ECOLE INTER-ETATS D'INGENIEURS DE L'EQUIPEMENT RURAL
(E.I.E.R)
03 BP 7023 Ouagadougou Burkina Faso

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

THEME : ANALYSE DES METHODES DE RESOLUTION DE CALCUL HYDRAULIQUE DES RESEAUX EXEMPLES DE CALCUL SUR TABLEUR

Assisté par :
M. GUILLERMINET
Professeur à l'EIER

Présenté par :
Simon KOULODJI

DEDICACE

- A ma mère pour toutes ses peines et sa tendresse pour moi

- A mon épouse pour son soutien moral toute l'année à travers ses correspondances

- Et enfin à mes filles Monique et Carelle en espérant qu'elles feront mieux que Papa.

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter ici mes remerciements à toute la Direction de l'Ecole pour l'organisation matérielle et pédagogique des mémoires de fin d'études. Cette phase importante de notre formation nous a permis face à certains problèmes scientifiques de réfléchir et de proposer des approches de solution.

Nos remerciements vont particulièrement à nos encadreurs qui ont su par leurs conseils nous guider pendant nos travaux.

A tous ceux qui ont d'une manière ou d'une autre contribué à la finalisation de ce document, nous disons merci.

SOMMAIRE

A- ANALYSE DES METHODES DE CALCUL DES RESEAUX D'EAU

INTRODUCTION

Le calcul en régime permanent des pressions et d'écoulement dans les réseaux maillés est d'une grande importance en génie rural (Hydraulique agricole et AEP). Les équations hydrauliques de base décrivant le phénomène sont des équations non linéaires qui ne peuvent être directement résolues. Ces équations ont été exprimées de deux manières :
- équations de conservation de la masse (ou équations de continuité) en chaque noeud.
- équations de conservation de l'énergie le long du poutour des mailles du réseau ou équations de boucle.

Les équations de continuité aux noeuds du réseau fournissent des équations linéaires, tandis que les équations de conservation de l'énergie donnent généralement lieu à des équations non linéaires. Comme il n'existe pas de méthode de résolution directe de ce système d'équations, on a recours à une exploitation sur ordinateur.

C'est pourquoi le calcul des réseaux maillés de distribution d'eau a depuis longtemps retenu l'attention des ingénieurs en sciences de l'eau et donné naissance à plusieurs publications.

La plus célèbre de toutes ces publications est indiscutablement celle de Hardy-Cross datant de 1936. La méthode préconisée par Cross consiste à envisager une répartition quelconque du débit ente les différents tronçons de conduites du réseau, à calculer la perte de charge entre deux points pour différents trajets à corriger la répartition des débits jusqu'à ce que la perte de charge entre deux points soit identique quel que soit le trajet envisagé. Bien qu'elle ne soit pas aussi populaire que la première, Hardy-Cross décrit une autre méthode par la résolution des équations nodales par ajustement de charge à chaque noeud de façon que l'équation de débits soit équilibrée.

Particulièrement adéquat pour un calcul manuel, le procédé de Cross, vu son caractère répétitif, a engendré de nombreux programmes d'ordinateur. La convergence du procédé dépendant du choix de la répartition initiale des débits, est fréquemment faible pour les réseaux à grand nombre de mailles.

Des méthodes particulières furent mises au point par Martin et Peters (1) pour remedier à cet inconvénivent. Elles consistent d'une part à répartir le déséquilibre des pertes de charge sur tout le réseau plutôt que sur une maille,; d'autre part à un choix optimal de mailles, ceci peut-être obtenu en choisissant les mailles de façon telle que les conduites à coefficient de résistance élevé, ne soient pas communes à plusieurs mailles. Cette technique d'amélioration de la convergence est due à travers (2)

D'autres méthodes ont recours à des techniques de linéarisation que nous verrons plus loin.

Outre l'inconvénient de voir la convergence dépendre du choix initial des débits, il faut noter que les divers procédés nécessitent l'inversion d'une matrice à chaque itération, opération qui s'avère fréquemment prohibitive du point de vue temps de calcul. Lekane (3) réduit le temps requis pour chaque itération ainsi que le nombre d'informations stockées en mémoire en utilisant une décomposition triangulaire ordonnée de la matrice des coefficients.

L'objet donc de la présente étude est dans un premier temps d'analyser ces différentes méthodes de résolution en vue de dégager la plus performante du point de vue précision et vitesse de convergence et dans un deuxième temps de présenter sur tableurs quelques exemples de calcul hydraulique des réseaux.

I PRINCIPES DE BASE

1) Géométrie du réseau maillé

Les considérations géométriques d'un réseau maillé peuvent se résumer comme suit :

Un réseau maillé est composé d'un certain nombre de section de conduites à diamètres invariables qui contiennent des pompes et des installations comme des coudes et des vannes de sectionnement. Les points de fin de sections sont identifiés soit comme des noeuds d'intersection soit des noeuds à gradient fixe. Un noeud d'intersection est un point où deux ou plusieurs conduites se rejoignent; c'est également un point où un débit peut entrer ou quitter le système. Un noeud à gradient fixe et un point ou une charge constante est maintenue, par exemple une connection à un bassin de stockage, ou on à un réservoir ou à une zone de pression constante. De plus on peut répérer des mailles du réseau. Quand les noeuds d'intersection, les noeuds à gradient fixe, les mailles sont identifiés, la relation suivante peut s'écrire.

$T = M + n + f - 1 = M + N - 1$ (1)

T = nbre de tronçon
n = nbre de noeuds d'intersection
f = nbre de noeuds à gradient fixe
N = nbre de noeuds = n + f
M = nbre de mailles.

Comme dans les réseaux réels, T est couramment supérieur à N de 40 à 50%,il vient en première approximation que :

$$N \approx 2M$$
$$T \approx 3M$$

2) Les équations fondamentales.

Un réseau maillé en état permanent est équilibré lorsque deux ensembles de conditions sont satisfaites :

a) Equation de noeuds

En tout noeud i du réseau, la somme de débits est nulle. C'est la loi de Kirchoff aux noeuds ou loi de continuité des débits.

$fi = \Sigma Qij + Ci = 0$ (i = 1,........,N) (2)

ou Qij est le débit du tronçon ij et Ci la consommation prélevée au noeud i. Qij est nul si le tronçon ij n'existe pas. Tout débit s'éloignant du noeud est négatif.

b) Equations de boucle

La somme des pertes de charge des tronçons appartenant à une même maille m est nulle. C'est la loi de Kirchoff aux mailles ou loi de conservation de l'énergie.

$fm = \Sigma hij = 0$ (3)

ou hij est la perte de charge du tronçon ij, positive si le sens du débit du tronçon coincide avec le sens de la maille, lequel est arbitraire mais doit être parfaitement défini. La relation fonctionnelle qui lie la perte de charge et le débit est sous une forme générale :

$$hij = Hi - Hj = Rij\, Qij^{\alpha} = Rij\, Qij\, |Qij|^{\alpha-1} \qquad (4a)$$

ou réciproquement

$$Qij = Rij^{-1/\alpha} \quad (Hi - Hj)|Hi - Hj|^{1-\alpha/\alpha} \qquad (4b)$$

ou Hi et Hj sont les niveaux piézométriques des noeuds i et j.
Rij est la résistance hydraulique du tronçon i j.
L'exposant α est compris entre 1,8 et 2.
Par exemple pour la formule de Manning-Strickler

$hij = 10,29 \times LxQ^2/Ks^2xD^{16/3}$ Ks : cofficient de M-S

William-Hazen lui propose :

$hij = 10,78 \times L \times Q^{1..852}/C^{1,8552} \times D^{4,87}$ C = coefficient de W-H

II METHODES DE RESOLUTION

Le système d'équations non linéaires qu'il faut résoudre pour équilibrer le réseau peut avoir pour dimension le nombre de noeuds N, ou le nombre de mailles M ou encore le nombre de tronçons T. L'évaluation initiale porte dans le premier cas, sur les niveaux piezométriques inconnus, et dans le deuxième cas sur les débits des tronçons. Dans le troisième cas aucune évaluation initiale n'est nécessaire. Toutes les méthodes que nous allons présenter s'appuient sur l'un ou l'autre des trois systèmes d'équations.

1) Algorithme pour la résolution des équations de boucle

Deux méthodes pour la résolution des équations de maille ont été développées et sont d'un emploi courant aujourd'hui. Chacun d'elles utilise la méthode de gradient (extrapolation de Newton) pour éliminer les termes non linéaires des équations d'énergie.

a) Méthode d'ajustement par tronçon unique.

Cette méthode de résolution décrite par Hardy-Cross est la plus vieille et la plus largement utilisée. La méthode originale était cependant limitée aux réseaux à boucle fermés et n'incluait que des pertes de charge linéaires.

La procédure a été depuis lors généralisée. La méthode de résolution se résume comme suit :

1 - Déterminer un système initial de débits qui satisfait la continuité à chaque noeud d'intersection.

2 - Calculer un facteur d'ajustement de débit pour chaque tronçon qui tend à satisfaire l'équation d'énergie écrite pour chaque tronçon. L'application de ce facteur de correction ne pertubera l'équilibre de l'équation de continuité.

3 - Utilisant des solutions améliorées pour chaque épreuve refaire l'étape 2 jusqu'à avoir un facteur de correction compris entre les limites spécifiées.

Le facteur d'ajustement de débit pour un tronçon est évalué à partir de l'équation d'énergie de ce tronçon et vise à corriger les débits de manière que les équations d'énergie soient satisfaites. Cependant une correction pour un tronçon particulier de conduite pertube la relation d'énergie pour tous les autres tronçons ayant en commun des conduites. Une épreuve avec cette méthode nécessite un ajustement d'écoulement pour tous les tronçons du réseau.

b) Méthode d'ajustement simultané de tronçons

Dans le but d'améliorer les caractéristiques de convergence une méthode de résolution qui ajuste simultanément les débits dans chaque tronçon de conduite représentant une équation d'énergie fut imaginée. Cette méthode se résume comme suit :
1- Déterminer un état initial de distribution de débit satisfaisant la continuité à chaque noeud d'intersection.
2- Calculer silmultanément un facteur d'ajustement de débit pour chaque tronçon qui tende à satisfaire les équations d'énergie sans déplacer l'équilibre de la continuité.
3- Utilisant les solutions améliorées refaire l'étape 2 jusqu'à obtention d'un facteur d'ajustement compris entre les limites spécifiées.

La détermination simultanée des facteurs d'ajustement des écoulement des tronçons impose la résolution simultanée de (M + N -1) équations. Chaque équation figure le déséquilibre dans l'équation d'énergie dû aux valeurs de débits incorrectes et renferme la contribution pour un tronçon particulier aussi bien que les contributions des autres tronçons qui ont des conduites communes aux deux tronçons.

Un système de (M+N-1) équations linéaires simultanées sont formées en termes de facteurs d'ajustement. Les équations linéaires peuvent être résolues en utilisant les manières classiques et la résolution donne un état d'équilibre amélioré de débits qui peuvent être utilisées pour une autre itération. Les itérations sont repétées jusqu'à obtention d'une précision spécifiée.

2) Algrithmes pour la résolution des équations nodales.

Deux méthodes pour la résoloution des équations nodales sont employées.
Il s'agit :

a) Méthode d'ajustement de noeud unique

Cette méthode était également décrite dans la publication de Hardy-Cross. Cependant,la méthode ne fut jamais aussi largement utilisée que la méthode d'ajustement par tronçon unique. Elle est néanmoins d'emploi notoire aujourd'hui. La méthode se résume comme suit :
1- Supposer une charge raisonnable à chaque noeud d'intersection du système. Cette charge arbitraire n'a à satisfaire aucune condition. Cependant meilleurs seront les hypothèses de base, moins d'itérations il y aura.
2- Calculer un facteur de correction de charge à chaque noeud d'intersection qui tende à satisfaire l'équation de continuité à ce noeud.
3- Refaire l'étape 2 jusqu'à ce que le facteur moyen de corection des charges soit dans une précision spécifié ou dans d'autres critères spécifiques de convergence.

