwA(V-W)]_{in}$$

Cette équation représente le théorème de transport de REYNOLDS.

1-2: Équation de Continuité

Pour l'établissement de cette équation on considère les hypothèses suivantes:

- écoulement d'un fluide compressible dans une conduite à parois élastiques
- volume de contrôle variable
- écoulement unidimensionnel
- pression uniforme à l'entrée et à la sortie



En appliquant le théorème de transport de REYNOLDS avec $B=m$ on obtient:

$$\frac{dms}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} wA dx + w_2 A_2 (V_2 - W_2) - w_1 A_1 (V_1 - W_1)$$

La masse du système reste constante en fonction du

temps, alors $\frac{dm_s}{dt} = 0$, ainsi l'équation précédente devient:

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} w A dx + w_2 A_2 (V_2 - W_2) - w_1 A_1 (V_1 - W_1) = 0$$

Le développement du premier terme conduit à :

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} w A dx = \int_{x_1}^{x_2} w A dx + (w A W)_2 - (w A W)_1$$

L'équation générale devient alors :

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta}{\delta t} (w A) dx + (w A V)_2 - (w A V)_1 = 0$$

L'intégrale apparaissant au premier terme s'évalue par application du théorème de la valeur moyenne.

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta}{\delta t} (w A) dx = \frac{\delta}{\delta t} (w A) (x_2 - x_1) = \frac{\delta}{\delta t} (w A) \Delta x$$

En reportant l'expression de l'intégrale dans l'équation générale

on obtient:

$$\frac{\delta}{\delta t} (w A) \Delta x + (w A V)_2 - (w A V)_1 = 0$$

En divisant par Δx et faisant tendre Δx vers 0 ;

$$\frac{\delta}{\delta t}(w \dot{A}) + \frac{\delta}{\delta t}(w A \dot{V}) = 0$$

Après développement des termes entre parenthèses et réarrangement

des termes on obtient une expression qui divisée par $(w A)$ donne:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{w} \frac{dw}{dt} + \frac{\delta V}{\delta x} = 0$$

Pour faire intervenir dans l'équation, les variables P et V,

exprimons les dérivées totales de A et w en fonction de P et V.

-expression de $\frac{1}{w} \frac{dw}{dt}$

Soit K le module d'élasticité $K = \frac{dP}{(dw/w)}$

$$dw = \frac{w}{K} dP \implies \frac{dw}{dt} = \frac{w}{K} \frac{dP}{dt} \quad \text{d'où}$$

$$\frac{1}{w} \frac{dw}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dP}{dt}$$

-expression de $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$

Soit une conduite circulaire de rayon R:

$$\frac{dA}{dt} = 2 \pi R \frac{dR}{dt} = 2 \pi R^2 \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$$

Soit ϵ la déformation radiale de la conduite

$$d\epsilon = \frac{dR}{R} ; \quad \frac{dA}{dt} = 2 A \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\epsilon}{dt}$$

En admettant que les parois de la conduite se déforment radialement dans le domaine élastique linéaire on peut écrire que:

$$\epsilon = \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{E}$$

σ_2 : contrainte radiale

σ_1 : contrainte axiale

μ : coefficient de Poisson; E : module de Young.

Pour des conduites possédant des joints d'expansion qui reprennent l'effet des contraintes axiales on peut supposer $\sigma_1 = 0$ d'où $\epsilon = (\sigma_2/E)$

σ_2 est déterminé par une conduite où règne une pression p, comme suit: $\sigma_2 = pD/2e$ avec D pour diamètre et e pour épaisseur de la paroi .

Par dérivation de σ_2 on obtient :

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt} \quad (a)$$

Comme $\sigma_2 = E\epsilon$ alors:

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = E \frac{d\epsilon}{dt} \quad (b)$$

de même on peut écrire:
$$\frac{dD}{dt} = D \frac{d\epsilon}{dt} \quad (c)$$

En remplaçant (b) et (c) dans (a) on trouve

$$E \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{pD}{2e} \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt}$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{D}{2e} \frac{dP}{dt} / (E - (PD/2e)) \implies \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{DdP/(edt)}{E - (pD/2e)}$$

En remplaçant les valeurs de $(1/A)dA/dt$ et $1/w(dw/dt)$ dans l'équation principale on trouve :

$$\frac{dP}{dt} \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{[(eE/D) - (P/2)]} \right) + \frac{\delta V}{\delta x} = 0.$$

En négligeant le terme $P/2$ devant (eE/D) on obtient

$$\frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{eE/KD} \right) \frac{dP}{dt} = 0$$

en posant:

$$a^2 = \frac{K/w}{[1+DK/eE]} ; \quad a : \text{vitesse de l'onde de pression}$$

et en multipliant l'équation principale par (wa^2) et en développant

$$\frac{dP}{dt} \quad \text{on trouve:}$$

$$\rho a^2 \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{\delta P}{\delta t} + \frac{V \delta P}{\delta x} = 0 \quad (1.1)$$

Cette équation représente l'équation de continuité.

1-3 : Équation de quantité de mouvement

On considère la variable extensive $B = mV$; $\beta = V$

Par application de la seconde loi de Newton, on peut écrire

$d(mV)_s / dt = \Sigma F$ où ΣF est la somme des forces qui s'exercent sur le système par son entourage.

Par application du théorème de transport de REYNOLDS on trouve:

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} w V dV = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta}{\delta t} (wAV) dx + (wAV)_2 W_2 - (wAV)_1 W_1$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta}{\delta t} (wAV) dx + (wAV^2)_2 - (wAV^2)_1 = \Sigma F \quad (i)$$

Le terme en intégrale peut être approximer comme suit:

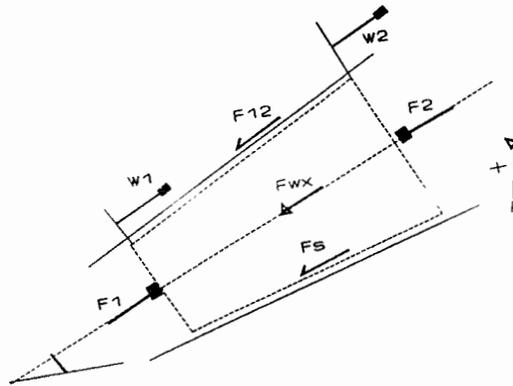
$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta}{\delta t} (wAV) dx = \frac{\delta}{\delta t} (wAV) \Delta x$$

En remplaçant la valeur de l'intégrale dans (i) et en divisant par Δx on obtient l'expression suivante:

$$\frac{\delta}{\delta t} (wAV) + ((wAV^2)_2 - (wAV^2)_1) / \Delta x = \Sigma F / \Delta x \quad (ii)$$

Les forces qui s'exercent sur le volume de contrôle sont:

- les forces de pression
- le poids du fluide
- les forces de frottement.



à la section 1 on a: $F_1 = P_1 A_1$

à la section 2 on a: $F_2 = P_2 A_2$

$$F_{12} = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (A_1 - A_2)$$

$$F_{wx} = wgA(x_2 - x_1) \sin\theta$$

$$F_s = \tau_0 \pi D (x_2 - x_1)$$

$$\Sigma F = P_1 A_1 - P_2 A_2 - \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (A_1 - A_2) - wgA(x_2 - x_1) \sin\theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1)$$

$$\Sigma F / \Delta x = (P_1 - P_2) (A_1 + A_2) / 2 \Delta x - wgA \sin\theta - \tau_0 \pi D.$$

En substituant la valeur de $(\Sigma F / \Delta x)$ dans l'expression (ii) et en faisant tendre Δx vers zéro on trouve:

$$\frac{\delta(wAV)}{\delta t} + \frac{\delta(wAV^2)}{\delta x} + \frac{A\delta P}{\delta x} + wgA \sin\theta + \tau_0 \pi D = 0$$

la contrainte de frottement peut s'évaluer par l'expression...

$$\tau_0 = \frac{1}{8} wfv|v|$$

l'expression de τ_0 peut être déduite pour un régime d'écoulement permanent, sans accélération de fluide dans un conduit à partir de l'équation de **DARCY WEISBACH**.

En remplaçant τ_0 par sa valeur dans l'équation globale on obtient:

$$V \left(\frac{\delta}{\delta t} (wA) + \frac{\delta}{\delta x} (wAV) \right) + wA \frac{\delta V}{\delta t} + wAV \frac{\delta V}{\delta x} + A \frac{\delta P}{\delta x} + wgA \sin \theta$$

$$+ (wAfv|v|)/2D = 0;$$

le terme entre parenthèse vaut zéro (continuité) d'où l'expression de l'équation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\delta V}{\delta t} + V \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{w} \frac{\delta P}{\delta x} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (1.2)$$

1-4: Analyse des paramètres:

les équations de continuité et de quantité de mouvement établies précédemment, décrivent l'écoulement d'un fluide en régime transitoire dans les conduites à parois élastiques.

Dans ces équations figurent différents paramètres et variables dont deux indépendantes x et t et deux dépendantes P et V . Les autres paramètres a, w, f, D représentent les caractéristiques du système et sont habituellement considérés indépendants du temps.

-Paramètre D:

Il représente le diamètre de la conduite, il n'est fonction que de la distance x (variation de la section de conduite suivant la longueur).

-Paramètre w :

Il représente la masse volumique du fluide, qui est généralement supposée constante pour la durée du régime transitoire.

-Paramètre f :

Il représente le coefficient de frottement, il est fonction du nombre de REYNOLDS donc varie en fonction de la vitesse mais cette variation affecte peu l'ordre de grandeur des variables de l'écoulement en régime transitoire, donc peut être négligée et f sera supposé constant.

-Paramètre a :

Il représente la vitesse de propagation de l'onde en régime transitoire, elle dépend des caractéristiques du système et des propriétés du fluide.

Elle peut être déterminée par l'expression suivante

$$a = \left(\frac{K}{w(1+K/E\Phi)} \right)^{1/2} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \Phi : \text{Paramètre addimensionnel} \\ \text{dépendant des propriétés du conduit} \end{array}$$

E: module de YOUNG

w: masse volumique.

Dans notre cas on peut considérer les conduites à joints d'expansion

on a $\Phi = D/e$

$$a = \left(\frac{K}{[w(1+KD/eE)]} \right)^{1/2} ;$$

Pour d'autres situations, des expressions de Φ sont élaborées afin de pouvoir évaluer la vitesse de propagation de l'onde de pression.

1-5: EQUATIONS SIMPLIFIEES:

Les équations de continuité et de quantité de mouvement établies précédemment peuvent être simplifiées en éliminant les termes relativement petits par rapport aux autres membres. Par exemple, dans diverses applications, les termes $V(\delta V/\delta x)$ et $V(\delta P/\delta x)$ sont négligeables devant respectivement $\delta V/\delta t$ et $\delta P/\delta t$, ainsi en les éliminant les équations deviennent :

$$\frac{\delta P}{\delta t} + wa^2 \frac{\delta V}{\delta x} = 0$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} + \frac{1}{w} \frac{\delta P}{\delta x} + \frac{fv|v|}{2D} + g \sin \theta = 0$$

Pour introduire dans ces équations, à la place de P et V des variables d'utilisation plus courante H et Q, on peut écrire les relations suivantes:

$$P = wg(H - Z) \quad H : \text{hauteur piézométrique ,}$$
$$Z : \text{hauteur statique conduite}$$
$$Q = VA \quad Q : \text{Débit volumique}$$

Pour une conduite horizontale $(dz/dx) = 0$ et $\sin \theta = 0$

$$\frac{\delta P}{\delta t} = wg \frac{\delta H}{\delta t} \quad \text{et} \quad \frac{\delta P}{\delta x} = wg \frac{\delta H}{\delta x}$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} = \frac{1}{A} \frac{\delta Q}{\delta t} \quad \text{et} \quad \frac{\delta V}{\delta x} = \frac{1}{A} \frac{\delta Q}{\delta x}$$

En remplaçant les dérivées partielles par leurs expressions dans les équations simplifiées on trouve:

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\delta Q}{\delta x} = 0$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0$$

Conditions initiales:

Les conditions initiales sont obtenues en admettant que l'écoulement était permanent avant l'apparition d'un régime transitoire quelconque.

Les équations du régime permanent peuvent être déduites de celles du régime transitoire en éliminant les termes de dérivation en fonction du temps .

Ainsi à l'instant initial $t=0$, les conditions seront

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \implies Q = c^{te}$$

$$gA \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0$$

la dernière équation se ramène à celle de DARCY-WEISBACH

$$\frac{\delta H}{\delta x} = f \frac{Q^2}{2gDA^2} \implies \Delta H = \frac{f \Delta x \cdot Q^2}{2gDA^2}$$

CHAPITRE 2

Méthodes numériques de résolution

Ce chapitre traite des méthodes numériques utilisées pour le traitement des équations en transitoire . Les méthodes développées sont :

- méthode des caractéristiques
- méthode des différences finies

Les critères de stabilité et la procédure de traitement général sont brièvement exposés.

2-1: Méthode des caractéristiques

Les équations dérivées au chapitre précédent, décrivant les écoulements transitoires dans les conduites, représentent un système d'équations différentielles aux dérivées partielles de type hyperbolique.

La méthode des caractéristiques est basée sur l'évolution des solutions le long de courbes dites "Courbes caractéristiques". Ces courbes sont déterminées de manière que le système d'équations possède une infinité de solutions.

Pour le développement de cette méthode, considérons les équations simplifiées déterminées au chapitre précédent

$$(2.1) \quad \frac{\delta Q}{\delta t} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + RQ|Q| = 0$$

$$(2.2) \quad \frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\delta H}{\delta t} = 0 \text{ avec } R = \frac{f}{2DA}$$

Ces équations sont fonction de deux variables (espace et temps).

Pour les ramener sous une forme ne faisant intervenir qu'une seule variable on fait une combinaison linéaire de ces deux équations.

$$\left(\frac{\delta Q}{\delta t} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + RQ|Q| \right) + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\delta H}{\delta t} \right) = 0$$

Posons $\lambda a^2 = 1/\lambda = dx/dt$ alors l'égalité précédente devient :

$$(2.3) \quad \frac{dQ}{dt} + \lambda gA \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0$$

A partir de la supposition $\lambda a^2 = 1/\lambda$ on tire:

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \text{ et } \frac{dx}{dt} = \pm a$$

$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = a \text{ on a: } \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (2.4)$$

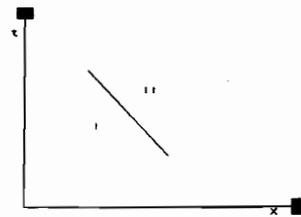
$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = -a \text{ on a: } \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (2.5)$$

Cette transformation nous conduit à une réduction de domaine de validité des équations .

Les équations (2.1) et (2.2) étaient valables en tout point du plan (x-t), par contre (2.4) et (2.5) ne sont applicables que suivant les droites de pente ($\pm 1/a$) dans le plan (x-t). Ces deux droites ($dx/dt = \pm a$) sont appelées "**droites caractéristiques**", elles délimitent le domaine de solutions influencées par les conditions initiales.

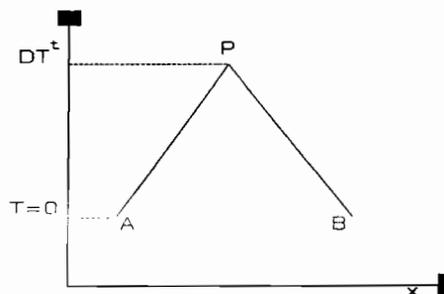
La signification physique des droites caractéristiques peut être mise en évidence, en considérant un cas simple comme l'écoulement dans une conduite ayant au bout un réservoir et à l'extrémité une vanne. Supposons qu'une réduction de débit, causée par la fermeture de la vanne a eu lieu, ceci provoquera une augmentation de pression et une propagation d'onde vers le réservoir. La représentation du trajet de l'onde sur un plan (x-t) fait apparaître deux régions:

La première région représente le domaine influencé par les conditions initiales (Celles du réservoir) qui restent inchangées; par contre la deuxième région est influencée par les conditions de vanne.



Si la perturbation est provoquée simultanément en deux points A et B , la région influencée par les conditions initiales aux points A et B sera le domaine situé sous les deux droites.

La résolution des équations (2.4) et (2.5) par la méthode de caractéristiques consiste à déterminer la hauteur et le débit au point P connaissant les valeurs initiales aux points A et B.



Soient Q_p et H_p les paramètres recherchés au point P. En multipliant l'équation (2.4) par dt et en intégrant

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q|dt = 0$$

$$(Q_p - Q_a) + \frac{gA}{a} (H_p - H_a) + R \int_A^P Q|Q|dt = 0$$

le terme de droite peut être évalué comme suit :

$$\int_A^P Q|Q|dt = Q_A|Q_A|dt$$

(en supposant le débit constant de A à P).

Suivant le degré de précision voulu on peut procéder à d'autres approximations, mais elles font intervenir l'inconnu Q_p d'où la nécessité de procédure itérative pour évaluer au mieux le terme.

Ainsi l'équation devient:

$$Q_p - Q_a + \frac{gA}{a}(H_p - H_a) + R \Delta t Q_a |Q_a| = 0$$

Par la même démarche, l'équation (2.5) peut aussi s'écrire:

$$Q_p - Q_b + \frac{gA}{a}(H_p - H_b) + R \Delta t Q_b |Q_b| = 0$$

En combinant les variables connues, les équations deviennent respectivement :

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad \text{-Caractéristique positive}$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad \text{-Caractéristique négative}$$

$$C_p = Q_a + \frac{gA}{a} H_a - R \Delta t Q_a |Q_a|$$

$$C_n = Q_b + \frac{gA}{a} H_b - R \Delta t Q_b |Q_b|$$

$$C_a = gA/a$$

C_p et C_n peuvent être déterminés à partir de l'état initial ou à partir des valeurs calculées à l'intervalle de temps précédent. C_a ne dépend que des propriétés des conduites et ne varie pas en fonction du temps.

En résolvant les deux caractéristiques on trouve:

$$Q_p = \frac{1}{2}(C_p + C_n)$$

H_p peut se calculer par substitution de la valeur de Q_p dans l'une des caractéristiques.

2-2: Méthode des différences finies

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences finies dans les équations gouvernant le phénomène .

Dans la littérature différents schémas de résolution sont disponibles. Pour notre application, il sera question du schéma explicite suivant:

$$\frac{\delta H}{\delta t} = \frac{H_i^{j+1} - \frac{1}{2}(H_{i+1}^j + H_{i-1}^j)}{\Delta t}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{Q_i^{j+1} - \frac{1}{2}(Q_{i+1}^j + Q_{i-1}^j)}{\Delta t}$$

$$\frac{\delta H}{\delta x} = \frac{H_{i+1}^j - H_{i-1}^j}{2 \Delta x}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = \frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2 \Delta x}$$

L'indice i se réfère à l'espace et j au temps.

En remplaçant ces expressions dans les équations du système on obtient les expressions de Calcul suivantes:

$$Q_i^{j+1} = \frac{1}{2}(Q_{i+1}^j + Q_{i-1}^j) - \frac{1}{2}gA \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{i+1}^j - H_{i-1}^j) - R \Delta t \bar{Q}_i |\bar{Q}_i|$$

$$H_i^{j+1} = \frac{1}{2}(H_{i+1}^j + H_{i-1}^j) - \frac{1}{2}gA \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \frac{a^2}{gA} (Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j)$$

$$\text{ou } \bar{Q}_i = \frac{1}{2}(Q_{i+1}^j + Q_{i-1}^j)$$

$$X_i^j = X(i. \Delta x, j. \Delta t)$$

Choix des pas d'espace et de temps

Théoriquement les critères de stabilité numérique pour les schémas de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles ne peuvent être déterminés que pour des équations linéaires.

Pour des équations non linéaires, des critères peuvent être déterminés en résolvant ces équations pour différentes valeurs de $(\Delta x / \Delta t)$ et en faisant une analyse des résultats obtenus.

Le critère de stabilité du schéma de résolution par les différences finies exposé précédemment est déterminé analytiquement en utilisant le critère de stabilité de VON NEUMANN . Ce critère est le respect de l'inégalité $\Delta x \geq a \Delta t$

où Δx : pas d'espace

Δt : pas de temps

a : célérité de l'onde

Ainsi le choix du pas d'espace et du pas de temps devrait être fait en respectant le critère de stabilité.

Pour la méthode des caractéristiques, on aura à respecter l'égalité $(\Delta x = a \Delta t)$, qui est imposée par la validité des équations utilisées . Ceci nous conduit à utiliser différents pas d'espace le long d'un réseau où les conduites ont des célérités différentes.

Le régime transitoire dans les installations hydrauliques peut être analysé en utilisant l'une des méthodes numériques décrites précédemment. Ainsi la procédure de traitement à suivre consiste à:

- 1- déterminer la discrétisation spatiale du réseau en respectant le critère de stabilité de la méthode numérique choisie.
- 2- calculer l'état du réseau en régime permanent à partir des conditions initiales développées dans le chapitre précédent.
- 3- déterminer les paramètres hauteur - débit aux points intermédiaires pour le temps suivant à l'aide de l'une des méthodes numériques
- 4- calculer les conditions aux frontières.

