

~~116/4/83~~

760

Mémoire du Projet de fin d'étude

2^{ème} Année Master



Département : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique



Présenté par :

BENSANA Amira

Etude théorique et expérimentale sur l'optimisation de la conception d'un réseau de distribution de fluides

Sous la Direction de :

LAHIOUEL Y.

Juin 2013



Remerciements

Remerciement

Ce travail a pu réaliser grâce à l'aide et le soutien d'un grand nombre de personnes à qui je souhaite exprimer ma gratitude.

La direction scientifique de ce mémoire a été assurée par madame LAHIOUEL Yasmina, professeure à l'université de 08 Mai 1945 de Guelma que je remercie sincèrement pour tous les efforts qu'elle a déployé pour mener à bien et à terme le travail.

Mes remerciements vont particulièrement à monsieur ACHI Fethi qui n'a épargné aucun effort pour m'aider, me soutenir et surtout m'encourager tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux techniciens du laboratoire de génie chimique et du laboratoire de mécanique des fluides Sihem, Zohra et Tahar.

Enfin, Je remercie les membres de ma famille pour leur aide, leur soutien morale et matériel au long de mes années d'étude.

Dédicace

Dédicace

*Je dédie chasteusement le fruit de mon travail à
Mes chers parents, Mazouz et Sakina. Qui se sont
sacrifiés pour moi et je tiens à les remercier de m'avoir
soutenu durant mes longues années d'études et d'avoir
dépensé tout précieux pour mon succès.*

Et mes chères sœurs: Lineb, Seloua, et Rima.

Et ma grande-mère: Hancouna.

*Mes amies: Khacoula, Sara, Amel, Lisi, Selma,
Farida, Hind, Hana, Rima, Besma,houda, Lydia,
Soumia, Nadia et souad.*

*Je dédie et j'adresse aussi mes remerciements à mon cher
ami: Fethi.*

*Table
de matière*

Table de matière

	Page
Remerciements	ii
Dédicace	iii
Table de matière.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	xi
Notations et variables	xiii
Introduction générale	
Introduction générale	2
Chapitre I : Généralité sur les réseaux de fluides	
1. Introduction.....	5
2. Définition d'un réseau de distribution.....	5
3. Constituants d'un réseau de fluides.....	5
3.1. Conduites	6
3.2. Nœuds	6
3.3. Réservoirs.....	6
3.4. Vannes	6
4. Fonctionnement du réseau de fluide.....	7
4.1. Maillon ressource.....	7
4.2. Maillon production - adduction.....	7
4.3. Le maillon traitement.....	7
4.4. Le maillon stockage	8
5. Type des réseaux de fluide	8
5.1. Réseaux maillées.....	8
5.2. Réseaux ramifiés.....	9
Chapitre II : Les écoulements dans les conduites	
1. Définition.....	12
2. Propriétés physiques des fluides.....	12
3. Les équations fondamentales de l'écoulement	13
3.1. Continuité.....	13
3.2. Energie	13

3.3. Quantité de mouvement	14
4. Les états de l'écoulement	15
5. Différents types d'écoulement.....	15
6. Régimes d'écoulement	16
6.1. Ecoulement rampant	16
6.3. Ecoulement laminaire à nombre de Reynolds élevé	17
6.4. Décollement	18
6.5. Transition de régime	18
6.6. Régime turbulent.....	19
6.7.Compressibilité et onde de choc.....	20

Chapite III : Les pertes de charge

1. Définition.....	22
2. Types de pertes de charge.....	22
2.1. Pertes de charge linéaires.....	22
2.2. Pertes de charge singulières	22

Chapitre IV : Analyse des réseaux

1. Principes pondamentaux de l'analyse des réseaux.....	27
2. Méthodes d'analyse des réseaux	27
2.1. Méthode de Hardy-Cross	27
2.2. Méthode de Newton-Raphson.....	28
2.3. Méthode de linéarisation de Charles -Wood.....	28
2.4. Méthode linéaire de Charles-Wood appliquée aux débits.....	30
2.5. Méthode linéaire de Charles-Wood appliquée aux charges.....	30
2.6. Méthode des Éléments Finis	30

Chapitre V : Optimisation

1. Introduction	33
2. Définition de l'optimisation	33
3. Types d'optimisation	34
4. Domaines d'applications	34
5. La conception optimale des réseaux de conduite.....	34

6.	La théorie des graphes et topologies des réseaux.....	36
6.1.	Définition d'un graphe.....	36
6.2.	Naissance de la théorie des graphes.....	36
6.3.	Différents types de graphes.....	37
6.4.	Application de la théorie des graphes.....	37
6.5.	Topologie d'un graphe.....	37
7.	La configuration optimale du réseau à moindre coût.....	37
7.1.	Objectif.....	37
7.2.	Les méthodes utilisées dans l'optimisation de la configuration.....	37
8.	Optimisation du diamètre.....	45
8.1.	Diamètre économique.....	45
8.2.	Critères de conception et contraintes pour trouver le diamètre.....	45
8.3.	Structure générale des problèmes d'optimisation.....	46
8.4.	La relation coût-perte de charge des assemblages.....	47
8.5.	Systèmes de distribution ramifiés.....	48
8.6.	Systèmes de distribution maillés.....	49
9.	Etapes du traitement d'un problème d'optimisation linéaire.....	50
10.	Description de la méthode de simplexe.....	50
10.1.	Définition de la méthode.....	50
10.2.	Propriétés de la méthode de simplexe.....	51
10.3.	L'algorithme de simplexe.....	51

Chapitre VI : Résultats et validation

1.	Validation de la configuration du réseau.....	58
1.1.	Objectif.....	59
1.2.	Description de la manipulation.....	59
1.3.	Lieu et date de la manipulation.....	59
1.4.	Composition du montage.....	59
1.5.	Résultats.....	60
2.	Analyse des réseaux.....	61
2.1.	Objectif.....	61
2.2.	Description de la manipulation.....	61
2.3.	Lieu et date de la manipulation.....	61
2.4.	Composition du montage.....	61
2.5.	Résultats.....	63

Conclusion générale

Conclusion générale	65
---------------------------	----

Annexes

Annexe A	II
Annexe B	V
Annexe C	VII
Annexe D	IX
Références bibliographiques.....	XI
Résumé	X

*Liste
des figures*

Liste des figures

Figure 1 : Nœud Simple.....	6
Figure I.2 : Schéma représente l'ossature d'un réseau maillé.	8
Figure I.3 : Schéma représentant l'ossature d'un réseau ramifié.....	9
Figure I.4 : Structure d'arbre.	10
Figure II.1 : écoulement rampant autour d'un cylindre ($Re < 3$).....	4
Figure .II. 2 : écoulement laminaire en conduite : le nombre de Reynolds est définie par $Re = UODv$	5
Figure .II.3 : Jet laminaire de CO_2 dans de l'aire au repos a $Re = 2\ 000$	5
Figure .II.4 : Régions de couche limites d'écoulement autour d'un profil à grand nombre de Reynolds.	6
Figure.II.5 : Décollement laminaire sur un profil a forte incidence.	6
Figure.II.6 : Régime laminaire (a), apparition (b), et amplification (c) de perturbations par perte de stabilité de l'écoulement de Poiseuille en conduite.	7
Figure.II.7 : Jet turbulent de CO_2 dans de l'aire au repos a $Re = 50\ 000$	8
Figure.II.8 : Onde de choc détachée en amont d'une sphère placée dans un écoulement à ($M=1,8$).....	8
Figure III.1 : Elargissement brusque.....	24
Figure III.2 : Rétrécissement brusque.....	24
Figure III.3 : Dérivation latérale.....	24
Figure III.4 : Robinet vanne.....	24
Figure III.5 : Vanne papillon.....	25
Figure III.6 : Ecoulement dans un coude.....	25
Figure V.1: Organigramme de l'algorithme de simplexe	52
Figure VI.1 : un réseau de distribution en eau à deux mailles.....	58
Figure VI.2 : Le sens de la circulation du mélange dans le réseau à deux mailles.....	60
Figure VI.3 : le montage de l'analyse du réseau à deux mailles.	62

*Liste des
tableaux*

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Valeurs de k	24
Tableau III.2 : K pour robinet vanne.....	24
Tableau III.3 : k pour vannes papillons.....	25
Tableau V.1 : les coordonnées et les données du réseau à deux mailles	42
Tableau V.2 : le tableau de la méthode du simplexe.....	54
Tableau VI.1: Résultats expérimentaux de l'analyse de réseau.....	62

*Notations et
variables*

Notations et variables utilisées

- A : surface de l'écoulement ou de la conduite ;
- Cap : capacité d'une source ;
- C_{HW} : coefficient de Hazen-Williams ;
- C_{\square} : coefficient d'écoulement ;
- D : diamètre d'une conduite ;
- Dem : demande en fluide d'un nœud de consommation ;
- D_x : Diamètre d'une conduite ;
- f : coefficient de frottement ;
- F : force ;
- g : accélération due à la gravité ;
- h_f : perte de charge par frottement ;
- h_s : perte de charge singulière ;
- H : hauteur de charge ;
- K : constante de perte de charge ;
- L : longueur ;
- P : pression ;
- Q : débit ;
- Re : nombre de Reynolds ;
- t : temps ;
- v : vitesse d'écoulement ;
- S : Pente des lignes hydrauliques et d'énergie exprimée par le terme h/L ;
- Z : Surélévation du nœud i ;
- α : Coefficient de correction, angle ;
- ρ : masse volumique du liquide ;
- τ : Contrainte de cisaillement ;
- ν : viscosité cinématique ;

Introduction

générale

Introduction générale

La meilleure conception d'un réseau de fluide (gaz/liquide) est largement demandée par divers secteurs, comme l'urbanisme, la société industrielle et le transport du pétrole, et constitue actuellement le majeur souci de l'ingénierie. Le fluide lors de la distribution, engendre des pertes d'énergie importantes dues principalement aux frottements avec les parois des conduites. Ces frottements sont quantifiés grâce à un paramètre appelé : *coefficient de frottement*. Lewis Moody dans son fameux diagramme a pu relier ce coefficient avec le nombre de Reynolds et la rugosité relative. Cette relation entre les trois paramètres a multiplié les études [Grégoire W et al. 2009, Jean B. 1983, Y. Lahiouel et al. 2002] sur les réseaux de transport qui deviennent de nos jours sans limite.

En plus du problème de la perte d'énergie, s'ajoute le problème de la fiabilité et la performance dans les réseaux de distribution. Plusieurs études ont été menées pour optimiser le coût de réseau de distribution et le rendre plus fiable et plus performant (Rieutord E. 1985, Bryan W K. 1984, Alperovits et al. 1977, Ioan S. 2009, Lahiouel R et al. 2011, Afshar MH. 2007, Arsene TC et al. 2008, Giustolisi O et al. 2006).

Le présent travail consiste à trouver la meilleure disposition ou configuration et la meilleure combinaison des dimensions des conduites pour le système entier, soumis à une série de contraintes physiques et technologiques. Généralement, le coût du réseau est à minimiser, bien que l'utilisation de la fiabilité comme un objectif et comme une contrainte soit considérée, et validée par l'expérience.

La première étape de ce travail a été consacrée à une étude bibliographique de quatre axes principaux qui nous aident à comprendre le principe de fonctionnement d'un réseau de fluide et les différents paramètres influençant sur le réseau lors de la distribution du fluide, ces axes sont : *généralités sur les réseaux de fluides, les écoulements dans les conduites, les pertes de charge, analyse des réseaux*.

Les trois premiers chapitres rassemblent les notions de base sur les réseaux hydrauliques et l'écoulement dans les conduites ainsi que le problème des pertes de charge, le quatrième chapitre envisage les méthodes d'analyse qui impliquent

l'évaluation des débits et pressions dans le système, sur la base de la configuration donnée et les dimensions des composants évaluées du système. Le problème consiste à résoudre un ensemble d'équations non linéaires simultanées faisant impliquer les relations d'équilibre de l'énergie, et un ensemble d'équations linéaires représentant la continuité du débit.

La deuxième étape qui représente la problématique du travail est l'optimisation, elle repose sur deux approches principales : l'optimisation de la configuration en utilisant l'algorithme de la longueur minimale, et l'optimisation du diamètre pour réduire les coûts des conduites.

L'algorithme de la longueur minimale utilisé dans ce travail, vise la minimisation des longueurs de toutes les branches formées autour des sources en assemblant en chemins ouverts (ramifiés), et par la suite concevoir un réseau complètement maillé, afin d'assurer la fiabilité du réseau et la disponibilité du fluide. Il est à noter qu'à cette étape de la conception, la nature du fluide (liquide/gaz) qui circule dans le réseau n'as pas d'influence sur le modèle de conception, ni sur le résultat.

Le choix du diamètre de conduite, est orienté par des raisons d'ordre économique, en utilisant la programmation linéaire qui résout le problème tout en employant la méthode du simplexe qui a été choisie pour économiser le coût totale et avec une grande simplicité et précision.

Enfin, la partie optimisation de la conception des réseaux a été validée à l'aide d'un montage descriptif d'un réseau à deux mailles qui a été réalisé au sein du laboratoire de mécanique des fluides, du département du Génie des Procédés, université le 08 mai 1945-Guelma.

Les résultats expérimentaux obtenus ont été comparés avec les résultats de la simulation par des programmes élaborés dans des études et des travaux antérieurs (Lahiouel Y. 2006).

En appliquant le principe de l'algorithme de la longueur minimale, puis la méthode de simplex pour optimiser le choix du diamètre des conduites. Le présent travail est alors considéré comme un pas vers la recherche pour l'analyse et l'optimisation de la conception des systèmes de distribution des fluides.

Chapitre I

Généralité sur les réseaux des fluides

1. Introduction

Du réservoir de stockage sort une conduite principale de gros diamètre. Celle-ci, en se prolongeant le long des rues de l'agglomération forme un ensemble de conduites maîtresses. Sur chacune de ces dernières, sont branchées des conduites de diamètres moindres dites conduites secondaires, tertiaires, etc.

L'ensemble de toutes ces différentes canalisations avec l'ensemble des équipements qui les accompagnent forment le réseau de distribution. C'est l'infrastructure la plus importante du réseau global, car il s'étend sur toute la surface de l'agglomération.

Un réseau de distribution de fluide est un système de conduites simples connectées entre elles. Dans ce cas les paramètres géométriques (diamètre, rugosité) ainsi que les paramètres d'écoulement (débit, vitesse, perte de charge) peuvent être différents en différents points du réseau.

2. Définition d'un réseau de distribution

Un réseau de distribution d'eau et d'air comprimé utilisé dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel a pour but de fournir le volume d'eau ou d'air désiré, à la pression et à la température spécifiée, à l'endroit voulu. Pour y parvenir, les réseaux de distribution sont dotés de conduites, de robinets et d'accessoires.

3. Constituants d'un réseau de fluides

Un réseau est un ensemble de conduites de section de diamètre constant. Il peut contenir des pompes et des installations telles que les coudes et les valves. Les points de terminaison des conduites sont les nœuds. Il existe des nœuds de jonction où plusieurs sections de conduites se joignent, par lesquels le débit entre dans le système ou en sort, et des nœuds de pente fixée, où une pente (ou charge) constante est maintenue. Elle représente une connexion à une cuve ou un réservoir de stockage ou bien une région de pression constante.

Les principaux éléments qui constituent un réseau de fluides sont :

3.1. Conduites :

La sécurité du service est fonction de la qualité de la canalisation, de son aptitude à résister aux atteintes du temps, aux attaques du sol et à celles du fluide transporté, aux chocs et aux variations de température

- Nature des conduites :

On distingue les conduites suivant le matériau principal qui constitue leur structure ;

- Fonte ductile
- Acier
- Béton
- Amiante- Ciment
- Matières plastiques synthétiques

3.2. Nœuds :

Ce sont les points de rencontre de plusieurs conduites. Un tronçon est une portion de conduite comprise entre deux nœuds successifs. La figure I. 1 montre une jonction de quatre conduites.

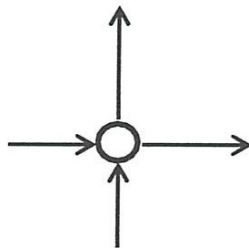


Figure I.1 : Nœud Simple

On introduit par la suite les équations qui expriment la continuité en termes de débits dans chaque nœud (chapitre IV)

3.3. Réservoirs

Dans les petits réseaux, que l'eau soit distribuée par gravité ou par pompage, il est toujours souhaitable de prévoir un réservoir de distribution. Lorsque l'eau est amenée, entre la source et le réservoir, on peut faire fonctionner les pompes à un régime uniforme pendant toute la journée, ce qui permet d'utiliser des dispositifs beaucoup moins importants que pour une marche intermittente.

3.4. Vannes

Dans les réseaux de distribution, on emploie divers types de vannes, chacun d'eux à des fins bien définies. Les vannes de garde servent à régler le débit d'eau. En principe, elles seront placées en des points tels que, lors des répartitions, il suffira d'isoler une petite partie du réseau, cependant que l'écoulement continuera dans le reste de l'installation. [Lahiouel Y, 2006].

4. Fonctionnement du réseau de fluide

Pour qu'un tel réseau puisse transporter l'eau de la source jusqu'au point de distribution, il doit contenir quatre maillons principaux :

- Maillon ressource
- Maillon production
- Maillon traitement
- Maillon stockage

4.1. Maillon ressource

La ressource est une structure permettant le captage de l'eau. La prise d'eau se fait habituellement par un captage d'eau de surface (rivière, lac, barrage, etc.). En l'absence d'une telle source, ou lorsque l'eau de surface est trop polluée, on procède au captage d'eau souterraine (forage, puits, galeries, sources, ...).