Le facteur d'ajustement de charge est la variation en charge au niveau d'un noeud donné qui découle de la satisfaction de la continuité en considérant les charges aux noeuds adjacents comme invariants. De nouveau un gradient d'approximation est utilisée pour calculer la variation de charge nécessaire. Une seule épreuve de cette méthode requiert l'ajustement de charge pour chaque noeud d'intersection du réseau. Les séquences continuent jusqu'à ce que un critère de convergence spécifique soit trouvé.

b) Méthode d'ajustement simultané des noeuds

Cette méthode se fonde sur la résolution simultanée des équations fondamentales du réseau maillé et nécessite une linérarisation des équations en termes de valeurs approximatives de charges. Cela conduit à (n + 2 np) équations linéaires simultanées (ou np est le nbre de pompes). Ces équations sont résolues comme suit

: commençant par un système arbitraire de valeurs de charges aux noeuds d'intersection, ces charges sont alors utilisées pour linéariser le sysème d'équations nodales et la procédure reprend jusqu'à ce que les calculs suivants stafisfassent un critère de convergence ou une précision spécifique.

3)Algorithme pour la résolution des équations de tronçons :

La seule méthode utilisant cet algorithme est la méthode linéaire
Les T équations à T inconnues sont obtenues en écrivant (N-1) équations de continuité des débits aux noeuds et M équations de mailles. Conformément à l'équation (1) le nombre total d'équations est alors bien égal à T. les variables d'itéation sont les débits des tronçons.

Les (N-1) équations aux noeuds sont directement déduites de l'équation (2); ce sont des équations linéaires. Les M équations de mailles sont linéairisées en réécrivant l'équation (4a) sous la forme :

$$h_{ij} = R_{ij} \quad Q_{ij} \; |Q_{ij}|^{\alpha-1} = K_{ij} \, Q_{ij} \quad (5)$$

et les Kij sont recalculés à chaque itération avec les nouveaux débits.

Aucune évaluation initiale n'est nécessaire. Plus exactement Wood et Charles (5) qui ont décrit cete technique obtiennent de bons résultats en calcultant les Kij initiaux de l'équation (5) pour un débit initial égal à l'unité.

III COMPARAISON DES SOLUTIONS

Toutes les cinq méthodes furent comparées à une solution exacte pour des systèmes de moins de 100 conduites. Ce qui conduit à une total de 60 comparaisons et les résultats pour chaque comparaison furent tablés et comparés comme décrit dans la tableau 1. Ce dernier est le résultat d'un système de 14 conduites présenté en fig.1. La solution exacte fut obtenue dans chaque cas en exécutant la méthode linéaire une fois de plus après obtention de la précision relative de 0,005 (c'est-à-dire Σ Q-Qi/ ΣQ $\leq$ 0,005)
Le tableau 1 résume l'information qui est essentielle pour évaluer l'efficacité de chaque algorithme.

Le débit moyen et la charge pour cette solution sont mentionnés. Par la suite les débits et les charges aux noeuds d'intersection sont comparés aux solutions exactes et les différences moyennes et maximales données pour chaque méthode. Les pourcentages de différences moyennes et maximales se font à partir du débit moyen et de l'amplitude de charge, et ces valeurs sont plus utiles pour les comparaisons relatives.

Les valeurs moyennes et maximales sont aussi données pour les deux solutions fondées sur les équations nodales, les débits non équilibrés aux huit noeuds de jonction sont à la suite avec des valeurs moyennes et maximales. Finalement le nombre d'épreuves nécessaires et la précision obtenue pour chacun des six solutions sont résumées. Toutes les solutions de cet exemple sont presque bonnes, ce qui est indiqué par les bonnes comparaisons avec la solution exacte et aussi la légère distorsion des débits et charges obtenues. La plus mauvaise solution fut obtenue par la méthode d'ajustement de noeuds unique pour laquelle l'erreur moyenne de débit est seulement de 1,23% et celle de la charge 0,6%.

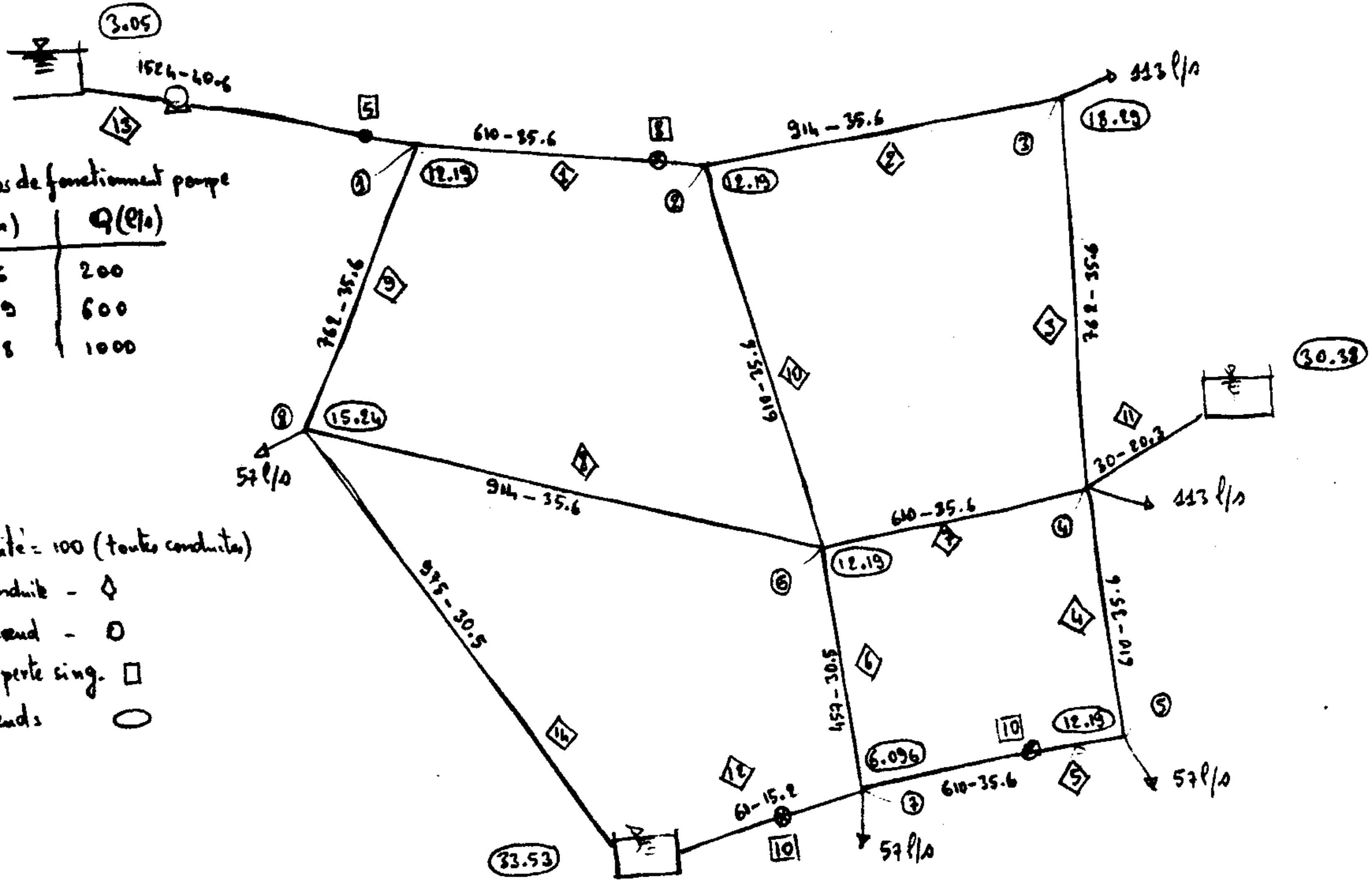
De comparaisons similaires furent faites en utilisant une précision relative de 0,005 pour 60 situations et les résultats sont résumés dans le tableau 2. Puisque l'atteinte du critère de convergence n'est pas assurée, quelques limites supérieures délibérées dans le nombre d'épreuves permises furent imposées, celle-ci sont également notées. Les calculs prenaient fin quand la précision de 0,005 est obtenue ou la limite du nombre d'épreuve fixée est atteinte.

TABLEAU 1. COMPARAISON DE DEBIT ET CHARGES POUR UN SYSTEME DE 14 CONDUITES

N° de tuyau (1)	Débit exacts (2)	Linéaire (3)	Différence (4)	SPATH (5)	Différence (6)	PATH (7)	Différence (8)	SNODE (9)	Différence (10)	Node (11)	Différence (12)
						(a) Débit (en litres par seconde)					
1	273.35	273.35	0.0.	273.36	0.01	273.31	0.04	273.36	0.01	272.60	0.75
2	149.21	149.21	0.0.	149.21	0.0	149.25	0.04	149.22	0.01	149.16	0.05
3	36.21	36.21	0.0	36.21	0.0	36.25	0.04	36.22	0.01	36.72	0.51
4	1.66	1.66	0.0.	1.66	0.0	1.71	0.05	4.04	5.70	6.87	8.53
5	-55.34	-55.34	0.0	-55.34	0.0.	-55.29	0.05	-55.25	0.09	-56.40	1.06
6	95.23	95.23	0.0	95.23	0.0	95.07	0.16	95.18	0.05	95.68	0.45
7	-139.21	-139.21	0.0	-139.21	0.0	-139.24	0.03	-139.24	0.03	-149.01	1.80
8	-110.29	-110.29	0.0	-110.20	0.0	-110.26	0.03	-110.28	0.01	-110.54	0.25
9	258.24	258.24	0.0	258.24	0.0	258.23	0.01	258.24	0.0	258.44	0.020
10	124.15	124.15	0.0	124.15	0.0	124.06	0.09	124.14	0.01	124.09	0.06
11	60.76	60.76	0.0	60.76	0.0.	60.79	0.03	60.72	0.04	67.61	6.85
12	-17.11	-17.11	0.01	-17.11	0.0	-17.22	0.11	-17.08	0.03	-15.73	1.33
13	531.59	531.59	0.0	531.59	0.0	531.54	0.05	531.54	0.0	531.85	0.74
14	90.95	90.95	0.0	90.95	0.0	90.97	0.02	90.95	0.0	92.30	1.35
Différence			0.00		0.00		0.05		0.43		1.71
Pourcentage moyen des chiffres			0.00		0.00		0.04		0.31		1.23
Différence maximale			0.01		0.01		0.16		5.70		8.53
Pourcentage maximale des chiffres			0.01		0.01		0.12		4.11		6.15
Noeuds	charges exactes										
						(b) Charges (en mètre)					
1	61.49	61.49	0.0.	61.49	0.0	61.51	0.02	61.49	0.0	61.73	0.24
2	40.58	40.58	0.0	40.57	0.01	40.61	0.03	40.58	0.0	40.84	0.26
3	31.86	31.86	0.0	31.86	0.0	31.86	0.0	32.06	0.20		
4	31.33	31.33	0.0	31.33	0.0	31.33	0.0	31.33	0.0	31.47	0.14
5	31.33	31.33	0.0	31.33	0.0	31.33	0.0	31.34	0.01	31.45	0.12
6	36.44	36.44	0.0	36.44	0.0	36.44	0.0	36.44	0.0	36.84	0.20
7	32.41	32.41	0.0	32.40	0.01	32.42	0.31	32.53	0.12		
8	41.42	41.42	0.0	41.42	0.0	41.42	0.0	41.42	0.0	41.58	0.16
Différence moyenne			0.00		0.00		0.01		0.00		0.18
Différence maxi			0.00		0.01		0.03		0.01		0.26
Différence moy/charge moy.(en %)			0.00		0.00		0.02		0.01		0.60
Différence max/amplitude charge (en %)			0.00		0.03		0.10		0.03		0.86

Nota : Le débit moyen = 138,81; la charge amplitude = 30,16

(13)



Données de fonctionnement pompe

E_p (m)	Q (l/s)
165.6	200
138.9	600
17.8	1000

HW rugosité = 100 (toutes conduites)
n° de conduite - ◇
n° de nœud - ○
coeff de perte sing. □
cote nœuds ⬭

système à 14 conduites - unités SI - p = 14 - j = 8 - l = 3 - f = 1 (toutes les longueurs en mètres et tous les diamètres en cm)

FIG 1 - Exemple de système (1 m = 1000 mm = 3.28 ft , 1000 l/s = 35,3 ft³/s

15

Les solutions étaient d'une comparaison favorable avec la solution exacte si le pourcentage de déviation moyenne, fondé sur le débit moyen et l'amplitude de charge de la solution exacte, des débits et des charges, n'exédait pas 10% et le pourcentage maximum des déviations ne dépassant pas 30%. On considérait comme échec si la précision relative spécifiée est atteinte et les conditions ci-dessus non rencontrées ou si le nombre maximum d'épreuves est exécuté sans que la précision ne soit atteinte. Le nombre d'échecs pour chaque méthode est consigné dans le tables 2.