Et ainsi de suite, en prenant les valeurs calculées comme valeurs initiales on peut continuer le traitement pour le pas de temps suivant jusqu'à épuisement de la durée de simulation souhaitée.

Le calcul au niveau des frontières, sera fait par différentes procédures développées pour chaque type de frontière et basées essentiellement sur la résolution d'un système composé des équations d'évolution le long des caractéristiques et des équations de la frontière.

CHAPITRE 3

CALCUL DES FRONTIERES

Dans cette partie, les méthodes de calcul des frontières usuellement rencontrées dans les réseaux, seront présentées.

Ces méthodes consistent essentiellement à résoudre un système d'équations constitué des **caractéristiques** et des équations qui peuvent être dérivées au niveau de la **frontière**.

Les types de frontière abordés sont:

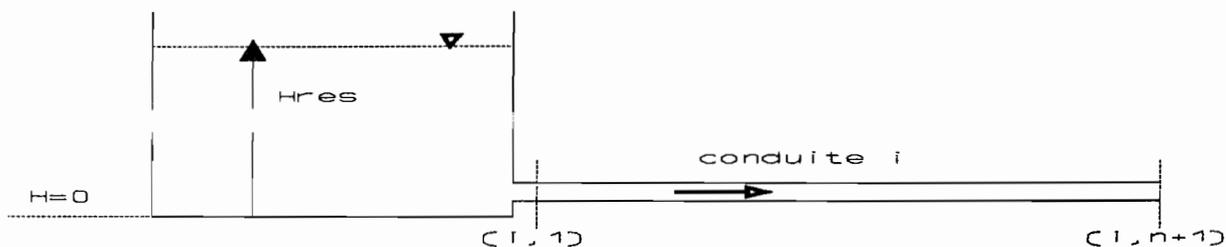
- Les réservoirs
- Les pertes locales
- Les branchements
- Les vannes
- Les pompes.

3-1: RESERVOIRS

Un réservoir constitue une frontière fréquemment rencontrée dans les réseaux. Il peut être en amont ou en aval d'une conduite

Réservoir en amont :

soit un réservoir placé à l'amont d'une conduite i



La hauteur manométrique $H_{p,i,1}$ (au noeud 1) est déterminée par l'expression suivante :

$$H_{p,i,1} = H_{res} - (1+k) Q_{p,i,1}^2 / 2gA_i^2$$

avec k : coefficient de perte de charge à la sortie du réservoir

A_i : section de la conduite i .

Cette équation spécifie la condition imposée par le réservoir. En la résolvant avec la caractéristique négative déterminée au premier noeud ,

$$Q_{p,i,1} = C_{n_i} + C_{a_i} H_{p,i,1} \quad \text{on obtient :}$$

$$Q_{p,i,1} = [-1 + (1+4k_1 (C_{n_i} + C_{a_i} H_{res}))] / 2 k_1$$

$$\text{avec } k_1 = C_{a_i} (1+k) / 2gA_i^2$$

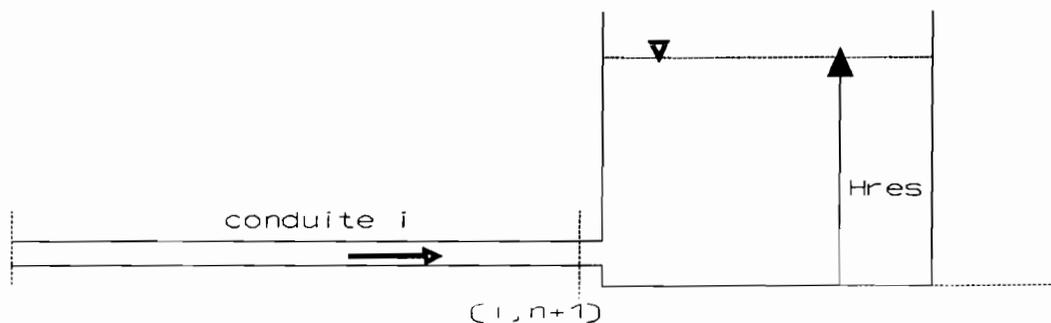
$$\text{et } H_{p,i,1} = (Q_{p,i,1} - C_{n_i}) / C_{a_i}$$

En supposant que la hauteur manométrique du réservoir reste constante durant la durée de simulation , on peut négliger le terme $(1+k)Q_{p,i,1}^2 / 2gA_i^2$ alors les expressions se simplifient comme suit:

$$H_{p,i,1} = H_{res}$$

$$Q_{p,i,1} = C_{n_i} + C_{a_i} H_{res}$$

Réservoir en aval:



Comme précédemment , la hauteur manométrique à l'entrée du réservoir peut se déterminer par l'expression :

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{res} - (1-k) Q_{p_{i,n+1}}^2 / 2gA_i^2$$

où k représente le coefficient de perte de charge.

Cette équation combinée avec la caractéristique positive

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} + C_{a_i} H_{p_{i,n+1}}$$

nous donne l'expression du débit :

$$Q_{p_{i,n+1}} = [1 - (1 - 4k_2(C_{p_i} - C_{a_i} H_{res}))^{0.5}] / 2 k_2$$

$$\text{avec } k_2 = C_{a_i} (1-k) / 2 g A_i^2$$

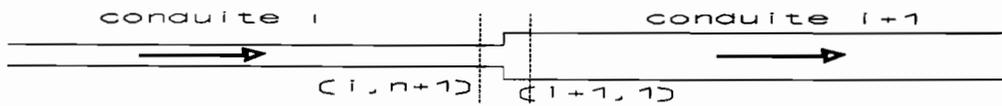
La hauteur manométrique $H_{p_{i,n+1}}$ se calcule ,connaissant le débit à partir de l'équation caractéristique.

$$H_{p_{i,n+1}} = (Q_{p_{i,n+1}} - C_{p_i}) / C_{a_i}$$

NOTE :

Dans les deux positions du réservoir, si le sens de l'écoulement est inversé, la valeur de k sera considérée négative.

3-2 : PERTES LOCALES



Au niveau de la perte locale, on cherche à déterminer la hauteur et le débit aux noeuds entourant la singularité. Pour cela on dispose de quatre équations :

- $Qp_{i,n+1} = Cp_i - Ca_i Hp_{i,n+1}$ **Caractéristique positive**
- $Qp_{i+1,1} = Cn_{i+1} + Ca_{i+1} Hp_{i+1,1}$ **Caractéristique négative**
- $Hp_{i,n+1} - Hp_{i+1,1} = kQp_{i,n+1}^2 / 2g A^2_i$ **Perte locale**
- $Qp_{i,n+1} = Qp_{i+1,1}$ **Continuité**

k désigne le coefficient de perte de charge locale.

En résolvant le système d'équations on aboutit aux expressions suivantes :

$$R = (Ca_i + Ca_{i+1}) / Ca_i Ca_{i+1}$$

$$V = k / 2g A^2_i$$

$$T = (Cp_i Ca_{i+1} + Ca_i Cn_{i+1}) / Ca_i Ca_{i+1}$$

$$Qp_{i+1,1} = Qp_{i,n+1} = \frac{1}{2} (-R + (R^2 + 4 T V)^{1/2})$$

Connaissant les débits, on peut déterminer les hauteurs manométriques à partir des équations caractéristiques.

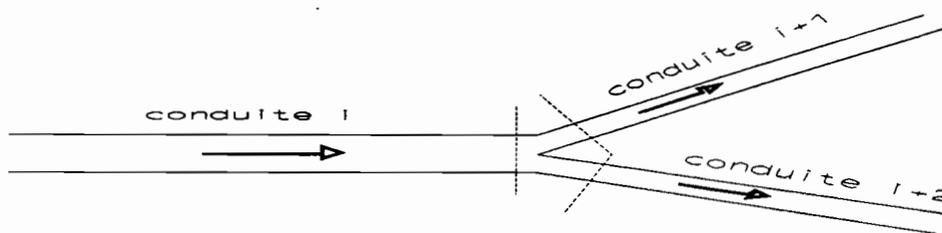
$$Hp_{i,n+1} = (Cp_i - Qp_{i,n+1}) / Ca_i$$

$$Hp_{i+1,1} = (Qp_{i+1,1} - Cn_{i+1}) / Ca_{i+1}$$

Lorsque le sens de l'écoulement est inversé pendant la durée de simulation la valeur de k sera considérée négative.

3-3: Branchement de plusieurs conduites:

Soit le système de trois conduites suivant :



Pour déterminer les variables Q et H aux premiers noeuds des conduites $(i+1)$, $(i+2)$ et au noeud $(n+1)$ de la conduite i , on peut écrire les équations suivantes :

$$Q_{p_{i,n+1}} = Q_{p_{i+1,1}} + Q_{p_{i+2,1}} \quad \text{Continuite}$$

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n+1}}$$

$$Q_{p_{i+1,1}} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,1}} \quad \text{Caractéristiques}$$

$$Q_{p_{i+2,1}} = C_{n_{i+2}} + C_{a_{i+2}} H_{p_{i+2,1}}$$

En négligeant la perte de charge au niveau de la jonction on peut écrire que :

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} = H_{p_{i+2,1}}$$

En combinant toutes ces équations ensemble on déduit l'expression de H_p .

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} = H_{p_{i+2,1}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}}$$

Connaissant les hauteurs aux différents noeuds, les débits peuvent être calculés à partir des équations caractéristiques.

En général, si on a un branchement de plusieurs conduites, la procédure est identique à celle développée pour trois conduites.

Soit un branchement constitué de :

- (s+1) conduites en amont
- v conduites en aval.

En écrivant l'équation de continuité et les équations caractéristiques, et en se servant de l'égalité des hauteurs manométriques développées aux noeuds on aboutit à l'expression générale suivante:

$$H_p = \frac{\sum_{j=i}^{i+s} C_{p_j} - \sum_{j=i+s+1}^{i+s+v} C_{n_j}}{\sum_{j=i}^{i+s+v} C_{a_j}}$$

Connaissant les différents H_p , on peut calculer les débits au niveau de chaque noeud en considérant l'équation caractéristique correspondante.

Cas particulier:

Si on a un branchement entre deux conduites i et $(i+1)$ les équations deviennent :

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}}$$

$$Q_{p_{i,n+1}} = Q_{p_{i+1,1}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n+1}}$$

3-4: VANNES

La manipulation des vannes est la principale cause de transitoire, elles représentent un type de frontières fréquemment rencontré sur les réseaux .

Pour déduire le modèle décrivant la vanne, considérons qu'un régime permanent d'écoulement à travers une vanne est décrit par :

$$Q_o = (Cd Av)_o (2gH_{o, i, n+1})^{1/2}$$

Si la vanne est placée au noeud (n+1) de la i^{eme} conduite on a :

$$Q_{oi, n+1} = (Cd Av)_o (2g H_{oi, n+1})^{1/2}$$

où Cd : Coefficient de perte de charge

Av : Section de passage de la vanne.

En regime transitoire , on admet que l'écoulement est décrit par une relation similaire à celle du régime stationnaire .

$$Q_{pi, n+1} = (Cd Av) (2gH_{pi, n+1})^{1/2}$$

En combinant les deux expressions on peut écrire :

$$\frac{Q_{pi, n+1}}{Q_{oi, n+1}} = \frac{Cd Av}{(Cd Av)_o} \left(\frac{H_{pi, n+1}}{H_{oi, n+1}} \right)^{1/2}$$

En posant $\tau = \frac{Cd Av}{(Cd Av)_o}$ et en élevant les deux membres de

l'équation au carré on trouve :

$$Q_{pi, n+1}^2 = \frac{H_{pi, n+1}}{H_{oi, n+1}} (\tau Q_{oi, n+1})^2$$

La caractéristique positive au noeud (n+1) de la i^{eme} conduite s'écrit:

$$Q_{pi, n+1} = C_{pi} - C_{ai} H_{pi, n+1}$$

La résolution des deux dernières équations nous conduit à :

$$Q_{p_{i,n+1}} = \frac{1}{2} (-Cv + (Cv^2 + 4 Cv C_{p_i})^{1/2})$$

$$\text{où } Cv = (\tau Q_{o_{i,n+1}})^2 / (Ca_i H_{o_{i,n+1}})$$

$$H_{p_{i,n+1}} = (C_{p_i} - Q_{p_{i,n+1}}) / Ca_i$$

Avec ces deux dernières équations on peut calculer Q_p et H_p au noeud sur lequel est placée la vanne .

τ est une caractéristique de la vanne et est fournie sous forme de graphiques ou tableaux par les manufacturiers, en fonction du temps de manoeuvre .

Lorsque la vanne n'est pas manipulée, son degré d'ouverture est le même durant toute la durée du régime transitoire. Ainsi τ devient constante et les valeurs de H et Q seront déterminées par des expressions similaires à celles d'une vanne manipulée avec $\tau = \tau_0 = \text{cste}$

3-5: Pompes

L'une des causes du transitoire dans les installation hydrauliques est le démarrage , l'arrêt ou la perte de puissance au niveau d'une pompe. Le transitoire des pompes peut être analysé en développant un modèle basé sur les équations de fonctionnement et sur les caractéristiques .

Modèle mathématique d'une pompe :

La représentation mathématique d'une pompe est basée sur les quatre variables (hauteur - couple - vitesse - débit) dont les relations de dépendances sont exprimées par des courbes dites " **courbes caractéristiques de fonctionnement** " .

Ces variables sont habituellement mises sous forme adimensionnelle comme suit :

$$v = \frac{Q}{Q_0} \quad , \quad h = \frac{H}{H_0} \quad , \quad \alpha = \frac{N}{N_0} \quad , \quad \beta = \frac{T}{T_0}$$

où Q: débit , H : hauteur , N : vitesse , T : couple .

Q_0 , H_0 , N_0 , T_0 représentent le fonctionnement normal .

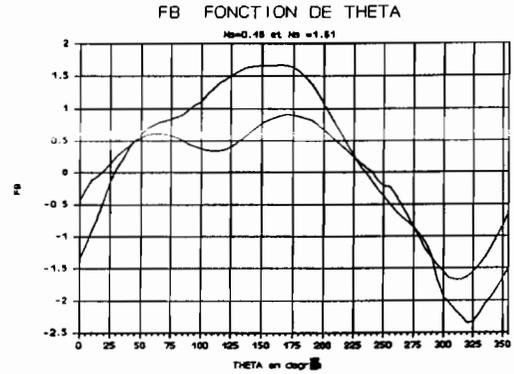
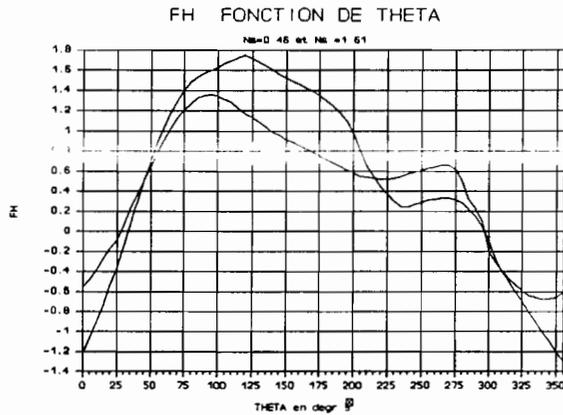
Durant les conditions normales de fonctionnement h, v, α et β sont positives mais elles peuvent devenir négatives, individuellement ou en groupe durant le régime transitoire, modifiant ainsi le fonctionnement de la pompe.

Dans ces conditions la pompe peut fonctionner en zone de dissipation ou en turbine ($H > 0$, $Q < 0$, $N < 0$) .

Pour l'analyse du régime transitoire les courbes caractéristiques de fonctionnement disponibles dans la littérature sont exprimées comme relations entre les groupes de variables adimensionnelles :

$$\theta = \arctg \left(\frac{\alpha}{v} \right) \quad , \quad FH = \frac{h}{(\alpha^2 + v^2)} \quad , \quad FB = \frac{\beta}{(\alpha^2 + v^2)}$$

Ainsi la courbe caractéristique de pression représente une relation entre FH et θ de même la courbe caractéristique du couple représente une relation entre FB et θ .



Pour déterminer l'état de fonctionnement d'une pompe caractérisée par les inconnues v_p , h_p , α_p et β_p considérons que ces paramètres sont connus à un instant initial i et on veut les évaluer à l'instant $(i+1)$.

Pour déterminer ces paramètres, on doit déterminer le point de fonctionnement de la pompe sur les courbes en approximant ces dernières localement par des segments de droites dont on cherchera à déterminer les équations. Ainsi on procède à une estimation des valeurs :

$$\alpha_e = \alpha_i + \delta\alpha_{i-1}$$

$$v_e = v_i + \delta v_{i-1}$$

α_e , v_e : valeurs estimées

$\delta\alpha_{i-1}$, δv_{i-1} : variations durant le temps $(i-1)$.

Ainsi connaissant θ_e calculée à partir de α_e et v_e on peut déterminer, à partir des courbes les valeurs de FH et FB correspondant à θ_e . A partir des valeurs estimées on peut déterminer les équations des segments de droites sur lesquels se situeront les points de fonctionnement de la pompe .

Les équations des segments sont:

$$\frac{h_p}{(\alpha_p^2 + v_p^2)} = a_1 + a_2 \operatorname{arctg}\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\beta_p}{(\alpha_p^2 + v_p^2)} = a_3 + a_4 \operatorname{arctg}\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) \quad (2)$$

où a_1 , a_2 , a_3 , a_4 sont des constantes intervenant dans les équations des segments des droites .

Pour déterminer le comportement de la pompe durant le régime transitoire, écrivons les équations caractéristiques, l'équation de continuité, l'équation d'inertie et l'équation de charge.

- Equation de charge:

Soit une pompe à suction courte, possédant une charge à l'aspiration H_{suc} et contrôlée par une vanne de coefficient de perte de charge C_v . Si la pompe est placée au premier noeud de la conduite i on peut écrire :

$$H_{p_{i,1}} = H_{suc} + H_p - C_v Q_{p_{i,1}} |Q_{p_{i,1}}| \quad (3)$$

- Equation de continuité:

$$Q_{p_{i,1}} = Q_p \quad \text{débit à travers la pompe} \quad (4)$$

- Caractéristique négative:

$$Q_{p_{i,1}} = C_n + C_a H_{p_{i,1}} \quad (5)$$

- Equation d'inertie :

Le couple de décélération développé au niveau d'une pompe après une perte de puissance s'exprime par la relation :

$$T = - I \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)$$

où I : inertie et Ω : vitesse angulaire

$$T = - I \left(\frac{2\pi}{60} \right) \left(\frac{dN}{dt} \right)$$

Sous forme adimensionnelle on peut écrire :

$$\beta = - I \frac{2\pi}{60} \frac{N_0}{T_0} \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)$$

avec T_0 couple initial en fonctionnement normal

N_0 vitesse de rotation en fonctionnement normal.

En écrivant les différentielles sous forme de différences finies et après quelques simplifications on obtient :

$$\alpha_p - C_6 \beta_p = \alpha + C_6 \beta \quad (6)$$

$$\text{avec } C_6 = (-15 T_0 \Delta t) / (\pi I N_0)$$

α , β sont des valeurs moyennes sur le temps considéré.

Pour développer les conditions à la frontière de la pompe on dispose de six équations, qu'on cherchera à résoudre. Les équations (3), (4) et (5) combinées et après quelques transformations nous donne l'équation générale :

$$Q_0 v_p = C_n + C_a H_{suc} + C_a H_o h_p - C_a C_v Q_0^2 v_p |v_p| \quad (7)$$

L'équation (7) combinée aux équations (1), (2) et (6) forme un système de quatre équations à quatre inconnues qui déterminent le

fonctionnement de la pompe. En éliminant h_p et β_p entre ces équations on retrouve les deux grandes équations suivantes :

$$F_1 = C_a H_o a_1 (\alpha_p^2 + v_p^2) + C_a H_o a_2 (\alpha_p^2 + v_p^2) \arctg\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) - Q_o v_p \\ - C_a C_v Q_o^2 v_p |v_p| + C_n + C_a H_{suc} = 0$$

$$F_2 = \alpha_p - C_6 a_3 (\alpha_p^2 + v_p^2) - C_6 a_4 (\alpha_p^2 + v_p^2) \arctg\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) - \alpha \\ - C_6 \beta = 0$$

Ces deux dernières équations peuvent être résolues de manière itérative par la méthode de NEWTON - RAPHSON. Ainsi en partant des valeurs estimées initiales on cherchera à améliorer la solution jusqu'à obtention de la précision désirée.

Connaissant α_p , v_p on pourra calculer h_p et β_p à partir des équations (1) et (2), ainsi l'état de fonctionnement de la pompe est considéré connu.

Les équations établies précédemment sont valables pour une seule pompe ayant une conduite de suction négligeable.