4.2. Maillon production - adduction

Ce maillon est un ensemble constitué d'une station de pompage et d'un dispositif d'adduction (conduites et accessoires).

4.3. Le maillon traitement

Le traitement de l'eau brute se passe généralement en trois étapes :

La clarification : il s'agit de débarrasser l'eau des particules colloïdales en utilisant un massif filtrant.

La stérilisation : son objectif est de rendre l'eau bactériologiquement pure. Pour ceci, on utilise des oxydants tels que le chlore et trioxygène (O₃).

L'affinage : permet d'éliminer les micropolluants (corps dissouts).

4.4. Le maillon stockage

Le réservoir de stockage est un bassin qui se remplit au cours des faibles consommations et qui se vide pendant les périodes de fortes consommations journalières [Fethi A, 2010].

5. Type des réseaux de fluide

Pour un réseau de fluide (gaz, eau). L'ossature du réseau dépend de la configuration de l'agglomération. Deux géométries de réseau sont possibles : réseau ramifié ou réseau maillé.

5.1. Réseaux maillés

Ce type de réseau est constitué de boucles. Le sens de l'écoulement varie fréquemment selon la demande de certaines conduites. En effet, le nombre d'abonnés non desservis en cas de panne ou de réparation est réduit au maximum puisque l'eau peut atteindre un même point par plusieurs chemins. L'autre intérêt est que la vitesse d'écoulement de l'eau est rarement nulle, ce qui offre l'avantage de maintenir la bonne qualité de l'eau distribuée (Figure I.2).

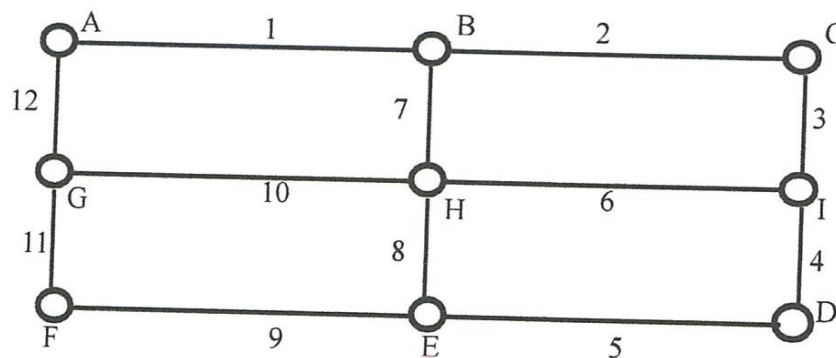


Figure I.2 : Schéma représente l'ossature d'un réseau maillé.

5.2. Réseaux ramifiés

Un réseau est dit ramifié quand les conduites qui le composent se ramifient successivement à partir d'un point commun d'alimentation sans se rejoindre jamais (Figure I.3).

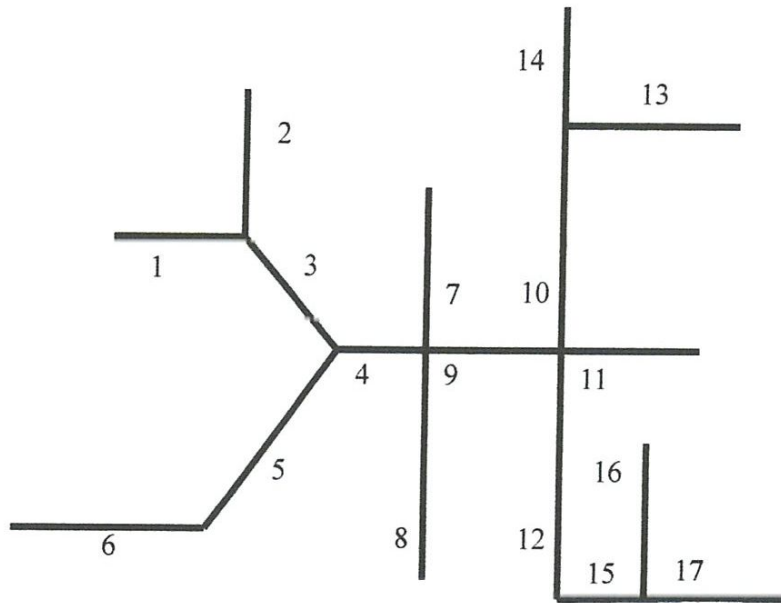


Figure I.3 : Schéma représentant l'ossature d'un réseau ramifié

Ce réseau est composé de 17 branches (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17).

Il contient 8 nœuds et 11 extrémités libres qu'elles ne se rejoignent jamais comme on voit dans le schéma.

Le fluide parcourant les canalisations dans un seul sens du réservoir pour aller au point de puisage.

Ce système n'est plus utilisé dans les distributions des fluides (eau, gaz naturel) dans les villes. Il est appelé ainsi car il possède topologiquement une structure d'arbre (figure I.4). [Fisli H, 2002].

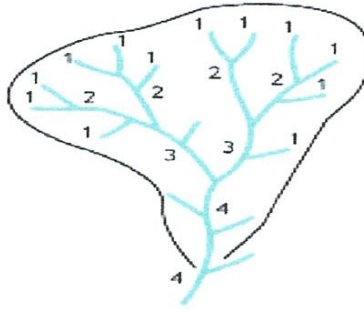


Figure I.4 : Structure d'arbre.

Principes de calcul :

Les problèmes relatifs aux réseaux ramifiés peuvent être résolus :

- Soit par calcul on appliquant les méthodes numériques.
- Soit par la méthode des courbes caractéristiques.

Dans les deux cas on calcule successivement, chaque tronçon. et on sait que pour sa connaissance parfaite, il faut connaître ces quatre éléments : Q , V , D , J (débit, vitesse, diamètre et la perte de charge).

Ce réseau présente l'avantage d'être économique à cause du linéaire réduit des canalisations posées et du nombre moins important des équipements hydrauliques mis en service. Ses principaux inconvénients résultent de l'absence d'une alimentation en retour dans les conduites : lorsqu'un arrêt se produit en un point quelconque, toutes les conduites placées en aval se trouvent privées d'eau [39].

Chapitre II

Les écoulements dans les conduites

1. Définition

Un fluide (liquide ou gaz) est une substance déformable sous l'action de forces très faibles. Contrairement aux solides, les éléments d'un fluide en mouvement peuvent se déplacer à des vitesses différentes et peuvent être soumis à des accélérations différentes. Du point de vue microscopique, un fluide est un corps dont les molécules glissent facilement les unes sur les autres ou se déplacent librement les unes par rapport aux autres.

Un fluide est le plus souvent décrit comme un milieu continu. Il est peut être compressible, c'est à dire le volume qu'il occupe change avec la pression appliquée. Ainsi, les gaz peuvent facilement changer de volume, mais les liquides sont caractérisés par une très faible compressibilité [Bryan W K, 1984].

2. Propriétés physiques des fluides

Les gaz et les liquides ont des propriétés communes : ils obéissent par exemple au principe d'Archimède et au principe de Pascal. En outre, au-delà de certaines valeurs de température et de pression, appelées température et pression critiques, la distinction entre liquide et gaz n'a plus de fondement.

La propriété physique qui permet de faire la différence entre les liquides et les gaz est la compressibilité. Les liquides ont une compressibilité très faible, contrairement aux gaz, parfois appelés fluides élastiques. Cette propriété joue un rôle fondamental en mécanique des fluides : lorsque l'on étudie le mouvement d'un fluide incompressible, on utilise les lois de l'hydrodynamique ; en revanche, le mouvement d'un fluide compressible est étudié par l'aérodynamique. Par ailleurs, un fluide statique peut être considéré comme un fluide parfait, c'est-à-dire un fluide exempt de viscosité : on parle alors de superfluidité.

Ils possèdent aussi d'autres propriétés physiques telles que l'isotropie, la mobilité et la viscosité [Brière F G, 1996].

- L'isotropie assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.
- La mobilité fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- La viscosité caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements).

3. Les équations fondamentales de l'écoulement [Labye Y et al, 1996]

Les trois concepts fondamentaux de la mécanique des fluides sont la continuité, la quantité de mouvement et l'énergie.

1.1. Continuité

L'équation de continuité d'un écoulement permanent à surface libre s'exprime de la même manière que pour l'écoulement en conduite

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_n V_n \quad (\text{II. 1})$$

Et dans le cas d'un canal principal se divisant en plusieurs branches où transitent les

$$\text{débits } Q_1 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (\text{II. 2})$$

Q_1 étant le débit du canal principal.

1.2. Energie

On admet que l'énergie cinétique est égale en tous points d'une section de canal, l'énergie totale (H) dans la section s'écrit :

$$H = z + d \cos \theta + \alpha V^2 / 2g \quad (\text{II. 3})$$

Où :

Z : la hauteur au dessus du plan de référence (m)

D : profondeur perpendiculaire au fond (m)

α : Angle d'inclinaison du fond du canal

d : Coefficient cinétique

V : vitesse moyenne (m/s)

Pour les canaux à pente faible on peut écrire :

$$H = z + y + V^2 / 2g \quad (\text{II. 4})$$

En appliquant le principe de la conservation de l'énergie à l'écoulement graduellement varié dans un canal à forte pente aux sections 1 et 2, on a :

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 V_1^2 / 2g = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 V_2^2 / 2g + h_f \quad (\text{II. 5})$$

Avec : h_f = perte d'énergie

Si au contraire la pente est faible, $y = d = d \cos \theta$ et

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g = z_2 + y_2 + \alpha_2 V_2^2 / 2g + h_f \quad (\text{II. 6})$$

Et avec

il vient

$$z_1 + y_1 + V_1^2/2g = z_2 + y_2 + V_2^2/2g = \text{constante} \quad (\text{II. 7})$$

C'est l'équation de Bernoulli

3.3. Quantité de mouvement

En appliquant le théorème fondamental de la dynamique, seconde loi de Newton, on sait que la variation de quantité de mouvement d'une tranche de liquide d'un écoulement pendant un temps élémentaire est égale à la résultante de toutes les forces externes agissant sur cette tranche. Ce principe, appliqué à l'écoulement entre les sections transversales 1 et 2 est exprimé par l'équation de la quantité de mouvement et s'écrit :

$$\frac{QW}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 \rho \sin \theta - F_f \quad (\text{II. 8})$$

Où :

P_1 et P_2 : Résultante des pressions agissant sur les deux sections

W : masse d'eau entre les deux sections

F_f : Force de frottement externe total à la surface de contact entre l'eau et les parois du canal

ρ : masse volumétrique de l'eau

β : Coefficient de quantité de mouvement

Sur une courte longueur (L) de canal rectangulaire de faible pente de largeur b

$$P_1 = 1/2 w b y_1^2$$

$$P_2 = 1/2 w b y_2^2$$

Et si : $F_f = w h_f' b \bar{y}$

Où : h_f' = perte de charge par frottement

$$\bar{y} = (y_1 + y_2)/2$$

Aussi : $Q = 1/2 (V_1 + V_2) b \bar{y}$

Et comme : $W = w b \bar{y} L$

Et : $\sin \theta = (z_1 - z_2)/L$

En remplaçant dans l'équation (II.8), on obtient :

$$z_1 + y_1 + \beta_1 V_1^2/2g = z_2 + y_2 + \beta_2 V_2^2/2g + h_f' \quad (\text{II. 9})$$

Cette équation ne diffère de l'équation de l'énergie (II.6) que par les coefficients de quantité de mouvement qui remplacent les coefficients cinétiques et par h_f' qui exprime les pertes dues aux forces externes alors que h_f exprime les pertes dues aux forces internes. Il

importe de différencier l'énergie, quantité scalaire, de la quantité de mouvement, quantité vectorielle, lors de la résolution des problèmes d'hydraulique.

4. Les états de l'écoulement

Selon la valeur du nombre de Reynolds (Re), l'écoulement dans une conduite est soit laminaire soit turbulent. Le nombre de Reynolds, quantité sans dimension, est défini par :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{II. 10})$$

Où :

V : vitesse de l'écoulement (m/s)

D : diamètre interne de la conduite (m)

ν : viscosité cinématique du fluide (m²/s)

Les observations montrent que l'écoulement est laminaire lorsque le nombre du Reynolds est inférieur à 2000, de transition, entre 2000 et 4000, et tout à fait turbulent bien au-delà de 4000.

Lorsqu'un débit est constant dans le temps, on dit que l'écoulement est permanent. Si le débit varie dans le temps, comme cela arrive lors de la vidange d'une cuve ou lors de la fermeture d'une vanne, on dit que l'écoulement est non-permanent. Si le débit varie le long d'une conduite (cas d'une conduite perforée) l'écoulement est spatialement variable. Quand le diamètre d'une conduite demeure constant, l'écoulement est uniforme. Si au contraire le diamètre de la conduite varie, l'écoulement est alors non-uniforme ou, plus communément, varié.

5. Différents types d'écoulement

On peut classer l'écoulement selon la nature du fluide ou par rapport à la variation de sa vitesse en fonction du temps [Achi F, 2010].

➤ Par rapport au fluide

- Fluide incompressible, (ρ constante)
- Fluide compressible, (ρ varie)
- Fluide parfait, ($\mu=0$)
- Fluide réel ou visqueux

➤ Par rapport au temps

Écoulements permanents : Ce sont des écoulements dont les caractéristiques sont identiques, c'est-à-dire en tout point la vitesse des particules du fluide successives est la même à des instants successifs (vitesse constante par rapport au temps ; de même pour la pression et la masse volumique).

Écoulements non permanents ou variables : Les caractéristiques varient dans chaque section avec le temps.

Écoulements uniformes : Ce sont des écoulements permanents dont les caractéristiques ne varient pas de section en section c'est-à-dire quand la grandeur et la direction de la vitesse ne changent pas d'un point à un autre demeurant constante tout au long de l'écoulement.

Écoulements non uniformes (variés) : Les caractéristiques varient d'une section en section ou d'un point à un autre.

6. Régimes d'écoulement [Jean B et al, 1983]

6.1. Ecoulement rampant

Lorsque le nombre de Reynolds est très petit (typiquement inférieur à quelques unités pour des écoulements autour de sphère ou de cylindre à section circulaire), le mouvement se fait sous l'action dominante des forces de viscosité et de pression (éventuellement des forces de pesanteur). Dans ce cas (mouvements dans des milieux très visqueux et/ou à très faible vitesse), le fluide donne l'impression de « ramper » sur l'obstacle (figure II.1).

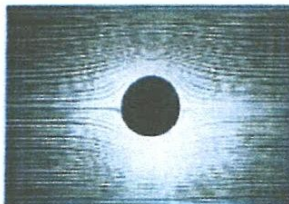


Figure II.1 : écoulement rampant autour d'un cylindre ($Re < 3$)

6.2. Écoulement laminaire à nombre de Reynolds modéré

Au-delà du régime rampant, mais pour des nombres de Reynolds modérés, l'écoulement s'organise de façon stable en reflétant la plupart des symétries et invariances des conditions

initiales et aux limites. Ainsi, si l'on impose au fluide de s'écouler dans une conduite rectiligne (Direction \vec{e}_x), on observe un écoulement parallèle, avec une vitesse d'advection suivant (\vec{e}_x) dont le module varie transversalement sous l'effet de la diffusion (figure II.2).

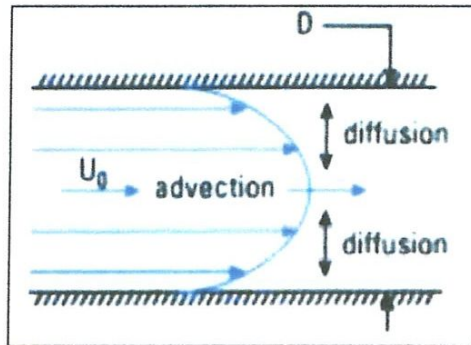


Figure .II. 2 : écoulement laminaire en conduite : le nombre de Reynolds est définie par

$$Re = \frac{U_0 D}{\nu}$$

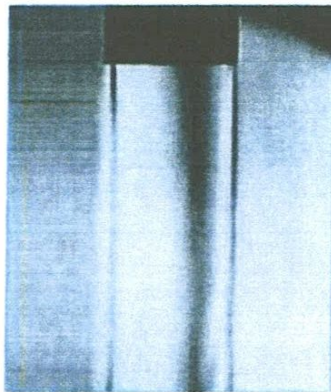


Figure .II.3 : Jet laminaire de CO₂ dans de l'air au repos a Re =2 000.

6.3. Ecoulement laminaire à nombre de Reynolds élevé : notion de couche limite

Lorsqu'un fluide visqueux en mouvement de vitesse uniforme à l'infini rencontre un obstacle solide, on observe que les effets de viscosité n'affectent pas de façon significative l'intégralité du champ de l'écoulement, dès que le nombre de Reynolds est suffisamment grand. De là résulte le concept de couche limite (figure II.4), zone dans laquelle se trouvent concentrés les effets de viscosité (plus généralement, tous les effets diffusifs dus à l'agitation moléculaire). Il s'agit d'une région de faible épaisseur relative (lorsque cette dimension est

rapportée à celle du développement dans le sens principal de l'écoulement). Hors de cette région, le fluide peut être considéré comme parfait et le mouvement irrotationnel.