Tableau 2

					Précision = 0,005
Méthodes	Epreuves permises	Précision obtenue	Nbre d'échecs	Nbre de succès	Pourcentage de réussite
1	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)%
Linéaire	20	60	0	60	100
S.PATH	30	59	1	59	98
PATH	200	60	8	52	87
S.NODE	40	53	18	42	70
NODE	200	53	51	9	15

IV ANALYSE ET CONCLUSIONS

La méthode linéaire tend à se montrer très précise. Elle converge en n'importe quelle situation vers la solution exacte. Le nombre d'épreuves requises ne dépend pas de la taille du système et tourne généralement autour de six pour les 60 comparaisons.

La méthode S.PATH a aussi d'excellentes caractéristiques de convergence et seulement un échec survient. Pour ce cas une pompe de puissance constante était présente et fonctionnait suivant une courbe H = f(Q) à pente très accentuée. C'était une pompe de très faible puissance fonctionnant à un très faible refoulement. Le gradient de pente causa de problèmes de convergence pour toutes les méthodes sauf la méthode linéaire. Le problème de convergence ne serait probablement pas apparu avec la méthode S.PATH si la pompe fonctionnait sur une courbe d'énergie plus plate.

Les systèmes plus grands de plus de 100 conduites furent analysés en utilisant la méthode linéaire et la méthode S.PATH et toutes atteinrent une bonne solution après un nombre raisonnable d'itérations. Pour les 31 systèmes analysés, la méthode linéaire nécessitera en moyenne 6 itérations pour 5,4 secondes, et la méthode S.PATH en demandera 8 pour 6,9 secondes. Cela montre que les deux méthodes conduisent à des résultats précis avec peu d'itérations et emploient des durées de calcul raisonnables.

Les trois autres méthodes étudiées montrent des problèmes de convergence notoires et la fréquence s'accroit à mesure que des systèmes plus importants sont analysés. Puisque le problème de convergence apparaissait déjà pour des systèmes de moins de 100 conduites, les résultats pour des systèmes plus grands ne furent pas comparés avec les méthodes PATH, NODE, et S.NODE. Un certain nombre de ces larges systèmes furent analysés par ces méthodes et de nombreux problèmes de convergence survinrent.

En conclusion nous pouvons affirmer que les méthodes S.PATH et linéaire toutes deux donnent une excellente convergence. Les débits et les charges sont calculés en peu d'épreuves avec une grande précision et l'atteinte de la précision relative au débit de 0,005 est adéquate pour assurer la convergence. Il n'existe cependant pas d'assurance absolue de convergence. Beaucoup de systèmes de conduites incorporent des traits à savoir des conditions erronées de données, utilisation de ligne de grande résistance ou de pauvres descriptions de pompes qui augmentent les difficultés de convergence. Toutefois cette étude montre que l'apparition des problèmes de convergence est peu probable lorsque ces méthodes sont utilisées. Il s'en conclut que si possible, soit la méthode S.PATH, soit la méthode linéaire serait employée pour l'analyse des réseaux d'eau et que la convergence est virtuellement assurée si des données raisonnables sont employées.

B - EXEMPLE DE CALCUL SUR TABLEUR

PRESENTATION

De 1850 à 1950, les recherches concernant l'hydraulique générale ont permis de développer de manière très importante la compréhension des phénomènes et la mise au point de méthodes de calcul souvent longs et fastidieux.

Après 1950 les recherches concernant l'hydraulique se sont portées vers des secteurs spécifiques (transports solides, régions transitoires par exemple) mais l'hydraulique générale a peu évolué et les méthodes de calculs classique se sont concervés pendant que se développait une informatique réservée aux spécialistes.

Le calcul hydraulique présente diverses particularités notamment l'utilisation fréquente de puissances fractionnaires, l'usage des formules non explicites, l'établissement d'une série de calcul d'ensemble comportant des éléments nombreux qui réagissent les uns sur les autres.

Les méthodes de calcul classique adaptés aux particularités du calcul hydraulique comprenaient donc des abaques, des tables, des méthodes graphiques permettant la simplification de certains expressions, donc un calcul moins long mais peu précis.

Depuis 1970 l'évolution de l'informatique et sa vulgarisation est rendu utile toute la partie de la théorie de l'hydraulique qui avait pour seul but de faciliter les calculs. A l'heure actuelle les diverses spécificités du calcul hydraulique n'introduisent que peu de contraintes pour un calcul informatique.

Les manuels et formulaires existant concernant l'hydraulique générale datent des années 50. Ils comportent donc de longs développement concernant les méthodes de calcul traditionnelles. Ils ne citent qu'occasionnellement et accessoirement les méthodes de calculs utilisables à l'aide de l'informatique.

Pour un enseignement général de l'hydraulique il apparait maintenant peu nécessaire de connaître les méthodes de calcul traditionnelles. Il est par contre indispensable de faciliter le calcul informatique en hydraulique. C'est l'objet de la deuxième partie de notre travail qui vise à présenter sur tableur des programmes pour le calcul des réseaux d'eau.

Ces programmes et leur présentation conçus pour faciliter la résolution des problèmes courants à l'aide d'un microordinateur P.C.

Le progiciel utilisé est le multiplan à cause de certains avantages que présente celui-ci, en particulier les itérations.

Ces programmes n'ont pas la prétention de traiter tous les cas, mais seulement ceux d'éléments on d'ensembles hydrauliques qui sont les plus fréquents. Ils ont surtout un but pédagogique et constiueront, nous l'espérons bien un support didactique à l'enseignement de l'hydraulique.

I. CONDUITES EQUIVALENTES

On peut, pour faciliter le calcul des pertes de charge, remplacer une conduite ou une série de conduites de diamètre Di et de longueur Li, transitant un débit Q donné par une conduite équivalente, c'est-à-dire une conduite qui occasionnerait la même perte de charge.

Suivant les problèmes, on peut être amené à rechercher cette équivalence en :

- longueur
- diamètre
- en débit

1.1. Eléments de calcul

Les éléments de calcul sont :

N° T = Numéros du tronçon

D = diamètre en mm

L = longueur en m

Q = débit en l/s

J = perte de charge en mm/m

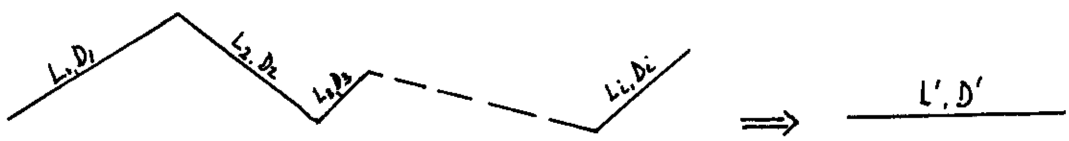
j = perte de charge totale = j^L + Js en m (js = 10%j^L)

a, n, m : coefficients de perte de charge qui dépendent de la loi des pertes de charge choisie (Calmon Lechapt ou M.S)

1.2. Conduites en série

1.21 Principe

On dispose d'un ensemble de conduites en série au diamètre D1, D2...et de longueur L1, L2, dans lesquelles transite un débit Q. On peut leur subsituer une conduite unique de diamètre D' et de large L' qui entraîne la même perte de charge.



Q fixé

$jT = \Sigma ji$

$jT = \Sigma ji = j' \Rightarrow L' = \Sigma ji/J'$

$ji = 1,1 \times Li \times ai\ Q^{ni}/Di^{mi}$

$J' = a'\ Q^{ni}/D'^{mi}$

Le débit Q recommandé de calcul est celui correspondant à la vitesse usuelle de 1m/s. Toutefois ce droit n'est que conventionnel etn'influe nullement sur le résultat du calcul.

1.2.2. Formule de type quadratique.

Les formules utilisées sont celles de M.S. ou de William Hazen

en m et n sont des constants.

On a : $jT = j' \Rightarrow a'L'Q^n/D'^m = a1L1Q^n/D^m + a2L2\ Q^n/D2^m\ .....+ a\ i\ Li\ Q^n/Di^m$

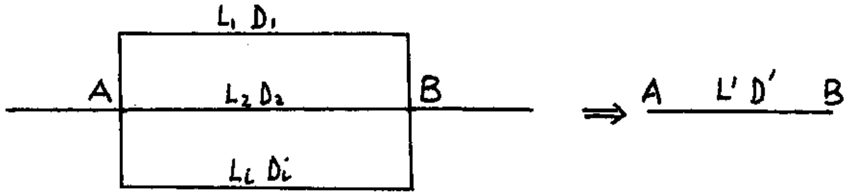
$a'L'/D'^m = \Sigma aiLi/Di^m \Rightarrow L' = \Sigma Li(D'/Di)^m(ai/a')$

1.3. Conduites en parallèle

13.1 Principe

On dispose d'un ensemble de conduites de diamètre D1, D2, Di en parallèle de longueur L1, L2..Li

On peut substituer à cet ensemble une conduite de diamètre D' et de longueur de même perte de charge j.



J fixé
$Q = \Sigma Qi$
Connues : Di, Li} Nature
$\Rightarrow Qi \Rightarrow \Sigma Qi$
On fixe j

$j = 1{,}1\ Li \times ai \times Qi^{ni}/Di^{mi} \Rightarrow Qi = (jxDi^{mi}/1{,}1Liai)1/n$

conduite équivalente

Connues : D', $Q = \Sigma Qi$, Nature: $J' \Rightarrow J' = J'L'$

$j' = j \Rightarrow j = J'L' \Rightarrow L' = j/J'$

N.B. La perte de charge j recommandée de calcul est celle correspondant à la vitesse usuelle de 1m/s. Toutefois ce choix n'est que conventionnel et n'influe nullement sur le résultat de calcul.