Pour déterminer les conditions aux frontières de plusieurs pompes en parallèle, les équations deviennent :

-Suction courte :

Soit n_p le nombre de pompes identiques en parallèle.

L'équation (7) devient :

$$n_p Q_o v_p = C_n + C_a H_{suc} + C_a H_o h_p - C_a C_v Q_o^2 v_p |v_p| \\ \text{de même l'expression de } F_1 \text{ devient :}$$

$$F_1 = C_a H_o a_1 (\alpha_p^2 + v_p^2) + C_a H_o a_2 (\alpha_p^2 + v_p^2) \arctg\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) - n_p Q_o v_p \\ - C_a C_v Q_o^2 v_p |v_p| + C_v + C_a H_{suc} = 0$$



-Suction non négligeable:

En considérant la caractéristique positive correspondante à la conduite de suction et l'équation de continuité l'expression de F_1 devient :

$$F_1 = a_1 (\alpha_p^2 + v_p^2) + a_2 (\alpha_p^2 + v_p^2) \arctg\left(\frac{\alpha_p}{v_p}\right) - C_7 v_p + C_8 = 0$$

$$C_7 = \frac{n_p (Ca_i + Ca_{i+1}) Q_0}{Ca_i Ca_{i+1} H_0}$$

$$C_8 = \frac{Ca_i C_n + C_p Ca_{i+1}}{Ca_i Ca_{i+1} H_0}$$

Les autres expressions sont identiques à celles déduites précédemment .

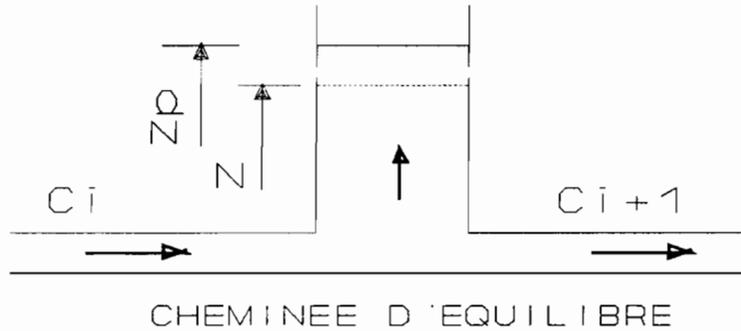
CHAPITRE 4
CONTROLE DU TRANSITOIRE

Présentation sommaire des éléments de
contrôle du transitoire :

- cheminée d'équilibre
- chambre à air
- valves

Les éléments de contrôle en régime transitoire ont pour rôle d'atténuer, voire éliminer les effets indésirables. Leur fonctionnement est basé essentiellement sur la réduction de la vitesse de l'écoulement afin de maintenir la pression dans des limites convenables.

4-1 : Cheminée d'équilibre :



Le principe de fonctionnement d'une cheminée d'équilibre est basé sur la variation du niveau dans la cheminée pour contrôler la pression dans la conduite. Son effet peut être analysé par les équations suivantes :

$Q_{p_{i,n+1}} = C_p - C_{a_i} H_{p_{i,n+1}}$	Carac. positive
$Q_{p_{i+1,1}} = C_n + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,1}}$	Carac. négative
$Q_{p_{i+1,1}} = Q_{p_{i,n+1}} - Q_{p_c}$	Continuité
$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} = Z_p$	Charge

Le niveau d'eau dans la cheminée Z_p à l'instant $(t+\delta t)$ peut être déterminé connaissant le niveau Z à l'instant t par :

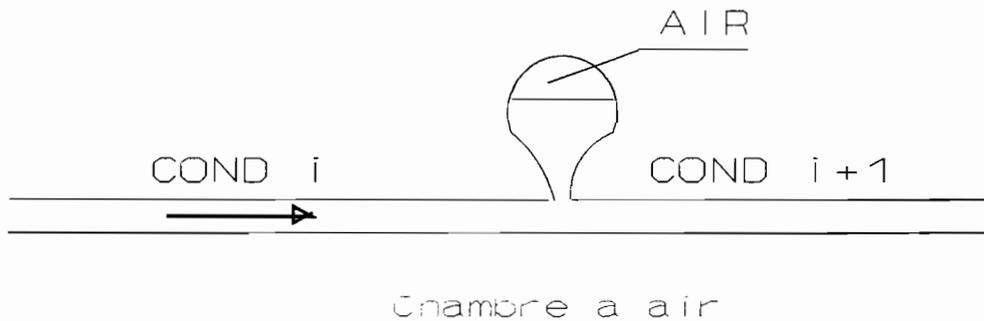
$$Z_p = Z + (Q_{p_c} + Q_c) \delta t / 2A_c$$

- où
- A_c : Section de la cheminée
 - Q_{p_c} : débit à travers la cheminée à l'instant $(t+\delta t)$
 - Q_c : débit à travers la cheminée à l'instant t .

La résolution de l'ensemble des équations nous donne l'expression suivante :

$$H_{p_{i,n+1}} = \frac{C_p - C_n + Q_c + (2A_c Z/\delta t)}{Ca_i + Ca_{i+1} + (2A_c/\delta t)}$$

4-2 : Chambre à air :



Une chambre à air est une enceinte contenant de l'air sous pression connectée à une conduite avec laquelle elle communique par un orifice aménagé à leur intersection.

La chambre à air contribue à atténuer les transitoires en ajustant la vitesse de l'écoulement dans la conduite. Et ceci grâce à un débit sortant pour augmenter la pression et un débit entrant pour réduire les surpressions.

4-3 : Les valves :

Les valves sont des éléments très utilisés dans le contrôle du transitoire , elles agissent de différentes manières :

- par fermeture ou ouverture afin de contrôler la vitesse de l'écoulement qui régularise la pression.
- par réduction rapide du débit en évacuant un débit sortant ce qui permet de réduire les pics de pression.
- par admission d'air dans la conduite , ce qui permet d'éviter que la pression atteigne la pression de vapeur du liquide.

Parmi les valves les plus couramment rencontrées on distingue :

- Les valves de sécurité
- Les valves de régulation de pression
- Les valves à admission d'air
- Les valves de contrôle.

CHAPITRE 5

Description et utilisation du programme

Dans ce chapitre ,il s'agit d'une présentation sommaire de la structure du programme réalisé et d'un aperçu sur son utilisation .

5-1: Structure et organigramme.

"HYTRPROG" est un programme de simulation des écoulements en régime transitoire dans les réseaux de conduites, écrit en TURBO - PASCAL version 4. Il permet de traiter la plupart des réseaux hydrauliques contenant les éléments habituels comme :

réservoir - branchements - pertes locales - vannes - pompes.

Le transitoire peut être généré, soit par la manipulation d'une vanne ou la perte de puissance au niveau d'une pompe.

La taille du réseau qui peut être traité est limité à vingt conduites et à dix éléments de chaque type.

HYTRPROG est un programme interactif utilisant un mode de communication général par menus et questions - réponses, ce qui facilite grandement son utilisation.

Le programme est structuré en trois grandes parties interconnectées qui jouent les rôles suivants :

a : Saisie et contrôle des données :

Cette partie permet à l'utilisateur, d'introduire les caractéristiques du réseau et les paramètres de simulation à l'ordinateur . Elle offre aussi la possibilité de sauvegarder ces données sur disque en vue d'une utilisation ultérieure.

b : Sortie -entrée :

Cette partie traite les entrées et sorties, elle permet la sortie des données et des résultats sur écran ou sur imprimante. L'accès à cette partie du programme peut être sélectionné à partir du menu principal.

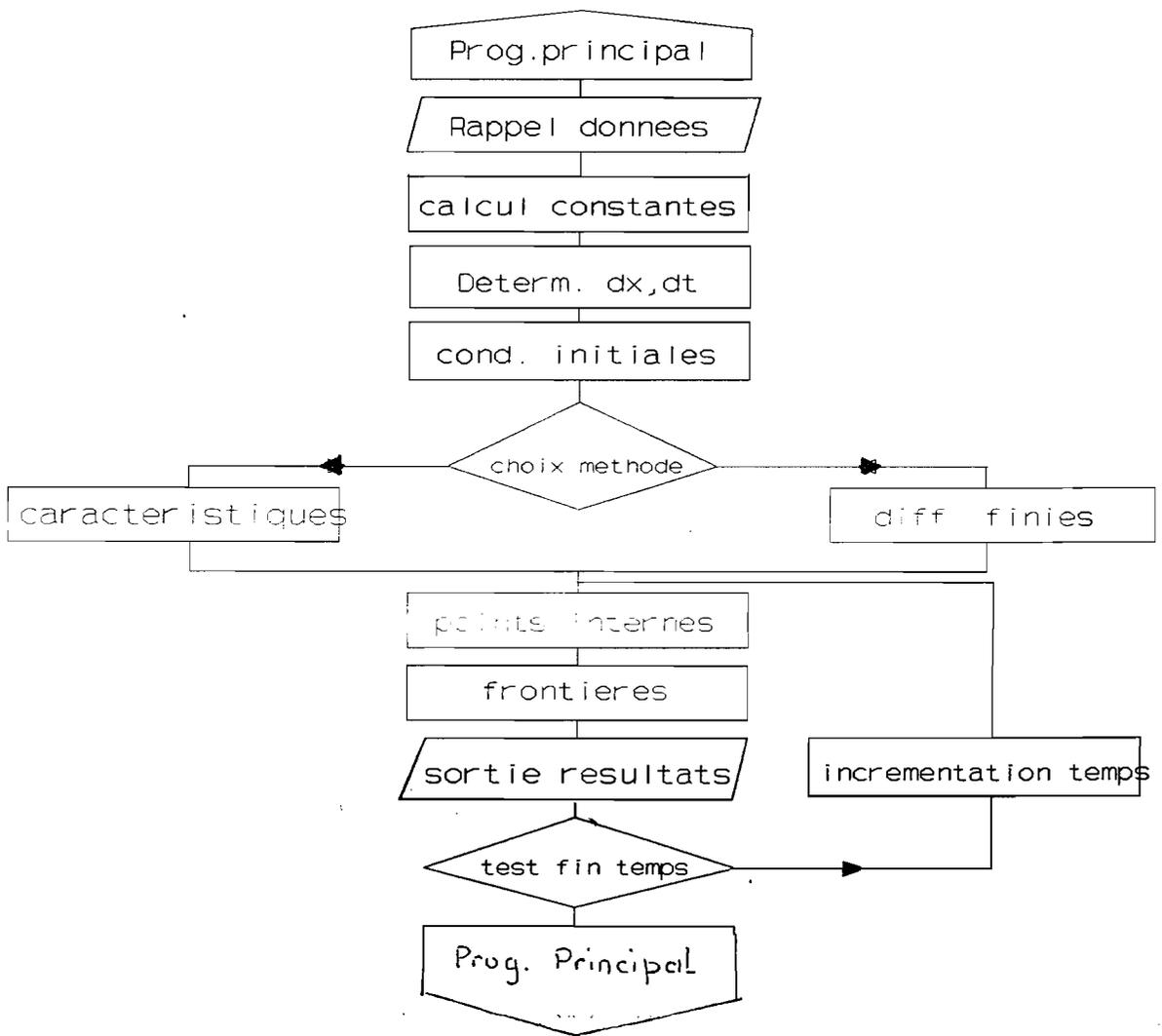
c : Traitement :

Cette partie essentielle, constitue le corps du programme, elle permet de rappeler le fichier des données en mémoire, offrir le

choix de la méthode numérique de calcul (caractéristiques ou différences finies), puis exécuter les calculs nécessaires pour la simulation en temps requis de l'écoulement dans le réseau.

Les résultats fournis sont automatiquement transférés sur disque en vue d'une analyse ou étude éventuelle. Les calculs sont effectués par des modules spécifiques à chaque type de frontière et un module général pouvant traiter les points intermédiaires des conduites.

ORGANIGRAMME GENERAL DE TRAITEMENT



5-2 : Utilisation :

L'utilisation de ce programme exige une certaine représentation du réseau sur lequel on désire faire la simulation .

L'utilisateur doit numérotter l'ensemble des conduites et frontières et distinguer les différents types de ces dernières.

Pour le calcul du réseau en régime permanent, l'utilisateur doit fournir au programme la pression et le débit au premier noeud de chaque conduite.

Les informations sur le réseau dont le programme aura besoin sont essentiellement les caractéristiques de chaque élément, ainsi pour les conduites il y a lieu de fournir :

- Longueur
- Diamètre
- Coefficient de frottement
- Célérité de l'onde

et pour les frontières, on doit introduire le code correspondant au type de la frontière et fournir les informations que le programme demandera pour le traitement de la frontière.

La localisation de la frontière est assurée par les numéros de la conduite en amont et de celle en aval (amont et aval se réfèrent au sens de l'écoulement en régime permanent).

Les codes des frontières sont :

- 1- Réservoir en amont
- 2- Réservoir en aval
- 3- Jonction de deux conduites
- 4- Pertes locales
- 5- Vanne non manipulée
- 6- Vanne manipulée

- 7- Pompe en fonctionnement normal
- 8- Pompe en perte de puissance
- 9- Branchement de plusieurs conduites
- 10- Cheminée d'équilibre

Si une frontière se trouve à une extrémité du réseau, l'un des numéros des conduites qui la localisent sera précisé égal à zéro. L'utilisateur aura à entrer le pas d'espace pour la discrétisation du réseau, ainsi connaissant ce pas, le programme le considérera valable pour la conduite ayant la plus grande célérité et déterminera à partir des caractéristiques de cette conduite le pas de temps pour l'exécution.

Les autres conduites seront discrétisées spatialement de manière à garder le pas de temps constant et à respecter la condition de stabilité imposée par la méthode numérique utilisée.

Afin d'éviter des durées d'exécution assez longues il va falloir s'arranger à donner une discrétisation spatiale conforme au critère de stabilité, permettant d'aboutir à un pas de temps convenable.

Les caractéristiques des éléments pouvant générer le transitoire comme les vannes et les pompes, sont introduites sous forme de fichiers texte qui seront chargés en mémoire lors de l'exécution et l'état de l'élément en question sera déterminé par une interpolation linéaire sur un segment de la courbe qui le décrit.

Enfin, notons que les noms des fichiers de travail du programme sont laissés au choix de l'utilisateur.

Ce dernier précisera les noms sans indication du lecteur car le programme stocke sous les fichiers de travail (**données- résultats- caractéristiques de fonctionnement**) sur le disque du lecteur B.

Remarque importante:

Après introduction des données à l'ordinateur, l'utilisateur est tenu de sélectionner l'option de sauvegarde pour transférer les données sur fichier en vue de leur rappel par le programme de calcul lors de l'exécution, (l'exécution ne peut avoir lieu sans fichier de données).

CHAPITRE 6

CAS TRAITES

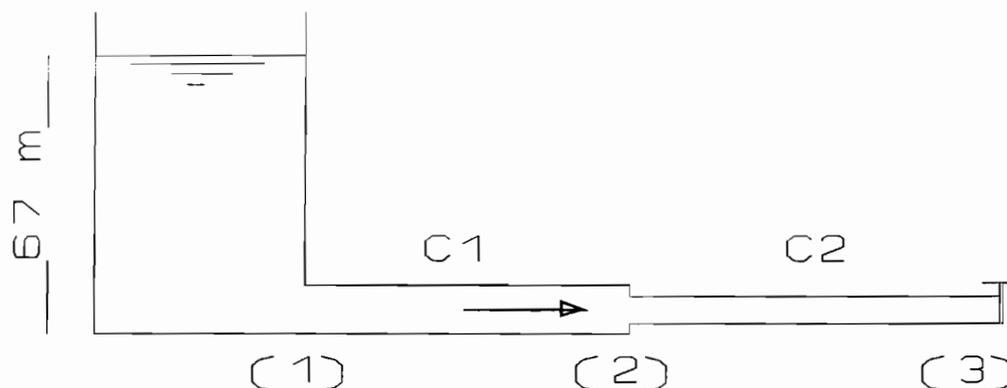
Présentation de quelques exemples de réseaux traités en régime transitoire.

Les résultats obtenus par le programme sont présentés graphiquement.

EXEMPLE 1

Fermeture lente d'une vanne dans un réseau

Dans cet exemple il s'agit d' une fermeture lente de vanne située à l'extrémité de deux conduites en série alimentées par un réservoir de 60 mètres de niveau.



Caractéristiques des conduites:

	Longueur	Diamètre	Vit.Onde	Coef.Frot
C1	550 m	0.75 m	1100 m/s	0.010
C2	450 m	0.60 m	900 m/s	0.012

La fermeture de la vanne suit la courbe discrétisée comme suit:

Temps (s)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
tau	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0

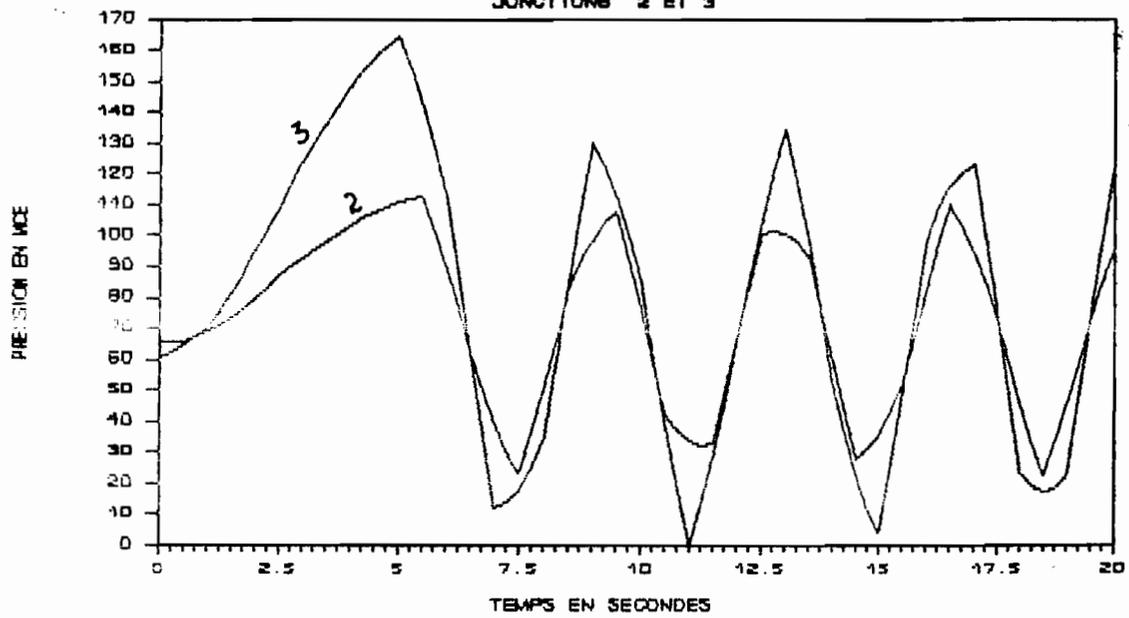
En régime permanent (régime initial) le débit véhiculé est de 1.0 m³/s.

La durée de simulation est fixée à 50 secondes à partir du début de la manipulation de la vanne .