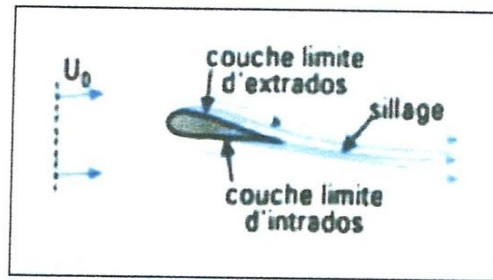


Figure .II.4 : Régions de couche limites d'écoulement autour d'un profil à grand nombre de Reynolds.

6.4. Décollement

Lorsque la géométrie de l'obstacle provoque une forte distorsion de l'écoulement au contournement de celui-ci (comme c'est le cas avec des corps épais ou des profils placés à forte incidence), on assiste à une séparation des filets fluides de la surface limite de l'obstacle : c'est le phénomène de décollement. En aval de la séparation, le mouvement d'organise, le plus souvent, en structures tourbillonnaires de différents types, stationnaire ou instationnaire, laminaire ou turbulent (figure II.5).

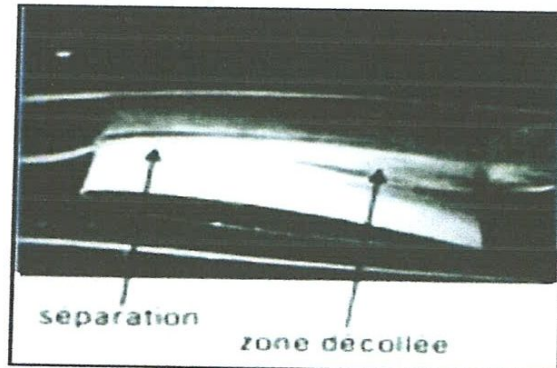


Figure.II.5 : Décollement laminaire sur un profil a forte incidence.

6.5. Transition de régime

Dans tout problème de dynamique, les questions concernent l'existence, l'unicité et la stabilité des solutions. Il en est de même de tout écoulement de fluide, en tant que (solution) d'un système dynamique particulier.

Au regard de la stabilité, on observe que les forces d'inertie ont un effet déstabilisateur, alors que les forces de viscosité tendent à stabiliser le mouvement en amortissant les perturbations lorsqu'elles apparaissent. Ainsi, lorsque le nombre de Reynolds augmente, la stabilité du régime laminaire peut ne plus être assurée. On se trouve alors dans une phase dite de *transition de régime*

Dans un écoulement en conduite, la perte de stabilité de l'écoulement de Poiseuille s'observe en pratique pour $Re = 2500$ à 3000 , où le nombre de Reynolds global est défini sur le diamètre de la conduite. L'instabilité se manifeste par l'apparition et l'amplification de perturbations conférant aux filets fluides un mouvement instantané désordonné, instationnaire et tridimensionnel, en rupture avec l'organisation stationnaire, parallèle et rectiligne du régime laminaire (figure II.6).

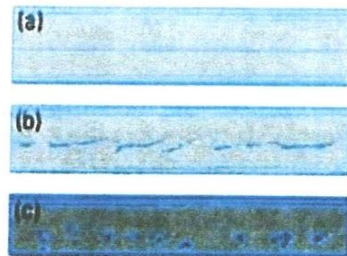


Figure.II.6 : Régime laminaire (a), apparition (b), et amplification (c) de perturbations par perte de stabilité de l'écoulement de Poiseuille en conduite.

6.6. Régime turbulent

Le développement ultime de la phase de transition par perte progressive de stabilité de l'écoulement conduit au régime turbulent, situation caractérisée par la présence d'une agitation d'ordre macroscopique interne à l'écoulement. Cette agitation, tridimensionnelle et chaotique, est responsable d'une intensification du mélange et des échanges au sein du mouvement, ainsi que d'une augmentation des transferts à la paroi d'un solide immergé. En écoulement à frontière libre, tel qu'un jet par exemple, l'agitation turbulente conduit à un accroissement sensible de la diffusion, par mouvements à échelle du continu (figure II.7).

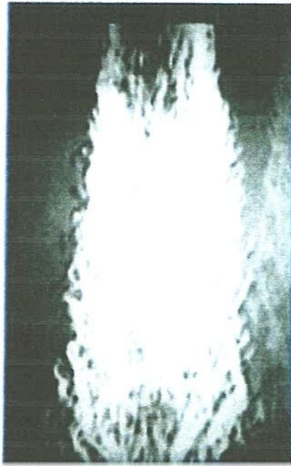


Figure.II.7 : Jet turbulent de CO₂ dans de l'aire au repos a Re =50 000

6.7. Compressibilité et onde de choc

Lorsque l'augmentation du nombre de Reynolds provient de celle de la vitesse de l'écoulement, il en résulte corrélativement une augmentation du nombre de Mach et des effets de compressibilité associés à ce paramètre. L'une des effets les plus remarquables apparaît lorsque l'on dispose un obstacle fixe dans un écoulement supersonique ($M > 1$).

L'arrêt du fluide à la paroi est la cause d'une forte variation de la pression qui se manifeste, dans ce cas, par une brusque augmentation de cette grandeur, localisée sur des régions de très faible épaisseur appelées ondes de choc. Cette onde peut être visualisée et apparaît détachée en amont de l'obstacle, dans le cas où celui-ci est un corps épais, une sphère dans l'exemple illustré (figure II.8).

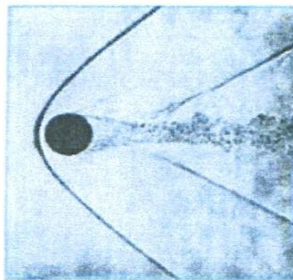


Figure.II.8 : Onde de choc détachée en amont d'une sphère placée dans un écoulement à ($M=1,8$)

Chapitre III

Pertes de charge

1. Définition

Lorsque de l'eau s'écoule dans une conduite, il y a frottement causé par les particules du fluide se frottant d'abord les unes contre les autres, puis le long de la paroi interne de la conduite. Le frottement est fonction de plusieurs facteurs : débit du fluide, diamètre et longueur de la conduite. Le frottement entraîne une perte de charge dans le sens de l'écoulement du liquide.

Les *pertes de charge* dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide. [www.almohandiss.com]

2. Types de pertes de charge

On distingue deux types de pertes de charge : Les pertes de charge du fluide par frottement sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle *pertes de charge régulières ou systématiques*. Et les pertes de charge ou résistance à l'écoulement provoquées par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissements de la section, organes de réglage, etc.) ; ce sont les *pertes de charge accidentelles ou singulières*. [http://www.mccflux.com/document/pertes%20de%20charge]

2.1. Pertes de charge linéaires

Les pertes de charge par frottement dans les conduites sont l'un des paramètres importants dont il faut tenir compte lors de la conception des conduites de distribution d'eau. Ces pertes sont dues à la viscosité du fluide et au régime d'écoulement. Les pertes de charge par frottement permettent de déterminer la diminution de pression dans les conduites de distribution d'eau. [Fethi A, 2010]

Pour étudier et résoudre le phénomène de perte de charge linéaire dans les conduites, les chercheurs ont d'abord élaboré des formules pour calculer ces pertes, parmi ces formules on distingue :

- Formule de Darcy-Weisbach
- Formule de Hazen-williams
- Formule de Colebrook

- Formule de Scobey
- Formule de Strickler
- Formule de Manning

2.2. Pertes de charge singulières

Lorsqu'il y a un changement, brusque ou progressif, dans les limites du fluide ou une présence d'un obstacle à l'écoulement, le type d'écoulement change. Ceci résulte en un changement dans l'ampleur, la direction ou la distribution de la vitesse de l'écoulement. Un tel changement introduit une perte de charge supplémentaire qui possède une nature locale et est généralement inférieure à la perte de charge par frottement subie par une conduite longue. Cette perte d'énergie est appelée *perte de charge singulière*.

Les singularités hydrauliques sont présentes dans tous les réseaux. Il peut s'agir de coudes, clapets, vannes, chutes, changements de pente ou de section, entrée ou sortie d'un réservoir, grilles, branchements et bifurcations, regard... Toutes ces singularités sont responsables d'une dissipation d'énergie par turbulence qui affecte l'écoulement.

Dans beaucoup de situations où le système hydraulique analysé est très étendu et les singularités hydrauliques sont modérées, les pertes de charge singulières peuvent être négligées par rapport aux pertes de charge linéaires par frottement.

D'une manière générale, les pertes de charge singulières peuvent être estimées à l'aide de la formule suivante [Carbonnet J] :

$$h_s = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{III. 1})$$

Ou encore, en remplaçant V par $4 Q / \pi D^2$

$$h_s = 0,0827 \cdot K \frac{Q^2}{D^4} \quad (\text{III. 2})$$

Où

V est la vitesse moyenne dans la conduite,

D est le diamètre de la conduite,

K est une constante qui dépend du type de singularité

2.2.1. Pertes de charge dans un élargissement brusque

Ces pertes de charge sont dues à l'expansion du fluide dans un espace plus grand s'accompagnant d'une diminution de vitesse et d'une augmentation de la pression. (Borda 1733-1799) est le premier à avoir établi la formule de perte de charge dans un élargissement brusque. Par application de l'équation de quantité de mouvement au volume compris entre les sections 1 et 2 de la figure III.1, on trouve :

$$h_s = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \frac{V^2}{2g} \quad (\text{III. 3})$$

Le coefficient de perte de charge singulière vaut par conséquent :

$$K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (\text{III. 4})$$

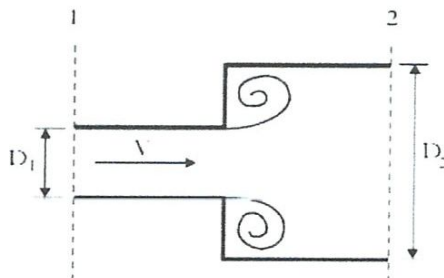


Figure III.1 : Elargissement brusque

2.2.2. Pertes de charge dans un rétrécissement

Ce phénomène est similaire à celui de l'élargissement brusque. Le décollement de la veine liquide au niveau du rétrécissement provoque une contraction de la section d'écoulement qui passe de A_1 à A_c (figure III.2). La section d'écoulement augmente ensuite comme dans un élargissement progressif pour atteindre A_2 .

Au niveau de la section contractée A_c , la vitesse augmente et la pression diminue avec un risque de cavitation.

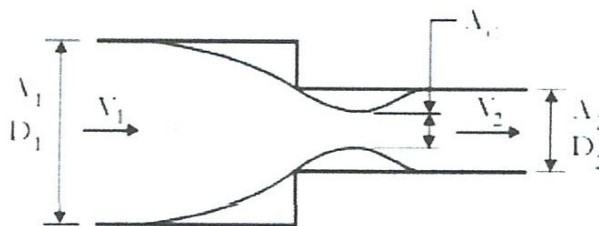


Figure III.2 : Rétrécissement brusque.

Pertes de charge dans une dérivation latérale

Les valeurs du coefficient de pertes de charge singulières dans la dérivation latérale (figure III.3) dépendent de l'angle α , tel que montré dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Valeurs de k

α (degrés)	K
15	0,1
30	0,3
45	0,5
60	0,7
90	1,3

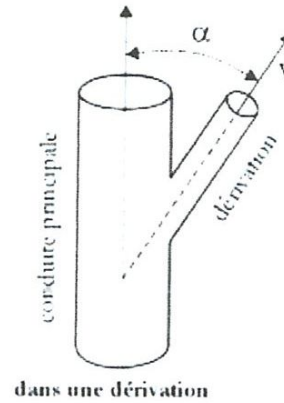


Figure III.3 : Dérivation latérale

2.2.3. Pertes de charge dans les vannes et les robinets

Ces pertes de charge singulière sont causées principalement par l'élargissement brusque après la restriction causée par la vanne ou le robinet. Pour certaines vannes, la déviation de l'écoulement à travers un chemin sinueux cause une perte d'énergie supplémentaire. Le coefficient de perte de charge singulière K peut être nul quand la vanne est complètement ouverte mais peut atteindre une valeur infinie quand la vanne est complètement fermée. La valeur de K passe par toutes les valeurs entre ces deux extrêmes.

Pour un robinet vanne (figure III.4), les ordres de grandeur des valeurs de K en fonction du degré de fermeture x/D sont donnés au tableau III.2.

Tableau III.2 : K pour robinet vanne

x/D	K
1/8	0,1
1/4	0,3
1/2	2
3/4	20
7/8	100

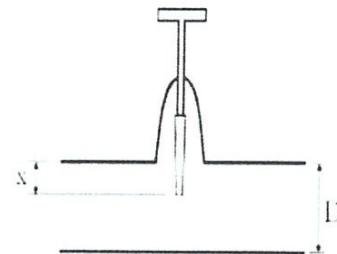


Figure III.4 : Robinet vanne

Le tableau suivant fournit les ordres de grandeur du coefficient de perte de charge singulière K pour les vannes papillons (figure III.5) pour différents angles d'orientation α :

Tableau III.3 : k pour vannes papillons

α (degrés)	K
0 (100% ouvert)	0,30
10	0,50
20	1,50
30	3,80
40	10,5
50	32
60	105

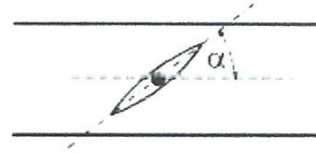


Figure III.5 : Vanne papillon

2.2.5. Pertes de charge dans les coudes

La déviation de l'écoulement dans un coude s'accompagne de forces centripètes qui modifient localement les champs de pression et de vitesse dans une section transversale à l'écoulement (figure III.6). Ainsi, dans un plan horizontal, la pression augmente en direction opposée au centre de courbure selon la deuxième équation d'Euler [Saad B, 2007] :

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \rho \frac{V^2}{r} \quad (\text{III.5})$$

Où

P est la pression,

n est la coordonnée curviligne selon l'axe perpendiculaire,

r est le rayon de courbure local,

ρ est la masse volumique de l'eau,

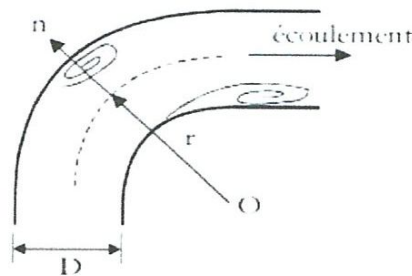


Figure III.6 : Ecoulement dans un coude

Chapitre IV

Analyse des réseaux

1. Principes fondamentaux de l'analyse des réseaux

En chaque nœud l'équation de continuité doit être satisfaite, et autour de chaque maille l'équation de conservation d'énergie doit être satisfaite. Une convention de signe est nécessaire, les débits entrant dans un nœud sont toujours considérés positifs. L'équation utilisée est sous la forme suivante :

$$Q_{ij} = \frac{(h_j - h_i)}{K_{ij}^{1/2}} (|h_j - h_i|)^{-1/2} = \frac{(h_j - h_i)}{K_{ij}^{1/2} (|h_j - h_i|)^{1/2}} \quad (IV. 1)$$

Pour les mailles, l'équation d'énergie, appelée équation Q, étant,

$$\sum_{j=1}^{NP(i)} K_{ij} \cdot Q_{ij}^2 = 0 \quad \text{avec} \quad i = 1, NL \quad (IV. 2)$$

Avec NP(i), le nombre de conduites dans la maille i, NL, le nombre de mailles.

Plusieurs approches sont possibles et on peut les regrouper en trois grandes catégories :

➤ Méthodes de corrections successives

- Méthode de Hardy-Cross
- Méthode des éléments finis

➤ Méthodes de corrections simultanées

- Méthode de Newton-Raphson

➤ Méthodes directes

- Méthode de linéarisation de Wood-Charles appliquée aux débits
- Méthode de linéarisation de Wood-Charles appliquée aux charges

2. Méthodes d'analyse des réseaux

2.1. Méthode de Hardy-Cross

Pour comprendre le principe de la méthode, on se donne a priori les débits dans chaque tronçon tout en respectant l'équilibre des débits au nœud. Si l'on a, pour N nœuds, soit N-1 relations indépendantes, M mailles, cela revient à se donner, pour la partie maillée du réseau, M-n+1 débit arbitraire auxquels il convient d'ajouter éventuellement ceux aboutissant aux nœuds frontières lorsqu'ils ne sont pas connus.

Si l'on désigne par dq_i l'écart entre le débit exact $q_{i_{ex}}$ et le débit q_i choisi [Dejan B,

2008] :

$$dq_i = q_{i_{ex}} - q_i, \quad (IV.3)$$

On peut écrire, en appliquant à chaque différence de charge ΔH_i , aux bornes d'un tronçon de conduite, u développement limité au premier ordre :

$$\Delta H_{i_{ex}} = \Delta H_i + \frac{d(\Delta H_i)}{dq_i} dq_i \quad (IV.4)$$

Où $\Delta H_{i_{ex}}$ représente la perte de charge dans le tronçon i pour le débit exacte cherché.

La relation des pertes de charge pour une maille s'écrit alors :

$$\sum_{I,i} \Delta H_{i_{ex}} = \sum_{I,i} \Delta H_i + \sum_{I,i} \frac{d(\Delta H_i)}{dq_i} dq_i \quad (IV.5)$$

Or, par hypothèse, $\sum \Delta H_{i_{ex}} = 0$

2.2. Méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est une méthode numérique qui permet de trouver la valeur de la variable x pour la $F(x) - 0$ à partir d'une première estimation de la valeur de x [Rieutord E E, 1985].