1.3.2 : Formules de type quadratique

Les formules utilisées sont celle de M.S. et de William Hazen.
On peut écrire
$L'a'\ Q^n/D'^m = L1\ a1\ q^n/D1^m = L2\ a2\ Q^n/D2^m = \ldots Li\ a\ i\ Qi^n/Di^m$

En prenant les égalités deux à deux, on a :
$Q1 = Qx\ ((a'/a1)(L'/L1)(D1^m/D'^m))1/n$

$Q2 = Qx\ ((a'/a2)(L'/L2)(D2^m/D'^m))1/n$

$\Rightarrow Qi = ((Q \times (a'/ai)(L'/Li)(Di^m/D'^n))1/n$

$Q = \Sigma Qi = \Sigma Q((a'/ai)(L'/Li)(D2^m/D'^m))1/2 \Rightarrow (a'/ai)(L'/Li)(Di^m/D'^m))1/n = 1$

$\Rightarrow (1/L')\ 1/n = \Sigma((a'/ai)(1/Li)(Di^m/D'^m))1/n$

$L' = 1/(\Sigma((a'/ai)(1/Li)(Di^m/D'^m))1/n)^n$

1.4 Programmes

Quatre programmes ont été mis au point pour le calcul des conduites équivalents. Il s'agit de deux programmes pour les conduites en série, et les deux autres pour les conduits en parallèle utilisant les formules de Calmen-Lochapt, de Mammariag Shiarckler et de William Hazen.

Ces programmes sont nommés CS.CL, CS.CL, CS.MW pour les conduites en série CP.CL , CP MW pour celles en parallèle.

14.1 Définition de paramètres

Les paramètres utiloisés pour le calcul sont :
DD : diamètre du tronçon
LL = longueur du tronçon
LE : Longueur équivalente tenant compte des pertes de charge singulière = 1,1xLL
AA, NN,MM : coefficients de perte de charge

1.4.2 : Entrée des donnés et calcul

```
-1      1      2      3      4      5      6      7      8      9      10
 1 -----------------------------------------------------------------------
 2 FORMULE GENERALE : APPROXIMATION CALMON-LECHAPT
 3                      Q Calcul recommandé (l/s) V=1m/s :  126
 4                      Q Calcul choisi (l/s):              100
 5 -----------------------------------------------------------------------
 6  N° T   D(mm)  L(m)  Leq(m) a*10^3    n      m    CALCULS  Pdc
 7
 8                                                  J(mm/m) j(m)
 9 -----------------------------------------------------------------------
10  A-B    400    500    550   0,971   1,81   4,81   1,234  0,679
11 -----------------------------------------------------------------------
12 -----------------------------------------------------------------------
13       CONDUITES EN SERIE : LONGUEUR EQUIVALENTE              0,679
14 -----------------------------------------------------------------------
15         400           550   0,971   1,81   4,81   1,234
16 -----------------------------------------------------------------------
17
18
COMMANDE: Alpha Blanc Calcul Détruit Edite Format Guide Insère Lit_Ecrit Mouv.
          Nom Options Protège Quitte Recopie Sortie Tri Vers Xterne ZoneFenêtre
Choisissez une option ou frappez le caractère de commande
L10C2    400
                                              99% Libre     Multiplan: CS.CL
```

CONDUITES EQUIVALENTES : FORMULES DE MANNING ET DE HAZEN
1.Formule de Manning Strinckler 2.Formule de Hazen
Inscrivez votre choix : 1

N° T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	K	a*10^3	n	m	Calcul
A-B	300	1000	1100	80	1,608	2	5,33	0,382
								0,382

CONDUITE EN SERIE : LONGUEUR EQUIVALENTE

400		237	80	1,608	2	5,33	

```
-1     1      2      3      4      5      6      7      8      9
 1 ------------------------------------------------------------------
 2 FORMULE GENERALE : APPROXIMATION CALMON-LECHAPT
 3                         j Calcul recommandé (m) V=1m/s :         3
 4                         j Calcul choisi (m):                     2
 5 ------------------------------------------------------------------
 6  N° T  D(mm)    L(m)   Leq(m)  a*10^3    n       m    CALCULS   de
 7                                                       J(mm/m)  Q(l/s)
 8
 9 ------------------------------------------------------------------
10  A-B    300     1000    1100   0,971   1,81    4,81    1,818   57,7
11 ------------------------------------------------------------------
12
13       CONDUITES EN PARALLELE : LONGUEUR EQUIVALENTE             57,7
14 ------------------------------------------------------------------
15         400            4389   0,971   1,81    4,81    0,456
16 ------------------------------------------------------------------
17
18
COMMANDE: Alpha Blanc Calcul Détruit Edite Format Guide Insère Lit_Ecrit Mouv.
          Nom Options Protège Quitte Recopie Sortie Tri Vers Xterne ZoneFenêtre
Choisissez une option ou frappez le caractère de commande
L11C2    "----------------------------     99% Libre     Multiplan: CP.CL
```

```
-1     1      2      3      4      5      6      7      8      9
 1 --------------------------------------------------------------------------
 2          CONDUITES EQUIVALENTES : FORMULES DE MANNING ET DE  HAZEN
 3          1.Formule de Manning Strinckler       2.Formule de  Hazen
 4          Inscrivez votre choix :     1
 5 --------------------------------------------------------------------------
 6   N° T  D(mm)    L(m)    Leq(m)    K     a*10^3    n       m     Calcul
 7 --------------------------------------------------------------------------
 8   A-B    300     1000    1100     80     1,608     2     5,33    0,349
 9 --------------------------------------------------------------------------
10
11                                                                  0,349
12          CONDUITE EN PARALLELE : LONGUEUR EQUIVALENTE
13 --------------------------------------------------------------------------
14          400             5097     80     1,608     2     5,33
15 --------------------------------------------------------------------------
16
17
18
COMMANDE: Alpha Blanc Calcul Détruit Edite Format Guide Insère Lit_Ecrit Mouv.
          Nom Options Protège Quitte Recopie Sortie Tri Vers Xterne ZoneFenêtre
Choisissez une option ou frappez le caractère de commande
L9C2     "--------------------------   99% Libre     Multiplan: CP.MW
```

Le programme se présente sous forme d'un tableau à 9 colonnes à 2 lignes. La 1ère ligne est est la ligne de saisie des caractéristiques des conduites existantes et la 2è (ligne inférieure) est celle de saisie des caractéristiques de la conduite équivalente.

L'entrée des données dans le tableau se fait de la façon suivante :

1) Entrer les caractéristiques du premier tronçon
2) Choisir la perte de charge ou le débit de calcul
3) Insérer après la première ligne de saisie autant de lignes que des conduites existantes moins un
4) Recopier la 1ère ligne vers les lignes insérées et corriger
5) Entrer ensuite les caractéristiques de la conduite équivalente

1.5. Exemple

1.5.1 conduites en série

A DN400/L500 B DN 350/L 800 C DN 500/L 600 D

a) Formule générale : Approximation Calmon-Lechapt

k = 0 C.L. : $a = 0{,}971.\ 10^{-3}$
$n = 1{,}81$
$m = 4{,}81$

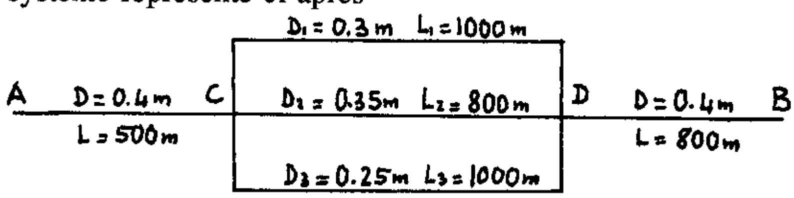
b) Formules de Manning et de William Hazen

M.S. : KS = 120 $a = 10{,}29/Ks^2 = 0{,}715.\ 10^{-3}$
$n = 2$
$m = 5{,}33$

W. H. : K' = 150 $a = 10{,}78/K'^2 = 1{,}016.10^{-3}$
$n = 1{,}85$
$m = 4{,}87$

1.5.2 Conduites en parallèle

soit le système représenté ci-après



a) Formule générale : Approximation C.L

k = 0 mm $a = 0{,}971.10^{-3}$
$n = 1{,}81$
$m = 4{,}81$

b) Formule de M.S. et de W.H.

k = 0 MS : Ks = 120 $\Rightarrow a = 10{,}29/Ks^2 = 0{,}715.10^{-3}$
$n = 2$
$n = 5{,}33$

k = 0 W.H. K' = 150 $\Rightarrow$ $a = 10{,}78/K'^{1{,}85} = 1{,}016.10^{-3}$
$n = 1{,}85$
$m = 4{,}87$

```
-1      1       2       3       4       5       6       7       8       9
 1 ------------------------------------------------------------------------
 2         CONDUITES EQUIVALENTES : FORMULES DE MANNING ET DE  HAZEN
 3         1.Formule de Manning Strinckler       2.Formule de  Hazen
 4         Inscrivez votre choix :    1
 5 ------------------------------------------------------------------------
 6   N° T   D(mm)    L(m)    Leq(m)     K     a*10^3    n       m      Calcul
 7 ------------------------------------------------------------------------
 8   A-B     400     500     550       80     1,608     2      5,33    0,884
 9   B-C     350     800     880       80     1,608     2      5,33    0,694
10   C-D     500     600     660       80     1,608     2      5,33    3,486
11 ------------------------------------------------------------------------
12
13                                                                     5,065
14         CONDUITE EN SERIE : LONGUEUR EQUIVALENTE
15 ------------------------------------------------------------------------
16           400             3150      80     1,608     2      5,33
17 ------------------------------------------------------------------------
18
COMMANDE: Alpha Blanc Calcul Détruit Edite Format Guide Insère Lit_Ecrit Mouv.
          Nom Options Protège Quitte Recopie Sortie Tri Vers Xterne ZoneFenêtre
Choisissez une option ou frappez le caractère de commande
L10C4    1,1*LC(-1)                         99% Libre     Multiplan: CS.MW
```

FORMULE GENERALE : APPROXIMATION CALMON-LECHAPT

Q Calcul recommandé (l/s) V=1m/s : 126

Q Calcul choisi (l/s): 100

N° T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	CALCULS J(mm/m)	Pdc j(m)
A-B	400	500	550	0,971	1,81	4,81	1,234	0,679
B-C	350	800	880	0,971	1,81	4,81	2,346	2,064
C-D	500	600	660	0,971	1,81	4,81	0,422	0,278
								3,021

CONDUITES EN SERIE : LONGUEUR EQUIVALENTE

	D(mm)		Leq(m)	a*10^3	n	m	J(mm/m)	
	400		2448	0,971	1,81	4,81	1,234	

FORMULE GENERALE : APPROXIMATION CALMON-LECHAPT

j Calcul recommandé (m) V=1m/s : 3

j Calcul choisi (m): 2

N° T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	CALCULS J(mm/m)	de Q(l/s)
A-B	300	1000	1100	0,971	1,81	4,81	1,818	57,7
B-C	350	800	880	0,971	1,81	4,81	2,273	98,3
C-D	250	1000	1100	0,971	1,81	4,81	1,818	35,5
								191,5

CONDUITES EN PARALLELE : LONGUEUR EQUIVALENTE

	400		500	0,971	1,81	4,81	3,999	

CONDUITES EQUIVALENTES : FORMULES DE MANNING ET DE HAZEN
1.Formule de Manning Strinckler 2.Formule de Hazen
Inscrivez votre choix : 1

N° T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	K	a*10^3	n	m	Calcul
A-B	300	1000	1100	80	1,608	2	5,33	0,349
B-C	350	800	880	80	1,608	2	5,33	0,589
C-D	250	1000	1100	80	1,608	2	5,33	0,215
								1,153

CONDUITE EN PARALLELE : LONGUEUR EQUIVALENTE

	400		468	80	1,608	2	5,33	

II SERVICE EN ROUTE

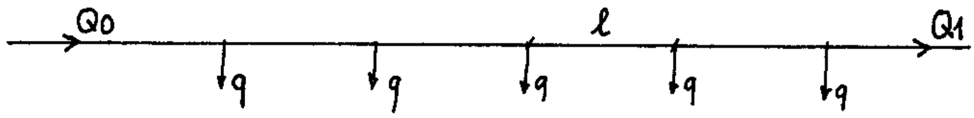
Certaines conduites assurent à la fois une fonction de transport et de distribution. C'est le cas notamment en alimentation en eau potale (AEP) où de nombreux branchements particuliers sont desservis tout au long des conduites qui transitent en même temps un débit vers l'aval.

