

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie des Procédés

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MAGISTER

---

---

Estimation du coût optimal de la pose d'un réseau de  
transport d'un fluide

---

---

**Filière** : Génie des Procédés  
**Option** : Génie des Matériaux  
**Présenté par** : BEDDIAF Souad

### Devant le jury:

<b>Pr BENHAMZA M.E.H.</b>	Professeur	Université de Guelma	Président
<b>Dr LAHIOUEL Y.</b>	M.C.A.	Université de Guelma	Rapporteur
<b>Pr NEMAMCHA A.R.</b>	Professeur	Université de Guelma	Examineur
<b>Pr AFFOUNE A.M.</b>	Professeur	Université de Guelma	Examineur

**2013**

## Sommaire

ملخص

*Remerciements*

*Résumé*

*Abstract*

*Liste des tableaux*

*Liste des figures*

INTRODUCTION..... 1

*Chapitre 1 : Présentation générale d'un système d'alimentation en eau potable*

1.1. INTRODUCTION..... 3

1.2. HISTORIQUE DU TRANSPORT PAR CANALISATION ..... 3

1.3. PRESENTATION D'UN SYSTEME DE DISTRIBUTION (AEP) ..... 4

1.4. SRUCTURE DE RESEAU D'AEP ..... 9

1.5. PHENOMENES A L'ORIGINE DE L'EVOLUTION D'UNE CANALISATION..... 12

1.6. PROBLEME RENCONTRES DANS UN RESEAU D'A.E.P ..... 18

1.7. LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE ..... 20

1.8. STRATEGIE POUR AUGMENTER LE STOKAGE DE L'EAU ..... 22

*Chapitre 2 : Généralités sur les fluides et leurs caractéristiques*

2.1. INTRODUCTION..... 23

2.2. NOTION GENERALES SUR LA MECANIQUE DES FLUIDES ..... 23

2.3. ECOULEMENTS EN CHARGE..... 24

2.4. EQUATIONS DE PERTES DE CHARGE .....	28
2.5. PERTES DE CHARGE.....	30
2.6. PHENOMENES HYDRAULIQUES .....	33

*Chapitre 3 : Etude de fiabilité et estimation du coût optimal*

3.1. INTRODUCTION.....	37
3.2. ETUDE DE LA FIABILITE HUDRAULIQUE DES RESEAUX.....	37
3.3. ALGORITHMES GENETIQUES DANS LE DOMAINE D’AEP .....	39
3.4. LE SYSTEME D’INFORMATION GEOGRAPHIQUES (SIG).....	40
3.5. THEORIE DES GRAPHES ET TOPOLOGIE DES RESEAUX.....	41
3.6. OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT D’UN RESEAU .....	47
3.7. TYPE DE RESEAUX .....	51

*Chapitre 4 : Interfaçage graphique et Applications*

4.1. INTRODUCTION.....	53
4.2. DESCRIPTION DU PROGRAMME DE CONFIGURATION .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 53
4.3. DESCRIPTION DU PROGRAMME DES DIAMETRES DES CONDUITES.....	62
4.4. RESULTATS ET COMMENTAIRES .....	67

CONCLUSION .....	85
------------------	----

# Remerciements

*Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude avant tous à « الله » le tout puissant qui m'a donné le courage et la force pour mener à bien ce travail.*

*Je remercie tout particulièrement mon encadreur Madame Dr LAHJOUEL Y., pour son encadrement, les remarques et conseils qu'elle m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury, Pr. BENHAMZA M.E.H, Pr. AFFOUNE A. M, Pr. NEMAMEHA A.R qui m'ont fait le très Grand honneur de porter un jugement sur mon travail.*

*Je voudrai aussi remercier mes proches de m'avoir toujours soutenue. Merci à ma famille pour leur aide. En particulier merci à mes parents, à mes sœurs et frères surtout mon frère ABDELJALIL et sa femme, à mon mari pour sa patience sans oublier mes petites filles. Je tiens à remercier aussi mon amie SARA.*

*Ces remerciements ne seraient pas complets si je n'y associe pas toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.*

## RESUMIE

L'eau recouvre 70% de la superficie du globe, mais malheureusement 97 % de cette eau est salée et non potable et ne convient pas à l'irrigation. L'eau douce représente 3% de l'eau totale de notre planète. Dans ce faible pourcentage, les rivières et les lacs représentent 0,3%, alors que tout le reste est stocké dans les calottes polaires glacières.