Fichier des données : EX1DAT.DAT

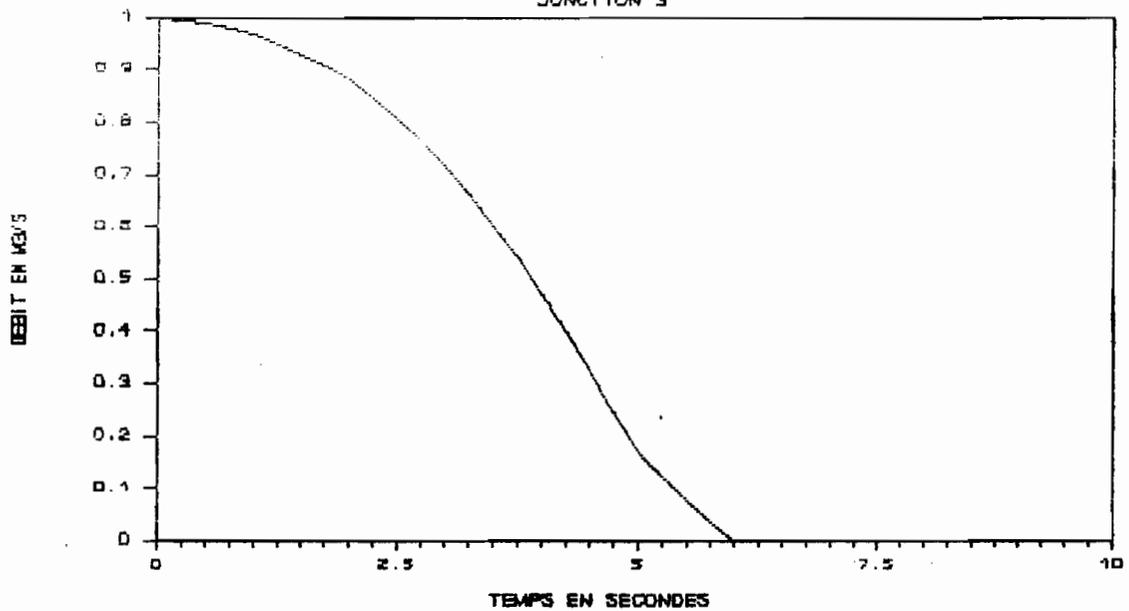
FERMETURE LENTE DE VANNE

JONCTIONS 2 ET 3



FERMETURE LENTE DE VANNE

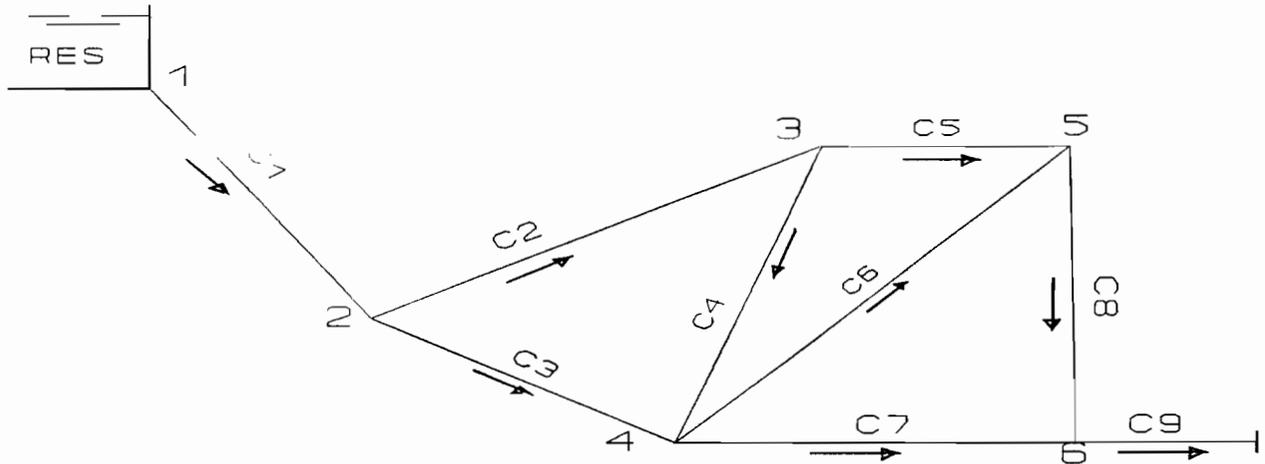
JONCTION 3



EXEMPLE 2

Fermeture brusque de vanne dans un réseau maillé

Fermeture brusque d'une vanne dans un réseau maillé constitué de neuf conduites de différents diamètres, alimenté par un réservoir de niveau 626 pieds. **Fichier des données: EX2DAT.DAT**

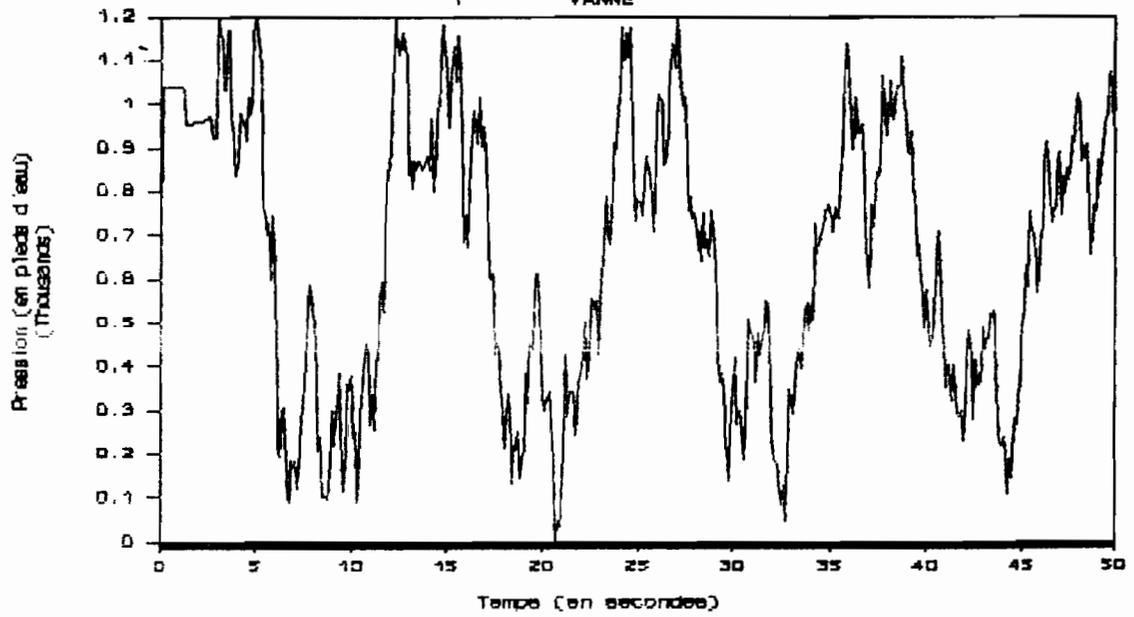


Caractéristiques des conduites

conduite	L (pi)	D (pi)	f	a (pi/s)	H(i,1)	Q(i,1)
C1	2000	3.0	0.03	3300	626.64	30
C2	3000	2.5	0.028	3750	621.05	14.34
C3	2000	2.0	0.024	4000	621.05	15.66
C4	1800	1.5	0.020	3000	616.60	6.35
C5	1500	1.5	0.022	3750	616.60	7.99
C6	1600	1.5	0.025	3200	611.79	4.05
C7	2200	2.5	0.040	3140	611.79	17.96
C8	1500	2.0	0.030	3000	609.62	12.04
C9	2000	3.0	0.024	3300	604.49	30

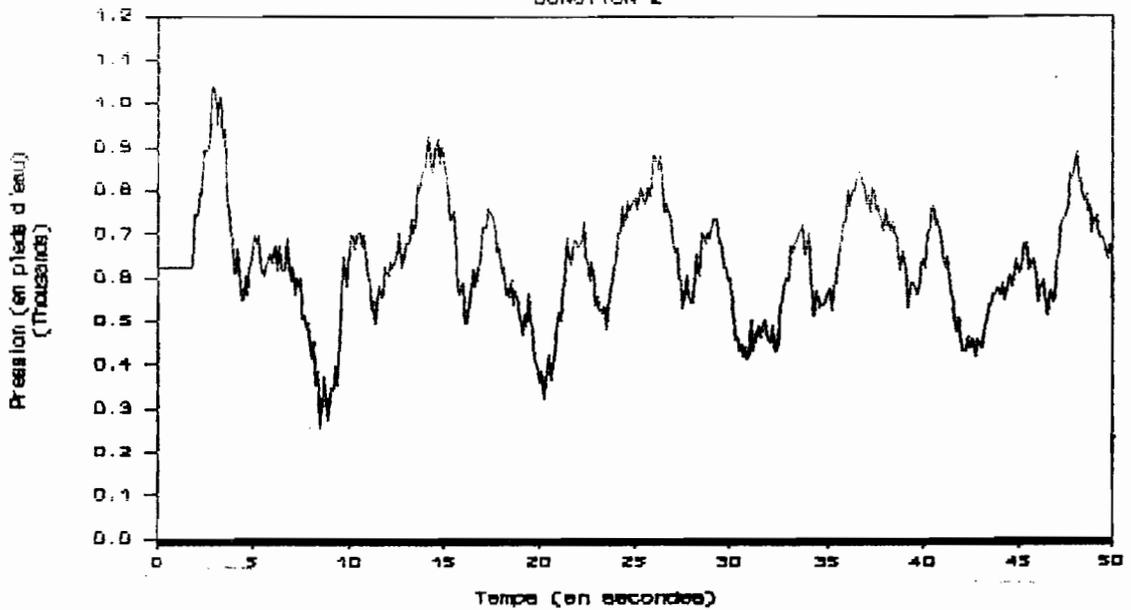
EVOLUTION DE LA PRESSION

VANNE



EVOLUTION DE LA PRESSION

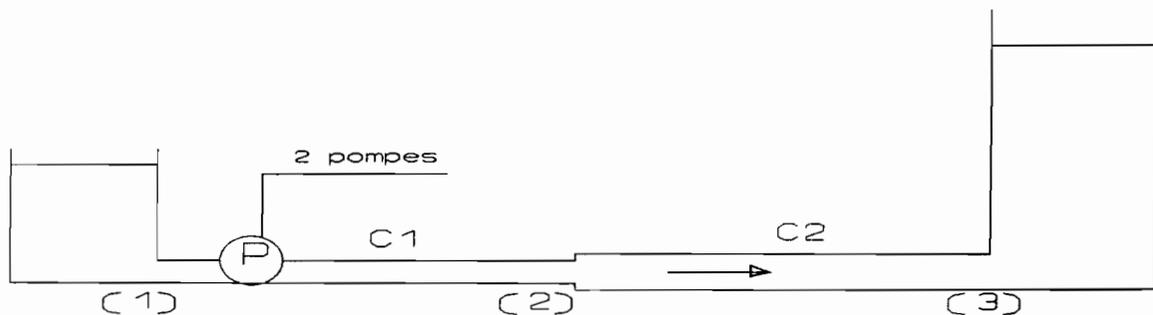
JONCTION 2



EXEMPLE 3

Perte de puissance d'une pompe

Il s'agit de la perte de puissance au niveau de deux pompes en montage parallèle qui alimentent un réservoir par l'intermédiaire de deux conduites en série. La conduite de suction des deux pompes est négligeable. En régime normal la hauteur d'élévation des pompes est de 60 mce avec un débit par pompe de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$.



Caractéristiques des conduites

Conduite	Long (m)	Diam (m)	Vit.Ond (m/s)	f (frot.)
C1	450	0.75	900	0.010
C2	550	0.75	1100	0.012

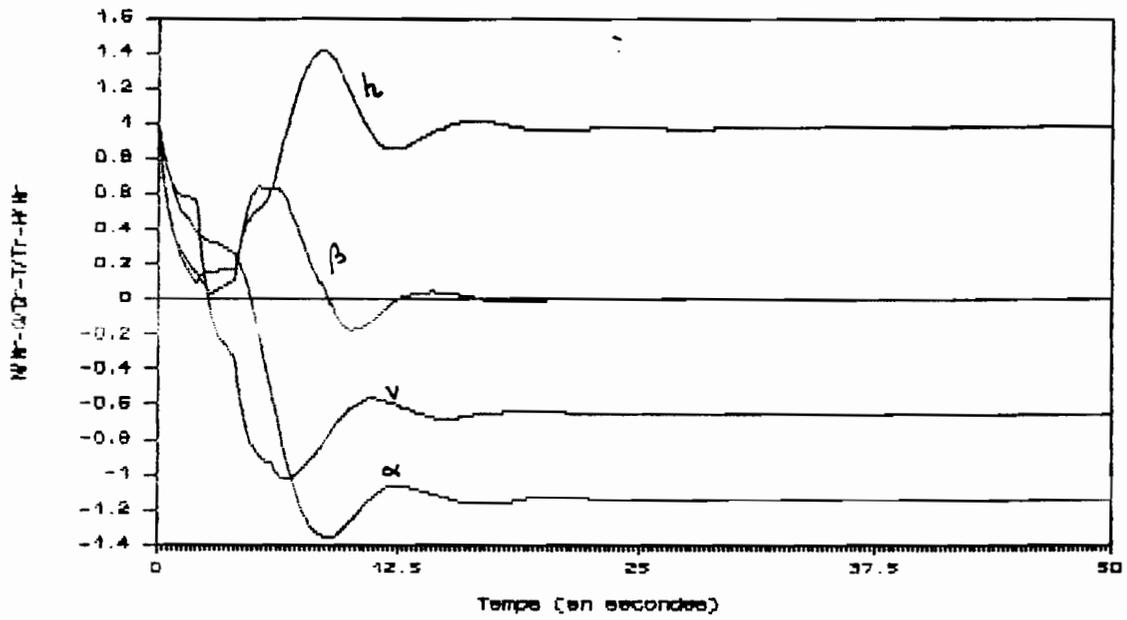
Caractéristiques des pompes

Les deux pompes sont identiques, leur vitesse spécifique est de 0.48 dans le système SI et elles fonctionnaient à rendement optimal (rendement = 0.84) avant la perte de puissance.

$Q_r = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$; $H_r = 60 \text{ mce}$; $N_r = 1100 \text{ rpm}$; $I = 16.85 \text{ kg m}^2$

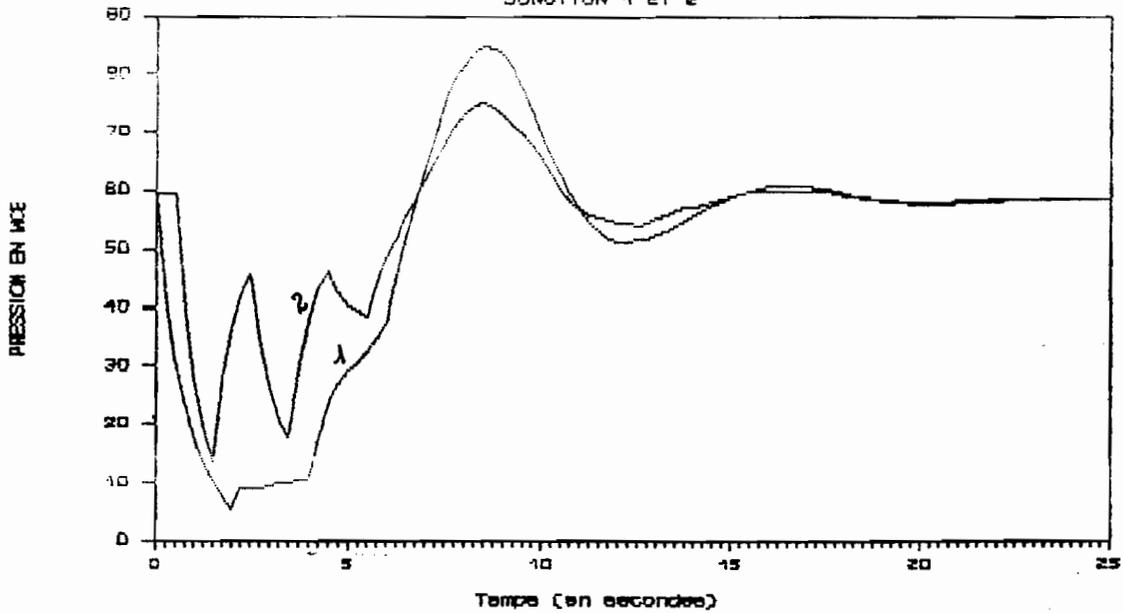
Fichier des données : EX3DAT.DAT

PERTE DE PUISSANCE D'UNE POMPE



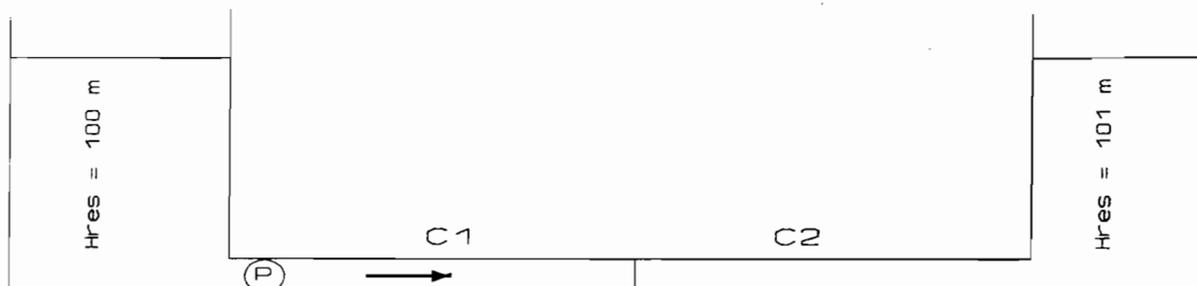
PERTE DE PUISSANCE D'UNE POMPE

JONCTION 1 ET 2



EXEMPLE 4

Cas similaire à l'exemple 3, qui met en évidence l'influence de la configuration du réseau sur le fonctionnement de la pompe. Dans ce cas on ne s'attend pas à un fonctionnement en régime turbine après la perte de puissance au niveau de la pompe.



Caractéristiques des conduites

Conduite	Longueur	Diamètre	Coef.frott.	Vitesse Onde
C1	450 m	0.25 m	0.010	900 m/s
C2	550 m	0.25 m	0.012	1100 m/s

Les caractéristiques de la pompe sont identiques à celles de la pompe utilisée dans l'exemple précédent.

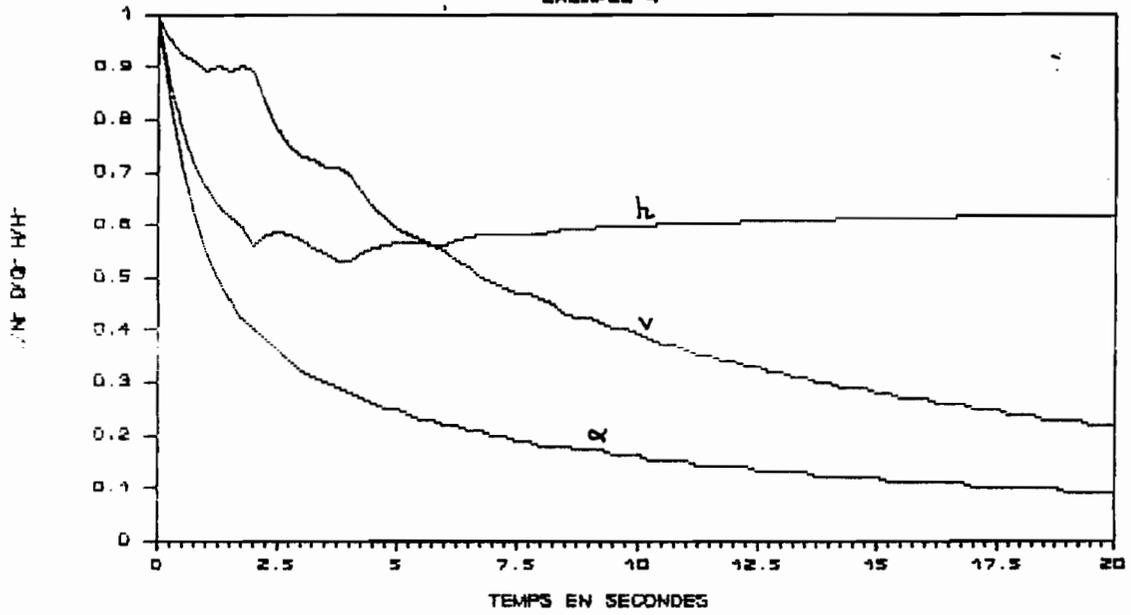
Le fonctionnement de la pompe est supposé en régime optimal.

La pompe aspire d'un réservoir de niveau 100 mce et refoule dans un autre de niveau 101.3 mce, à travers un réseau de deux conduites de mêmes diamètres, en série.

Fichier des données : EX4DAT.DAT

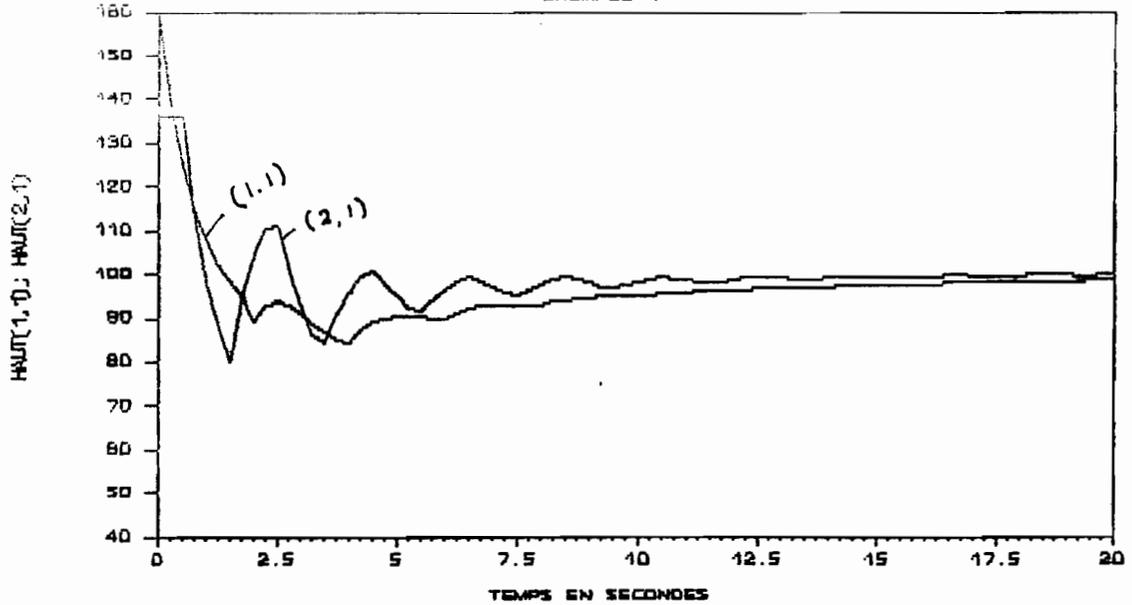
PERTE DE PUISSANCE

EXEMPLE 4



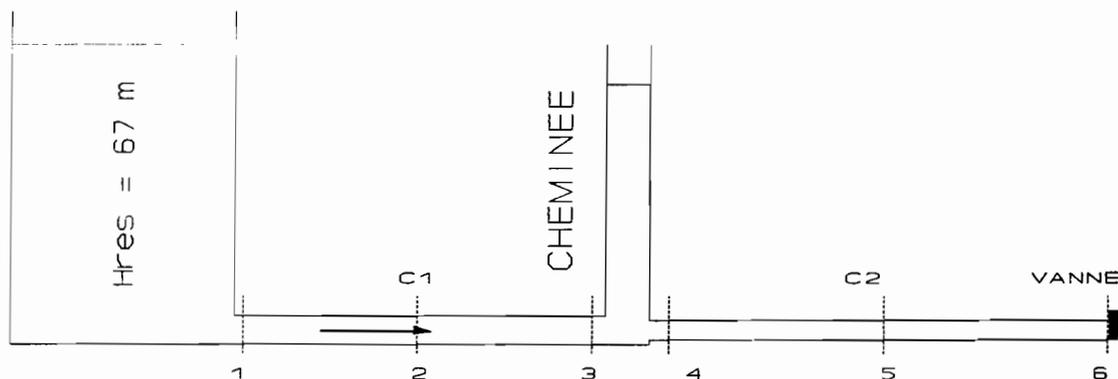
PERTE DE PUISSANCE

EXEMPLE 4



EXEMPLE 5

Cet exemple cherche à mettre en évidence l'effet d'une cheminée d'équilibre dans un réseau affecté par un régime transitoire. Ainsi considérons l'exemple 1 qui traite de la fermeture d'une vanne dans lequel on insère une cheminée à la jonction des deux conduites .