En irrigation, il arrive qu'une conduite de même diamètre désserve une série d'appareils fournissant de débits égaux et situé à des distances égaux et situés à des distances égales (asperseurs, ajustages, goutteurs).

Pour éviter de calculer les pertes de charge dans chaque tronçon élémentaire, on recherche un débit équivalent ou une longueur équivalente, c'est-à-dire celui (ou celle) qui entrainerait la même perte de charge que la conduite assurant le service en route.

2.1 Service en route uniforme

Desserte de débits unitaires égaux à distrances égales (avec ou sans débit avale) : cas des asperseurs, ajustages, goutteurs.



2.1.1. Eléments de calcul

Les éléments de calcul sont :
N..T : numéro par tronçon de l'aval vers l'amont
D'(mm) : diamètre de la conduite
T : nombre de points de desserte
q(l/s) : débit de desserte
Q1 (l/s) : débit aval
Qo(l/s) : débit amont : Q + Txq
l (m) : distance entre deux points de desserte
a, n, m : coefficients de perte de charge qui dépendent de la loi des pertes de charge choisie.

L (m) : longueur totale de la conduite = l x T
Q' (l/s) : débit équivalent
L' (m) : longueur équivalente

2.1.2 Problème

Le problème consiste à déterminer la perte de charge totale par application des différents méthodes à savoir :
- méthode de débit équivalent
- " des longueurs équivalentes
- " directe c'est-à-dire calcul tronçon par tronçon

a) Méthode de débit équivalent

$Q' = (\Sigma(Q1 + ixq)^n)^{1/n}/T^{1/n}$

$J\ T(m) = L \times a \times Q'^n/D^m$

Remarque : En AEP, pour calculer le réseau maillé avec service en route, on prend comme débit, le débit équivalent.

$Q' = 0{,}5\ Q1 + 0{,}5\ Qo$ avec ⇒ Qo = débit amont
Q1 = débit aval

b) Méthode de longueur équivalentes

$L'(m) = (l\ \Sigma\ (Q1 + i \times q)^n)/Qo^n$

$jT\ (m) = L' \times a \times Qo^n/D^m$

C) Méthode directe

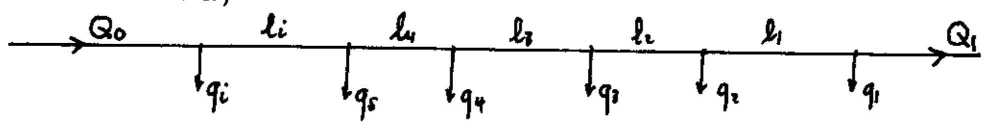
soit le système (Li, Qi, D)

$Ji(m) = Li \times a \times Qi^{\,n} = l \times a \times Qi^n/D^m = l \times a\ (Q1 + i\ q)^n/D^m$

$jT\ (m) = \Sigma\ ji = (l \times a\ \Sigma(Q1 + iq)^n)/D^m$

2.2 Service en route irrégulier.

Il s'agit de la desserte des débits unitaires divers dq irrégulièrement répartis (avec ou sans débit aval)



2.2.1 Eléments de calcul

Les éléments de calcul sont les mêmes que ceux du service en route uniforme, sauf que :
- le débit de desserte q n'est pas constant
- $Qo = Q1 + \Sigma qi$
- la distance entre 2 points de desserte n'est pas constante

2.2.2 Problème

Le problème est le même qu'en 2.1.2

a) Méthode de débit équivalent

$$Q'(m^3/s) = \left(\sum_{i=1}^{T} li \left(\sum_{j=1}^{i}(Q_1+q_j)\right)^n\right)^{1/m} \Big/ \left(\sum_{i=1}^{T} li\right)^{1/n}$$

$$jT(m) = \left(\Sigma li\right) a \times Q'^n / D^m$$

b) Méthode de longueur équivalente

$$L'(m) = \left(\sum_{i=1}^{T} li \left(\sum_{j=1}^{i}(Q_1+q_j)\right)^n\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{T}(Q_1+q_i)\right)^n$$

$$jT(m) = L' \times a \times Q_o^n / D^m = L' \times a \times \left(\sum_{i=1}(Q_1+q_i)\right)^n / D^m$$

c) Méthode directe

$$ji(m) = li \times a \times Q_i^n / D^m = li \times a \times \left(\sum_{j=1}^{i}(Q_1+q_j)\right)^n$$

$$jT(m) = \sum_{i=1}^{T} ji = a \times \sum_{i=1}^{T} li \left(\sum_{j=1}^{i}(Q_1+q_j)\right)^n / D^m$$

2.3 Programme

2.3.1 Service en route uniforme

Deux programmes ont été conçus pour le calcul de la perte de charge en service en route uniforme. Le premier nommé SU.CL utilise la formule de Calmon Lechapt et le second SU.MW utilise les formules de Manning Strinckler et de William Hazen.

a) Définition des paramètres

TT = nombre de points desserte

SERVICE EN ROUTE UNIFORME : FORMULE DE CALMON-LECHAPT

N° T	D(mm)	T	q(l/s)	Q1(l/s)	l(m)	a*10^3	n	m	L(m)	QO(l/s)	Calcul
1	150	10	2	0	25	1,601	1,975	5,25	250	20	3,93
											3,93128

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	0,6		0,004
Méthode de longueur équivalente		0	0,004
Méthode directe			0,004

SERVICE EN ROUTE UNIFORME : FORMULES DE MANNING ET DE WILLIAM HAZEN

1.Formule de Manning Strinckler 2.Formule de William Hazen

Inscrivez votre choix : 2 Coefficient Ks ou K' : 100

N° T	D(mm)	T	q(l/s)	Q1(l/s)	l(m)	a*10^3	n	m	L(m)	Q0(l/s)	Calcul
1	150	10	2	0	25	1,078	1,85	4,87	250	20	3,61
											3,605

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	0,6		0,003
Méthode de longueur équivalente		0	0,003
Méthode directe			0,003

SERVICE EN ROUTE IRREGULIER : FORMULE DE CALMON-LECHAPT

N° T	D(mm)	T	qi(l/s)	Q1(l/s)	li(m)	a*10^3	n	m	QO(l/s)	Qi(l/s)	CALCULS	
1	200	10	2	0	25	1,601	1,975	5,25	4	2	0,002	0,000
2			2		20					2	0,004	0,000
			4		45					4		0,000

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	3,1		0,004
Méthode de longueur équivale		26	0,004
Méthode directe			0,004

SERVICE EN ROUTE IRREGULIER : FORMULE DE MANNING ET DE WILLIAM HAZEN

1.Formule de Manning Strinckler — 2.Formule de William Hazen

Inscrivez votre choix : 1 — Coefficient Ks ou K': 80

N° T	D(mm)	T	qi(l/s)	Q1(l/s)	li(m)	a*10^3	n	m	Q0(l/s)	Qi(l/s)	CALCULS	
1	200	10	2	0	25	1,608	2	5,33	4	2	0,002	0,000
2			2		20					2	0,004	0,000
			4		45					4		0,000

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	3,1		0,004
Méthode de longueur équivale		26	0,004
Méthode directe			0,004

DD = diamètre de la conduite
QQ = débit de desserte
SQI = $\Sigma(Q1 + ixq)^n$
QQO = débit amont
LI = distance entre deux points de desserte
LL = longeuru totale de la conduite
AA, NN, MM = coefficients de perte de charge.

b) Entrée des données et calcul

Les deux programmes se présente sous forme d'un tableau à 12 colonnes et 4 lignes (1 ligne supérieure de saisie et 3 lignes inférieures de calcul).
La saisie des données se fait dans les 9 premières colonnes du tableau et de la manière suivante :
1) Remplir la 1ère ligne de saisie : caractéristiques de la conduite et conditions de desserte
2) Insérer après cette ligne un nombre (T-1) de lignes supplémentaires
3) Remplir la 1ère colonne par ordre croissant du nombre total T de point de desserte
4) Recopier la 1ère cellule de la colonne 12 (T-1) fois vers le bas.
5) Passer au mode calcul automatique de la commande options.

2.3.2 Service en route irrégulier

Deux programmes ont été également conçus pour le calcul de perte de charge dans le cas du service en route irrégulier. Le premier nommé SI.CL utilise la formule de Calmon-Lechapt et le second nommé SI.MW utilise les formules de Manning Strickler et de William Hazen.
a) Définition des paramètres
En plus des paramètres définis au paragraphe 2.3.1 du service uniforme, nous avons :

SQD = Σ qi

SLI = Σ li

SLQ = Σ li (Σ (Q1 + qj))'n

b) Entrée des données et calcul

Les deux programmes se présentent sous forme d'un tableau à 13 colonnes et 5 lignes (2 lignes supérieurs de saisie) et 3 lignes inférieurs de calcul).
La saisie des données se fait dans les 10 premières colonnes du tableau et de la manière suivante :
1) Remplir les 2 premières lignes de saisie
2) insérer après la deuxième ligne un nombre (T-2) de lignes supplémentaires
3) Recopier la 2e colonne par ordre croissant du nombre total T de points de desserte avec les débits et les longueurs correspondants dans les colonnes 4 et 6.
5) Passer ensuite au mode calcul automatique de la commande options.

2.4 Exemple de calcul

2.4.1 Service en route uniforme
a) Formule de Calmon-Lechapt
6) Formule de Manning et de William Hazen

2.4.2 Service en route irrégulier
a) Formule de Calman-Lechapt
b) Formules de Manning et de Willian-Hazen

SERVICE EN ROUTE IRREGULIER : FORMULE DE CALMON-LECHAPT

N° T	D(mm)	T	qi(l/s)	Q1(l/s)	li(m)	a*10^3	n	m	Q0(l/s)	Qi(l/s)	CALCULS	
1	200	10	2	0	25	1,601	1,975	5,25	30	2	0,002	0,000
2			2		20					2	0,004	0,000
3			3		20					3	0,007	0,001
4			3		30					3	0,010	0,003
5			4		35					4	0,014	0,008
6			2		25					2	0,016	0,007
7			3		25					3	0,019	0,010
8			4		30					4	0,023	0,017
9			2		35					2	0,025	0,024
10			5		30					5	0,030	0,029
			30		275					30		0,101

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	18,2		0,752
Méthode de longueur équivale		102	0,752
Méthode directe			0,752

SERVICE EN ROUTE UNIFORME : FORMULES DE MANNING ET DE WILLIAM HAZEN

1.Formule de Manning Strinckler   2.Formule de William Hazen
Inscrivez votre choix : 2
Coefficient Ks ou K' : 100

N° T	D(mm)	T	q(l/s)	Q1(l/s)	l(m)	a*10^3	n	m	L(m)	QO(l/s)	Calcul
1	150	10	2	0	25	1,078	1,85	4,87	250	20	3,605
2											12,996
3											27,5157
4											46,8507
5											70,7946
6											99,194
7											131,928
8											168,897
9											210,017
10											255,215
											1027,01

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	12,2		0,803
Méthode de longueur équivalente		101	0,803
Méthode directe			0,803

SERVICE EN ROUTE IRREGULIER : FORMULE DE CALMON-LECHAPT

N° T	D(mm)	T	qi(l/s)	Q1(l/s)	li(m)	a*10^3	n	m	Q0(l/s)	Qi(l/s)	CALCULS	
1	200	10	2	0	25	1,601	1,975	5,25	30	2	0,002	0,000
2			2		20					2	0,004	0,000
3			3		20					3	0,007	0,001
4			3		30					3	0,010	0,003
5			4		35					4	0,014	0,008
6			2		25					2	0,016	0,007
7			3		25					3	0,019	0,010
8			4		30					4	0,023	0,017
9			2		35					2	0,025	0,024
10			5		30					5	0,030	0,029
			30		275					30		0,101