L'eau est un bien essentiel à la vie et une ressource limitée faisant partie du grand système écologique dans lequel nous vivons et dont notre vie dépend. En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. Malgré son importance l'eau potable en Algérie est menacée dans sa qualité et dans sa quantité.

Les recherches menées actuellement dans le domaine des réseaux d'eau potable concernent essentiellement le vieillissement des réseaux, la réalisation de diagnostic et la construction de programme de maintenance / réhabilitation. Ces différents problèmes constituent, de nos jours, une préoccupation majeure pour les gestionnaires des réseaux d'A.E.P.

L'objectif de la présente étude est l'optimisation du coût de pose d'un réseau de transport de fluide, il s'agit de développer une méthodologie pour optimiser le choix des diamètres, la longueur totale d'un réseau de distribution d'eau potable pour réduire le coût de transport. L'optimisation proposée dans ce travail est essentiellement basée sur une procédure de calcul complétée par une interface graphique.

**Mots clés :** optimisation le choix des diamètres et la longueur totale d'un réseau de distribution de fluide, le coût de transport, interface graphique.

## ABSTRACT

Water covers 70% of the Earth's surface, but unfortunately 97% of this water is salty and undrinkable and is not suitable for irrigation. Freshwater represents 3% of the total water on our planet. In this small percentage, rivers and lakes are 0.3 %, while the rest is stored in the polar ice caps

Water is an essential commodity for life and limited resources are part of the great ecological system in which we live and which our life depends. In Algeria, the water is a resource more valuable. Despite the importance of drinking water in Algeria is threatened in its quality and quantity.

Current researches in the field of drinking water systems are mainly aging networks, making diagnosis and building maintenance program / rehabilitation. These problems are , nowadays , a major concern for managers of water supply systems

The objective of this study is to optimize the cost of installing a transmission fluid , it is to develop a methodology to optimize the choice of diameters , the total length of a network of distribution drinking water to reduce the cost of transport. The proposed optimization in this work is mainly based on a calculation procedure complemented by a graphical interface.

**Keywords:** optimize the choice of diameters, the total length of a network of distribution fluid, the cost of transport, graphical interface.

## ملخص

يغطي الماء 70% من سطح الكرة الأرضية لكن الماء المالح يمثل 97% وهو غير صالح لشرب أو السقي. بينما الماء الصالح لشرب لا يمثل سوى 3% من الكرة الأرضية ورغم ضعف نسبة ماء الشرب إلا أن ماء الوديان والأنهار يمثل 0,3% فقط أما الباقي فهو مخزن في القطبين الشمالي و الجنوبي.

الماء هو عنصر أساسي في الحياة و مورد محدود وهو أيضا جزء من النظام البيئي الذي نعيش فيه. في الجزائر، يعتبر الماء ذو قيمة كبيرة على الرغم من أهميته إلا انه مهدد في نوعيه وكميته.

الأبحاث الحالية في مجال شبكات مياه الشرب تتمثل في كيفية إعادة تأهيلها ومعالجة التسريبات وبناء برامج للصيانة . هذه المشاكل تعتبر في الوقت الحالي، مصدر قلق كبير بالنسبة للمسؤولين على حماية البيئة.

الهدف من هذه الدراسة هو تقدير التكلفة المثلى لانتقال السوائل، ووضع منهجية لتحسين اختيار الأقطار الخاصة بالأنابيب، وطول شبكة توزيع مياه الشرب، للحد من تكاليف النقل. ويستند أساسا على التقنية الحساب مكمّل بالواجهة الرسومية .

**الكلمات المفتاحية:** تحسين اختيار أقطار الأنابيب وطول شبكة التوزيع، تكاليف النقل، الواجهة الرسومية.

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Certains types de conduite selon le matériau les constituants.....	10
Tableau 1.2 : Cause des défaillances selon le matériau des conduites.....	14
Tableau 2.1: Exemple de singularités présentes dans un écoulement.....	32
Tableau 4.1 : Données du réseau avec des nœuds loin .....	67
Tableau 4.2 : Données du réseau avec des sources loin.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 72
Tableau 4.3 : Caractéristiques du réseau .....	75
Tableau 4.4 : Caractéristiques du réseau à deux mailles .....	80
Tableau 4.5 : Résultats de l'optimisation Complète .....	83