Caractéristiques des conduites

Conduites	Longueurs	Diamètres	Vit.Onde	Coef.Frott.
C1	550 m	0.75 m	1100 m	0.010
C2	450 m	0.60 m	900 m	0.012

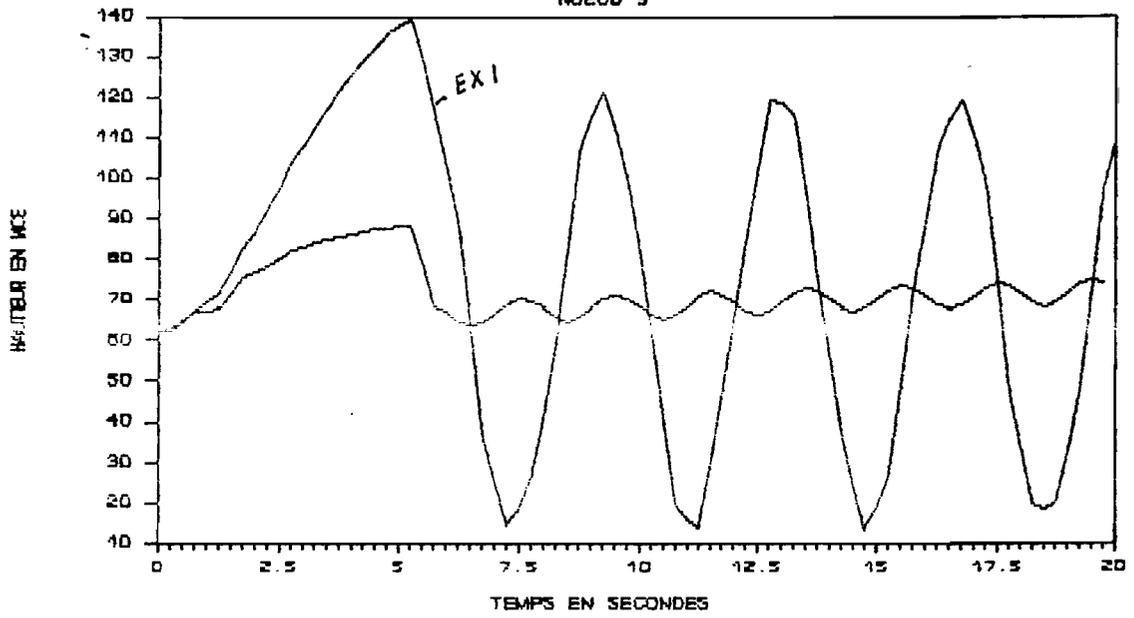
La courbe de fermeture de la vanne est identique à celle de l'exemple 1 .

Les graphiques obtenus établissent une comparaison entre les résultats de l'exemple 1 et 5 aux noeuds 2 et 5 situés aux milieux des deux conduites qui sont séparées par la cheminée.

Fichier des données : EX5DAT.DAT

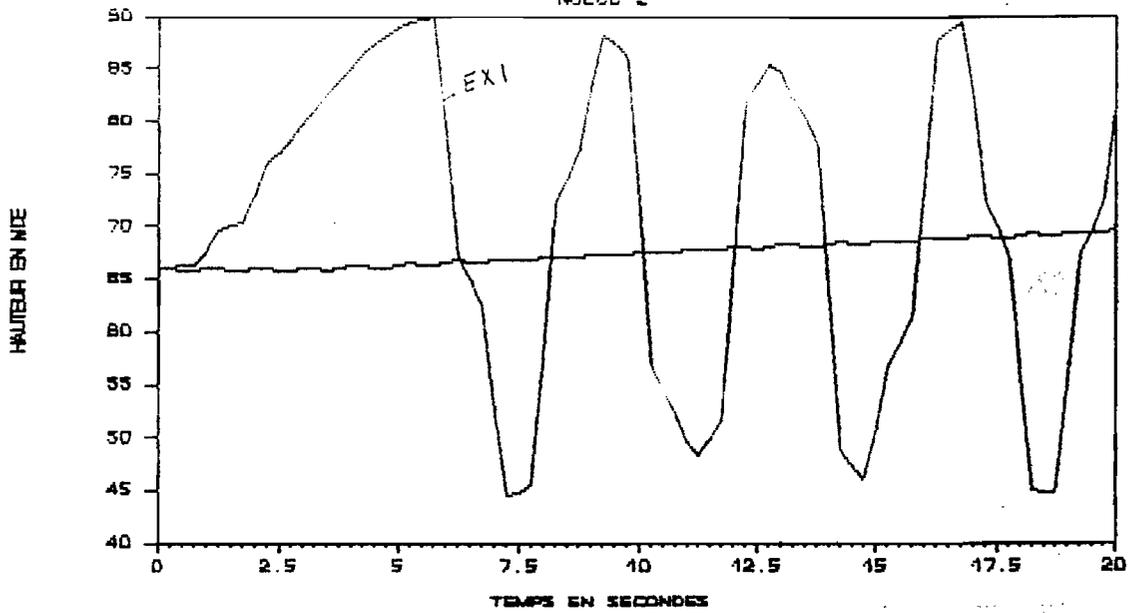
EFFET D'UNE CHEMINEE

NOEUD 5



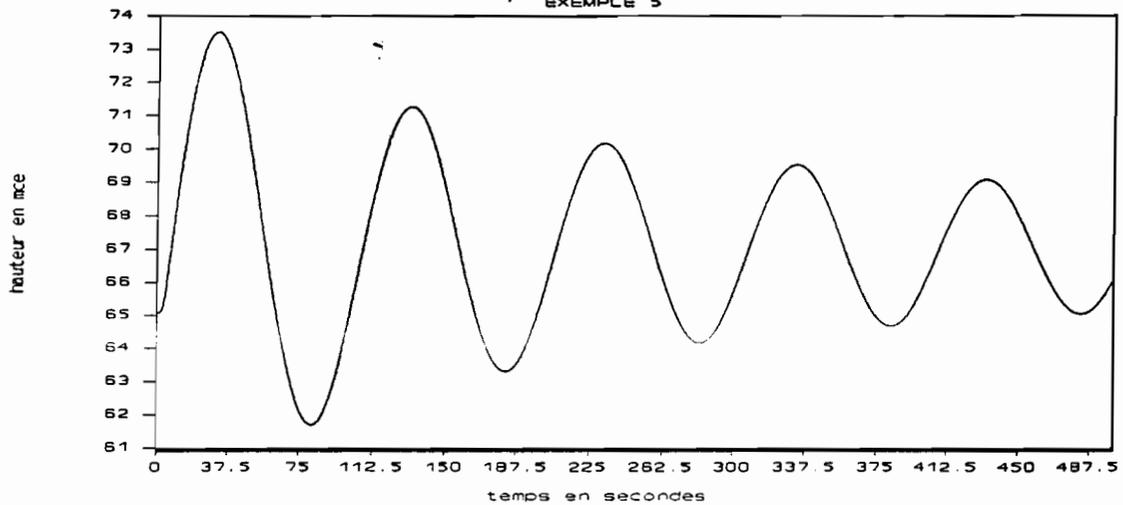
EFFET D'UNE CHEMINEE

NOEUD 2



NIVEAU D'EAU DANS LA CHEMINÉE

EXEMPLE 5



A partir de ces graphiques on remarque aisement l'effet de la cheminée sur les variations de pression dans le réseau . Elle contribue à maintenir une pression constante dans le temps au niveau de chaque point de la conduite en agissant sur le débit de l'écoulement. Ainsi le niveau d'eau dans la cheminée se modifie en conséquence, ce qui est visualisé par le dernier graphique .

Le programme réalisé nous a permis de traiter les exemples décrits précédemment, dans lesquels le transitoire a été généré de différentes manières (vannes et pompes).

Les cas 1 et 2 mettent en évidence l'effet d'une fermeture de vanne (brusque ou lente) dans un réseau. Ainsi à partir des graphiques obtenus on remarque que le transitoire est beaucoup plus sévère pour une fermeture brusque, qui engendre partout dans le réseau des pics de pression plus ou moins réguliers et amortis dans le temps. Ces pics occasionnent des valeurs de pression élevées ou très petites qui approchent la pression de vapeur du fluide (risque de cavitation).

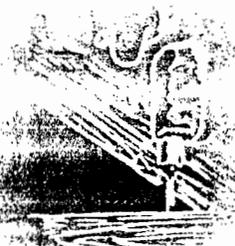
Les exemples 3 et 4 montrent l'effet de perte de puissance d'une pompe dans un réseau hydraulique. Ce transitoire n'étant pas sévère du point de vue valeurs atteintes par les pressions mais fait apparaître parfois des valeurs basses qui peuvent occasionner le phénomène de la cavitation.

L'exemple 3 fait apparaître les différentes zones de fonctionnement de la pompe durant le régime transitoire, ainsi la pompe passe de la zone de fonctionnement normal à la zone de fonctionnement en turbine en passant par la zone de dissipation d'énergie. En fonctionnement turbine on tend vers un nouveau régime d'équilibre caractérisé par des nouvelles valeurs des paramètres décrivant la pompe.

L'exemple 4 nous permet de dire que, durant le régime transitoire on n'a pas toujours les différentes zones de fonctionnement de la pompe comme dans l'exemple 3 mais plutôt un déplacement du point de fonctionnement de la pompe en régime normal afin qu'elle tende vers l'arrêt.

Dans ces deux exemples on a utilisé la même pompe ce qui montre l'influence de la configuration du réseau sur le fonctionnement d'une pompe en transitoire.

Le dernier cas traité fait ressortir le rôle que peut jouer une cheminée d'équilibre comme élément de régulation et de contrôle durant un régime transitoire, dans un réseau hydraulique.



CONCLUSION

Cette étude a abouti à la réalisation d'un programme de simulation des écoulements en régime transitoire. Ce programme permet de traiter la plupart des réseaux maillés, où le régime transitoire est généré par la manipulation d'une vanne ou la perte de puissance d'une pompe.

Aux fins de calcul, le phénomène physique a été traduit par le modèle mathématique basé sur les équations de base de la mécanique des fluides, et le traitement numérique assuré par des méthodes parfaitement adaptées comme la méthode des caractéristiques.

Le programme possède une structure modulaire où chaque élément et frontière est traité séparément grâce à un petit modèle qui le décrit fidèlement.

Cette structure reste d'un avantage non négligeable, car elle permet une éventuelle extension des capacités du programme par l'ajout du traitement d'éléments de contrôle (chambre à air, cheminée d'équilibre) et les possibilités de modules graphiques.

Ce programme peut devenir un excellent outil de travail permettant de prévoir les variations de pressions et débits inhabituelles dans les réseaux, ce qui permettra de procéder à un dimensionnement correct et rationnel.

ANNEXE 1

Listing du programme "HYTRPROG"

```

PROGRAM RTRCV;
USES CRT,DOS,PRINTER;
TYPE
  mat1=array[1..10] of real;
  mat2=array[1..10,1..10] of real;
  mat4=array[1..10] of integer;
  mat3=array[1..10] of integer;
  mat5=array[1..10,1..10] of integer;
  mat6=array[1..10] of string[14];

```

```

VAR
  ncam,ncav,npp:mat4;
  ncmb,ncvb:mat5;
  pastau:file of real;
  fichier,don,paspompe,pasbeta:text;
  resultat,fichdon,fnom,p:string[14];
  fichfr,fichfr1,fichfr2:mat6;
  nbcond,nbfront,I,J,K,comp,pas,reponsec:integer;
  tfine,dx,dt,temps,cn,cp,pesa,cval,c6val:real;
  x,y,surf,long,ni,diam,vitond,coff,ca,r:mat1;
  hres,kres,kjonc,tau,tov,tauo,tauf,dxt,hsh,hro,gro,
  tr,c5,c6,alphh,vh,beth,dvh,dalphh,hr,qr,nr,er,wr2,
  no,qo,dth,hsuc,cvan,qch,zch,sch,tauv:mat1;
  haut,hautp,debit,debitp,qv,hv:mat2;
  n,cm,cv,m,typ:mat3;
  fh,fb:array[1..200] of real;
  an,choix,c,reponse:char;
  {$I a:saiscont }
  {$i a:resul}

```

```

PROCEDURE impression;{ IMPRESSION DES RESULTATS}
begin
  writeln(fichier,temps:5:2);
  for i:=1 to nbfront do
    begin
      if typ[i]=6 then
        writeln(fichier,tauv[i]:6:3);
      if typ[i]=8 then
        writeln(fichier,alphh[i]:6:3,' ',vh[i]:6:3);
    end ;
  for i:=1 to nbcond do
    begin
      for j:=1 to n[i]+1 do
        begin
          write(fichier,i:5);
          write(fichier,haut[i,j]:10:5);
          writeln(fichier,debit[i,j]:10:5);
        end;
      end;
      writeln(fichier,' ');
    end;{procedure}

```

```

PROCEDURE reservoirenamont; {RESERVOIR EN AMONT DU RESEAU}
var
s:integer;
kk:real;

begin
s:=ncav[i];
cn:=debit[s,2]-ca[s]*haut[s,2]-r[s]*debit[s,2]*abs(debit[s,2]);

if debit[s,1]>=0 then
kk:= ca[s]*(1+kres[i])/(2*pesa*sqr(surf[s]))
else
kk:=ca[s]*(1-kres[i])/(2*pesa*sqr(surf[s]));
debitp[s,1]:=(-1+sqr(1+4*kk*(cn+ca[s]*hres[i])))/(2*kk);
hautp[s,1]:=hres[i]-kk*sqr(debitp[s,1])/ca[s];
end; {procedure}

```

```

PROCEDURE reservoirenaval; {RESERVOIR EN AVAL DU RESEAU}
var
s:integer;
kk:real;

begin
s:=ncam[i];
cp:=debit[s,n[s]]+ca[s]*haut[s,n[s]]-r[s]*debit[s,n[s]]*
abs(debit[s,n[s]]);
if debit[s,n[s]+1]>=0 then
kk:=ca[s]*(1-kres[i])/(2*pesa*sqr(surf[s]))
else
kk:=ca[s]*(1+kres[i])/(2*pesa*sqr(surf[s]));
debitp[s,n[s]+1]:=(1-sqr(1-4*kk*(cp-ca[s]*hres[i])))/(2*kk);
hautp[s,n[s]+1]:=hres[i]-kk*sqr(debit[s,n[s]+1])/ca[s];
end; {procedure}

```

```

PROCEDURE poininter;{CALCUL DES NOEUDS INTERMEDIAIRES PAR
CARACTERISTIQUES}
begin
for i:=1 to nbcond do
for j:=2 to n[i] do
begin
cn:=debit[i,j+1]-ca[i]*haut[i,j+1]-r[i]*debit[i,j+1]*
abs(debit[i,j+1]);
cp:=debit[i,j-1]+ca[i]*haut[i,j-1]-r[i]*debit[i,j-1]*
abs(debit[i,j-1]);
debitp[i,j]:=0.5*(cp+cn);
hautp[i,j]:=(cp-debitp[i,j])/ca[i];
end;
end; {procedure}

```

PROCEDURE poininterdif; (CALCUL DES NOEUDS INTERMEDIAIRES PAR DIFF. FINIES)

```
begin
  for i:=1 to nbcond do
    for j:=2 to n[i] do
      begin
        debitp[i,j]:=0.5*(debit[i,j-1]+debit[i,j+1])-0.5*pesa*
          surf[i]*(dt*n[i]/long[i])*(haut[i,j+1]-haut[i,j-1])-r[i]*
          .5*(debit[i,j+1]+debit[i,j-1])*0.5*abs(debit[i,j+1]+
          debit[i,j-1]);
        hautp[i,j]:=0.5*(haut[i,j-1]+haut[i,j+1])-0.5*
          (dt*n[i]/long[i])*(sqr(vitond[i])/
          (pesa*surf[i]))*(debit[i,j+1]-debit[i,j-1]);
      end;
    end;
  end;
end; {procedure}
```

PROCEDURE jonction; (BRANCHEMENT DE DEUX CONDUITES)

```
var
  s,v:integer;
begin
  s:=ncam[i];v:=ncav[i];
  cn:=debit[v,2]-ca[v]*haut[v,2]-r[v]*debit[v,2]*abs(debit[v,2]);
  cp:=debit[s,n[s]]+ca[s]*haut[s,n[s]]-r[s]*debit[s,n[s]]*
    abs(debit[s,n[s]]);
  hautp[s,n[s]+1]:=(cp-cn)/(ca[s]+ca[v]);
  hautp[v,1]:=hautp[s,n[s]+1];
  debitp[s,n[s]+1]:=cp-ca[s]*hautp[s,n[s]+1];
  debitp[v,1]:=cn+ca[v]*hautp[v,1];
end; {procedure}
```

PROCEDURE branchement; (BRANCHEMENT DE PLUSIEURS CONDUITES)

```
var
  cpt,cnt,cat:real;
  s:integer;
  cnn,cpp:array[1..10] of real;
begin
  cpt:=0;
  cnt:=0;
  cat:=0;
  for j:=1 to cm[i] do
    begin
      s:=ncmb[i,j];
      cpp[s]:=debit[s,n[s]]+ca[s]*haut[s,n[s]]-r[s]*
        debit[s,n[s]]*abs(debit[s,n[s]]);
      cpt:=cpt+cpp[s];
      cat:=cat+ca[s];
    end;
  for j:=1 to cv[i] do
    begin
      s:=ncvb[i,j];
      cnn[s]:=debit[s,2]-ca[s]*haut[s,2]-r[s]*debit[s,2]*
```

```

                abs(debit[s,2]);
        cnt:=cnt+cnn[s];
        cat:=cat+ca[s];
    end;
    for j:=1 to cm[i] do
        begin
            s:=ncmb[i,j];
            hautp[s,n[s]+1]:=(cpt-cnt)/cat;
            debitp[s,n[s]+1]:=cpp[s]-ca[s]*hautp[s,n[s]+1];
        end;
    for j:=1 to cv[i] do
        begin
            s:=ncvb[i,j];
            hautp[s,1]:=(cpt-cnt)/cat;
            debitp[s,1]:=cnn[s]+ca[s]*hautp[s,1];
        end;
    end; {procedure}

```

PROCEDURE pertelocale; {CALCUL AU NIVEAU D'UNE PERTE LOCALE}

```

var
v,s,t:real;
x1,x2:integer;
cp,cn:real;
begin
    x1:=ncam[i];
    x2:=ncav[i];
    cp:=debit[x1,n[x1]]+ca[x1]*haut[x1,n[x1]]-r[x1]*
        debit[x1,n[x1]]*abs(debit[x1,n[x1]]);
    cn:=debit[x2,2]-ca[x2]*haut[x2,2]-r[x2]*
        debit[x2,2]*abs(debit[x2,2]);
    if debit[x2,2]>=0 then
        v:=kjonc[i]/(2*pesa*sqr(surf[x1]))
    else
        v:=-kjonc[i]/(2*pesa*sqr(surf[x1]));
    s:=(ca[x1]+ca[x2])/(ca[x1]*ca[x2]);
    t:=(cp*ca[x2]+cn*ca[x1])/(ca[x1]*ca[x2]);
    debitp[x1,n[x1]+1]:=0.5*(-s+sqrt(sqr(s)+4*v*t));
    debitp[x2,1]:=debitp[x1,n[x1]+1];
    hautp[x1,n[x1]+1]:=(cp-debit[x1,n[x1]+1])/ca[x1];
    hautp[x2,1]:=(debitp[x2,1]-cn)/ca[x2];
end; {procedure}

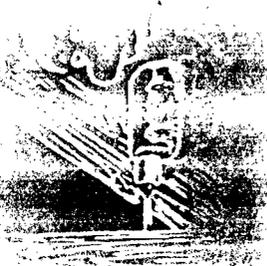
```