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	18,2		0,752
Méthode de longueur équivale		102	0,752
Méthode directe			0,752

SERVICE EN ROUTE IRREGULIER : FORMULE DE MANNING ET DE WILLIAM HAZEN

1.Formule de Manning Strinckler   2.Formule de William Hazen

Inscrivez votre choix : 1   Coefficient Ks ou K' : 80

N° T	D(mm)	T	qi(l/s)	Q1(l/s)	li(m)	a*10^3	n	m	Q0(l/s)	Qi(l/s)	CALCULS	
1	200	10	2	0	25	1,608	2	5,33	30	2	0,002	0,000
2			2		20					2	0,004	0,000
3			3		20					3	0,007	0,001
4			3		30					3	0,010	0,003
5			4		35					4	0,014	0,007
6			2		25					2	0,016	0,006
7			3		25					3	0,019	0,009
8			4		30					4	0,023	0,016
9			2		35					2	0,025	0,022
10			5		30					5	0,030	0,027
			30		275					30		0,091

METHODE	Q'(l/s)	L'(m)	jT(m)
Méthode de debit équivalent	18,2		0,781
Méthode de longueur équivale		102	0,781
Méthode directe			0,781

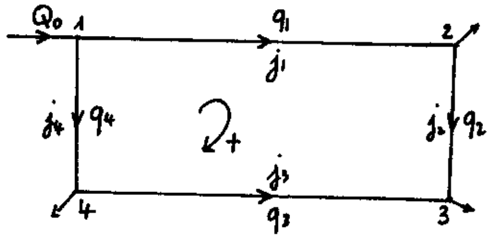
III LE RESEAU MAILLE

Diverses méthodes ont été mises au point pour le calcul des réseaux maillés. La méthode classique de Hardy-Cross qui est aujourd'hui la plus utilisée permet à la fois un calcul manuel d'une programmation simple. Nous appliquons cette méthode d'après la formule de Calmon Lechapt.

3.1 Principe

La méthode de Hardy-Cross s'applique au calcul des débits qui circulent dans les tronçons définis d'un réseau maillé desservant une série de points de distribution.

Elle s'appuie sur la loi des noeuds exprime la conservation des débits en chaque noeud et la loi des mailles exprime que la perte de charge est nulle le long d'une maille.



loi des noeuds : par exemple au noeud n° 1 : Qo = q1 + q4
loi des mailles : j1 + j2 - j3 - j4 = 0

3.2 Procédé de calcul

a) les tronçons étant définis (longueur, diamètre, rugosité étant connus) on procède à une première répartition arbitraire des débits (par exemple en adoptant les débits correspondant à la vitesse uselle de 1m/s. Cette repartition initiale doit respecter la loi des noeuds c'est-à-dire qu'en chaque, la somme des débits entrants et égale à la somme des débits .....

On adopte un sens positif de circulation des débits. Les débits circulent dans le sens inverse seront affectés d'un signe moins (-)

b) Pour chaque maille, on calcule :

- la perte de charge dans chaque tronçon soit $ji = 1,1 \times Li \; ax \; Qi^n/Di^m$
  Elle prend le signe du débit pour le tronçon considéré
- les termes ji/Qi
- les sommes Σji et $\Sigma ji/Qi$
- le débit de correction dq d'après la formule

$$dq = - \Sigma \, ji/(n \, \Sigma \, ji/Qi)$$

L'expression dq résulte de la loi des mailles.

c) On corrige les débits ainsi répartis dans chaque tronçon (en tenant compte du signe des débits) : nouveau débit Q'i = Qi + dq

Les tronçons appartenant à 2 mailles sont corrigés deux fois c'est-à-dire que lorsque l'on rencontre le même tronçon dans une autre maille (tronçon commun), on prend pour valeur de Q à corriger la valeur déjà corrigée dans la maille précédante (en tenant compte du signe du débit).

d) A partir des débits ainsi corrigés, on calcule à nouveau dq et on obtient une nouvelle répartion des débits et ainsi de suite. On arrête le calcul lorsque dq est petit de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-3} l/s.

3.3 Elément de calcul

Les éléments de calcul sont :
N° M : numéro de la maille
N° T : numéro de tronçon
N° MA : numéro de la maille adjacinte
D (mm) : diamètre de la conduite
L (m) longueur du tronçon
Leq (m) : longueur équivalents du tronçon en considérant les pertes de charge singulières : = 1,1 x L
a, n, m : coefficients de perte de charge.
Qo (l/s) : débit initial
Qi(l/s) : nouveau débit à charge à chaque inération
Vi (m/s) : vitesse de l'écoulement
ji (m) : perte de charge dans le tronçon
ji/Qi = correction de la maille
Qi M : corection de la maille
Qi MA : correction de la maille adjacente
Q (i+1) : débit calculé dans chaque tronçon

3.4 Programme

3.4.1 Définition des paramètres

DD : diamètre de la conduite
LL : longueur équivalente du tronçon
AA, N N, MM : coefficients de perte de charge
QQ : nouveau débit à chaque itération
SJi = somme des pertes de charge le long de la maille i
DQi = débit de correction de la maille i

3.4.2 : Entrée des données et calcul.

Le programme est conçu pour le calcul d'un réseau de 5 mailles au maximum. il se présente sous forme d'un tableau de 17 colonnes et 5 lignes (1 ligne par maille). L'entrée des données se fait dans les 1O premières colonnes (excepté celle de la Leq) et de la manière suivante :

1) Entrer les données du premier tronçon sur la 1ère ligne
2) Insérer après cette ligne un nombre égal au nombre total de tronçons de la maille moins un de lignes supplémentaires.
3) Recopier la 1ère ligne vers les lignes insérées
4) Procéder à la saisie des données tronçon par tronçon
5) Saisir les débits de correction pour les tronçons communs dans la colonne 16
6) Repéter cette opération pour toutes les mailles
7) Passer ensuite au calul itératif de la commande Options.

Le calcul s'arrête lorsque la précision est atteinte ou si le nombre maximum d'itérations est atteint.

Pour le programme nous avons choisi un dq de 10^{-2}l/s et un nombre maximum d'itérations égal à 100. Toutefois ces chiffres pourraient être modifiés par l'utilisateur s'il le veut.

N.B: les tronçons ainsi que les mailles seront numérotés à partir du chiffre 1.

CALCUL DE RESEAU MAILLE
METHODE HARDY CROSS

Nmbre d'itérations : 1

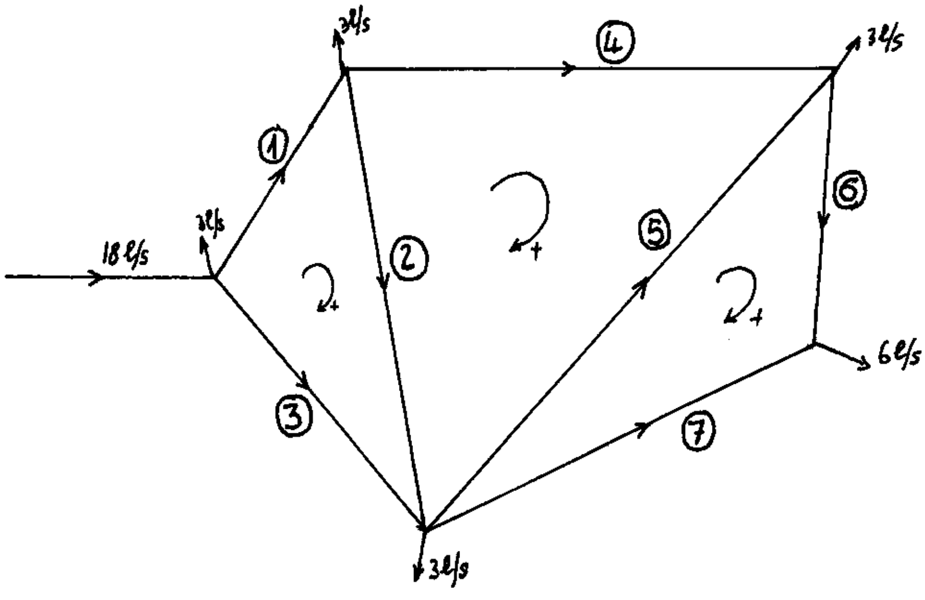
Test : VRAI
FAUX

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	QO (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	Ji (m)	Ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	1		80	320	352	1,601	1,975	5,25	6	6,00	1,19	13,23	2205	-3		3,00
												13,23	2205	0		
2	2		80	340	374	1,601	1,975	5,25	-1	-1,00	0,20	-0,41	408	0,5		-0,50
												-0,41	408	0		
3	5		80	580	638	1,601	1,975	5,25	2	2,00	0,40	2,74	1369	-1		1,00
												2,74	1369	0		
4	1		80	580	638	1,601	1,975	5,25	4	4,00	0,80	10,77	2692	-2		2,00
												10,77	2692	0		
5	2		80	360	396	1,601	1,975	5,25	5	5,00	1,00	10,38	2077	-2,5		2,50
												10,38	2077	0		

N°T	D (mm)	L (m)	Qo (l/s)
1	80	320	6
2	80	340	1
3	100	310	9
4	80	550	2
5	80	580	2
6	80	360	1
7	80	550	5

Conduites en fonte acier non revêtu

C.L : k = 1 mm $a = 1{,}601.10^{3}$
$n = 1{,}975$
$m = 5{,}25$



CALCUL DE RESEAU MAILLE
METHODE HARDY CROSS

Nmbre d'itérations : 9

Test : VRAI
FAUX

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	QO (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	Ji (m)	Ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	1		80	320	352	1,601	1,975	5,25	6	5,30	1,05	10,35	1954	2E-04		5,30
	2	2	80	340	374	1,601	1,975	5,25	1	-0,48	0,10	-0,10	201	2E-04	2E-04	-0,48
	3		100	310	341	1,601	1,975	5,25	-9	-9,70	1,24	-10,26	1057	2E-04		-9,70
												0,00	3212	2E-04		
2	2	1	80	340	374	1,601	1,975	5,25	-1	0,48	0,10	0,10	201	2E-04	2E-04	0,48
	4		80	550	605	1,601	1,975	5,25	2	2,78	0,55	4,98	1791	2E-04		2,78
	5	3	80	580	638	1,601	1,975	5,25	-2	-2,73	0,54	-5,08	1858	2E-04	0,001	-2,74
												0,00	3850	2E-04		
3	5	2	80	580	638	1,601	1,975	5,25	2	2,73	0,54	5,08	1858	0,001	2E-04	2,74
	6		80	360	396	1,601	1,975	5,25	1	2,52	0,50	2,68	1063	0,001		2,52
	7		80	550	605	1,601	1,975	5,25	-5	-3,48	0,69	-7,77	2230	0,001		-3,48
												-0,01	5151	0,001		
4	1		80	580	638	1,601	1,975	5,25	4	0,02	0,00	0,00	12	-0,01		0,01
												0,00	12,08	-0,01		
5	2		80	360	396	1,601	1,975	5,25	5	0,02	0,00	0,00	9	-0,01		0,01
												0,00	9,32	-0,01		

IV OPTIMISATION ECONOMIQUE DES RESEAUX

4.1. Position du problème

La définition des diamètres d'un réseau de canalisation laisse dans la plupart des cas une certaine liberté au projeteur.

En effet si l'on tient compte des diverses contraintes (côte piézométrique minimal, vitesses limites) il est possible d'enregistrer diverses combinaisons de choix des diamètres aux divers tronçons du réseau de distribution pour alimenter les points de desserte avec la pression et le débit demandés. Cette possibilité existe même si la côte en tête est définie (barrage, réservoir, source).