Pour ce faire, on utilise la relation bien connue suivante :

$$x_{p+1} = x_p - \frac{F(x_p)}{F'(x_p)} \quad (IV.6)$$

Où :

x_{p+1} : Nouvelle valeur (calculée) de x à partir de x_p

x_p : Valeur estimée ou précédente de x

$F(x_p)$: Valeur de $F(x)$ pour $x = x_p$

$F'(x_p)$: Pente de la fonction $F(x)$ pour $x = x_p$ [Arsene C.T.C, 2005]

2.3. Méthode de linéarisation de Charles -Wood

La méthode théorique linéaire proposée par Wood et Charles, utilise la théorie de linéarisation dans le calcul et l'analyse des systèmes de distribution d'eau. Cette méthode consiste principalement à linéariser le système d'équation, résoudre les

équations linéaires et substituer la solution des équations linéaires en revenant au système d'origine des équations non linéaires. Elle a un avantage, elle n'exige pas d'estimés initiaux pour lancer le processus.

La méthode converge plus rapidement que celle de Hardy-Cross. Elle détermine le débit dans toutes les conduites simultanément en faisant intervenir toutes les relations de base du réseau nécessitant ainsi l'utilisation d'une matrice d'ordre élevé.

On obtient un système d'équations :

$$\left. \begin{aligned} a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + \dots + a_{1k}Q_k &= dh_1 \\ a_{k1}Q_1 + a_{k2}Q_2 + \dots + a_{kk}Q_k &= dh_k \end{aligned} \right\} B \text{ équations}$$

$$\left. \begin{aligned} b_{11}Q_1 + b_{12}Q_2 + \dots + b_{1k}Q_k &= u_1 \\ b_{N-1,1}Q_1 + b_{N-1,2}Q_2 + \dots + b_{N-1,k}Q_k &= u_{N-1} \end{aligned} \right\} N - 1 \text{ équation}$$

Où :

Q_i : débit dans la conduite i

u_i : consommation dans le nœud i

$$a_{ij} = \begin{cases} K_j |Q_i|^{n-1}, & \text{si la conduite } j \text{ appartient à la maille } i \\ 0, & \text{si la conduite } j \text{ n'appartient pas à la maille } i \end{cases}$$

Donc pour résoudre un problème il ne reste qu'à résoudre le système d'équations linéaires, et résoudre les équations linéaires en répétition jusqu'à convergence de la solution.

2.4. Méthode linéaire de Charles-Wood appliquée aux débits

Cette méthode est assez simple en ce qui concerne la mise en équations. En effet, il suffit d'écrire autant d'équations de conservation de débit ou d'énergie qu'il y a de débits dans les éléments du réseau.

Dans un réseau maillé, on peut écrire la relation :

$$C = M + N - 1 \tag{IV. 9}$$

Où :

C : nombre de conduites entre deux nœuds.

M : nombre de mailles (boucles fermées).

N : nombre de nœuds (point de jonctions) [Fethi A, 2010].

2.5. Méthode linéaire de Charles-Wood appliquée aux charges

Cette méthode consiste à écrire un système d'équations composé des N équations de nœuds. Comme il y a C débits inconnus dans ces équations, on remplace les débits par la relation qui relie le débit à la perte de charge dans laquelle on remplace explicitement la perte de charge par la différence des deux charges nodales. On obtient donc N inconnues. Pour chaque nœud, i, il faut alors écrire une équation du type :

$$\begin{aligned} & (\sum_{N=j,k} mK_{i,N} |H_i - H_N|^{m-1}) \Delta H_i - mK_{i,j} |H_i - H_j|^{m-1} \Delta H_j - mK_{i,k} |H_i - H_k|^{m-1} \Delta H_k - \\ & \dots = -(\sum_{N=j,k} mK_{i,N} |H_i - H_N|^m + \varepsilon_i Q_i) \end{aligned} \quad (IV.10)$$

2.6. Méthode des Éléments Finis

La méthode des éléments finis a de plus en plus été utilisée dans différents domaines de l'ingénierie se basant sur l'analyse structurelle du système à étudier. L'analogie entre les systèmes structurels et les réseaux de conduites permet l'application de la méthode des éléments finis dans l'analyse des réseaux de conduites.

La méthode des éléments finis consiste à diviser (discrétiser) la structure en éléments discrets. La méthode utilise la relation entre les propriétés de base de chacun des éléments afin de définir le comportement de cet élément. Chaque élément doit satisfaire les trois conditions :

- l'équilibre des forces doit être maintenu ;
- la compatibilité doit être maintenue ;
- la relation du déplacement des forces spécifiée par les propriétés géométriques et élastiques de l'élément discret doit être satisfaite.
- La force F est donnée par la relation :

$$F = K \cdot u \quad (IV.11)$$

Où :

U : le déplacement ;

K : la raideur (propriété) de l'élément [Lahiouel Y, 2006].

Chapitre V

Optimisation

1. Introduction

Les mots “optimiser” et “optimisation” sont bien souvent galvaudés dans le langage courant dans la mesure où ils sont utilisés dans le sens d’une simple “amélioration” ou “mieux possible”. Par rapport à un état antérieur. On ne peut strictement parler d’optimisation que si l’on est sûr qu’*aucun autre* choix ou aucune autre décision n’est possible — dans le cadre de contraintes explicitement spécifiées — qui fera mieux que celle réputée “optimale”, et “mieux” n’a de sens qu’une fois précisé l’échelle de mesure de performance. En supposant la pré-existence d’un modèle mathématique et d’un « critère » à optimiser. Il faut alors un “algorithme” plus performant, c’est-à-dire une méthode pour cheminer vers “la” solution en explorant le moins de “moins bonnes” solutions possible. Mais, sans précision sur le “combien mieux”, ou “combien moins bien”, la notion de “sous optimalité” reste très floue, et une façon plus claire de s’exprimer consisterait à parler tout simplement de “non optimalité”.

Dans ce chapitre une procédure de conception fait quelques efforts pour optimiser le coût, la fiabilité et la performance ou bien quelque autre propriété ou encore une combinaison des propriétés du système. Ceci est toujours fait sur une base informelle et largement intuitive afin d’atteindre “une bonne solution d’ingénierie”, c’est-à-dire une solution qui atteint ses objectifs en se souciant de l’économie et de l’intégrité.

Dans la conception d’un réseau de conduites, le processus d’optimisation complet consiste à trouver la meilleure disposition ou configuration et la meilleure combinaison des dimensions des conduites pour le système entier, soumis à une série de contraintes physiques et technologiques. Généralement, le coût du réseau est à minimiser, bien que l’utilisation de la fiabilité comme un objectif et comme une contrainte soit considérée. L’algorithme de la longueur minimale a été utilisée pour l’objectif de concevoir des réseaux maillés de longueur minimale. La méthode du Simplexe a été choisie pour l’optimisation du choix du diamètre afin d’économiser le coût totale et d’assurer la fiabilité du réseau. L’exploitation de ce modèle sur un cas concret permettra l’estimation des paramètres intrinsèques relatifs à un réseau de transport et de distribution.

2. Définition de l’optimisation

L’optimisation consiste à appliquer les méthodes, les techniques, les instruments

scientifiques pour modéliser et résoudre les problèmes dans tous les domaines. On peut le définir comme un approche généraliste qui relève des sciences de la décision et qui combine : savoir faire pratique (comment formuler un problème d'optimisation, comment résoudre un problème à l'aide d'algorithmes numériques) connaissances théoriques (comment caractériser les solutions optimales, que nous apprennent les conditions d'optimalité sur les propriétés qualitatives et quantitatives des solutions) [Sau et al].

3. Types d'optimisation

- Optimisation continue et optimisation discrète (ou combinatoire)
- Optimisation déterministe et optimisation dans l'incertain
- Optimisation linéaire et optimisation non linéaire
- Optimisation statique et dynamique [Cohen G. 2000 ,2006].
- Optimisation convexe
- Optimisation non-convexe
- Optimisation dans le cas d'analyse des réseaux [Fisli H, 2002].

4. Domaines d'applications

On peut citer quelques domaines :

- Militaire
- Transport (aéroport, route, trajet, livraison, horaire)
- contrôle des réseaux (infrastructures, distribution) [Cohen G. 2000 ,2006]

5. La conception optimale des réseaux de conduite

Les réseaux de distribution d'eau représentent une des plus grandes infrastructures dans une société industrielle.les réseaux physiques tels que les réseaux de conduites d'eau et de gaze, d'assainissement, d'irrigation, électriques et les câbles de téléphone, sont présents à travers le monde et constituent les atouts les plus importants et les plus chers.

Plusieurs réseaux, particulièrement ceux prévus pour les systèmes d'assainissement et d'irrigation, ont des structures arborescentes, ayant un nœud racine (source ou puits), un réservoir et un système de branches dont la capacité diminue avec la distance à partir de la source. Quelques réseaux de distribution d'eau et de gaz retiennent une structure de base arborescente, mais plusieurs ont, à travers les années, acquis des mailles comme un moyen de renforcer et d'assurer

l'appauvrissement. La majorité des réseaux de distributions sont conçus comme des réseaux maillés, mais avec comme une structure de base ou de fond un arbre.

Presque toute procédure de conception fait intervenir les efforts pour optimiser le cout, la fiabilité et la performance ou bien quelque autre propriété ou encore une combinaison du système. Ceci est toujours fait sur une base informelle et largement intuitive afin d'atteindre « une bonne solution d'ingénierie », c'est-à-dire une solution qui atteint ses objectifs en se souciant de l'économie et de l'ingénierie. Vu la puissance des ordinateurs disponibles et les théories existantes, l'optimisation peut être traitée de manière beaucoup plus rigoureuse.

Etant donné un modèle numérique convenable du système sous étude, un très grand nombre d'alternatives peut être examiné en un temps très court, permettant au concepteur de choisir un plan final meilleur que ceux pouvant être obtenus par les méthodes manuelles et intuitives.

Dans la conception d'un réseau de conduite, le processus d'optimisation complet consiste à trouver la meilleure disposition ou configuration géométrique et la meilleure combinaison des dimensions des conduites pour le système entier, soumis à une série de contraintes physiques et technologiques. Généralement, le cout de l'investissement et de l'exploitation du réseau sont à minimiser, bien que l'utilisation de la fiabilité comme un objectif et comme une contrainte soit simultanément considéré.

L'importance d'obtenir la meilleure configuration géométrique du réseau et diamètres d'optimums pour chaque conduite est appuyée par le fait que les décisions prises durant les étapes de conception influent directement sur l'optimalité des coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance finaux.

Quand la configuration ou la connectivité du système est à concevoir, la technique de résolution appropriée est la plus compliquée et complète. Pour certains types de petits systèmes, la programmation dynamique peut être utilisée, et peut donner une solution optimale globale réelle pour le problème de réseaux de conduites sous pression. Quand la disposition et la connectivité sont fixées, alors pour une série donnée de valeur des demandes, le débit dans toute branche, peut être déterminé. La sélection des diamètres optimums des conduites (à moindre coût) peut ainsi être obtenue en utilisant soit l'approche de programmation linéaire soit la programmation dynamique.

Beaucoup plus complexe est le choix de la disposition et la connectivité optimales pour un réseau. Le problème général peut être divisé en une série de sous problèmes. Les coordonnées (x, y) de tout nœud de jonction deviennent alors les variables du problème d'optimisation.

La méthode de recherche itérative peut être décomposée en deux processus d'optimisation.

Le premier processus est l'itération principale dans laquelle la configuration optimale du réseau à moindre coût est recherchée. Ensuite, dans le deuxième processus itératif une série de diamètres optimums des conduites est identifiée correspondant à la configuration spécifiée dans l'étape précédente, en se basant aussi sur le coût comme critère de performance.

Le problème de conception des réseaux de distribution d'eau peut être énoncé comme suit :

Minimiser le coût du système sous les contraintes suivantes :

- 1- Les équations de continuité,
- 2- Les équations d'énergie,
- 3- Les limites sur les pressions aux charges,

Les exigences de fiabilité pour le système.

La recherche dans le domaine de la conception des réseaux peut être divisée en deux catégories [Lahiouel Y, 2006] :

1. Approches qui concernent le problème combiné optimisation-fiabilité-configuration, dans lequel la configuration n'est pas fixé, mais doit être déterminé de façon à optimiser la conception globale,
2. Approches qui focalisent sur l'optimisation de réseaux maillés préalablement fixé, ou la redondance est fournie par spécification de diamètres ou débits minimums.

6. La théorie des graphes et topologies des réseaux

6.1. Définition d'un graphe

Un graphe est un schéma constitué par un ensemble de points finis et par un ensemble de flèches reliant chacune deux de ceux ci. Les points sont appelés les sommets du graphe, et les flèches les arcs du graphe [Pelle S, 2005].

6.2. Naissance de la théorie des graphes

Le problème des ponts de Königsberg

La ville s'étend sur les rives du Pregel (alors capitale de la Prusse de l'Est, aujourd'hui rebaptisée Kaliningrad) [Didier M, 2003] et sur ces deux îles.

- Ces quatre régions sont reliées par 7 ponts.
- Les citoyens se demandent s'il est possible de faire un chemin qui traverse chaque pont exactement une fois.

La réponse à cette question

- Un tel circuit n'existe pas. (Euler, 1736)
- Euler a prouvé qu'un graphe peut avoir un tel circuit si il n'y a pas de sommets ayant un nombre impair de arêtes incidentes.
- Königsberg: 4 sommets, tous ayant un nombre impair d'arêtes [Bogdan C].

6.3. Différents types de graphes

-*Orienté* : chaque arête (arc) a un sens, habituellement représenté par une petite flèche.

-*Non orienté* : les arêtes n'ont pas de sens particuliers.

-*Multi-graphe* : il peut y avoir plusieurs arcs ayant les mêmes extrémités [Montcouquiol G, 2006-2007].

6.4. Application de la théorie des graphes

La théorie des graphes permet de générer des circuits optimisés et de gérer des réseaux (routiers, de communication, d'eau de gaz, ...), d'ordonnancer des tâches et de gérer des plannings. Elle est la clé de l'intelligence artificielle avec la notion du « plus court chemin » [Ameeuw Fet al, 2010].

6.5. Topologie d'un graphe

Dans l'analyse des réseaux de fluide, les matrices se prêtent comme le moyen naturel pour exprimer le problème. Tout réseau peut être décrit par l'ensemble de matrices basées sur sa topologie.

L'analyse d'un réseau nécessite le choix d'au moins un nœud de référence afin de faciliter la génération de l'arbre. La pression au nœud source est habituellement connue et ce dernier est souvent utilisé comme le nœud de référence. Cependant, tout nœud peut avoir sa pression définie et peut être utilisé comme nœud de référence.

Pour définir complètement la topologie, il est nécessaire d'attribuer un sens à chaque branche. Le sens est attribué arbitrairement et supposé être le sens positif de l'écoulement dans la branche. Si le débit a une valeur négative alors le sens de l'écoulement est l'opposé de celui de la branche [Lahiouel Y, 2006].

7. La configuration optimale du réseau à moindre coût « optimisation de la longueur totale du réseau »

7.1. Objectif

La résolution des problèmes de réseaux de distribution de fluide de n'importe quel topologie nécessite de trouver la représentation graphique ou matricielle du réseau qui permet d'effectuer les calculs de la manière la plus simple. L'objectif principal de cette étape est d'optimiser la longueur totale du réseau, et de là les longueurs des conduites sont à minimiser. Dans ce cas, les débits aux jonctions (nœuds) ainsi que leurs positions sont supposés connus.

7.2. Les méthodes utilisées dans l'optimisation de la configuration

Les techniques de résolution utilisent, généralement l'un des trois principaux algorithmes, l'algorithme du chemin le plus court, celle de l'arbre minimale, et celles des algorithmes génétiques.

7.2.1. Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes de recherche basés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, et sur des méthodes énumératives.

Un algorithme génétique simple, qui donne des résultats dans bon nombres d'applications, est composé de ces étapes :

1. Prendre arbitrairement des chemins reliant le nœud source aux nœuds de demande.
2. Calculer la valeur de « fitness » (fonction objective), qui est la longueur du chemin.
3. Coder les chemins par les numéros des nœuds pris dans une suite séquentielle entre le nœud source et le nœud destination en se basant sur la topologie du réseau.
4. Appliquer les opérateurs génétiques :
 - a) La mutation génère un chemin alternatif au chemin existant en modifiant légèrement le parcours.
 - b) Le croisement échange des sous-chemins entre deux chemins. Les chemins doivent avoir la même source et la même destination.
5. Calculer la valeur du « fitness » des nouveaux chemins ;
6. Si la valeur se trouve améliorée, prendre le nouveaux chemin ;
7. Revenir en 3.

Le processus étant itératif, l'arrêt se fait quand il n'y a plus d'amélioration dans la valeur du « fitness » [Lahiouel Y, 2006].

7.2.2. La méthode du plus court chemin

L'objectif de cet algorithme est de trouver la connexion la plus petite entre la source et une destination dans un réseau, tel que le nœud source et les nœuds de demande dans un système de distribution d'eau.

Il y a un algorithme plus utilisée celle de Dijkstra

- Algorithme de Dijkstra

L'algorithme de Dijkstra résout le problème de la recherche d'un plus court chemin a origine unique pour un graphe orienté pondéré $G = (S;A)$ dans le cas où tous les arcs ont un poids positif ou nul.

L'algorithme de Dijkstra maintient à jour un ensemble E des sommets de G dont le plus court chemin à partir de l'origine s est connu et calculé. À chaque itération, l'algorithme choisit parmi les sommets de $S \setminus E$ — c'est-à-dire parmi les sommets dont le plus court chemin à partir de l'origine n'est pas connu — le sommet u dont l'estimation de plus court chemin est minimale [Frédéric V, 2002].