PROCEDURE vannemanip; { MANIPULATION D'UNE VANNE }

```

var
s,v,ii:integer;
a,cvv:real;
begin
    s:=ncam[i];
    v:=ncav[i];
    cp:=debit[s,n[s]]+ca[s]*haut[s,n[s]]-r[s]*
        debit[s,n[s]]*abs(debit[s,n[s]]);
    if temps<toiv[i] then

```



```

begin
  a:=temps/dxt[i];  ii:=trunc(a);
  assign(pastau,'b:'+fichfr[i]);
  reset(pastau);
  seek(pastau,ii);
  read(pastau,y[ii]);
  seek(pastau,ii+1);
  read(pastau,y[ii+1]);
  tauv[i]:=(temps-ii*dxt[i])*(y[ii+1]-y[ii])/dxt[i]+y[ii];
  close(pastau);
end
else tauv[i]:=tauf[i];
cvv:=(qv[s,n[s]+1]*sqr(tauv[i])*qv[s,n[s]+1])/
      (hv[s,n[s]+1]*ca[s]);
debitp[s,n[s]+1]:=0.5*(-cvv+sqr(cvv*cvv+4*cp*cvv));
hautp[s,n[s]+1]:=(cp-debitp[s,n[s]+1])/ca[s];
if v<>0 then
  begin
    debitp[v,1]:=debitp[s,n[s]+1];
    cn:=debit[v,2]-ca[v]*haut[v,2]-r[v]*debit[v,2]*
        abs(debit[v,2]);
    hautp[v,1]:=(debitp[v,1]-cn)/ca[v];
  end;
end;{procedure}

```

PROCEDURE VANNENORMALE; { VANNE NON MANIPULEE }

```

var
s,v,ii:integer;
a,cvv,tauv:real;
begin
  s:=ncam[i];
  v:=ncav[i];
  cp:=debit[s,n[s]]+ca[s]*haut[s,n[s]]-r[s]*debit[s,n[s]]*
      abs(debit[s,n[s]]);
  cvv:=(qv[s,n[s]+1]*sqr(tau[i])*qv[s,n[s]+1])/
      ( h v [ s , n [ s ] + 1 ] * c a [ s ] ) ;
  debitp[s,n[s]+1]:=0.5*(-cvv+sqr(cvv*cvv+4*cp*cvv));
  hautp[s,n[s]+1]:=(cp-debitp[s,n[s]+1])/ca[s];
  if v<>0 then
    begin
      debitp[v,1]:=debitp[s,n[s]+1];
      cn:=debit[v,2]-ca[v]*haut[v,2]-r[v]*debit[v,2]*abs(debit[v,2]);
      hautp[v,1]:=(debitp[v,1]-cn)/ca[v];
    end;
  end;{procedure}

```

```

PROCEDURE pompenormale; { POMPE EN FONCTIONNEMENT NORMAL }
var
w,z:integer;
rr,t,v:real;

begin
w:=ncam[i]; z:=ncav[i];
cn:=debit[z,2]-ca[z]*haut[z,2]-r[z]*debit[z,2]*abs(debit[z,2]);
t:=(hsh[i]-hro[i])/sqr(qro[i]);
if w<>0 then
begin
cp:=debit[w,n[w]]+ca[w]*haut[w,n[w]]-r[w]*debit[w,n[w]]*
abs(debit[w,n[w]]);
rr:=1/ca[z]+1/ca[w];
v:=hsh[i]+cn/ca[z]+cp/ca[w];
debitp[w,n[w]+1]:=(-rr+sqr(sqr(rr)+4*t*v))/(2*t);
debitp[z,1]:=debitp[w,n[w]+1];
hautp[z,1]:=(debitp[z,1]-cn)/ca[z];
hautp[w,n[w]+1]:=(cp-debitp[w,n[w]+1])/ca[w];
end
else
begin
debitp[z,1]:=(-1+sqr(1+4*ca[z]*t*(cn+ca[z]*hsh[i])))/
2*ca[z]*t;
hautp[z,1]:=(debitp[z,1]-cn)/ca[z];
end;
end; {procedure}

```

```

PROCEDURE pompetrans; { PERTE DE PUISSANCE D'UNE POMPE }
var
zz:char;
jj,mml,kk:integer;
a,v,ve,alpha,alphae,beta,th,th1,a1,a2,a3,
a4,alpsq,vesq,alpv,m1,c7,c8:real;
f1,f2,flal,flv,f2al,f2v,dv,dalpha,den:real;
begin
jj:=0;
v:=vh[i];
alpha:=alphh[i];
beta:=beth[i];
ve:=v+dvh[i];
alphae:=alpha+dalphh[i];
repeat
repeat
jj:=jj+1;
if (ve=0)and(alphae=0) then
begin
th:=0;
th1:=0;
end
end

```

```

else
  begin
    th1:= arctan(alphae/ve);
    th:=57.296*th1;
    if (th1<0) or ((alphae<0) and (ve<0)) then
      begin
        th:=th+180;
        th1:=th1 + 3.141592654;
      end;
    end;

m1:=(th/dth[i])+1;
mm1:=trunc(m1);
a1:=fh[mm1]*mm1-fh[mm1+1]*(mm1-1);
a2:=(fh[mm1+1]-fh[mm1])/(dth[i]*0.017453);
a3:=fb[mm1]*mm1-fb[mm1+1]*(mm1-1);
a4:=(fb[mm1+1]-fb[mm1])/(dth[i]*0.017453);
alpsq:=alphae*alphae;
vesq:=ve*ve;
alpv:=alpsq+vesq;
if ncam[i]=0 then
  begin
    f1:=(c5[i]*a1*alpv)+(c5[i]*a2*alpv*th1)-
      (npp[i]*ve*qr[i])+cn;
    flal:=c5[i]*((2.0*a1*alphae)+(a2*ve)+
      (2.0*a2*alphae*th1));
    flv:=c5[i]*((2.0*a1*ve)-(a2*alphae)+(2.0*a2*ve*th1))-
      (npp[i]*qr[i]);
  end
else
  begin
    c7:=(npp[i]*(ca[ncam[i]]+ca[ncav[i]])*qr[i])/
      (ca[ncam[i]]*ca[ncav[i]]*hr[i]);
    c8:=(cn*ca[ncam[i]]+cp*ca[ncav[i]])/
      (ca[ncam[i]]*ca[ncav[i]]*hr[i]);
    f1:=(a1*alpv)+(a2*alpv*th1)-(c7*ve)+c8;
    flal:=(2.0*a1*alphae)+(2.0*a2*alphae*th1)+(a2*ve);
    flv:=(2.0*a1*ve)+(2.0*a2*th1)-(a2*alphae)-c7;
  end;
  f2:=alphae-(c6[i]*a3*alpv)-(c6[i]*a4*alpv*th1)-
    alpha-(c6[i]*beta);

f2al:=1-(c6[i]*((2.0*a3*alphae)+(a4*ve)+(2.0*a4*alphae*th1)));
f2v:=c6[i]*((-2.0*a3*ve)+(a4*alphae)-(2.0*a4*ve*th1));
den:=(flal*f2v)-(flv*f2al);
dalpa:=((f2*flv)-(f1*f2v))/den;
dv:=((f1*f2al)-(f2*flal))/den;
alphae:=alphae+dalpa;
ve:=ve+dv;

until ((abs(dv)<=0.001) and (abs(dalpa)<=0.001)) or (jj>30);

```

```

th1:=arctan(alphae/ve);
th:=57.296*th1;
  if (th1<0) or ((alphae<0) and (ve<0)) then
  begin
    th:=th+180;
    th1:=th1+3.141592654;
  end;
a:=th/dth[i]+1; kk:=trunc(a);
alpv:=(sqr(ve)+sqr(alphae));
beta:=(a3+a4*th1);
beta:=alpv*beta;
until (kk=mm1) or (jj>30);
dalphh[i]:=alphae-alpha;
dvh[i]:=ve-v;
alphh[i]:=alphae;
vh[i]:=ve;
beth[i]:=beta;
end; {procedure}

PROCEDURE pompe; { CALCUL DE LA FRONTIERE POMPE}
var
w,z:integer;
begin
w:=ncam[i]; z:=ncav[i];
cn:=debit[z,2]-ca[z]*haut[z,2]-r[z]*debit[z,2]*abs(debit[z,2]);
if w<>0 then
cp:=debit[w,n[w]]+ca[w]*haut[w,n[w]]-r[w]*debit[w,n[w]]*
abs(debit[w,n[w]]);
pompetrans;
if w=0 then
begin
debitp[z,1]:=npp[i]*vh[i]*qr[i];
hautp[z,1]:=(debitp[z,1]-cn)/ca[z];
end
else
begin
debitp[w,n[w]+1]:=npp[i]*vh[i]*qr[i];
debitp[z,1]:=debitp[w,n[w]+1];
hautp[w,n[w]+1]:=(cp-debitp[z,1])/ca[w];
hautp[z,1]:=(debitp[z,1]-cn)/ca[z];
end;
end; {procedure}

PROCEDURE CHEMINEE; {element de controle}
var
cn,cp:real;
w,z:integer;
begin
w:=ncam[i];
z:=ncav[i];

```

```

cn:=debit[z,2]-ca[z]*haut[z,2]-r[z]*debit[z,2]*abs(debit[z,2]);
cp:=debit[w,n[w]]+ca[w]*haut[w,n[w]]-r[w]*debit[w,n[w]]*
abs(debit[w,n[w]]);
hautp[w,n[w]+1]:=(cp-cn+qch[i]+(2*sch[i]*zch[i]/dt))/
(ca[w]+ca[z]+(2*sch[i]/dt));
hautp[z,1]:=hautp[w,n[w]+1];
debitp[w,n[w]+1]:=cp-ca[w]*hautp[w,n[w]+1];
debitp[z,1]:=cn+ca[z]*hautp[z,1];
qch[i]:=debitp[w,n[w]+1]-debitp[z,1];
zch[i]:=hautp[z,1];
end ;{procedure}

```

```

PROCEDURE calcond1; { CALCUL DES CONSTANTES DES CONDUITES}
var
k,i:integer;
vitondm:real;
begin
clrscr;
gotoxy(25,10);
write('PAS ESPACE A CONSIDERER : ');
mincecad(32,44,11,13,3);
gotoxy(34,12);
readln(dx);
writeln;writeln;
vitondm:=0;
for i:=1 to nbcond do
begin
if vitond[i]>vitondm then
begin
vitondm:=vitond[i];
k:=i;
end;
end;
dt:=dx/vitond[k];
end;{procedure}

```

```

PROCEDURE calcond; { SYSTEME D'UNITES ET CALCUL DES PARAMETRES
CONSTANTS}
var
i,kk,pos:integer;
a,th,rien:real;
begin
if upcase(reponse)='A' then
begin
pesa:=32.185;
cval:=595.875;
c6val:=153.744;
end

```

```

else
begin
  pesa:=9.81;
  cval:=93604.99;
  c6val:=4.775;
end;
comp:=0;
for i:=1 to nbcond do
begin
  surf[i]:=(3.14*sqr(diam[i]))/4;
  ni[i]:=(long[i]/(dt*vitond[i]));
  n[i]:=trunc(ni[i]);
  comp:=comp+n[i]+1;
  ca[i]:=pesa*surf[i]/vitond[i];
  r[i]:=(coff[i]*dt)/(2*diam[i]*surf[i]);
end;
for i:=1 to nbfront do
begin
  if typ[i]=8 then
  begin
    tr[i]:=(cval*hr[i]*qr[i])/(nr[i]*er[i]);
    c5[i]:=ca[ncav[i]]*hr[i];
    c6[i]:=- (c6val*tr[i]*dt)/(nr[i]*wr2[i]);
    alphh[i]:=no[i]/nr[i];
    vh[i]:=qo[i]/(npp[i]*qr[i]);
    dvh[i]:=0; dalphh[i]:=0;
    th:=arctan(alphh[i]/vh[i]);
    th:=57.296*th;
    if th<0 then
      th:=th+360;
    a:=th/dth[i]; kk:=trunc(a);
    assign(pasbeta, 'b:'+fichfr2[i]);
    reset(pasbeta);
    pos:=1;
    while not eof(pasbeta) do
      begin
        readln(pasbeta, fb[pos]);
        pos:=pos+1;
      end;
    close(pasbeta);
    assign(paspompe, 'b:'+fichfr1[i]);
    reset(paspompe);
    pos:=1;
    while not eof(paspompe) do
      begin
        read(paspompe, fh[pos]);
        pos:=pos+1;
      end;
    close(paspompe);
    beth[i]:=(th-(kk-1)*dth[i])*(fb[kk+1]-fb[kk])/dth[i]+fb[kk];
    beth[i]:=beth[i]*(sqr(alphh[i])+sqr(vh[i]));
  end;
end;

```

```

end;
if typ[i]=10 then
begin
zch[i]:=haut[ncav[i],1];
qch[i]:=debit[ncam[i],1]-debit[ncav[i],1];
end;
end;
end; {procedure}

PROCEDURE calcond2;
var
k,i:integer;
vitondm:real;
an:char;
begin
repeat
an:='N';
clrscr;
gotoxy(25,10);
write('PAS ESPACE A CONSIDERER : ');
mincecad(32,44,11,13,3);
gotoxy(34,12);
readln(dx);
clrscr;
gotoxy(25,10);
write('PAS TEMPS A CONSIDERER : ');
mincecad(32,44,11,13,3);
gotoxy(34,12);
readln(dt);
vitondm:=0;
for i:=1 to nbcond do
begin
if vitond[i]>vitondm then
begin
vitondm:=vitond[i];
k:=i;
end;
end;
if (vitond[k]*dt/dx)>1 then
begin
clrscr;
gotoxy(20,10);
writeln('LE SCHEMA DE DIFFERENCES FINIES EST INSTABLE ');
gotoxy(21,12);
writeln(' [ (',vitond[k]:8:2 , '*DT/DX ) DOIT ETRE <= 1 ] ');
gotoxy(23,14);
write(' MODIFICATION DES PARAMETRES <O/N>\ <O>: ');
an:=readkey;
end;
until upcase(an)='N'
end; {procedure}

```

```

PROCEDURE REGIMESTAT; { ETAT DU RESEAU EN REGIME PERMANANT}
var
i,j:integer;
begin
  for i:=1 to nbcond do
  for j:=1 to (n[i]+1) do
  begin
    haut[i,j]:=haut[i,1]-coff[i]*(j-1)*long[i]*sqr(debit[i,1])/
    (n[i]*2*pesa*diam[i]*sqr(surf[i]));
    debit[i,j]:=debit[i,1];
    hv[i,j]:=haut[i,j];
    qv[i,j]:=debit[i,j];
  end;
end;{procedure}

```

```

PROCEDURE CALCUL; { TRAITEMENT GENERAL DU RESEAU }
begin
repeat
  MENU4(c);
if c<>'3' then
begin
  case c of

    '1': calcond1;
    '2': calcond2;
  end;
calcond;
regimestat;
temps:=0;
clrscr;
gotoxy(25,10);
write(' NOM DU FICHER DE SORTIE ');
mincecad(28,50,11,13,3);
gotoxy(30,12);
readln(resultat);
assign(fichier,'b:'+resultat);
rewrite(fichier);
clrscr;
mincecad(28,50,11,13,3);
gotoxy(29,12);writeln(' EXECUTION EN COURS ');
writeln(fichier,comp);
impression;
while temps<tfine do
begin
  temps:=temps+dt;
  case c of
    '1': poininter;
    '2': poininterdif;
  end;
end;

```

```

for i:=1 to nbfront do
case typ[i] of
  1:reservoirenamont;
  2:reservoirenaual;
  3:jonction;
  4:pertelocale;
  5:vannenormale;
  6:vannemanip;
  7:pompenormale;
  8:pompe;
  9:branchement;
  10:cheminee;
end;
for i:=1 to nbcond do
  for j:=1 to (n[i]+1) do
    begin
      debit[i,j]:=debitp[i,j];
      haut[i,j]:=hautp[i,j];
    end;
    impression;
  end;
  flush(fichier);
  close(fichier);
end;
until (c='3')

```

end;

```

BEGIN
debut;
repeat
menu2(an);
case an of
'1':saiscont;
'2':begin
  lecture;
  calcul;
end;
'3':lectresul;
end;
until (an='4' );
  clrscr;
END.^Z

```

```
{ FICHIER SAISCONT.PAS }
```

```
FUNCTION fichexist(fnom:string):boolean;  
var  
  f:file;  
  ok:boolean;  
begin  
  assign(f,fnom);  
  {$i-}  
  reset(f);  
  {$i+}  
  ok:=IOresult=0;  
  if not(ok) then  
    fichexist:=false  
  else  
    begin  
      close(f);  
      fichexist:=true;  
    end;  
end;
```

```
PROCEDURE mincecad( x,max_x,y,max_y,z : byte);  
  VAR  
    i : Integer;  
  BEGIN  
    TEXTCOLOR(z);  
    FOR i:=x TO max_x DO  
      BEGIN  
        GOTOXY(i,y);  
        write(#205);  
        GOTOXY(i,max_y);  
        Write(#205);  
      END;  
    FOR i:=(y+1) TO (max_y-1) DO  
      BEGIN  
        GOTOXY(x-1,i);  
        Write(#186);  
        GOTOXY(max_x,i);  
        Write(#186);  
      END;  
    GOTOXY(x-1,y);  
    Write(#201);  
    GOTOXY(x-1,max_y);  
    Write(#200);  
    GOTOXY(max_x,y);  
    Write(#187);  
    GOTOXY(max_x,max_y);  
    Write(#188);  
    normvideo;  
  END;
```

PROCEDURE SAISIE;

```
type
  fofo = string[20];
var
  fof:fofo;
  unite,d,maxi_r,l: real;
  X,y:ARRAY[1..100] of real;
  a,j,w,wi,v,h: integer;
  an,resp:char;
  term:boolean;
  m,won,wonl :array[1..10] of integer;
  ccp,cct :array[1..10] of real;
```

```
Function valide1 ( var don : fofo;var min:real;var max:real;
                  var chiffre:real):boolean;
```

```
var
  vrai:integer;
```

```
Begin
  val(don,chiffre,vrai);
  if (vrai=0) and (chiffre>=min)
    and (chiffre<=max) then valide1:=true else
```

```
valide1:=false;
```

```
End;
```

```
Function valide2 (var don : fofo; var min:integer;
                  var max,chiffre:integer):boolean;
```

```
var
  vrai:integer;
```

```
Begin
  if length(don)<=4 then
    begin
      val(don,chiffre,vrai);
      if (vrai=0) and (chiffre>=min)
        and (chiffre<=max) and ( round(chiffre)=chiffre)
        then valide2:=true else valide2:=false;
```

```
end
```

```
else
```

```
valide2:=false;
```

```
End;
```

```
Procedure lire_reel (x,y:byte; var prem:fofo; inf:real; var
                    sup :real;var nombre : real);
```

```
begin
```

```
gotoxy(x,y);write(' ');
```

```
gotoxy(x,y);
```

```
highvideo; readln(prem); normvideo;
```

```
if not(valide1(prem,inf,sup,nombre)) or (prem='0')
```

```
then
```

```
repeat
```

```
gotoxy(x,y); write(' '); write(#7);
```

```
gotoxy(x,y); highvideo;gotoxy(x,y);
```

```
readln(prem); normvideo;
```

```
untilvalide1(prem,inf,sup,nombre)and(nombre<>0);
```

```
end;
```

```

Procedure lire_reel2 (x,y:byte; var prem:fofo; inf:real; var
sup :real;var nombre : real);
begin
gotoxy(x,y);write(' ');gotoxy(x,y);
highvideo; readln(prem); normvideo;
if not(validel(prem,inf,sup,nombre)) then
repeat
gotoxy(x,y); write(' '); write(#7);
gotoxy(x,y); highvideo; readln(prem); normvideo;
until validel(prem,inf,sup,nombre);
end;

```

```

Procedure lire_entier (x,y:byte; var prem:fofo; inf:integer;
sup:integer;var nombre : integer);

begin
gotoxy(x,y); write(' ');gotoxy(x,y);
highvideo;
readln(prem); normvideo;
if not(valide2(prem,inf,sup,nombre)) or (prem='0')
then
repeat
gotoxy(x,y); write(' '); write(#7);
gotoxy(x,y); highvideo;readln(prem); normvideo;
until valide2(prem,inf,sup,nombre) and(nombre<>0);
end;