Il en est de même et d'autant plus si la côte en tête peut-être ajustée (station de pompage, réservoir). Il s'agit alors de dimensionner à la fois le réseau d'alimentation et celui de distribution.

Enfin certains réseaux de conduites ont pour objet la production d'énergie hydroélectrique. Le choix des diamètres de ces réseaux est dépendant des caractéristiques des usines projetées.

On peut donc étudier trois catégories principales du problème :
- à partir d'une côte en tête déterminée, définir les diamètres de chaque tronçon;
- fixer une côte en tête puis déterminer les diamètres de chaque tronçon;
- fixer les diamètres des canalisations alimentant les usines hydroélectriques.

La caractéritique commune de ces divers problèmes est qu'il convient que l'ensemble projeté, tout en respectant les contraintes fixées permettent de réaliser le projet dans les conditions économique optimales.

Les deux premiers les plus courants sont ceux traités dans le présent document.

4.2 Optimatisation des réseaux

42.1 Données de base

Les données de base pour le calcul économique d'un réseau sont :
- les points de desserte et leurs caractéristiques (débit et côte piézométrique minimale à assurer)
- le tracé du réseau
- le bordereau des canalisations (rugosité, diamètre commercial et pression admissible)
- les conditions générales de calcul hydraulique : loi de perte de charge (ici Manning Strikler) vitesses limites (Max 1,5m/s)

Il en résulte pour chaque tronçon un débit et une condition minimale de côte piézométrique avale.

4.3 Eléments de calcul.

Les éléments de calcul sont :

QT (l/s) =débit transité par le tronçon

PAt (m) = Pression amont du tronçon

P Av (m) = Pression avale minimale nécessaire

L (m) = longueur du tronçon

KS = rugosité

jD (m) = perte de charge disponible

= P At (m) - P Av Néc(m)

D th (mm) = diamètre théorique correspondant à la perte de charge disponible
D min(mm) = diamètre correspondant à la vitesse maximale de 1,50 m/s
D Opt (mm) = diamètre optimal commercial
j (m) = perte de charge réelle
P Av (mm) = nouvelle pression avale
= PAt (m) - j (m)
V (m/s) = vitesse dans la conduite

4.4. Programmes

4.4.1 Paramètres de calcul
Aucun paramètre n'est nécessaire pour le calcul économique d'un réseau

4.4.2. Energie des données et calcul
Il est à signaler que le programe est conçu pour l'opitmatisation d'un réseau de 10 tronçons et ceci pour permettre l'impression sur un papier format A4. L'entrée des données se fait de la manière suivante :
- Introduire les N° des différents tronçons
- Introduire les débits transites par chaque tronçon
- Saisir les côtes piézomètriques amont et aval
- Introduire les longueurs des tronçons et leur rugosité
- Passer ensuite en mode calcul automatique
- choisir le diamètre optimal suivant le bordereau des diamètres commerciaux
- passer de nouveau en mode calcul automatique

4.5 Exemple de calcul.

SCHEMA D'IMPLANTATION DES NOEUDS ET BORNES DU RESEAU
(Echelle = 1/10 000)

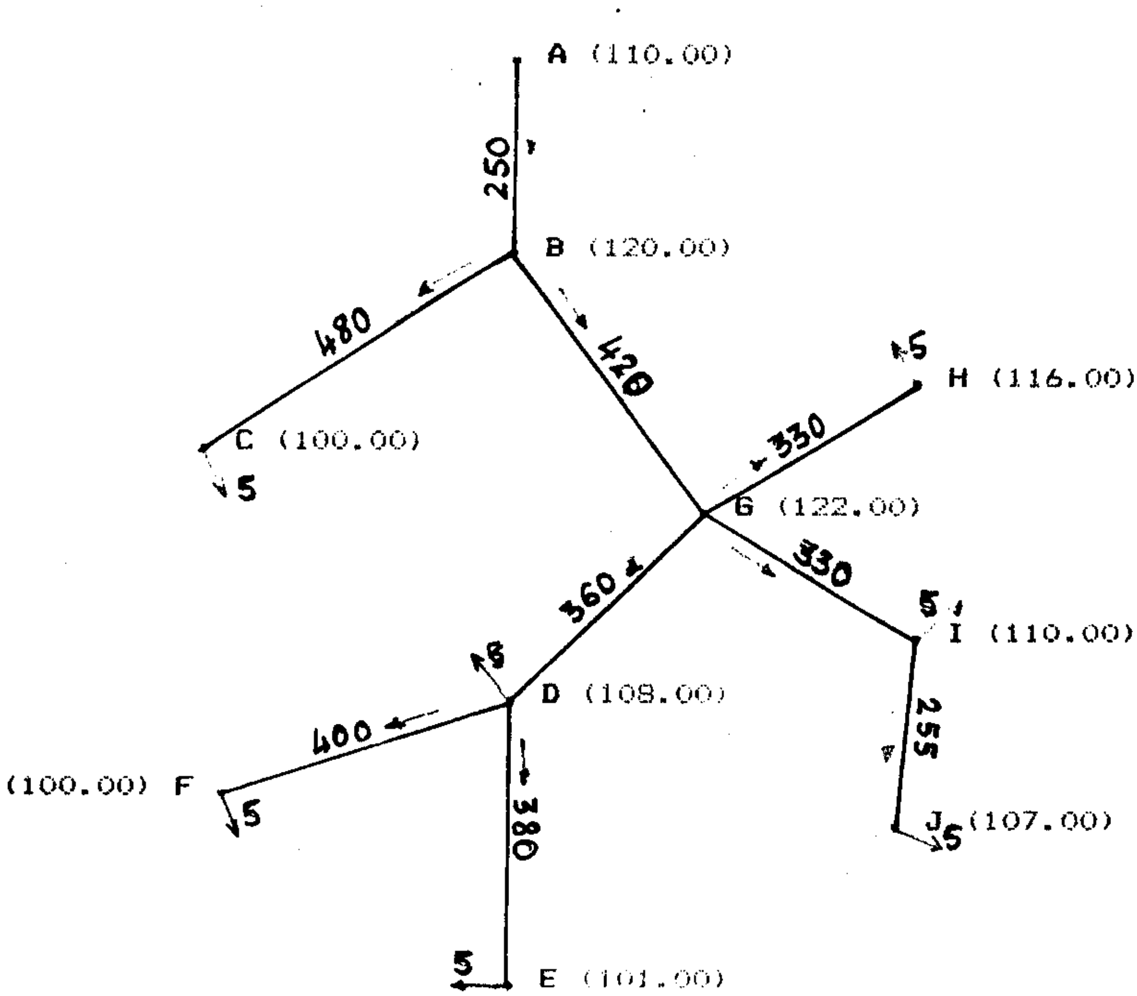


TABLEAU D'OPTIMISATION

N° TRONCONS	A-B	B-C	B-G	G-H	G-D	D-F	D-E	G-I	I-J
QT (l/s)	35,00	5,00	30,00	5,00	15,00	5,00	5,00	10,00	5,00
P At (m)	138,82	137,82	137,82	136,58	136,58	125,90	125,90	136,58	122,27
P Av Néc (m)	137,82	106,00	135,94	122,00	120,54	106,00	107,00	122,09	113,00
L (m)	250	480	420	330	360	400	380	330	255
Ks	75	75	75	75	75	75	75	75	75
jD (m)	1,00	31,82	1,88	14,58	16,04	19,90	18,90	14,49	9,27
D Th (mm)	250	71	231	77	116	75	75	100	80
D Min (mm)	172	65	160	65	113	65	65	92	65
D Opt (mm)	250	80	250	80	125	80	80	100	80
j (m)	1,00	16,96	1,23	11,66	10,61	14,13	13,43	14,20	9,01
P Av (mm)	137,82	120,86	136,59	124,92	125,97	111,77	112,47	122,38	113,26
U (m/s)	0,71	1,00	0,61	1,00	1,22	1,00	1,00	1,27	1,00

V CONCLUSION

Nous pensons que cette étude, bien que modeste contribuera à l'enseignement de la l'hydraulique en charge à l'EIER et dans d'autres écoles de formation technique.

Il convient de mentionner que le programme Hardy-Cross permet également de résoudre un certain nombre de problème à savoir :

- alimentation d'un réseau ramifié par deux ou plusieurs réservoirs
- alimentation d'un réseau ramifié par pompage et réservoirs simultanés.

Ces cas sont résolus en considérant des mailles fictives . (voir annexes)

Nous souhaitons également qu'elle soit poursuivie et complétée dans les années à venir par une résolution sur graphiques.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Martin, D. W., and Peters, G, "the Application of Newton's Method to Network Analysis by Dijital computer. Journal of the Institute of Water Engeniors. Vol 17, 1963

(2) Travers K. The Mesh Method in Gas Network Analysis" Gas Journal, 332, 1967

(3) LEKANE T., "Modèle de calcul de l'Ecoulement en Régime Permanent dans un réseau d'Eau Maillé". Journal of Hydraulic Research, vol.17, 1979

(4) SHamir, V, and Howard, C.D.D, "Water Distribution systems Analysis". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol.94, Jan.1968

(5) Wood, D-J, and Charles, C.O.A, "Hydraulic Network Analysis Using Linear theory". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol.July 1972.

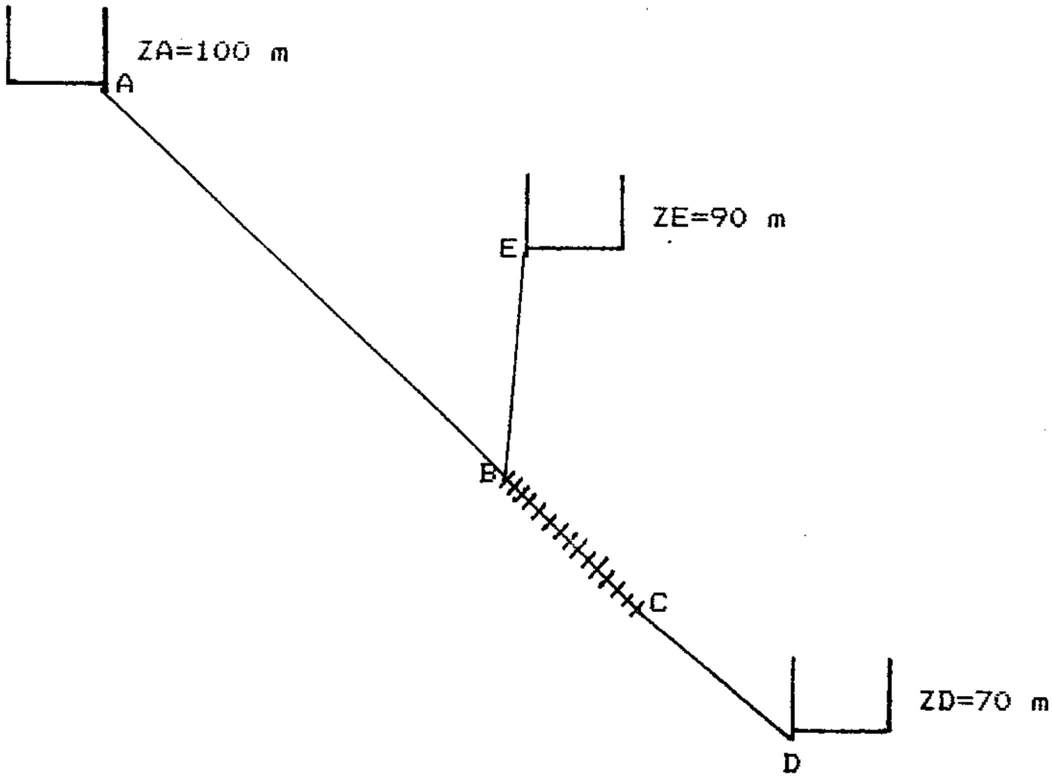
(6) Lejeune A., Fonck R., Sahloul M., "techniques Nouvelles dans la résolution par ordinateur des Réseaux Maillés de conduites". Technique de l'Eau et de l'Assainissement N° 438/439, Juiar-Juillet 1983.