7.2.3. la méthode de l'arbre minimal

L'objectif de l'algorithme de l'arbre minimal est de trouver les branches d'un réseau qui relie tous les nœuds les uns aux autres avec une longueur totale minimale. Tel est le cas d'un système de distribution d'eau en arbre ou la longueur totale de la conduite est à minimiser commençant en un nœud quelconque du réseau, le nœud non connecté le plus proche est connecté à l'arbre des nœuds connectés.

L'algorithme de résolution est aussi un processus itératif. L'objectif de chaque itération est de trouver parmi tous les nœuds non connectés celui le plus proche du réseau de nœud déjà connecté. Les pas d'itération sont comme suit :

1. Sélectionner arbitrairement un nœud de départ.
2. Connecter dans un processus itératif le nœud non connecté le plus proche.

Il existe deux principaux algorithmes qui incluent dans le principe de la méthode de l'arbre minimale, celle de Prim, et celle de Kruskal.

- *Principe de l'Algorithme de Prim*

On construit un sous-graphe en ajoutant arêtes et sommets les un après les autres. A chaque étape, on cherche l'arête sortante de plus petite valuation. Une arête est sortante si elle joint un sommet du sous-graphe à un sommet qui n'est pas dans le sous-graphe. On ajoute alors l'arête et le sommet qu'elle joint au sous-graphe. On termine dès que l'on a sélectionné $n - 1$ arêtes

- *Principe de l'Algorithme de Kruskal*

On construit un sous-graphe en ajoutant des arêtes une par une. A chaque étape, on cherche l'arête de plus petite valuation parmi celles que l'on n'a pas déjà explorées. Si elle ne crée pas un cycle, on l'ajoute au sous-graphe, sinon on la laisse de côté. On termine dès que l'on a sélectionné $n - 1$ arêtes, ou qu'il ne reste plus d'arêtes ne créant pas de cycles [Montcouquiol G,2006-2007].

7.2.4. l'algorithme de la longueur minimale

En essayant d'utiliser les avantages et les lacunes des méthodes existantes, une nouvelle méthode de conception des réseaux de distribution a été développée, l'algorithme de la longueur minimale. Il vise la minimisation des longueurs de toutes les branches formées autour des sources des assemblant en chemin ouvert (ramifiés), et par suite concevoir un réseau complètement maillé.

A. La matrice d'adjacence

Dans la conception des réseaux de fluide, les matrices se prêtent comme le moyen naturel pour exprimer le problème. La matrice d'adjacence est un concept mathématique compact du réseau. L'information relative à la configuration du réseau peut être résumée dans la matrice d'adjacence (incidente) qui permet d'établir l'état de la connectivité du graphe, et par conséquent du réseau. Elle représente un élément clé de l'étude de la connectivité des réseaux et de là, vérifier l'adjacence des nœuds entre eux au moyen de l'élément :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le noeud } i \text{ est relie au noeud } j \\ 0, & \text{si le noeud } i \text{ n'est pas relie au noeud } j \end{cases} \quad (V.1)$$

Le maillage du réseau est donc déduit de l'exploration de la matrice. En faisant la somme des éléments des lignes, le nombre de connexion (degré de connectivité) pour les nœuds est obtenu.

Ceci permet de repérer les nœuds flottants, ayants moins de deux connexions.

B. Formulation mathématique

Afin de résoudre le problème d'optimisation de la conception des réseaux de distribution d'eau par la minimisation de la longueur totale du réseau, il est nécessaire de le modéliser par un ensemble d'équations. La plus importante est la fonction objet. Il est supposé que la fonction coût à minimiser soit basée sur les longueurs des conduites et prend la forme suivante :

$$\text{Coût} = \sum_{i=1}^{NB} C_i \cdot L_i \quad (V.2)$$

La fonction objective est soumise aux contraintes :

- Pour chaque source, la contrainte de la disponibilité est comme suit :

$$\sum Q_{ij} \leq Cap \quad (V.3)$$

Pour chaque nœud de jonction, les contraintes de continuité du débit doit être satisfaite :

$$\sum Q_{ij} = Dem \quad (V.4)$$

Pour chaque nœud de jonction la contrainte de fiabilité doit être satisfaite :

$$\sum NC_i \geq 2 \quad (V.5)$$

Cette contrainte garantit qu'il y ait, à la fin, deux chemins différents reliant chaque nœud de demande à la source qui approvisionne. Elle assure la fiabilité du système.

C. L'algorithme de la méthode

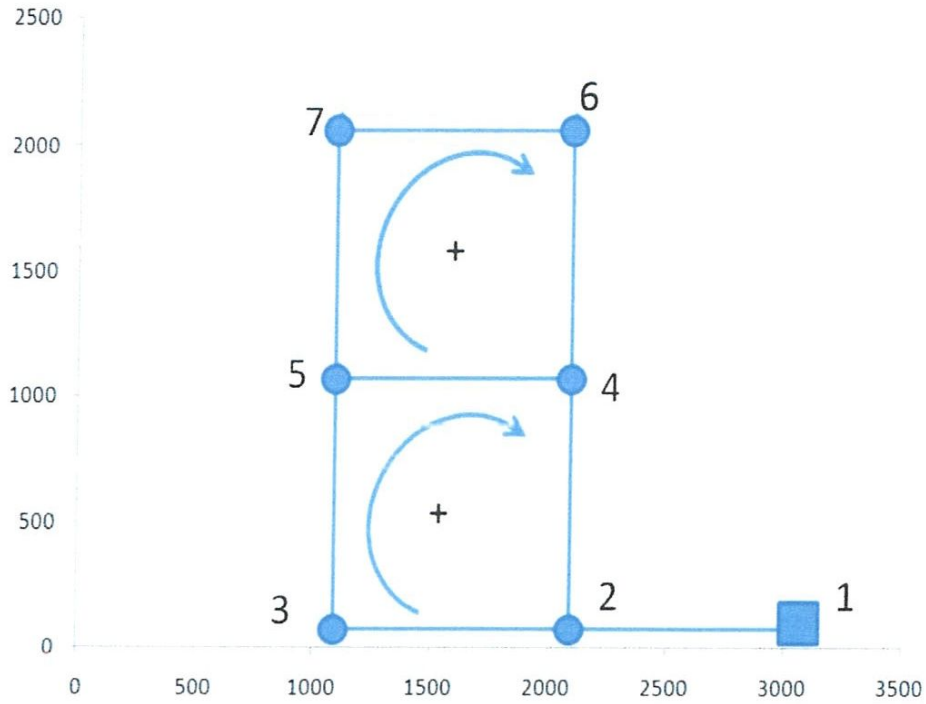
- Soit deux ensembles :
 - Ensemble des sources avec toutes les informations d'identification, position (coordonnées cartésiennes) et capacité.
 - Ensemble des nœuds avec aussi toutes les informations d'identification, position (coordonnées cartésiennes) et demande.
- Les étapes de la conception d'un réseau en minimisant la longueur totale sont énumérées ci-après [Lahiouel Y, 2006] :
 1. Etant données les caractéristiques des nœuds et des sources ;
 2. Calculer les distances des sources aux nœuds et des nœuds entre eux ;
 3. Considérer la source ayant la plus faible capacité ;
 4. Choisir la plus petite distance source-nœud et relier le nœud à la source ;

5. Choisir, parmi les nœuds non connectés, la distance la plus petite au nœud qui vient d'être connecté ou à la source en considération. Relier alors ce nœud en constituant un groupe de nœuds en forme de réseau primaire ;
6. Répéter l'étape 5 jusqu'à ce que la disponibilité au niveau de la source soit nulle ou inférieur à la demande des nœuds non connectés ;
7. Reprendre les étapes 4 à 6 avec chacune des sources séparément, en passant, à chaque fois, à la source ayant une capacité juste supérieur ;
8. Générer une matrice d'adjacence, au fur et à mesure que les groupes se forment. Mettre "1" dans la matrice à la position relative à l'arc, qui se forme entre deux éléments ;
9. Repérer les nœuds ayant un degré de connexion inférieur à 2 ;
10. Relier, entre eux, les nœuds ayant un degré inférieur à deux, c'est-à-dire n'ayant pas, au moins deux conduites qui leur sont connectées directement. On choisit les nœuds les moins distants et appartenant à deux groupes distincts ;
11. S'il reste encore des nœuds flottants, ces derniers sont alors reliés a des nœuds du même groupe.

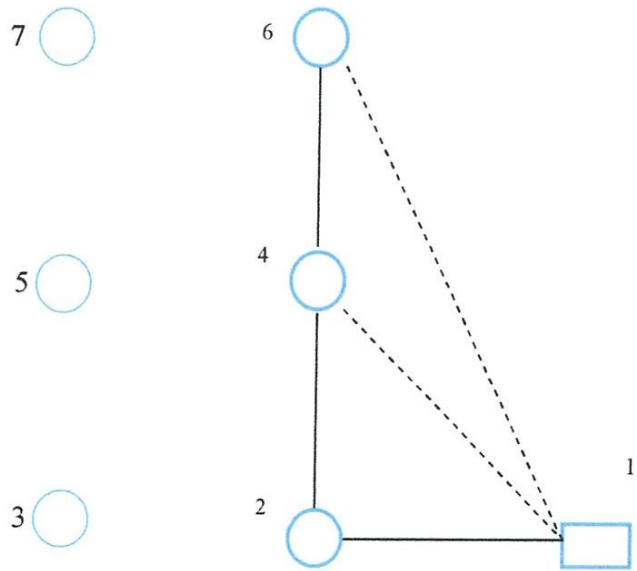
D. Illustration des étapes de la conception

Tableau V.1 : les coordonnées et les données du réseau à deux mailles

Nœuds	x(m)	y(m)	Capacité de demande	Z (m)	Pmin
Source 1	3100	100	1120	210	00
2	2100	100	100	150	30
3	1100	100	100	160	30
4	2100	1100	120	155	30
5	1100	1100	270	150	30
6	2100	2100	330	165	30
7	1100	2100	200	160	30



Première étape : construction des groupes



Les premières conduites

Sources 01 : les nœuds (2, 4,6)

Les conduites résultantes : (1,2) (1,4) (1,6) (2,4) (4,6)

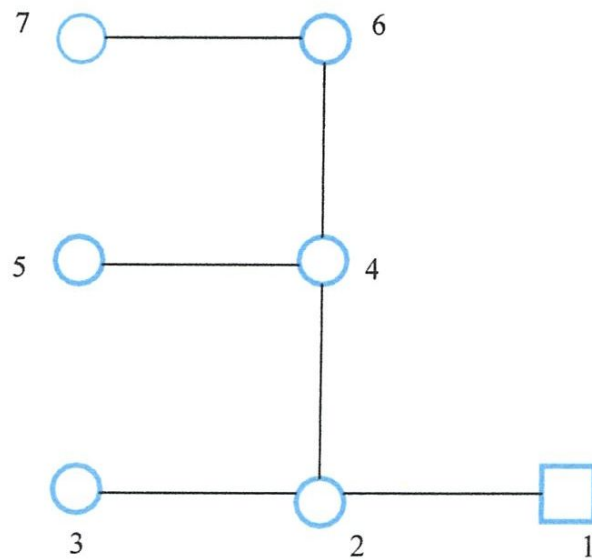
La matrice adjacente :

$$A = \begin{pmatrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Total} \\ \hline 3 \\ 2 \\ 0 \\ 3 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{array}$$

2^{ème} étape :

Pour les nœuds sans source : (3, 5, 7)

On a les conduites suivantes : (2, 3) (4, 5) (6, 7)



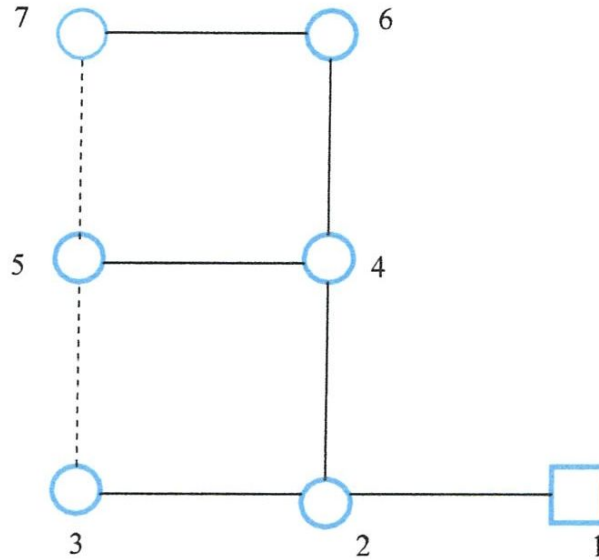
La matrice d'adjacence :

$$A = \begin{pmatrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Total} \\ \hline 1 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{array}$$

3^{ème} étape : Repérage des nœuds flottants

Les nœuds de degré 1 : (3 ; 5 ; 7)

On obtient les conduites (3,5), (3,7)



La matrice adjacente

$$A = \begin{array}{c|ccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \begin{array}{l} \text{Total} \\ \hline 2 \\ 3 \\ 2 \\ 3 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{array}$$

Le réseau est complètement maillé.

8. Optimisation du diamètre

8.1. Diamètre économique

Dans cette partie de notre travail, on s'intéresse sur tout à chercher le diamètre économique d'une canalisation de distribution de fluide, en considérant, par exemple, un débit à transporter, sans pompage, à une distance déterminée, le choix du diamètre de conduite et, en conséquence, la valeur de la perte de charge, sera orienté, en fin de compte par des raisons d'ordre économique : on

s'efforcera d'obtenir des coûts totaux minimums d'investissement et d'exploitation. Cette recherche n'a pas pour but de chercher le diamètre économique avec un coût minimal seulement, mais d'assurer aussi que ce diamètre réduit les pertes de charge, et le débit du fluide passant à travers lui soit suffisant pour répondre aux demandes

8.1. Critères de conception et contraintes pour trouver le diamètre économique

En prenant un réseau de distribution sans station de pompage, ni réservoirs,..., la conception est basée sur les critères suivants :

- La demande en un nœud (ou plusieurs) peut être imposée à la conception.
- Les vitesses maximale et minimale de l'écoulement sont généralement imposées afin d'éviter la détérioration de la qualité de l'eau; le bruit; le dépôt des solides.
- Diamètre et matériau : Le choix du matériau dépend du coefficient de rugosité dans la formule du débit, de la pression maximale admise dans le conduit; et du coût par rapport à la fonction objet.
- Pressions minimale et maximale : la pression minimale dépend principalement du niveau du service et de la région à servir. La pression maximale est limitée par le matériau du conduit et la qualité de la construction du réseau.
- Etat de l'écoulement : l'écoulement stationnaire est supposé pour la conception mais d'autres états doivent être pris en considération.

8.2. Structure générale des problèmes d'optimisation

La fonction objet est supposée être une fonction coût des diamètres et longueurs des conduites :

$$f(D, L) = \sum_{i,j=1}^{NB} C(D_{ij}, L_{ij}) \quad (V. 6)$$

Cette fonction est à minimiser sous l'effet des contraintes.

Les trois principales contraintes pour la conception hydraulique d'un réseau sont la continuité du débit aux nœuds, le maintien des pressions minimale et maximale et la perte de charge dans la maille. L'équation de continuité en un nœud n est :

$$\sum Q_{in} = q_n \quad (V. 7)$$

Où Q_{in} est le débit dans le conduit i (m³/s) ; q_n est la demande au nœud n (m³/s) ;

Maintenir la pression de service minimale en chaque nœud n est :

$$\sum S_{in} l_{inj} \leq h_s - H_m + Z_s - Z_n \quad (V.8)$$

Où

S est la pente de la ligne de pente hydraulique ;

l est la longueur du conduit

h_s , est la charge de pression à la source (m) ;

H_m est la charge de pression de service minimale (m) ;

Z_n est la surélévation du nœud n (m) ;

Z_s est la surélévation de la source (m) ;

in est l'ensemble d'indices des assemblages entre la source et le nœud n.

La pression maximale a lieu quand il n'y a pas de demande dans le système (pression hydrostatique). Pour un nœud n.

$$h_s \leq H_m + Z_n - Z_s \quad (V.9)$$

$$\sum_{i,j \in I_r} S_{ij} l_{ii} = 0$$

Pour chacune des mailles primaires dans le réseau, la contrainte de conservation de l'énergie peut être écrite comme :

$$\sum_{i,j \in I_r} S_{ij} l_{ii} = 0 \quad (V.10)$$

Où I_r est l'ensemble d'indices pour les assemblages de la maille r.

La formule de Hazen-Williams ou celle de Darcy-Weisbach peut être utilisée pour exprimer la perte de charge. En présence de plusieurs sources des contraintes de conservation d'énergie sont formulées entre deux paires de nœuds [Lahiouel Y, 2006].

Dans un réseau ramifié, la distribution du débit est obtenue en résolvant l'équation de continuité (V.7) pour tous les nœuds. Ensuite résoudre l'équation (V.8) pour les nœuds critiques (avec surélévation importante) seulement et l'équation (V.9) pour le nœud avec la plus petite surélévation qui constituent les constantes pour le réseau ramifié.

Dans les réseaux maillés le débit est influencé par le diamètre. Les équations (V.7), (V.8) et (V.10) sont interdépendantes et ne peuvent être résolues séparément. De là, en plus des constantes du réseau ramifié, l'équation de continuité est établie pour tous les nœuds et l'équation de la maille pour toutes les mailles afin de constituer les constantes d'un réseau maillé [Fisli H, 2002].

Le coût d'un conduit du réseau est communément exprimé par :

$$C = f(D)l \quad (V, 11)$$

Où C est le coût du conduite; D est le diamètre(m) ; l est la longueur du conduite (m)

Puisque S et Q sont les seules variables des constantes, D doit être remplacé dans le coût. D peut être exprimé par :

$$D = K \frac{Q^{0.4}}{S^{0.2}} \quad (V.12)$$

Où K est une constante dépendant de la rugosité de la conduite.