```

```

Procedure lire_entier2 (x,y:byte; var prem:fofo; inf:integer;
sup:integer;var nombre : integer);

begin
gotoxy(x,y); write(' ');gotoxy(x,y);
highvideo;
readln(prem); normvideo;
if not(valide2(prem,inf,sup,nombre)) then
repeat
gotoxy(x,y); write(' ');
write(#7);
gotoxy(x,y); highvideo;readln(prem); normvideo;
until valide2(prem,inf,sup,nombre) ;
end;

```

```

PROCEDURE cadre_gras( x,max_x,y,max_y:byte;
Num_couleur : byte);
VAR
i,j : byte ;
dummy : char;
BEGIN
textcolor(num_couleur);
textbackground(num_couleur);
highVideo;

```



```

for i:=x to max_x do
begin
  gotoxy(i,y); write(#219);
  gotoxy(i,max_y); write(#219);
end;
for j:=y to max_y do
begin
  gotoxy((x-1),j); write(#219);
  gotoxy((max_x +1),j); write(#219);
end;
  for j:= y to max_y -1 do
  begin
  gotoxy(x,(j+1)); write(#219);
  gotoxy(max_x,(j+1)); write(#219);
  end,
normvideo;
END;

```

```

BEGIN
  clrscr;
  v:=maxint;
  maxi_r:=5E07;
  h:=8;
  term:=false;
  Repeat
  cadre_gras(9,70,5,12,14);
  gotoxy(28,5);TEXTCOLOR(4);writeln('  DONNEES  GENERALES  ');
  normvideo;
  gotoXY(24,7);
  write (' NOMBRE DE CONDUITES---');
  lire_entier(49,7,fof,1,100,nbcond);
  gotoxy(24,8);
  write (' NOMBRE DE FRONTIERES---');
  lire_entier(49,8,fof,2,(nbcond+1),nbfront);
  gotoxy(24,9);
  write (' TEMPS DE SIMULATION ---');
  lire_reel(49,9,fof,0,maxi_r,tfine);
  repeat
  gotoxy(24,10);
  write(' SYSTEME UNITES <SI/ANG>');
  GOTOXY(52,10);
  WRITE(' (S/A) ');
  READLN(REPONSE);
until ((upcase(reponse)='A') or (upcase(reponse)='S'));
if upcase(reponse)='S' then
reponsec:=1 else reponsec:=2;
gotoxy(30,11); write(' correct o/n <0>');
resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;
clrscr;

```

```

until term = true;
clrscr;
for i:=1 to nbcond do
begin
    term:=false;
    Repeat
    cadre_gras(9,70,5,12,14);
    gotoxy(28,5);TEXTCOLOR(4);writeln('  REGIME STATIONNAIRE  ');
normvideo;
    gotoxy(11,8); textcolor(14+128);
    writeln('  CONDUITE N° ',i);normvideo;gotoxy(26,7);
    write('  HAUTEUR MANOMETRIQUE ');gotoxy(26,8);
    write('  AU    PREMIER    NOEUD    -----  ');
lire_reel(52,8,fof,0,maxi_r,haut[i,1]);
    gotoxy(26,9);
    write('  DEBIT DANS LA CONDUITE-');
    lire_reel(52,9,fof,0,maxi_r,debit[i,1]);
    gotoxy(30,10); write('  correct  o/n <O>');
    resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
    else term:=true;

    clrscr;
until term = true;
clrscr;
end;
for i:=1 to nbcond do
begin
    term:=false;
    Repeat
    cadre_gras(9,70,5,14,14);
    gotoxy(24,5);TEXTCOLOR(4);writeln('  CARACTERISTIQUES  DES
    CONDUITES  ');
normvideo;
    gotoxy(11,9); textcolor(14+128);
    writeln('CONDUITE N° ',i:1,' ');normvideo;
    gotoxy(30,7);write('  LONGUEUR  -----  ');
lire_reel(49,7,fof,0,maxi_r,long[i]);
    gotoxy(30,8);write('  DIAMETRE  -----  ');
lire_reel(49,8,fof,0,maxi_r,diam[i]);
    gotoxy(30,9);write('  VITESSE    ONDE  ---  ');
lire_reel(49,9,fof,0,maxi_r,vitond[i]);
    gotoxy(30,10);write('  COEFF.  FROTT.  ----  ');
lire_reel(49,10,fof,0,maxi_r,coff[i]);
    gotoxy(30,12); write('  correct  o/n <O>');
    resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
    else term:=true;

    clrscr;
    until term = true;
    clrscr;
end;
clrscr;
for i:=1 to nbfront do

```

```

begin
cadre_gras(9,70,5,18,14);
gotoxy(24,5);TEXTCOLOR(4);writeln(' CARACTERISTIQUES DES
FRONTIERES ');

normvideo;
gotoxy(20,7);
write ('TYPE FRONTIERE N°',i);
Lire_entier(45,7,fof,1,10,typ[i]);
case typ[i] of
1:begin
term:=false;
Repeat
cadre_gras(11,68,10,16,14);
gotoxy(28,10);TEXTCOLOR(4);writeln('RESERVOIR EN AMONT');
normvideo;
gotoxy(34,12);
write (' HAUT. MANOM.-----');
lire_reel(55,12,fof,0,maxi_r,hres[i]);
gotoxy(34,13);
write (' COFF. PERTE CHARGE -');
lire_reel(55,13,fof,0,maxi_r,kres[i]);
gotoxy(34,14);
write (' N° COND. EN AVAL ---');
lire_entier(55,14,fof,1,nbcond,ncav[i]);
gotoxy(12,13); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Uppcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;

until term=true;
end;

2:
begin
term:=false;
Repeat
cadre_gras(11,68,10,16,14);
gotoxy(28,10);TEXTCOLOR(4);writeln('RESERVOIR EN AVAL ');
normvideo;
gotoxy(34,12);
write (' HAUT. MANOM.-----');
lire_reel(55,12,fof,0,maxi_r,hres[i]);
gotoxy(34,13);
write (' COFF. PERTE CHARGE -');
lire_reel(55,13,fof,0,maxi_r,kres[i]);
gotoxy(34,14);
write (' N° COND. EN AMONT --');
lire_entier(55,14,fof,1,nbcond,ncam[i]);
gotoxy(12,13); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Uppcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;

until term=true;

end;

```

```

3:
  begin
    term:=false;
    Repeat
      cadre_gras(11,68,10,16,14);
      gotoxy(27,10);TEXTCOLOR(4);writeln('  JONCTION DEUX
CONDUITES  '); normvideo;
      gotoxy(35,12);
      write(' N° COND. EN AMONT --');
      lire_entier(55,12,fof,1,nbcond,ncam[i]);
      gotoxy(35,13);
      write(' N° COND EN AVAL ----');
      lire_entier(55,13,fof,1,nbcond,ncav[i]);
      gotoxy(12,13); write( ' correct o/n <0>');
      resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
      else term:=true;
    until term=true;

end;

4:
  begin
    term:=false;
    Repeat
      cadre_gras(11,68,10,16,14);
      gotoxy(30,10);TEXTCOLOR(4);writeln('  PERTE LOCALE  ');
      normvideo;
      gotoxy(35,12);
      write(' N° COND. EN AMONT --');
      lire_entier(55,12,fof,1,nbcond,ncam[i]);
      gotoxy(35,13);
      write(' N° COND EN AVAL ----');
      lire_entier2(55,13,fof,0,nbcond,ncav[i]);
      gotoxy(35,14);
      write( ' COFF. PERTE CHARGE -');
      lire_reel(55,14,fof,0,maxi_r,kjonc[i]);
      gotoxy(12,13); write( ' correct o/n <0>');
      resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
      else term:=true;
    until term=true;
  end;

5:
  begin
    term:=false;
    Repeat
      unite:=1;
      cadre_gras(11,68,10,16,14);
      gotoxy(28,10);TEXTCOLOR(4);writeln('  VANNE NON MANIPULEE');
      normvideo;

```

```

gotoxy(35,12);
write('OUVERTURE DE VANNE ----');
lire_reel(55,12,fof,0,unite,tau[i]);
gotoxy(35,13);
write('N° COND. EN AMONT -----');
lire_entier(55,13,fof,0,nbcond,ncam[i]);
gotoxy(35,14);
write('N° COND EN AVAL ----');
lire_entier2(55,14,fof,0,nbcond,ncav[i]);
gotoxy(12,13); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;
until term=true;
end;

```

```

6:begin
term:=false;
Repeat
gotoxy(1,18); clreol; unite:=1;
Cadre_gras(11,68,10,20,14);
gotoxy(31,10);TEXTCOLOR(4);writeln(' VANNE MANIPULEE ');
normvideo;
gotoxy(35,12);
write('N° COND. EN AMONT -----');
lire_entier(55,12,fof,1,nbcond,ncam[i]);
gotoxy(35,13);
write('N° COND EN AVAL -----');
lire_entier2(55,13,fof,0,nbcond,ncav[i]);
gotoxy(35,14);
write('OUVERTURE INITIALE ----');
lire_reel2(55,14,fof,0,unite,tau0[i]);
gotoxy(35,15);
write('OUVERTURE FINALE -----');
lire_reel2(55,15,fof,0,unite,tauf[i]);
gotoxy(35,16);
write('INTERV.TEMPS ABS.COURBE');
lire_reel(60,16,fof,0,maxi_r,dxt[i]);
gotoxy(35,17);
write('TEMPS MANIPULATUION --');
lire_reel(55,17,fof,0,maxi_r,tov[i]);
gotoxy(15,18);
write('LES VALEURS DE TAU SONT ELLES SUR FICHER <O/N> <N>');
Gotoxy(39,19);
an:=readkey;
gotoxy(12,15); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false else
term:=true;
until term=true;
term:=false;

```

```

Repeat
if upcase(an)='O' then
begin
gotoxy(20,19);
write(' NOM DU FICHIER ');readln(fichfr[i]);
end
else
begin
FOR W:=10 to 20 do
begin
gotoxy(11,W);
write(' ');
end;
Cadre_gras(11,68,10,20,14);
gotoxy(35,12);
write('NOM DU NOUVEAU FICHIER:');
highvideo;readln(fichfr[i]);normvideo;
gotoxy(35,13);
write('OUVERTURE INITIALE ----');
lire_reel2(55,13,fof,0,unite,tauO[i]);
gotoxy(35,14);
write('OUVERTURE FINALE ----- ');
lire_reel2(55,14,fof,0,unite,tauf[i]);
gotoxy(35,15);
write('NBRE POINTS SUR COURBE ');
lire_entier(60,15,fof,1,100,m[i]);
gotoxy(35,16);
write('INTERV.TEMPS ABS.COURBE');
lire_reel(60,16,fof,0,maxi_r,dxt[i]);
assign(pastau,'b:'+fichfr[i]);
rewrite(pastau);
for j:=0 to (m[i]-1) do
begin
x[j]:=j*dxt[i];
gotoxy(18,17);
write('ORDONNEE DU POINT D'ABCISSE ',x[j]:6:2,' ','s',' ');
lire_reel2(30,18,fof,0,maxi_r,y[j]);
gotoxy(29,18); write(' ');
write(pastau,y[j]);
end;
close (pastau);
end;
gotoxy(12,15); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;
until term=true;
end;

```

7:

```
Begin
  term:=false;
  Repeat
    unite:=1;
    cadre_gras(11,68,10,18,14);
    gotoxy(30,10);TEXTCOLOR(4);writeln(' POMPE NORMALE ');
    normvideo;
    gotoxy(35,12);
    write(' N° COND. EN AMONT --');
    lire_entier2(55,12,fof,0,nbcond,ncam[i]);
    gotoxy(35,13);
    write(' N° COND EN AVAL ----');
    lire_entier(55,13,fof,1,nbcond,ncav[i]);
    gotoxy(35,14);
    write(' HAUTEUR MANO.(Q=0): ');
    lire_reel(55,14,fof,0,maxi_r,hsh[i]);
    gotoxy(31,15);
    write('HAUT. DEVEL.(Rend. Max):');
    lire_reel(55,15,fof,0,maxi_r,hro[i]);
    gotoxy(31,16);
    write('DEBIT (Rendement maxi): ');
    lire_reel(55,16,fof,0,maxi_r,gro[i]);
    gotoxy(12,14); write( ' correct o/n <0>');
    resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
    else term:=true;
  until term=true;
End;
```

8:

```
Begin
  term:=false;
  Repeat
    unite:=1;
    gotoxy(11,18);
    write(' ');
    cadre_gras(11,68,9,25,14);
    gotoxy(32,9);TEXTCOLOR(4);writeln(' POMPE TRANS ');
    normvideo;
    gotoxy(35,11);
    write('N° COND. EN AMONT -----');
    lire_entier2(55,11,fof,0,nbcond,ncam[i]);
    gotoxy(35,12);
    write('N° COND EN AVAL -----');
    lire_entier(55,12,fof,1,nbcond,ncav[i]);
    gotoxy(30,13);
    write('Fonctionnement à rendement maximal ');
    gotoxy(35,14);
    write('DEBIT -----');
    lire_reel(55,14,fof,0,maxi_r,qr[i]);
    gotoxy(35,15);
    write('HAUTEUR-----');
```



```

lire_reel(55,15,fof,0,maxi_r,hr[i]);
gotoxy(35,16);
write('VITESSE-----');
lire_reel(55,16,fof,0,maxi_r,nr[i]);
gotoxy(35,17);
write('RENDEMENT -----');
lire_reel(55,17,fof,0,unite,er[i]);
gotoxy(35,18);
write('INERTIE -----');
lire_reel(55,18,fof,0,maxi_r,wr2[i]);
gotoxy(30,19);
write('Fonctionnement à régime normal ');
gotoxy(35,20);
write('VITESSE -----');
lire_reel(55,20,fof,0,maxi_r,no[i]);
gotoxy(35,21);
write('DEBIT -----');
lire_reel(55,21,fof,0,maxi_r,qo[i]);
gotoxy(30,22);write('NBRE DE POMPES EN PARALL. ');
lire_entier(55,22,fof,1,10,npp[i]);
gotoxy(30,23);write('COEFF.FROT. VAN. CONT. ');
lire_reel(55,23,fof,0,maxi_r,cvan[i]);
gotoxy(12,15); write( ' correct o/n <O>');
resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
else term:=true;
until term=true;
term:=false;
Repeat
for w:=11 to 24 do
begin
gotoxy(13,w);
write(' ');
end;
if ncam[i]=0 then
begin
for w:=14 to 25 do
begin
gotoxy(1,w); clreol;
end;
cadre_gras(11,68,9,13,14);
gotoxy(27,9);textcolor(4); write(' Suite pompetrans');
NORMVIDEO;
gotoxy(30,11); write('HAUT. MANO.A LA SUCT. ');
lire_reel(55,11,fof,0,maxi_r,hsuc[i]);
end;
for w:=16 to 25 do
begin
gotoxy(1,w); clreol;
end;
cadre_gras(11,68,9,18,14);
gotoxy(12,13);
write(' ');

```

```

gotoxy(27,9);textcolor(4);write(' COURBE CARACTERISTIQUE ');
normvideo;
gotoxy(13,11);write('Les valeurs.. courbes carac.
                    déjà sur fichier? o/n <n>');
an:=readkey;write(upcase(an));
gotoxy(35,12); write('Interv. sur axe des X');
lire_reel2(55,12,fof,0,maxi_r,dth[i]);
if upcase(an)='O' then
begin
gotoxy(35,13);write('Nom fichier carac. pression ');
highvideo;
  readln(fichfr1[i]);normvideo;
  gotoxy(35,14);write('Nom fichier carac. couple ');
highvideo;readln(fichfr2[i]);normvideo;
end
else
begin
unite:=100;
gotoxy(15,13); write('caractéristiques pression');
gotoxy(30,14);write('Nom fichier de sauvegarde');
highvideo;
  readln(fichfr1[i]);normvideo;
  gotoxy(30,15);write('Nbre points sur courbe');
  lire_entier(55,15,fof,1,100,won[i]);
Assign(paspompe,'b:'+fichfr1[i]);rewrite(paspompe);
for w:=1 to won[i] do
begin
gotoxy(35,16); write('Point ',w,'-----');
  gotoxy(55,16);write(' ');
  gotoxy(55,16);readln(ccp[i]);
  writeln(paspompe,ccp[i]);
end;
close(paspompe);
for wi:=12 to 17 do
begin
gotoxy(12,wi);
write(' ');
end;
gotoxy(25,13); write('caractéristiques couple ');
gotoxy(32,14);write('Nom fichier de sauvegarde');
highvideo;
  readln(fichfr2[i]);normvideo;
  gotoxy(32,15);write('Nbre points sur courbe');
  lire_entier(52,15,fof,1,100,won1[i]);
Assign(paspompe,'b:'+fichfr2[i]);rewrite(paspompe);
for w:=1 to won1[i] do
begin
gotoxy(35,16); write('Point ',w,'-----');
  gotoxy(55,16);write(' ');
  gotoxy(55,16);readln(cct[i]);
  writeln(paspompe,cct[i]);
end;

```

```

        close(paspompe);
    end;
    gotoxy(12,17); write( ' correct o/n <0>');
    resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
        else term:=true;
until term=true;
end;

9:
begin
    term:=false;
    Repeat
        cadre_gras(11,68,10,18,14);
        gotoxy(31,10);TEXTCOLOR(4);writeln(' BRANCHEMENT ');
    normvideo;gotoxy(25,12);
        write('NBRE DE COND. EN AMONT');
        lire_entier(50,12,fof,1,nbcond,cm[i]);
        gotoxy(25,13);
        write('NBRE DE COND. EN AVAL');
        lire_entier(50,13,fof,1,nbcond,cv[i]);
        gotoxy(25,14);
        write('N° CONDUITES EN AMONT ');
    for j:=1 to cm[i] do
    begin
        gotoxy(50,14);write(' ');
        lire_entier(50,14,fof,1,nbcond,ncmb[i,j]);
    end;
        gotoxy(25,15);
        write('N° CONDUITES EN AVAL ');
    for j:=1 to cv[i] do
    begin
        gotoxy(50,15); write(' ');
        lire_entier(50,15,fof,1,nbcond,ncvb[i,j]);
    end;
        gotoxy(25,16); write( ' correct o/n <0>');
        resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
            else term:=true;
    until term=true;
end;

10:
begin
    term:=false;
    Repeat
        cadre_gras(11,68,10,18,14);
    gotoxy(31,10);TEXTCOLOR(4);writeln(' CHEMINEE EQUILIBRE');
    normvideo; gotoxy(25,12);
        write('NUMERO DE COND. EN AMONT');
        lire_entier(50,12,fof,1,nbcond,NCAM[i]);
        gotoxy(25,13);
        write('NUMERO DE COND. EN AVAL');
        lire_entier(50,13,fof,1,nbcond,NCAV[i]);

```

```

gotoxy(25,14);
write(' SECTION DE LA CHEMINEE');
lire_reel(50,14,fof,0,maxi_r,SCH[i]);
gotoxy(25,16); write( ' correct o/n <0>');
    resp:=readkey; if Upcase(resp)='N' then term:= false
                    else term:=true;
until term=true;

```

```

END;

```

```

end; (case)
clrscr;
end;

```

```

END ; (* proc. saisie *)

```

```

PROCEDURE SAUVEGARDE;

```

```

var

```

```

i,j:integer;

```

```

begin

```

```

clrscr;

```

```

gotoxy(25,9);

```

```

writeln('NOM DU FICHIER DE SAUVEGARDE : ');

```

```

mincecad(30,46,10,12,3);

```

```

gotoxy(33,11);

```

```

readln(fichdon);

```

```

clrscr;

```

```

mincecad(31,53,9,11,3);

```

```

gotoxy(33,10);

```

```

writeln('SAUVEGARDE EN COURS');

```

```

assign(don,'b:'+fichdon);

```

```

rewrite(don);

```

```

writeln(don,nbcond,' ',nbfront,' ',tfine:6:3,' ',reponsec);

```

```

for i:=1 to nbcond do

```

```

writeln(don,long[i]:6:2,' ',diam[i]:6:3,' ',

```

```

    vitond[i]:6:2,' ',coff[i]:6:4,

```

```

    ' ',haut[i,1]:10:5,' ',debit[i,1]:10:5);

```

```

for i:=1 to nbfront do

```

```

begin

```

```

    writeln(don,typ[i]);

```

```

    case typ[i] of

```

```

      1:writeln(don,hres[i]:6:2,' ',kres[i]:6:3,' ',ncav[i]);

```

```

      2:writeln(don,hres[i]:6:2,' ',kres[i]:6:3,' ',ncam[i]);

```

```

      3:writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i]);

```

```

      4:writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',kjonc[i]:6:3);

```

```

      5:writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',tau[i]:6:3);