(7) Lejeune A., Fonck R., Sahloul M., "le calcul par ordinateur des Réseaux Maillés de Distribution d'Eau". La technique de l'Eau et de l'Assainissement N°437, Mai 1983.

(8) André Divenot, C.G.E, "Une nouvelle méthode de calcul des réseaux Maillés". Houille Blanche N° 6/1980.

ANNEXES

TRAVAUX DIRIGES N° 8
EXERCICE DE SYNTHESE



Dans le réseau représenté ci-haut, A, E, D sont des réservoirs. On considère 4 tronçons avec les données suivantes:

AB: D = 0.30 m ; L = 1000 m

BC: D = 0.35 m ; L = 800 m ; service en route q=10 l/s

CD: D = 0.35 m ; L = 1000 m

BE: D = 0.25 m ; L = 700 m

On vous demande de calculer les débits dans les tronçons:

1°/ Par la **méthode directe** (calcul des pertes de charge).

2°/ Par la **méthode de Hardy-Cross** (mailles).

3°/ Par la **méthode des caractéristiques** (graphiques).

TRAVAUX DIRIGES N°8 Méthode directe
Formule générale : approximation Calmon-Lechapt

Solution retenue :

1)

Débit qui entre en D :

Q DC (l/s) = 214,70

Calcul de jDC

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	Q(l/s)	j(m)
DC	350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	214,70	9,351

Cote piézométrique en C = 79,35

2)

Débit équivalent BC = Q DC + 0,55 Q desservi = 220,20

Calcul de jCB

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	Q(l/s)	j(m)
CB	350	800	800	0,971	1,81	4,81	220,20	7,831

Cote piézométrique en B = 87,18

3)

d'ou:

jBE(m) = 2,817
jBA(m) = 12,817

4)

Calcul de Q BE

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	j(m)	Q(l/s)
BE	250	700	700	0,971	1,81	4,81	2,817	55,11

5)

Calcul de Q BA

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	j(m)	Q(l/s)
BA	300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	12,817	169,66

7)

Vérification : Q BA + Q BE = Q DC + 10 l/s

Q DC + 10 = 224,7 DQ/2 = 0,03

Q BA + Q BE = 224,8

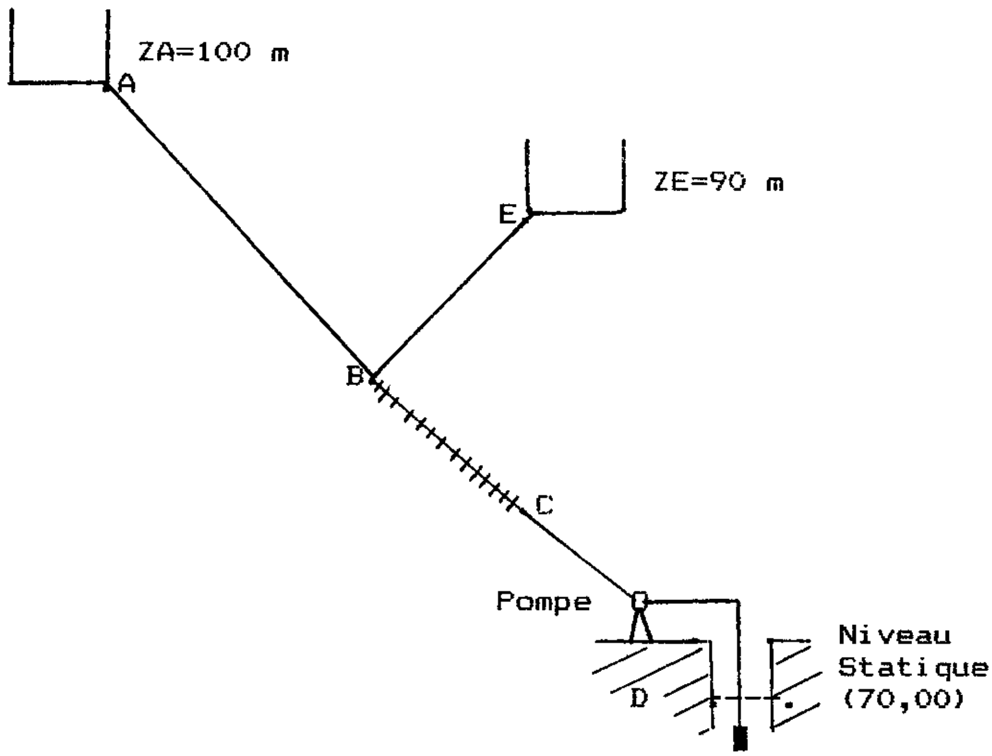
CALCUL DE RESEAU MAILLE — Nombre d'itérations : 1 — VRAI
METHODE HARDY CROSS — TD N°8 — Q Total = - 10l/s

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	Q0 (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	ji (m)	ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	AB		300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	-40,0	-40,0	0,6	-0,938	23	-84,61		-124,6
	BE	2	250	700	700	0,971	1,81	4,81	40,0	40,0	0,8	1,577	39	-84,61	-111,6	67,0
	Conduite Fictive entre A et E => Q=0 et Abs(j)=hAE										0,0	10,000	0			
												10,640	63	-84,61		
2	BE	1	250	700	700	0,971	1,81	4,81	-40,0	-40,0	0,8	-1,577	39	-111,63	-84,6	-67,0
	BC		350	800	800	0,971	1,81	4,81	-75,5	-75,5	0,8	-1,128	15	-111,63		-187,1
	CD		350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	-70,0	-70,0	0,7	-1,230	18	-111,63		-181,6
	Conduite Fictive entre E et D => Q=0 et Abs(j)=hED										0,0	20,000	0			
												16,064	72	-111,63		

CALCUL DE RESEAU MAILLE — Nombre d'itérations : 2 — VRAI
METHODE HARDY CROSS — TD N°8 — Q Total = - 10l/s

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	Q0 (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	ji (m)	ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	AB		300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	-40,0	-124,6	1,8	-7,332	59	-28,14		-152,8
	BE	2	250	700	700	0,971	1,81	4,81	40,0	67,0	1,4	4,015	60	-28,14	-12,6	51,4
	Conduite Fictive entre A et E => Q=0 et Abs(j)=hAE										0,0	10,000	0			
												6,683	119	-28,14		
2	BE	1	250	700	700	0,971	1,81	4,81	-40,0	-67,0	1,4	-4,015	60	-12,56	-28,1	-51,4
	BC		350	800	800	0,971	1,81	4,81	-75,5	-187,1	1,9	-5,834	31	-12,56		-199,7
	CD		350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	-70,0	-181,6	1,9	-6,909	38	-12,56		-194,2
	Conduite Fictive entre E et D => Q=0 et Abs(j)=hED										0,0	20,000	0			
												3,243	129	-12,56		

TRAVAUX DIRIGES N°9
EXERCICE DE SYNTHESE



Dans le réseau représenté ci-dessus comprend :
- deux réservoirs A et E
- une pompe (P) dont la caractéristique peut-être approché par une parabole passant par les points (Q=0 l/s, H=150m) et (Q=200 l/s, H=100m).
- quatre tronçons définis dans le tableau ci-dessous :

Tronçon	Diamètre (m)	Longueur (m)	k (Colebrook)
AB	0.30	1000	0
BC	0.35	800	0
CD	0.35	1000	0
BE	:0.25	700	0

Seul le tronçon BC dessert uniformément en route un débit de 10 l/s.

En supposant que la courbe de rabattement est une parabole passant par le point (Q=200 l/s, DZ=5m); calculer les débits dans les tronçons:

1°/ Par la **méthode directe** (calcul des pertes de charge).

2°/ Par la **méthode de Hardy-Cross** (mailles).

3°/ Par la **méthode des caractéristiques** (graphiques).

TRAVAUX DIRIGES N°9 Méthode directe
Formule générale : approximation Calmon-Lechapt

Solution retenue :

1)
Q (l/s) fixé = 167,40 =>Cote piézo D =111,47
(a partir de la caractéritique de la pompe équivalente)

2)
Calcul de jDC

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	Q(l/s)	j(m)
DC	350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	167,40	5,960

Cote piézométrique en C = 105,51

3)
Débit équivalent BC = Q DC - 0,45 Q desservi = 162,90
Calcul de jCB

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	Q(l/s)	j(m)
CB	350	800	800	0,971	1,81	4,81	162,90	4,539

Cote piézométrique en B = 100,97

4)
d'ou:
jBE(m) = 10,970
jBA(m) = 0,970

5)
Calcul de Q BE

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	j(m)	Q(l/s)
BE	250	700	700	0,971	1,81	4,81	10,970	116,79

6)
Calcul de Q BA

N°T	D(mm)	L(m)	Leq(m)	a*10^3	n	m	j(m)	Q(l/s)
BA	300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	0,970	40,76

7)
Vérification : Q BA + Q BE = Q DC - 10 l/s
Q DC - 10 = **157,4** DQ/2 = 0,07
Q BA + Q BE = **157,5**

CALCUL DE RESEAU MAILLE — METHODE HARDY CROSS — TD N°9

Nombre d'itérations : 1 — VRAI

Q Total = - 101/s

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	Q0 (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	ji (m)	ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	AB		300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	40,0	40,0	0,6	0,938	23	-91,45		-51,4
	BE	2	250	700	700	0,971	1,81	4,81	-30,0	-30,0	0,6	-0,937	31	-91,45	25,7	-147,2
	Conduite Fictive entre A et E => Q=0 et Abs(j)=hAE										0,0	10,000	0			
												10,000	55	-91,45		
2	BE	1	250	700	700	0,971	1,81	4,81	30,0	30,0	0,6	0,937	31	25,73	-91,4	147,2
	BC		350	800	800	0,971	1,81	4,81	75,5	75,5	0,8	1,128	15	25,73		101,2
	CF		350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	80,0	80,0	0,8	1,566	20	25,73		105,7
	Cond. Fict. F et D (pompe)=>DH=aQ^2+b								80,0	80,0		-71,200	890	25,73		105,7
	Conduite Fictive entre E et D => Q=0 et Abs(j)=hED										0,0	20,000	0			
												-47,568	925	25,73		

CALCUL DE RESEAU MAILLE — METHODE HARDY CROSS — TD N°9

Nombre d'itérations : 2 — VRAI

Q Total = - 101/s

N° M	N° T	N° MA	D (mm)	L (m)	Leq (m)	a *10^3	n	m	Q0 (l/s)	Qi (l/s)	Vi (m/s)	ji (m)	ji/Qi	dQi M	dQi MA	Q(i+1) (l/s)
1	AB		300	1000	1000	0,971	1,81	4,81	40,0	-51,4	0,7	-1,479	29	28,70		-22,8
	BE	2	250	700	700	0,971	1,81	4,81	-30,0	-147,2	3,0	-16,673	113	28,70	17,9	-136,4
	Conduite Fictive entre A et E => Q=0 et Abs(j)=hAE										0,0	10,000	0			
												-8,151	142	28,70		
2	BE	1	250	700	700	0,971	1,81	4,81	30,0	147,2	3,0	16,673	113	17,90	28,7	136,4
	BC		350	800	800	0,971	1,81	4,81	75,5	101,2	1,1	1,918	19	17,90		119,1
	CF		350	1000	1000	0,971	1,81	4,81	80,0	105,7	1,1	2,594	25	17,90		123,6
	Cond. Fict. F et D (pompe)=>DH=aQ^2+b								80,0	105,7		-64,630	611	17,90		123,6
	Conduite Fictive entre E et D => Q=0 et Abs(j)=hED										0,0	20,000	0			
												-23,445	655	17,90		