En faisant la somme de toutes les fonctions coûts des conduits d'un système, selon l'équation /

$$C_T = \sum f_i \left(K \frac{Q^{0.4}}{S^{0.2}} \right) l \quad \longrightarrow \quad \text{à minimiser} \quad (V.13)$$

Où C_T est le coût total du système.

8.4. La relation coût-perte de charge des assemblages

La relation coût - perte de charge est dérivée pour un assemblage avec un débit constant. Chaque diamètre donne une valeur pour la perte de charge et le coût. Des valeurs entre ces points sont obtenues par des combinaisons linéaires de différents diamètres, représentant un assemblage avec plusieurs sections. En faisant varier la longueur des sections, toute perte de charge entre celle du plus grand diamètre et celle du plus petit peut être reproduite.

La relation coût - perte de charge doit montrer quel diamètre doit- on retenir comme solution. Pour cela des combinaisons multiples entre les diamètres peuvent être faites donnant des coûts différents.

En choisissant le coût le plus bas, on choisit les diamètres à retenir et ceux à rejeter.

On devrait aussi savoir combien d'assemblages avec plusieurs sections apparaîtront dans la solution optimale.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées pour la dernière solution du système de distribution d'eau :

La dernière solution du coût nécessite dans quelques assemblages deux sections de diamètres différents. La somme des longueurs des deux sections est égale à la longueur de l'assemblage.

- Pour une relation coût - perte de charge convexe, le cas général, deux diamètres adjacents apparaissent.
- Le nombre d'assemblages avec deux sections dépend du nombre de contraintes des charges de pression. Un assemblage avec deux sections est nécessaire dans chaque maille et chaque nœud avec une contrainte de charge de pression.

Puisque les conduits ne sont disponibles que dans quelques diamètres, la fonction coût n'est pas

continue mais discrète. De la, la fonction objective est une fonction discrète avec un constituant convexe dans le cas du réseau ramifié et un constituant concave dans le cas du réseau maillé.

Il n'existe pas d'algorithmes pouvant résoudre ce type de problème. Des transformations doivent donc être faites afin de pouvoir le résoudre. Le problème sera versé aux problèmes d'optimisation linéaire. Ceci implique beaucoup de difficultés pour les systèmes maillés. Dans ce qui suit seront montrées les transformations dans les problèmes d'optimisation linéaire.

L'objectif du modèle de conception est de minimiser le coût total du système en trouvant la meilleure combinaison possible des diamètres. Dans ce cas la contrainte principale est la contrainte de pression de service minimum.

8.5. Systèmes de distribution ramifiés

La particularité des systèmes ramifiés est que le débit est connu pour tous les assemblages. Il ne dépend pas du choix du diamètre comme pour les systèmes maillés.

Un modèle de base pour un système ramifié est celui avec une seule source et plusieurs nœuds de fin, ne comportant qu'un seul état de service et aucune station de pompage.

Les données suivantes sont fournies au modèle de base :

- Le débit de conception Q pour chaque assemblage.
- La longueur l de chaque assemblage.
- Le coût C pour tout diamètre en chaque assemblage par mètre linéaire.
- Les surélévations de tous les nœuds.

D'après l'équation (V.8) on a :

$$\sum S_j L_j \leq h_s - H_m + Z_s - Z_n \quad (V.13)$$

L'équation (V.13) est établie pour tous les nœuds critiques.

$$\sum L_j \leq l_i$$

La fonction objet est :

$$C_T = \sum_j C_j L_j \rightarrow \min \quad (V.14)$$

Les équations (V.13) et (V.14) représentent le modèle d'optimisation. Elles sont linéaires, les variables sont les longueurs des sections, qui représentent la longueur d'un diamètre dans un assemblage. S_j et C_j sont des constantes.

Dans d'autres cas, seuls les nœuds de demande sont donnés, et de là plusieurs possibilités se

présentent afin de relier les nœuds aux sources. Dans un premier temps la solution la plus économique est retenue. Ensuite il faut penser au réseau, qui relie tous les nœuds à la source avec une longueur totale minimale. Le problème est donc de trouver l'arbre minimal utilisant l'algorithme de l'arbre minimal ou bien l'algorithme du chemin le plus court.

8.6. Systèmes de distribution maillés

La différence entre le réseau maillé et le réseau ramifié est que la distribution du débit dans le réseau maillé n'est pas connue au début de la conception. Elle dépend du choix du diamètre. Elle est donc supposée connue dans un premier temps.

Avec la supposition que la distribution du débit soit connue, le modèle de conception du réseau maillé est fort identique à celui du réseau ramifié. Il faut toute fois ajouter la contrainte sur la charge dans la maille (nulle) [Lahiouel Y, 2006].

$$\sum_j S_j L_j = 0 \quad (V.15)$$

Le modèle de conception des systèmes de distribution d'eau consiste en :

- La fonction objet selon l'équation (V.14)
- La condition de pression minimale selon l'équation (V.13) établie en tous les nœuds critiques
- La condition de la maille, équation (V.15), établie pour toutes les mailles
- La condition de la longueur, établie pour tous les assemblages.

Le modèle est un modèle d'optimisation linéaire, dont les variables sont les longueurs des sections L_j .

9. Etapes du traitement d'un problème d'optimisation linéaire

La programmation linéaire a donc pour objet de résoudre le problème d'optimisation qui consiste à optimiser un fonctionnel linéaire (la fonction économique) dans le domaine ainsi défini .

Les phases du traitement d'un problème de programmation linéaire sont :

- La mise en équation
- La résolution numérique
- L'interprétation économique et discussion des résultats.

G. B. DANIZIG, a mis au point il y a une trentaine d'années, un processus de calcul un algorithme connu sous le nom de méthode du simplexe. Cette méthode est la plus utilisée pour la résolution des

programmes linéaires.

Elle donne alors le moyen de reconnaître si cette solution est optimale et si elle ne l'est pas, de trouver une autre solution pour laquelle la fonction économique sera améliorée.

10. Description de la méthode de simplexe

10.1. Définition de la méthode

L'algorithme du simplexe est une des méthodes les plus communément utilisée pour résoudre les problèmes de programmation linéaire. Cette méthode a été conçue en 1947 par George Dantzig. Par la suite, elle a été sujette à de nombreux travaux de recherche qui ont aboutis sur plusieurs améliorations en terme de performance et de stabilité.

Il existe deux versions principales du simplexe. La première méthode dite standard ou l'algorithme est appliqué sur une version non modifiée du problème.

Cette méthode est aussi appelée "full tableau" (tableau complet). La seconde méthode est la méthode révisée. Cette dernière utilise une décomposition du problème de base en sous-matrices. Cette modélisation du problème, à l'aide de quelques astuces, permet de réduire les calculs à effectuer pour les problèmes ayant une faible densité de coefficients non nul.

Dans un premier temps, nous verrons ce qu'est un problème de programmation linéaire. Les bases étant posées, nous étudierons l'algorithme du simplexe en commençant par sa représentation géométrique. Cette dernière permet d'illustrer le fonctionnement de l'algorithme. La méthode standard sera alors décrite et servira à expliquer les concepts fondamentaux du simplexe. Finalement, nous verrons quelles sont les particularités de l'algorithme du simplexe révisé [Xavier M, 2011].

10.2. Propriétés de la méthode de simplexe

- Zone de solution du problème linéaire toujours convexe.
- une surface est convexe si elle est située toute entière du même coté d'un plan tangent.
- S'il existe une seule solution optimale au problème linéaire, elle est obligatoirement localisée sur un sommet de la zone de solution.
- S'il existe de multiples solutions optimales, au moins deux d'entre elles doivent être localisées sur des sommets adjacents.
- Le nombre de sommets de la zone de solution est fini.

- Si la solution réalisable localisée à un sommet donné n'a pas de voisin adjacent dont la solution est supérieure, ce sommet est la solution optimale.

10.3. L'algorithme de simplexe

1. Déterminer une solution de base réalisable.
2. Vérifier si la solution actuelle est optimale.
3. Déterminer la variable hors base qui va devenir variable de base.
4. Déterminer la variable de base qui sortira de la solution.
5. Effectuer les opérations linéaires (pivots) selon la technique de Gauss-Jordan [Bocchieri S,2003].

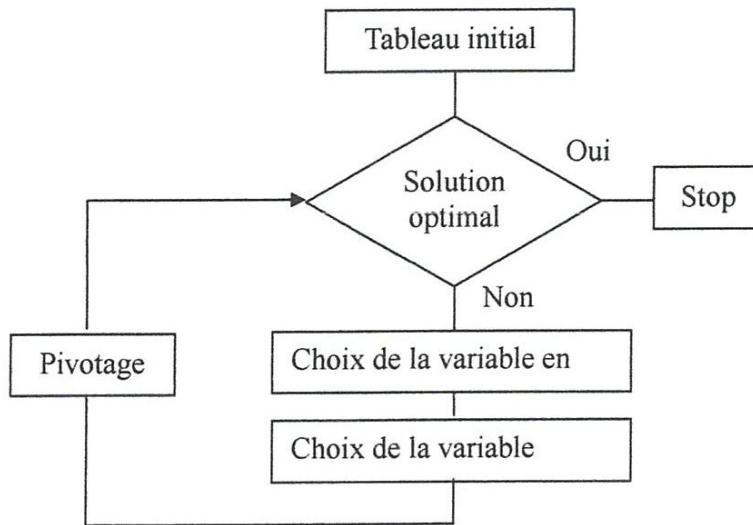


Figure V.1: Organigramme de l'algorithme de simplexe [Nicod J-M, 2008].

Le problème est posé comme suit :

Soit une fonction objet :

$$Z = (C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n) \rightarrow \min \quad (V. 16)$$

Sujette à des contraintes :

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m \end{cases} \quad (V.17)$$

En introduisant les variables d'écart dans les contraintes, elles deviendront :

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + Z_1 = b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n + Z_2 = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n + Z_m = b_m \end{cases} \quad (V.18)$$

En introduisant ces variables d'écart on modifie les contraintes, la fonction objet sera elle aussi modifiée.

La fonction objet devient :

$$Z = (C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_m) \rightarrow \min \quad (V.19)$$

On peut écrire le problème sous la forme d'un tableau ;

Tableau V.2 : le tableau de la méthode du simplexe.

	$f_1 = X_1$	$f_2 = X_2$	\dots	$f_n = X_n$	$f_{n+1} = Z_1$	\dots	$f_{n+m} = Z_m$	Y^0	P^0	
$f_1^0 = f_{n+1}$	a_{11}	a_{12}	\dots	a_{1n}	1	\dots	\dots	0	b_1	0
$f_2^0 = f_{n+2}$	a_{21}	a_{22}	\dots	a_{2n}	1	\dots	\dots	0	b_2	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$f_m^0 = f_{n+m}$	a_{m1}	a_{m2}	\dots	a_{mn}	1	\dots	\dots	0	b_m	0
P_j	C_1	C_2	\dots	C_n	0	\dots	\dots	0		
μ_j									μ_y	
$P_j + \mu_j$										

Où $f_1^0, f_2^0, \dots, f_m^0$ sont les solutions initiales.

P^0 : sont les coûts des variables $f_1^0, f_2^0, \dots, f_m^0$

P_j : sont les coûts des variables $f_1, f_2, \dots, f_n, f_{n+1}, \dots, f_{n+m}$ (qui sont en tête)

μ_j : est la somme des éléments des produits du premier élément avec le premier élément des deux vecteurs colonnes (x, p).

$$\mu_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} \cdot P_i \quad (V.20)$$

μ_j : se calcule pour évaluer le gain, c'est la somme des éléments des produits du premier élément avec le premier élément des deux vecteurs colonnes (y, p).

$$\mu_y = \sum_{i=1}^m y_i^0 P_i^0 \quad (V.21)$$

L'algorithme de simplexe qu'on applique au tableau est le suivant :

1. Examiner la ligne $p_j - \mu_j$ dans le tableau pour la solution faisable initiale.

Sélectionner le vecteur f_s pour lequel la valeur $p_s - \mu_s$ est la plus grande. Ce vecteur sera ajouté à la colonne des variables de base.

2. Pour la colonne f_s calculer y_j^0 / a_{js} , $j = 1, 2, \dots, m$ et choisir la valeur positive la plus petite de y_j^0 / a_{js} , ceci déterminera le vecteur f_k^0 qui sera enlevé de la base.

3. Réaliser les opérations qui suivent sur les lignes et colonnes pour remplacer f_k^0 et f_s

a. Diviser la ligne k , a_{kj} par a_{ks} pour produire « 1 » dans l'élément a_{ks} ;

b. Obtenir des « 0 » dans le reste des éléments a_{is} en multipliant la nouvelle ligne k par a_{is} ($i \neq k$) et en la retranchant de la ligne « i ».

Appliquer cela à toutes les autres lignes que la ligne k .

4. Calculer μ_j, μ_y , en utilisant les équations relatives et $P_j - \mu_j$ pour chaque colonne.

Si toutes les quantités $P_j - \mu_j$ sont ≤ 0 , l'optimum a été trouvé. Autrement choisir la plus grande valeur de $P_j - \mu_j$ pour de terminer le nouveau vecteur f_s et retourner à l'étape 2.

C'est une méthode itérative commençant par une solution initiale, qu'on essaye d'améliorer. Les calculs s'effectuent donc d'une manière systématique en utilisant les tableaux simplexes donnant les coefficients des équations et les valeurs successives de variables non nulles et de la fonction

économique.

Des fois les contraintes se présentent sous la forme :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j \leq b_i \quad (V.22)$$

ou comme

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j + z_i = b_i \quad (V.23)$$

Dans ce cas on n'obtient pas de solution faisable de base initiale par l'écriture du problème sous la forme standard. Afin de surpasser ce problème, on introduit des variables artificielles puis on exploite le mécanisme de l'algorithme de la méthode du simplexe.

L'approche consiste à écrire les contraintes sous la forme :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j \geq b_i$$

Comme

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j - z_i + r_i = b_i \quad (V.24)$$

Par nécessité on ajoute une variable artificielle « r_i » qui est toujours nulle et retranche une variable d'écart « z_i » pour les égalités supérieures, et les contraintes de la forme :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j = b_i$$

Comme

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j + r_i = b_i \quad (V.25)$$

On ajoute une variable artificielle. Si on a un problème on fait comme ci-dessus où les « r_i » sont des variables artificielles. On peut maintenant utiliser la procédure normale de la méthode du simplexe, toutefois pour que la solution obtenue soit valide toutes les « r_i » doivent être égales à « 0 » dans le tableau final.

Pour s'assurer que « r_i » ne seront pas dans la solution de base optimale, on leur associe un coût fictif arbitrairement grand, lorsqu'on minimise la fonction. Ainsi les variables artificielles seront éliminées par le simple jeu de l'algorithme. A chaque fois que l'une d'entre elles aura été chassée on pourra l'éliminer du tableau de calcul.

De nos jours encore, la méthode du simplexe reste, semble-t-il, la meilleure méthode de résolution des programmes linéaires. Plus longtemps encore, probablement, la programmation linéaire restera l'outil de base de ce nouveau métier, qu'on appellera, faute de mieux, « optimiseur ».

- Les calculs que nous pouvons développer ne présentent aucune difficulté particulière. Ils sont cependant longs et fastidieux lorsque le nombre d'équations et de variables devient important. Comme ils sont répétitifs, ils se prêtent particulièrement bien, par contre, au traitement par ordinateur en utilisant un programme.

C'est pourquoi la méthode du simplexe est depuis plusieurs années « programmée » sur ordinateur. Grâce à ces « programmes machines » la résolution d'un problème de programmation linéaire est pratiquement réduite à la mise en équation et à l'obtention de la matrice des contraintes et du second membre.

Ces données sont introduites dans l'ordinateur suivant un code préétabli. A partir de ce moment, la résolution du problème devient entièrement automatique ; l'ordinateur poursuit ses itérations jusqu'à ce que l'optimum de la fonction économique soit atteint.

La solution optimale et les coûts marginaux des variables nulles à l'optimum sont alors imprimés directement.

Il faut ensuite interpréter les résultats et analyser la structure des coûts marginaux.

L'intérêt essentiel de la programmation linéaire est précisément de permettre cette analyse [Fisli H, 2002].

Chapitre VI

Résultats et validation

1. Validation de la configuration du réseau :

Dans ce travail on veut valider une des deux étapes de l'optimisation de la conception des réseaux, l'optimisation de la configuration par minimisation de la longueur totale. Le cas pris comme exemple est le réseau avec une seule source et 6 nœuds de connexion, connu sous le nom de réseau à deux mailles.