```

```

      6:begin

```

```

          writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',

```

```

              tov[i]:6:3,' ',dxt[i]:6:3,

```

```

              ' ',tauo[i]:4:2,' ',tauf[i]:4:2);

```

```

        writeln(don,fichfr[i]);
    end;
7:writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',hsh[i]:6:3,
          ' ',hro[i]:6:3,' ',gro[i]:6:3);
8:begin
    writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',qr[i]:6:2,
          ' ',nr[i]:6:2,' ',hr[i]:6:2);
    writeln(don,er[i]:6:2,' ',wr2[i]:6:2,' ',no[i]:6:2,
          ' ',qo[i]:6:2,' ',npp[i]:6,' ',cvan[i]:6:2,
          ' ',dth[i]:6:2);
    writeln(don,fichfr1[i]);
    writeln(don,fichfr2[i]);
    writeln(don,hsuc[i]:6:2);
end;
9:begin
    writeln(don,cm[i],' ',cv[i]);
    for j:=1 to cm[i] do
        writeln(don,ncmb[i,j]);
    for j:=1 to cv[i] do
        writeln(don,ncvb[i,j]);
    end;
    10:writeln(don,ncam[i],' ',ncav[i],' ',sch[i]);
end; {end du case}
end;
close(don);
end;
PROCEDURE LECTURE;
var
    i,j:integer;
begin
    clrscr;
    gotoxy(25,10);
    writeln('FICHER DE DONNEES : ');
    mincecad(25,44,11,13,3);

Repeat
    gotoxy(26,12);
    readln(fichdon);
    p:='b:'+fichdon;
    if not(fichexist(p)) then
        write(#7);
        gotoxy(26,12);
        write(' ');
    until fichexist(p);
    clrscr;
    mincecad(27,51,9,11,3);
    gotoxy(29,10);
    writeln('RECUPERATION EN COURS ');
    assign(don,'b:'+fichdon);
    reset(don);
    readln(don,nbcond,nbfront,tfine,reponsec);
    if reponsec=1 then reponse:='S' ELSE REPOSE:='A';

```

```

for i:=1 to nbcond do
readln(don,long[i],diam[i],vitond[i],coff[i],haut[i,1],debit[i,1]);
for i:=1 to nbfront do
begin
readln(don,typ[i]);
case typ[i] of
1:readln(don,hres[i],kres[i],ncav[i]);
2:readln(don,hres[i],kres[i],ncam[i]);
3:readln(don,ncam[i],ncav[i]);
4:readln(don,ncam[i],ncav[i],kjonc[i]);
5:readln(don,ncam[i],ncav[i],tau[i]);
6: begin
readln(don,ncam[i],ncav[i],tov[i],dxt[i],tauo[i],tauf[i]);
readln(don,fichfr[i]);
end;
7:readln(don,ncam[i],ncav[i],hsh[i],hro[i],gro[i]);

8:begin
readln(don,ncam[i],ncav[i],qr[i],nr[i],hr[i]);
readln(don,er[i],wr2[i],no[i],qo[i],npp[i],cvan[i],dth[i]);
readln(don,fichfr1[i]);
readln(don,fichfr2[i]);
readln(don,hsuc[i]);
end;
9:begin
readln(don,cm[i],cv[i]);
for j:=1 to cm[i] do
readln(don,ncmb[i,j]);
for j:=1 to cv[i] do
readln(don,ncvb[i,j]);
end;
10:readln(don,ncam[i],ncav[i],sch[i]);
end;
end;
close(don);
end;
PROCEDURE IMPRESS;
var
i,j:integer;
zz:char;
begin
lecture;
clrscr;
gotoxy(25,10);
writeln(' VERIFIER IMPRIMANTE ET CONTINUER ');
gotoxy(25,22);
write(' UNE TOUCHE POUR CONTINUER ');zz:=readkey;clrscr;
gotoxy(25,10);writeln('ATTENTE SVP');
writeln(lst,' ANALYSE EN REGIME TRANSITOIRE ');
gotoxy(15,6);

```

```

writeln(lst,' *****');
writeln(lst,' ');writeln(lst,' ');
writeln(lst,' DONNEES GENERALES ');
writeln(lst,' ');
write(lst,' NOMBRE DE CONDUITES :');
WRITELN(lst,NBCOND);
write(lst,' NOMBRE DE FRONTIERES:');
writeln(lst,nbfront);
write(lst,' TEMPS DE SIMULATION :');
WRITELN(lst,TFINE:3:1);
if reponse='S' then
writeln(lst,' SYSTEME UNITE INTERNATIONAL ',' ');
else
writeln(lst,' SYSTEME UNITE ANGLAIS ',' ');
WRITELN(lst,' ');WRITELN(lst,' ');
writeln(lst,' CARACTERISTIQUES DES CONDUITES ');
writeln(lst,' ');writeln(lst,' ');
writeln(lst,' N.COND ',' ','LONG. ',' ','DIAM. ','
','VIT.OND. ',' ','COEF.FROT. ',' ');
for i:=1 to nbcond do
writeln(lst,' ',i:3,' ',long[i]:5:2,
',diam[i]:5:2,
',vitond[i]:5:1,',coff[i]:5:3,' ');
writeln(lst,' ');writeln(lst,' ');writeln(lst,' ');
writeln(lst,' POSITIONS DES FRONTIERES ');
writeln(lst,' ');writeln(lst,' ');
for i:=1 to nbfront do
case typ[i] of
1:writeln(lst,' -----RESERVOIR EN
AMONT-----',ncav[i]);
2:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----RESERVOIR EN AVAL-----');
3:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----JONCTION 2 CONDUITES-----',ncav[i]:2);
4:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----PERTE LOCALE-----',ncav[i]:2);
5:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----VANNE NORMALE-----',ncav[i]:2);
6:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----VANNE MANIPULEE-----',ncav[i]:2);
7:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----POMPE NORMALE-----',ncav[i]:2);
8:writeln(lst,' ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----POMPE POWER FAILURE-----',ncav[i]:2);
9:begin
write(lst,' ');
for j:=1 to cm[i] do
write(lst,ncmb[i,j]:2,' ');
write(lst,'FR ',i,'--BRANCHEMENT PLUSIEURS CONDUITES--');
for j:=1 to cv[i] do
write(lst,ncvb[i,j]:2,' ');
writeln(lst,' ');

```

```

end;
10:writeln(lst,'          ',ncam[i]:2,' FR',i,
'-----CHEMINEE D EQUILIBRE-----',ncav[i]:2);
end;
      writeln(lst,'          ');writeln(lst,'          ');
for i:=1 to nbfront do
begin
  if typ[i]=6 then
  begin
    writeln(lst,'          FR ',i,'          VANNE MANIPULEE          ');
    writeln(lst,'          -----          ');
    writeln(lst,'          ');
    writeln(lst,'          TEMPS D OPERATION          ',tov[i]:6:3,'          ');
    writeln(lst,'          ETAT INITIAL          ',tauo[i]:6:3,'          ');
    writeln(lst,'          ETAT FINAL          ',tauf[i]:6:3,'          ');
    writeln(lst,'          LES VALEURS DE TAU EN FONCTION DU TEMPS SONT
          DANS LE FICHIER: ');
      riteln(lst,'          b:',fichfr[i],'          ');
    end;
    writeln('          ');writeln('          ');
    IF TYP[I]=8 then
    begin
      writeln(lst,'          FR ',i,'          POMPE __ PERTE DE PUISSANCE          ');
      writeln(lst,'          -----          ');
      writeln(lst,'          ');
      writeln(lst,'          PARAMETRES EN FONCTIONNEMENT OPTIMAL          ');
      writeln(lst,'          -----DEBIT-----',qr[i]:6:3,'          ');
      writeln(lst,'          -----VITESSE DE ROTATION-----',nr[i]:6:3,'          ');
      writeln(lst,'          -----HAUTEUR ELEVATION-----',hr[i]:6:3,'          ');
      writeln(lst,'          -----RENDEMENT-----',er[i]:6:3,'          ');
      writeln(lst,'          -----INERTIE-----',wr2[i]:6:3,'          ');
      writeln(lst,'          LES VALEURS DE FH ET FB SONT
          RESPECTIVEMENT DANS          ');
        writeln(lst,'          LES FICHIERS: ')
          writeln(lst,'          FH----b:',fichfr1[i],'          ');
          writeln(lst,'          FB----b:',fichfr2[i],'          ');
        end;
      end;
    end;
  end;
  (end procedure)

```

```

PROCEDURE mettre_cadre( x,max_x,y,max_y:byte;
                        Num_couleur : byte);

```

```

VAR
  i,j : byte ;

```

```

BEGIN
  textcolor(num_couleur);
  textbackground(num_couleur);
  highVideo;
  for i:=x to max_x do

```

```

begin
  gotoxy(i,y); write(#219);
  gotoxy(i,max_y); write(#219);
end;
for j:=y to max_y do
begin
  gotoxy((x-1),j); write(#219);
  gotoxy((max_x +1),j); write(#219);
  gotoxy((x-2),j); write(#219);
  gotoxy((max_x+2),j); write(#219);
end;
NormVideo;
END;

```

```
PROCEDURE Haut_menu;
```

```
VAR
```

```
  i,j,k,l,m : byte;
```

```
BEGIN
```

```
  highvideo;
```

```
  textcolor(4);
```

```
  for i:=12 to 67 do
```

```
  begin
```

```
    gotoxy(i,3); write('█');
```

```
    gotoxy(i,5); write('█');
```

```
  end;
```

```
  gotoxy(12,4);
```

```
writeln('█');

```

```
  normvideo;
```

```
  gotoxy(36,4);
```

```
  textcolor(15); write('HYD.TR.PROG');
```

```
  normvideo;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE Questions1;
```

```
BEGIN
```

```
  textbackground(4);
```

```
  gotoxy(18,10);
```

```
  writeln(' 1 : ENTREE DONNEES AU CLAVIER ');
```

```
  gotoxy(18,12);
```

```
  writeln(' 2 : IMPRESSION DES DONNEES ');
```

```
  gotoxy(18,14);
```

```
  writeln(' 3 : SAUVEGARDE DES DONNEES ');
```

```
  gotoxy(18,16);
```

```
  writeln(' 4 : RETOUR MENU PRINCIPAL ');
```

```
  normvideo;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE MENU1(var choix : char);
```

```
VAR
```

```
  a,b,c,d,e,f,g,h,l : byte;
```

```
BEGIN
```

```
  clrscr; haut_menu;
```

```

mettre_cadre(14,65,7,23,14);
mincecad(16,64,8,22,1);
questions1;
mincecad(24,42,19,21,3);
gotoxy(25, 20); write(' Votre choix ');
choix:=readkey;
choix:=UpCase(choix);
if (choix<>'1') and (choix<>'2') and (choix<>'3')
and (choix<>'4') then
repeat
gotoxy(25, 20);
write(' ');
gotoxy(27, 20);
write(#7);
write(' Non permis ');
delay(500);
gotoxy(25, 20);
write(' ');
gotoxy(25,20);
write(' Votre choix ');
choix:=readkey;
choix:= UpCase(choix);
write(choix);
until (choix='1') or (choix='2') or (choix='3')
or (choix='4')
else
write(choix);
end;
PROCEDURE Questions3;
BEGIN
textbackground(4);
gotoxy(18,10);
writeln(' 1 : SORTIE RESULTATS SUR IMPRIMANTE ');
gotoxy(18,12);
writeln(' 2 : SORTIE RESULTATS SUR ECRAN ');
gotoxy(18,14);
writeln(' 3 : RETOUR MENU PRINCIPAL ');
normvideo;
END;

PROCEDURE Questions2;
BEGIN
textbackground(4);
gotoxy(18,10);
writeln(' 1 : ENTREE DONNEES ');
gotoxy(18,12);
writeln(' 2 : EXECUTION ');
gotoxy(18,14);
writeln(' 3 : IMPRESSION ');
gotoxy(18,16);
writeln(' 4 : QUITTER ');
normvideo;

```

```

END;
PROCEDURE Questions4;
  BEGIN
    textbackground(4);
    gotoxy(18,10);
    writeln('      CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL ');
    gotoxy(20,12);
    writeln(' 1 : METHODE DES CARACTERISTIQUES ');
    gotoxy(20,14);
    writeln(' 2 : METHODE DES DIFFERENCES FINIES ');
    gotoxy(20,16);
    writeln(' 3 :          MENU PRINCIPAL ');
    normvideo;

```

```

END;
PROCEDURE MENU2(var choix : char);
  var
    a,b,c,d,e,f,g,h,l : byte;
  BEGIN
    clrscr;  haut_menu;
    mettre_cadre(14,65,7,23,14);
    mincecad(16,64,8,22,1);
    questions2;
    mincecad(44,62,14,16,3);
    gotoxy(45, 15); write(' Votre choix ');
    choix:=readkey;
    choix:=UpCase(choix);
    if (choix<>'1') and (choix<>'2') and (choix<>'3')
    and (choix<>'4') then
      repeat
        gotoxy(45, 15);
        write(' ');
        gotoxy(47, 15);
        write(#7);
        write(' Non permis ');
        delay(500);
        gotoxy(45, 15);
        write(' ');
        gotoxy(45,15);
        write(' Votre choix ');
        choix:=readkey;
        choix:= UpCase(choix);
        write(choix);
      until (choix='1') or (choix='2') or (choix='3')
        or (choix='4')
        else
          write(choix);

```

```

end;
PROCEDURE MENU4(var choix : char);
  var
    a,b,c,d,e,f,g,h,l : byte;
  BEGIN
    clrscr;  haut_menu;

```

```

mettre_cadre(14,65,7,23,14);
mincecad(16,64,8,22,1);
questions4;
mincecad(26,44,18,20,3);
gotoxy(27, 19); write(' Votre choix ');
choix:=readkey;
choix:=UpCase(choix);
if (choix<>'1') and (choix<>'2') and (choix<>'3')
  then
  repeat
  gotoxy(27, 19);
  write(' ');
  gotoxy(27, 19);
  write(#7);
  write(' Non permis ');
  delay(500);
  gotoxy(27, 19);
  write(' ');
  gotoxy(27,19);
  write(' Votre choix ');
  choix:=readkey;
  choix:= UpCase(choix);
  write(choix);
  until (choix='1') or (choix='2') or (choix='3')
  else
  write(choix);
end;
PROCEDURE MENU3(var choix : char);
var
a,b,c,d,e,f,g,h,l : byte;
BEGIN
  clrscr; haut_menu;
mettre_cadre(14,65,7,23,14);
mincecad(16,64,8,22,1);
questions3;
mincecad(24,42,19,21,3);
gotoxy(25, 20); write(' Votre choix ');
choix:=readkey;
choix:=UpCase(choix);
if (choix<>'1') and (choix<>'2') and (choix<>'3') then
repeat
gotoxy(25, 20);
write(' ');
gotoxy(27, 20);
write(#7);
write(' Non permis ');
delay(500);
gotoxy(25, 20);
write(' ');
gotoxy(25,20);
write(' Votre choix ');
choix:=readkey;

```

```

choix:= UpCase(choix);
write(choix);
until (choix='1') or (choix='2') or (choix='3')
  else
    write(choix);
end;
PROCEDURE saiscont;
begin
  repeat
    menu1(c);
    case c of

      '1':  saisie;
      '2':  impress;
      '3':  garde;
    end;
  until c='4';
end;

```

{ FICHER RESUL.PAS }

```

PROCEDURE DEBUT;
var dummy:char;
Begin
  clrscr;
  Gotoxy(26,2);Textcolor(15);lowvideo;
  write('COLE OLYTECHNIQUE DE HIES ');
  gotoxy(26,3);
  write(' ENIE ECANIQUE ');
  normvideo;
  textcolor(4);highvideo;
  gotoxy(25,2);write('E');
  gotoxy(32,2);write('P');
  gotoxy(49,2);write('T');
  gotoxy(32,3);write('G');
  gotoxy(39,3);write('M');
  normvideo;
  gotoxy(31,5);
  textcolor(4);highvideo;
  writeln('PROJET FIN ETUDES ');
  gotoxy(35,6);
  writeln('JUIN 1989');
  normvideo;
  Gotoxy(18,8);
  writeln(' ██████████ ██████████ ██████████ ');
  Gotoxy(18,9);
  writeln(' ██████████ ██████████ ██████████ ');
  Gotoxy(18,10);
  writeln(' ██████████ ██████████ ██████████ ');
  Gotoxy(18,11);
  writeln(' ██████████ ██████████ ██████████ ');

```



```

        if typ[i]=8 then
            writeln('      alpha-P',i,'=',alphh[i]:6:3,
                '      ',v-P',i,'=',vh[i]:6:3);
    end;
    writeln('      n° conduite ', '      ', 'hauteur ',
        '      ', 'debit ', '      ');
    for k:=1 to comp do
        begin
            val(nc[k],reel,kkk);
            if kkk=0 then
                write('      ',reel:3:0,' ');
            val(hh[k],reel,kkk);
            if kkk=0 then
                write('      ',reel:10:5,' ');
            val(qq[k],reel,kkk);
            if kkk=0 then
                writeln('      ',reel:10:5,' ');
        end;
    writeln;
    gotoxy(20,24);
    write(' APPUYER SUR RETOUR POUR CONTINUER ');
    Repeat
    cc:=ReadKey;
    Until cc=#13;
end;
PROCEDURE impimp;
var
k,i:integer;
begin
    clrscr;
    mincecad(28,50,11,13,3);
    gotoxy(29,12);writeln(' IMPRESSION EN COURS ');
    writeln(lst,'      temps: ',temp:5:2,' ');
    for i:=1 to nbsemt do
        begin
            if typ[i]=6 then
                writeln(lst,'      tau V',i,'=',tauv[i]:6:3);
            if typ[i]=8 then
                writeln(lst,'      alpha P',i,'=',alphh[i]:6:3,'
                    v P',i,'=',vh[i]:6:3);
        end;
    writeln(lst,' ');
    writeln(lst,'      n° conduite ', '      ', 'hauteur ',
        '      ', 'debit ', '      ');
    for k:=1 to comp do
        begin
            val(nc[k],reel,kkk);
            if kkk=0 then
                write(lst,'      ',reel:3:0,' ');
            val(hh[k],reel,kkk);
            if kkk=0 then
                write(lst,'      ',reel:6:2,' ');
        end;
    end;
end;

```

```

        val (qq[k], reel, kkk);
        if kkk=0 then
            writeln(1st, ' ', reel:6:2, ' ');
        end;
        writeln(1st, ' '); writeln(1st, ' ');
    end;
begin
    clrscr;
    lecture;
    repeat
        menu3(c);
        if c<>'3' then
            begin
                clrscr;
                gotoxy(25,10);
                writeln(' NOM DU FICHER DES RESULTATS ');
                mincecad(32,47,11,13,3);
                Repeat
                    GOTOXY(33,12);
                    write(' ');
                    gotoxy(33,12);
                    readln(resul);
                    p:='b:'+resul;
                    IF not(fichexist(p)) then
                        Write(#7);
                until fichexist(p);
                assign(pasres, 'b:'+resul);
                reset(pasres);
                readln(pasres, comp);
                while not(eof(pasres)) do
                    begin
                        readln(pasres, temp);
                        for i:=1 to nbfront do
                            begin
                                if typ[i]=6 then
                                    readln(pasres, tauv[i]);
                                if typ[i]=8 then
                                    readln(pasres, alphh[i], vh[i]);
                            end;
                        for k:=1 to comp do
                            begin
                                readln(pasres, nc[k], hh[k], qq[k]);
                            end;
                        case c of
                            '2': impecran;
                            '1': impimp;
                        end;
                    end;
                close(pasres);
            end;
        until (c='3')
    end;
end;

```

BIBLIOGRAPHIE

M. Hanif Chaudhry, PH.D., "APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS",
Van Nostrand Runhold Company Inc. 1987 New-York.

Gary A. Sod, "NUMERICAL METHODS IN FLUID DYNAMICS",
Cambridge University Press - 1986.

X Shaw S. Kuo, "COMPUTER APPLICATIONS OF NUMERICAL METHODS",
Addison, Wesley Publishing Company.

Rodnay Zaks, "INTRODUCTION TO PASCAL INCLUDING UCSD PASCAL"
<Sybex>, 2e édition revised.

Bierre le Boeux, "INTRODUCTION A PASCAL AVEC TURBO-PASCAL"
<Sybex>.

X E. Benjamin Wylie, Victor L. Streeter, "FLUID TRANSIENTS"
FEB Press, Michigan USA, 1983.

Léon Lapidus, George F. Pindis, "NUMERICAL SOLUTION OF PARTIAL
DIFFERENTIAL EQUATIONS IN SCIENCE
AND ENGINEERING"
John Wiley and Sons, 1982.

D. Ouazar, C.A. Brebbia, H. Barthet, "COMPUTER METHODS AND WATER
RESOURCES : COMPUTATIONAL HYDRAULICS"
Computational Mechanis publications, Southampton Boston,
1988.

X Bortand Software "TURBO PASCAL REFERENCE MANUAL".