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Le processus de production et distribution de l'eau .....	4
Figure 1.2 : Exemple de courbe de volume d'un réservoir .....	8
Figure 1.3: Représentation schématique d'un réseau d'alimentation en eau potable .....	11
Figure 1.4 : Causes de l'affaiblissement de conduites d'eau potable.....	12
Figure 1.5: Conduite de diamètre 80 mm ayant subi des dépôts ferriques de corrosion interne.. .....	13
Figure 1.6 : Conduite de diamètre 80 mm ayant subi une corrosion externe.....	14
Figure 1.7 : Le bio film .....	17
Figure 1.8: Ruptures ou fuites apparentes .....	20
Figure 2.1: Evolution de la vitesse dans une conduite circulaire .....	25
Figure 2.2: Elagissement et rétrécissement dans une conduite .....	25
Figure 2.3: Sortie d'un réservoir.....	26
Figure 2.4 : Evolution des lignes de courant dans un coude circulaire .....	27
Figure 2.5: L'écoulement dans une jonction .....	27
Figure 2.6 : l'évolution des tourbillons à l'aval d'un obstacle dans un écoulement en fonction de l'intensité de la vitesse.....	28
Figure 2.7 : Les vannes à opercule et les vannes papillon .....	28
Figure 2.8 : La rugosité par rapport au diamètre de la conduite .....	31
Figure 2.9: Le coup de bélier .....	34
Figure 2.10 : La réduction soudaine de la section transversale d'une conduite.....	35
Figure 3.1 : Structure d'un Système d'Information Géographique.....	41
Figure 3.2: Schéma d'un réseau de distribution de fluide.....	42
Figure 3.3: Représentation graphique du réseau de la Figure 3.1 .....	42
Figure 3.4 : Graphe et sous graphe orientés .....	43
Figure 3.5 : Arbre d'un graphe.....	44
Figure 3.6 : Eléments du graphe d'un réseau .....	46
Figure 3.7: Un réseau ramifié de distribution de l'eau.....	52
Figure 3.8 : Un réseau maillé de distribution de l'eau .....	52
Figure 4.1 : Interfaçage graphique de deux réseaux ramifiés .....	68
Figure 4.2 : Interfaçage graphique de l'assemblage des réseaux ramifiés .....	69
Figure 4.3 : interfaçage graphique d'un réseau après ajout et suppression de conduites.....	70

Figure 4.4 : interfaçage graphique du réseau final de deux sources .....	71
Figure 4.5 : Réseau obtenu par les algorithmes génétiques .....	71
Figure 4.6 : Interfaçage graphique des quatres réseaux ramifiés. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	72
Figure 4.7 : Interfaçage graphique de l'assemblage des réseaux ramifiés. ....	73
Figure 4.8 : interfaçage graphique d'un réseau après ajout et suppression de conduites.....	74
Figure 4.9 : interfaçage graphique d'un réseau final à quatre sources.....	75
Figure 4.10: Interfaçage graphique du réseau ramifié à une seule source .....	76
Figure 4.11: Interfaçage graphique du réseau maillé à une seule source .....	77
Figure 4.12 : interfaçage graphique du réseau après ajout et suppression de conduites .....	78
Figure 4.13 : interfaçage graphique du réseau final obtenu .....	79
Figure 4.14 : Représentation graphique du réseau à une seule source .....	79
Figure 4.15 : Interfaçage graphique du réseau ramifié du réseau à deux mailles .....	81
Figure 4.16 : Interfaçage graphique du réseau final à deux mailles.....	82
Figure 4.17 : Représentation graphique du réseau à deux mailles .....	82
Figure 4.18 : Interfaçage graphique du réseau final à deux mailles après l'optimisation complète .....	84

# *INTRODUCTION*

## INTRODUCTION

Le transport et/ou la distribution de fluide (liquide ou gaz) acquiert depuis ces dernières décennies une importance particulière. Pour les responsables de réseaux de distribution, l'amélioration du rendement d'un réseau a toujours été un souci majeur. L'industrie de l'eau est sous une pression croissante pour produire une eau potable d'une plus grande qualité au plus faible coût. Ceci représente une économie en termes de coût mais aussi en termes de respect de l'environnement.

L'installation de réseaux de transport ou de distribution d'eau potable s'est toujours trouvée confrontée à de nombreux problèmes d'exploitation (casses, ruptures, fuites), susceptibles de décrire la détérioration des conduites. Cette détérioration peut être décrite selon trois niveaux en fonction de l'élément d'analyse pris en compte. Nous distinguons :

- *La détérioration structurelle* de la conduite qui se manifeste par une rupture de la conduite, fuite ou un affaissement de la chaussée. C'est une détérioration physique liée au vieillissement.
- *La détérioration hydraulique* se manifeste par une baisse de pression et de débit en raison du rétrécissement de la section (diamètre) interne des conduites causé par des dépôts de sédiments, la corrosion ou des fuites.
- *la détérioration de la qualité* de l'eau qui se manifeste par une coloration de l'eau provoquée par à des infiltrations de substances ou matières dans les conduites.