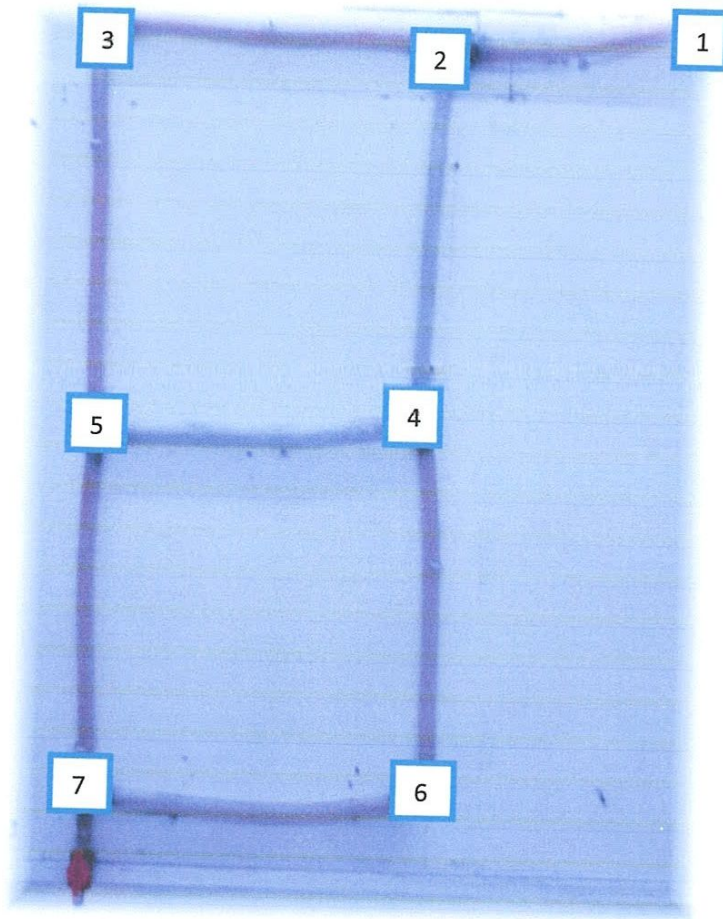


Figure VI.1 : un réseau de distribution en eau à deux mailles

1.1.Objectif :

L'objectif de ce travail est d'appliquer le principe de l'algorithme de la longueur minimale pour l'optimisation de la longueur totale d'un réseau de distribution en eau à deux mailles pour valider les résultats obtenus par la simulation. Il s'agit de voir l'évolution de l'écoulement du fluide dans le réseau afin de confirmer ou non le résultat de la conception. Ceci étant possible par une observation du sens de l'écoulement et l'arrivée de l'eau dans les conduites en utilisant un indice colorant.

1.2.Description de la manipulation

On a réalisé un montage descriptif d'un réseau de distribution de l'eau à deux mailles considérant qu'il y a un débit à transporter d'un mélange d'eau de volume de 10 l et d'encre tampon (sans huile) de couleur rouge de volume de 0,024 l, qui s'écoule à travers des conduites ayant le même diamètre.

1.3.Lieu et date de la manipulation :

Lieu : laboratoire de mécanique des fluides du département de Génie des Procédés de l'Université 08 mai 1945 de Guelma.

Date : le 15 mai 2013.

1.4.Composition du montage :

Comme le montre la figure ci-dessus (Figure 1), le montage de la manipulation, un réseau de distribution en eau à deux mailles constitué de :

- Une source : un petit réservoir.
- Sept nœuds de demande.
- Huit conduites transparentes en plastique de longueurs et de diamètres identiques (longueurs = 45 cm ; diamètre intérieur = 2 cm ; diamètre extérieur = 2,6 cm).
- Deux coudes transparents en verre.
- Quatre pièces en forme de T.
- Une vanne.

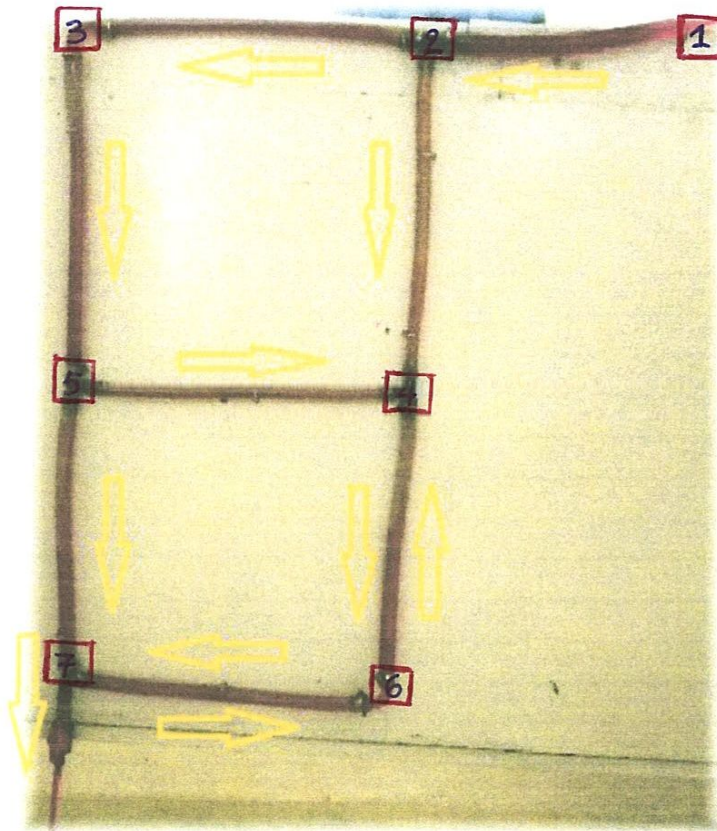


Figure VI.2 : Le sens de la circulation du mélange (eau + encre) dans le réseau à deux mailles

1.5. Résultats

On a observé le sens de l'écoulement, il s'avère ne pas être en concordance avec l'ordre de pose des conduites. Lors de la conception, les conduites ont été formées dans l'ordre suivant : (1, 2), (2,4)... Alors que pour l'expérience le fluide circule dans un sens tout autre soit : (1, 2)..., comme le permet de voir la couleur utilisée (Figure 2). On a pu voir que le débit du fluide était plus important sur la conduite (2,3) que la conduite (2,4). Aussi on a constaté que l'écoulement s'est fait dans le sens inverse pour la conduite (4,6), c'est-à-dire que l'arrivée de l'eau s'est faite du nœud 6 vers le nœud 4. Après un laps de temps l'écoulement s'est encore fait du nœud 4 vers le nœud 6. Ceci a donc permis de voir et de ressentir la nécessité du maillage dans un réseau afin de garantir l'approvisionnement en fluide de tous les nœuds même en cas de rupture ou de casse de conduites.

Dans le cas présent, une rupture de la conduite (4,5) ou /et (2,4) n'affecterait pas trop l'alimentation des nœuds de demande 4 et 6.

2. Analyse des réseaux

2.1.Objectif

On a signalé comme but dans cette partie la mesure du débit et de la pression dans chaque point de demande pour comprendre et analyser.

2.2.Description de la manipulation

Dans cette expérience, on a mesuré le débit et la différence de pression (pertes de charge) à chaque nœud (source+nœuds de demande) d'un réseau de distribution en eau à deux mailles.

2.3.Lieu et date de la manipulation

Lieu : laboratoire de mécanique des fluides du département de Génie des Procédés de l'Université 08 mai 1945 de Guelma.

Date : le 16 mai 2013.

2.4.Composition du montage

Comme la figure ci-dessous a montré le montage de la manipulation de l'analyse d'un réseau de distribution en eau à deux mailles constitué de :

1. Une source : le robinet de laboratoire de la mécanique des fluides.
 - Septe nœuds de demandes.
 - Huit conduites transparentes en plastique de longueurs et de diamètres identiques (longueurs = 45 cm ; diamètre intérieur = 2 cm).
 - Deux coudes transparents en verre.
 - Quatre pièces ont la forme de la lettre (T).
 - Une vanne.
2. Un débitmètre (Gunt-Hambourg).
3. Un manomètre à mercure.

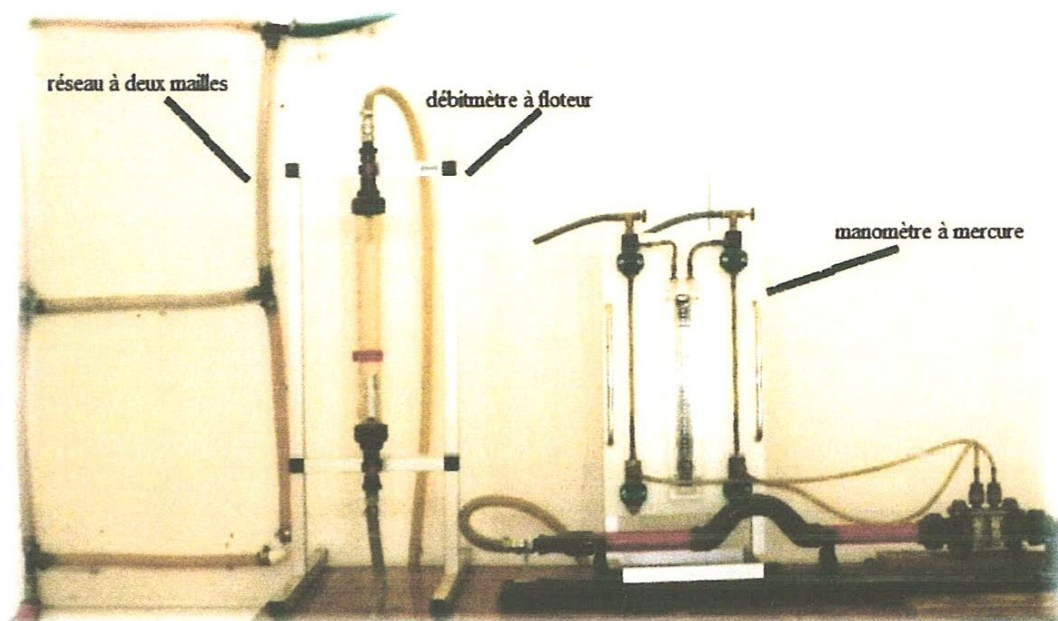


Figure VI.3 : le montage de l'analyse du réseau à deux mailles.

Tableau VI.1: Résultats expérimentaux de l'analyse de réseau.

Nœuds	Débit (l/h)	Différence de pression (mbar)
1	60	54
02	22	11
03	20	8
04	18	8
05	20	10
06	18	8
07	45	12

2.5.Résultats

Les résultats ne sont pas très fiables et ne permettent pas une bonne analyse. On remarque une fluctuation dans les valeurs des débits et pressions, ce qui ne va pas avec la théorie ou encore la simulation. Mais ceci peut être expliqué par la présence malencontreuse de singularités et de fuites.

Le réseau est supposé théoriquement sans singularités, mais à cause des difficultés qu'on a trouvé lors de la construction du montage, on a utilisé deux coudes, quatre pièces en forme de **T**, pour pouvoir lier trois conduites ensemble, et une vanne dans le dernier nœud, donnant ainsi lieu à des rétrécissements et élargissements.

On a aussi remarqué une fuite au niveau du nœud (6) à laquelle on n'a pas pu remédier. Ceci a causé des chutes de pression.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Les réseaux de distribution représentent une des plus grandes infrastructures dans une société industrielle. Les réseaux physiques tels que les réseaux de conduites d'eau et de gaz, d'assainissement, électriques, câbles téléphoniques, sont présents à travers le monde et constituent les atouts les plus importants et les plus chers.

Dans la conception d'un réseau de conduites, le processus d'optimisation complet consiste à trouver la meilleure disposition ou configuration géométrique et la meilleure combinaison, les dimensions des conduites pour le système entier, soumis à une série de contraintes physiques et techniques. Généralement, le coût d'investissement et d'exploitation du réseau sont à minimiser, bien que l'utilisation de la fiabilité comme un objectif et comme une contrainte soit simultanément considérée.

La méthode de recherche itérative peut être décomposée en un processus d'optimisation. Le premier processus est l'itération principale dans laquelle la configuration optimale du réseau à moindre coût est recherchée. Ensuite, dans le deuxième processus itératif une série de diamètres optimums est sélectionnée, pour les conduites identifiées lors de la configuration spécifiée dans l'étape précédente, en se basant aussi sur le coût comme critère de performance.

L'optimisation nécessite la linéarisation des équations du modèle par l'estimation de la distribution du débit dans les conduites du réseau. Par contre une génération automatique de l'arbre à l'intérieur du réseau et une détermination conséquente de la distribution du débit améliore considérablement la méthode.

L'objectif principal du présent travail était de développer une méthodologie qui puisse permettre de concevoir des réseaux maillés et de longueur minimale, dans un souci à la fois d'économie sur le coût total, et de fiabilité du réseau et disponibilité du produit desservi, avec la minimisation du coût des longueurs par l'optimisation des diamètres. La procédure d'optimisation qui pourrait être complétée par une bonne prise de décision, ceci devrait être mieux adapté et devrait garantir de meilleurs résultats.

De plus, et contrairement aux procédures existantes, l'algorithme qu'on utilise dans l'optimisation de la configuration ne nécessite pas de graphe prédéfini et élabore

la configuration à partir des simples données que sont les coordonnées et les débits (demandes ou disponibilités) des nœuds et des sources. La méthode est alors faite d'une manière fondamentale et répond aux exigences relatives à la conception de réseaux maillés fiables. La redondance était un objectif et une contrainte dans notre algorithme de minimisation de la longueur totale du réseau, afin d'en assurer la fiabilité et de garantir l'approvisionnement en fluide pour tous les points de consommation même en cas de rupture éventuelle de conduite.

Quand la disposition et la connectivité sont fixées, alors pour une série donnée de valeurs des demandes, le débit dans toute branche, peut être déterminé, on passe alors à la deuxième étape de conception, qui est la minimisation du coût total du système en trouvant la meilleure combinaison possible des diamètres. Dans ce cas les variables de décision sont les longueurs des diamètres.

La sélection des diamètres optimums des conduites (à moindre coût) peut ainsi être obtenue en utilisant l'approche de programmation linéaire. La programmation linéaire ayant comme application l'étude et la résolution des programmes linéaires, c'est-à-dire des problèmes d'optimisation dans lesquels la fonction objective aussi bien que les contraintes sont exprimés de manière linéaire, et pour la résolution de ce type de problèmes, on a utilisé l'approche du simplexe qui est caractérisée par la simplicité et la précision.

Les résultats obtenus par la méthode utilisée dans ce mémoire, comparés à ceux obtenus par l'expérience, sont très satisfaisants. L'algorithme de la longueur minimale, garantit la connexion de chaque nœud à, au moins deux conduites et autorise le libre choix à l'utilisateur du nombre de connexions possibles pour les nœuds afin de faciliter la construction de chemins multiples. L'expérience a confirmée l'avantage du maillage pour les réseaux d'alimentation, ce qui permet d'avoir une garantie de dessert du produit véhiculé à tous les nœuds.

Annexes

Annexe A

Réseaux hydrauliques

A. Calcul des conduites en série et en parallèle

- Conduites en série

Lorsque plusieurs conduites sont placées en série, le débit qui les traverse est le même et la perte totale de charge est la somme de toutes les pertes de charge figure 1 :

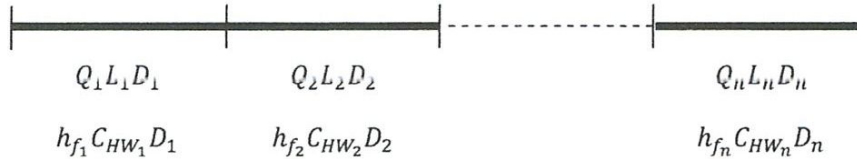


Figure 1 : conduites en série

$$h_{f_{total}} = h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3} + \dots + h_{f_n} \quad (1)$$

Le débit ne varie pas le long de la série : $Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q$.

Si on utilise la formule de Hazen-Williams pour estimer la perte de charge :

$$h_f = L \left(\frac{3,59}{C_{HW}} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} \quad (2)$$

On peut poser :

$$K = L \left(\frac{3,59}{C_{HW}} \right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D^{4,87}} \quad (3)$$

On remplace l'équation 3 dans 2, puis l'équation 2 dans l'équation 1 pour chacune des conduites, on trouve :

$$k_{eq} Q_{eq}^{1,852} = k_1 Q_1^{1,852} + \dots + k_n Q_n^{1,852} \quad (4)$$

Comme les débits sont égaux, l'équation 4 devient :

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^n K_i \quad (5)$$

En posant :

$$K_{eq} = L_{eq} \left(\frac{3,59}{(C_{HW})_{eq}} \right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D_{eq}^{4,87}} \quad (6)$$

On écrit alors :

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (7)$$

- Conduites en parallèle

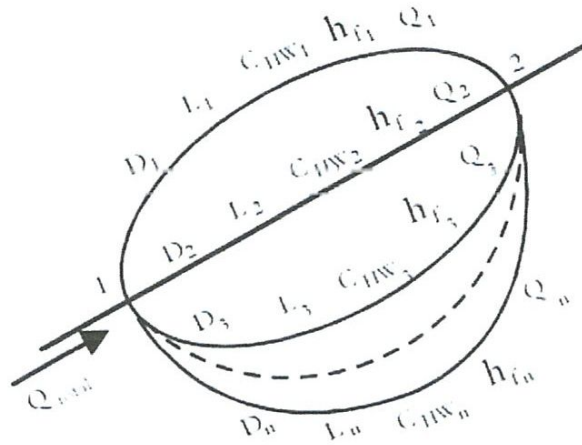


Figure 02-conduites en parallèle

La conduite équivalente devra donc véhiculer un débit égal au débit total sous une perte de charge égale à la perte de charge unique. Pour une conduite *i* quelconque on peut écrire, avec les mêmes notations que pour les conduites en série :

$$Q_i = \left(\frac{h_{fi}}{k_i} \right)^{1/1,852} \quad (8)$$

En utilisant l'équation (8) pour chacune des conduites dans (7) et en considérant que toutes les pertes de charge sont égales, on trouve :

$$\frac{1}{k_{eq}} = \left[\left(\frac{1}{k_1} \right)^{1/1,852} + \left(\frac{1}{k_2} \right)^{1/1,852} + \dots + \left(\frac{1}{k_n} \right)^{1/1,852} \right]^{1,852} \quad (9)$$

Ou encore :

$$k_{eq} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_i} \right)^{1/1,852} \right]^{1,852}} \quad (10)$$

De la même manière que pour les conduites en série, on pose :

$$k_{eq} = L_{eq} \left(\frac{3,59}{(C_{HW})_{eq}} \right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D_{eq}^{4,87}} \quad (11)$$

Annexe B

Les écoulements

A. Interprétation physique du nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est le rapport des ordres de grandeur de deux termes de l'équation de Navier-Stokes, que l'on peut interpréter comme deux modes de transfert de quantité de mouvement.

$$Re = \frac{\text{inertie}}{\text{viscosité}} = \frac{\text{transfert convectif}}{\text{transfert diffusif}}$$

B. Epaisseur de la couche limite ($Re \gg 1$)

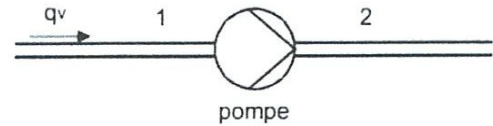
$$\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}}$$

C. Écoulement avec échange d'énergie

Lorsque le fluide traverse une machine hydraulique, il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail ΔW pendant une durée Δt . La puissance P échangée est $P = \frac{\Delta w}{\Delta t}$

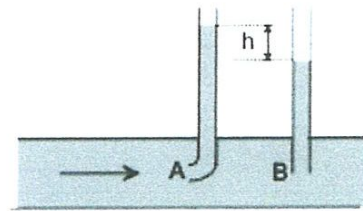
Unités : P en watt (W), W en joule (J), t en seconde (s).

- $P > 0$ si l'énergie est reçue par le fluide, (ex. : pompe)
- $P < 0$ si l'énergie est fournie par le fluide (ex. : turbine)



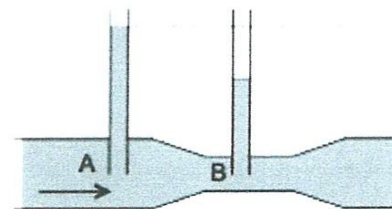
D. Théorème de Bernoulli

$$p_B + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_A \quad \text{soit} \quad \frac{1}{2}\rho v^2 = \rho gh$$



E. Phénomène de Venturi

$$p_A - p_B = \frac{1}{2}\rho \left(\frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right) q^2 = kq^2$$

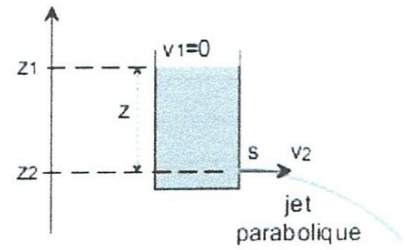


F. Théorème de Torricelli : Ecoulement d'un liquide contenu dans un réservoir

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g z_1 + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g z_2 + p_2$$

Or $p_1 = p_2$: pression atmosphérique

Et $v_1 \ll v_2$ d'où $v_2 = \sqrt{2gz}$



Annexe C

Pertes de charges

A. Définitions

- Pressions statique : $p_{st} = p$
- Pressions dynamique : $p_{dyn} = \rho \frac{w^2}{2}$
- Pression totale : $p_t \triangleq p_{st} + p_{dyn} \triangleq p + \rho \frac{w^2}{2}$
- Pression de charge : $p_{ch} \triangleq p_{st} + p_{dyn} + \rho g z \triangleq p + \rho \frac{w^2}{2} + \rho g z$

$$\text{Si } \rho g \Delta z = 0 \Rightarrow \Delta p_t = \Delta p_{ch}$$

B. Terminologie

w_f (J/kg ou m^2/s^2): Perte d'énergie massique due aux frottements à la paroi

Δp_f (Pa) : Diminution de pression de charge par frottements $p_{ch,1} - p_{ch,2}$

C. Coefficients de Hazen-Williams pour différents matériaux de conduite

Matériau	C_{HW}
PVC	150
Amiante-ciment	140
Béton lissé	130
Acier soudé, neuf	120-140
Fonte neuve	130-140
Fonte âgée (10 ans)	110
Fonte âgée (20 ans)	100
Fonte âgée (30 ans)	85
Fonte âgée (40 ans)	75
Fonte âgée (50 ans)	70

Tableau1- Valeurs du coefficient C_{HW} adopté de Brière (1997)

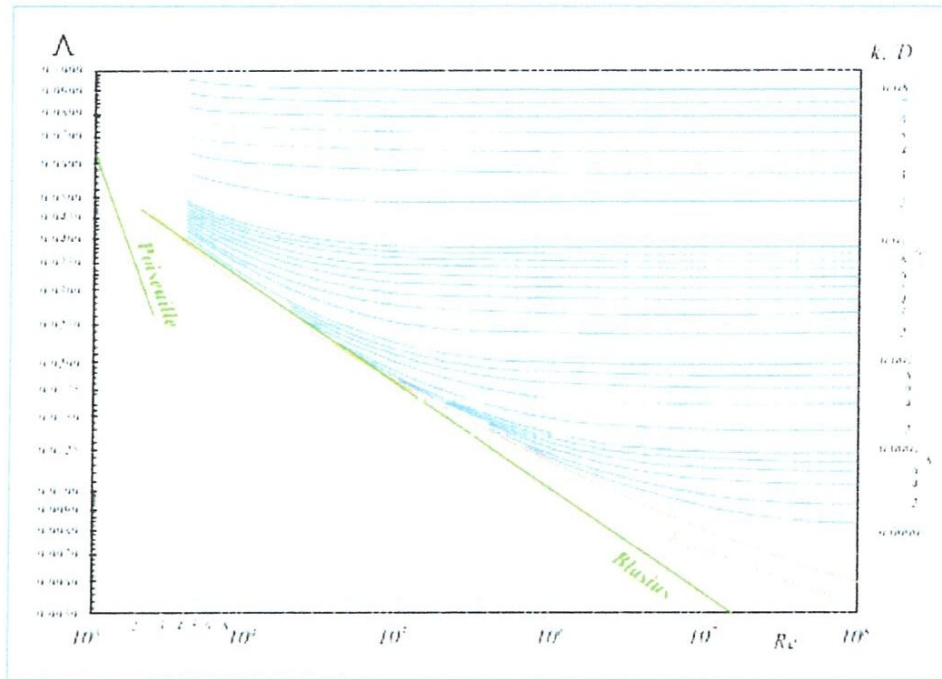
D. La résistance hydraulique

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^2}$$

E. Loi de Poiseuille

$$\Delta P = RD \Rightarrow \Delta P = \frac{8\eta L}{\pi r^2} D$$

F. Diagramme de Moody : coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative

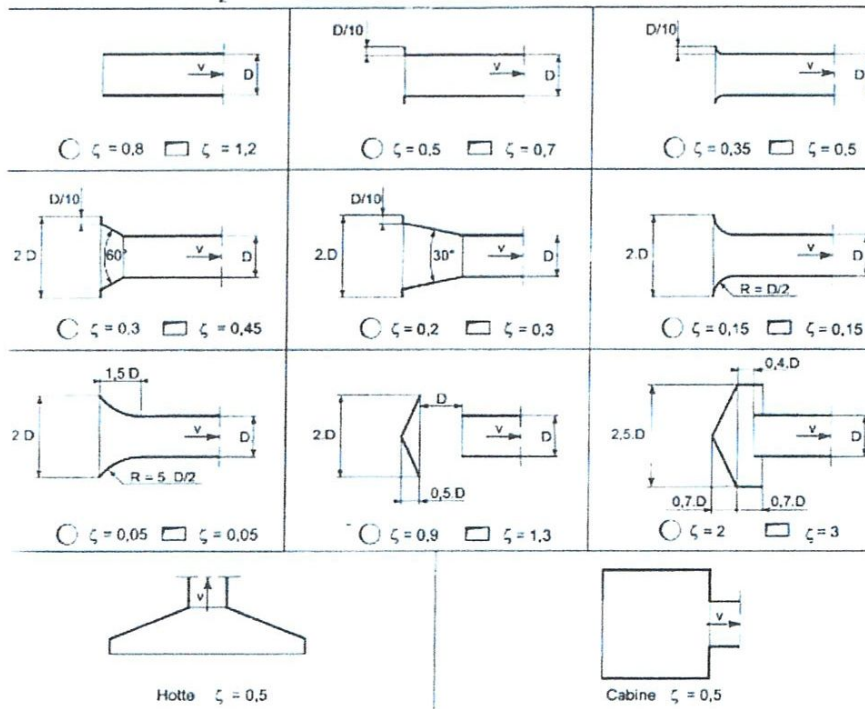


G. Coefficients de perte de charges singières

**COEFFICIENTS DE PERTE DE CHARGE SINGULIERE
ζ ENTREES D'UN FLUX D'AIR**

$$J_{\text{sing}} = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \text{ [Pa]}$$

La flèche indique la vitesse sur laquelle s'applique le ζ



Annexe d

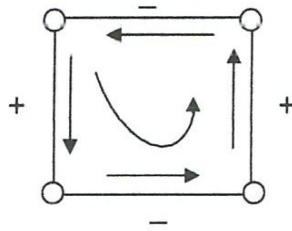
Analyse des réseaux

A. Méthode de Hardy Cross

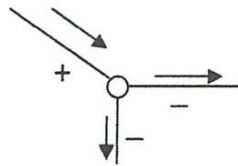
- convention de signe pour le terme (ϵ) (terme signé)

$(\epsilon)_{i,j}$ relatifs à la $i^{\text{ème}}$ maille et à la $j^{\text{ème}}$ conduite.

Positif lorsque le débit est dans le sens de parcours de la maille.



Positif lorsque le débit arrive au nœud.



- Correction des la valeur ΔQ (Méthode de Hardy Cross appliquée aux mailles)

$$Q_M = Q_{0,M} + \epsilon_M \Delta Q$$

- Correction des la valeur ΔH (Méthode de Hardy Cross appliquée aux noeuds)

$$\Delta H = \Delta H_0 + \epsilon_N \Delta H$$

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographique

- Achi F, Lahiouel Y., *modélisation d'un réseau de distribution des eaux*, Mémoire de Master, Université 08 Mais 1945 Guelma, Juin 2010
- Afshar M.H., *Evaluation of selection algorithms for simultaneous Layout and Pipe Size Optimization of Water Distribution Networks*, Scientia Iranica, Vol. 14, No1, pp23-32, Sharif University of technology, February 2007
- Alperovits, Shamir, *design of water distribution systems*, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, VOL. 13. NO. 6, December 1977
- Ameeuw Fet al. Mme De Blicck S, *7 défis pour découvrir la théorie des graphes*, Institut Saint-Laurent Marche-en-Famenne. Congrès Dédra-Math-isons, UCL-FSA – 2010
- Arsene C.T.C, Bargiela A, AL-Dabass D, *Modeling And Simulation of Water Systems Based On Loop Equations*, I.J. of Simulation Vol. 5 No 1-2, 2005
- Bocchieri S, *Etude d'optimisation selon la méthode du simplexe*, Promotion 2003, version 1
- Bogdan C, *Introductions à la théorie des graphes*, cours, Structures de Données et Algorithmes (INF101), C201-6
- Brière F G, *Distribution et collecte des eaux*, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 44, M-65, ISBN92-5-202666-5, Rome, 1996
- Bryan W K, *analysis of fluid transients in large distribution networks*, Thèse de Doctorat, the University of British Columbia, Septembre 1984
- Carbonnet J., Roques M., *Fichier : Poly-mecaflu.doc*, Terminale STL Physique de Laboratoire et Procédés Industriels mécanique des fluides. Académie de Nancy-Metz
- Christophe A, *Notes de cours Mécanique des fluides ; Une introduction a l'hydraulique pour les ingénieurs civils*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Version 7.6 du 21, Juin 2012.
- Cohen G, *convexité et optimisation*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et INRIA, Edition 2000 correction 2006
- Dejan B, *An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks*, Applied Energy 86,1290–1300, November 2008.

- Didier M, *Eléments de Théorie des Graphes*, institut national polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure d'électricité et de Mécanique, Version provisoire du 3 mai 2003
- Fisli H. Lahiouel Y, *optimisation de la conception d'un réseau d'alimentation en eau potable*, Mémoire d'ingénieur, Université 08 Mais 1945 Guelma, juin 2002.
- Frédéric V, *Cours Algorithmique avancée*, IUP 2, 24 avril 2002
- Giustolisi O. , Mastroianni M., *Optimal-Robust Design of Water Distribution Networks under Uncertain Scenario* , Technical University of Bari, Engineering Faculty of Taranto Italy, 2006
- Grégoire W., Vincent L., *Mécanique des Fluides et Transferts I: Partie sur les écoulements turbulents*, MECA1321, Septembre 2009
- Ioan. S, *Design of optimal water distribution systems*, International journal of energy, Issue 4, Vol. 3, 2009
- Jean B., Publication No. 77, *physique: mécanique des Fluides PC-PSI* , water resources research center, University of Florida Gainesville, university of Florida, November 1983
- Kavila A et al., the Onset of Turbulence in Pipe Flow, Science 333, n°6039, p.192 (2011)
- Labye Y , Olson M .A, Galand A, Tsiourtis N, Conception et optimisation des réseaux d'irrigation, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 44, M-65, ISBN92-5-202666-5, Rome, 1996
- Lahiouel R, Lahiouel Y, AZari Z, *Modélisation de l'écoulement et conception à moindre cout des réseaux de distribution d'eau*, 20^{ième} Congrès Français de Mécanique Besançon, 29 août au 2 septembre 2011
- Lahiouel Y. *Modélisation d'un réseau de distribution des eaux*, Thèse de Doctorat d'état, université Badji Mokhtar, Annaba, 2006
- Lindell E. Ormsbee, *The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age*, Kentucky Water Resources Research Institute, University of Kentucky, 40506-0107, 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, 2006
- Montcouquiol G. (IUT Orsay), *Graphes et théorie des jeux Stratégie gagnante*, Théorie des graphes, 2006-2007

- Nicod J-M, *cours master 2 Informatique, Université de Franche-Comté , UFR des Sciences et Techniques , septembre 2008*
- Pelle S, *la théorie des graphes, Cours Ingénieur 1ère année, École Nationale des Sciences Géographiques, Institut Géographique National 6 et 8 avenue Blaise Pascal 77455 Marne la Vallée Cedex 2, 2005.*
- Rieutord E, *Calcul des réseaux hydraulique en régime permanent et fluide incompressible, INSA de Lyon, 1985*
- Saad B, *Hydraulique et hydrologie. 2e édition, Presses de l'université de Québec, ISBN 978-2-7605-1521-5-D1521N, 2007*
- Saad B, *Hydraulique et hydrologie. 2e édition, Presses de l'université de Québec, ISBN 978-2-7605-1521-5-D1521N, 2007*
- Sau et Molle C, *Cours Mathématiques pour l'Optimisation, LP SIL*
- Vyškov , *Hydraulic Analysis of Water Supply Network, Czech Technical University, 1998*
- Xavier M, Chopard B (CUI, UNIGE), Albuquerque P, *Etude et impémentation de l'algorithme du simplexe standard sur GPUs, la Faculté de sciences de l'Université de Genève, Genève, le 4 février 2011*

Documents et Sites web consultés

- *Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé, document technique, direction des économies d'énergie Canada.*

<http://www.hach.ulg.ac.be> ArGEnCo – MS²F - Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques (HACH)

www.almohandiss.com

www.rcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm

<http://www.mecaflux.com/document/pertes%2520de%2520charge> 1M3ecaflux : Aide aux calculs de mécanique des fluides

<http://www.le-plus-court-chemin.htm>

<http://www.dijkstraPrinciple.htm>

Résumé. La fiabilité d'un réseau de distribution du fluide (gaz/liquide) est largement demandée dans divers secteurs, comme l'urbanisme, la société industrielle et le transport du pétrole. Plusieurs études ont été menées pour l'optimisation du coût de réseau de distribution et de le rendre plus fiable et plus performant. Notre objectif consiste à trouver la meilleure disposition ou configuration et la meilleure combinaison des dimensions des conduites pour le système entier, soumis à une série de contraintes physiques et technologiques. Un traitement mathématique pour l'analyse et la conception d'un réseau (diamètre et la longueur de la conduite) de fluide est présenté. Le présent travail utilise l'algorithme de la longueur minimale pour l'objectif de concevoir des réseaux maillés de longueur minimale. La méthode du Simplexe a été choisie pour l'optimisation du choix du diamètre afin d'économiser le coût totale et d'assurer la fiabilité du réseau. La méthode a été testés sur un réseau d'eau à deux mailles, les résultats sont traités et discutés.

Mots clefs : *Algorithme de la longueur minimale, méthode de simplex, modélisation mathématique, optimisation, réseau de distribution de fluide.*

Abstract. The reliability of distribution in fluid (gas/liquid) transport systems is required in various areas such as urbanism, industrial society and transport of petroleum. Several studies make an effort to optimize the cost, reliability and performance of fluid distribution network. Our goal is to find the best network configuration and the appropriate combination of pipes for the whole system, under some physical and technological constraints. A mathematical treatment for the description of network behaviour (pipe size and loop length) is analyzed as a method to design fluid distribution network. The present study investigates the use of the minimum length algorithm for the purpose of optimum design of length network loop. The simplex method was chosen to optimize the choice of diameter pipes as a goal to ensure the reliability of the system and to reduce the total network cost. The method is tested in the water network of two loops and the results are treated and discussed.

Keywords: *Fluid distribution network, mathematical modeling, minimum length algorithm, optimization, simplex method.*