Un réseau de distribution de haute qualité est un réseau qui est fiable et assure un approvisionnement continu en eau potable, à une pression appropriée. Des réservoirs équilibrent la pression et permettent de répondre aux pointes de consommation, d'assurer la protection contre les incendies et les autres urgences, sans causer de rétention indue de l'eau. Des conduites principales en boucle empêchent l'eau de stagner et réduisent au minimum les inconvénients pour les clients pendant les réparations. Comme la qualité de l'eau diminue quand le temps de séjour dans le réseau augmente et que la vitesse à laquelle cette qualité diminue dépend en partie des caractéristiques du réseau de distribution, un réseau de grande qualité a le moins possible de conduites en impasse et assure un débit et un renouvellement adéquats de l'eau.

Le présent travail a pour but principal de contribuer au développement d'une expertise algérienne dans ce domaine. Un aspect important de cette initiative est le produit final palpable qu'est la procédure informatisée de conception et d'optimisation des réseaux.

Une bonne gestion des réseaux devrait éviter toute rupture du service (arrêts d'eau et nuisances engendrées, etc.), assurer la qualité du service rendu, limiter les pertes et maîtriser les coûts d'exploitation.

L'étude a révélé que beaucoup de travaux ont été conduits dans le domaine de l'optimisation du dimensionnement du réseau en donnant des résultats très satisfaisants. Il

nous revenait donc de choisir la méthode qui répond le mieux aux exigences actuelles. Notre choix s'est donc porté sur la méthode de la longueur minimale pour optimiser la longueur du réseau et sur la méthode de programmation linéaire (SIMPLEX), pour sa simplicité et sa facilité à être programmée, dans la partie dimensionnement des conduites. La procédure ainsi constituée est implémentée dans un programme de calcul et consolidée par un interfaçage graphique. L'inconvénient major de la méthode du SIMPLEX réside dans le fait que l'application de la technique propre de 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.

Le travail effectué dans ce mémoire est axé autour de quatre chapitres présentés comme suit :

Dans le premier chapitre les notions et concepts permettant de comprendre le fonctionnement du réseau AEP. Un système de distribution d'eau devrait essentiellement inclure des facilités pour le captage et le stockage, le transport, le pompage, le traitement et la distribution. Le captage et le stockage nécessitent le développement de lignes de partage des eaux, de barrages, de réservoirs, d'adductions, de galeries. Le transport inclut les canalisations, les aqueducs et les canalisations de pompage pour transporter l'eau des réservoirs de stockage au consommateur. Le pompage inclut les pompes et autres unités auxiliaires permettant son pompage. Le traitement inclut l'aération, la sédimentation, la filtration et la désinfection. La distribution inclut l'acheminement et la bonne répartition des réservoirs, des conduites etc. L'eau potable est transportée dans des canalisations, généralement enterrées. Elles sont en fonte grise ou ductile, en amiante-ciment, en PVC, etc.

Le second chapitre décrit quelques généralités sur les fluides et leurs caractéristiques, les équations hydrauliques représentant l'écoulement de l'eau dans un réseau d'eau potable. Les relations de calcul des pertes de charge est fondamental en mécanique des fluides et en hydraulique, et quelques phénomènes hydrodynamiques.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une description détaillée du problème d'optimisation de réseau de distribution d'eau potable et les techniques utilisées pour minimiser le coût des réseaux de distribution à partir de l'optimisation de la longueur totale d'un réseau, soit les longueurs des branchements et le choix des diamètres.

Dans le dernier chapitre nous développons et utilisons des techniques de simulation et d'analyse numérique dans la conception, l'évaluation et le développement des réseaux de distribution d'eau potable. L'optimisation proposée est essentiellement basée sur une technique qui fait appel à un interfaçage graphique. Elle permet de schématiser le réseau étudié par l'emploi de tronçons pour les conduites et des nœuds pour les intersections. Ces éléments sont documentés de sorte que toutes les infrastructures présentes sur le réseau et toutes les conditions d'utilisation apparaissent dans le graphe du réseau résultant de l'étude.

*Chapitre 1 : Présentation générale d'un système d'alimentation en eau potable*

## **1.1. INTRODUCTION**

Le transport par canalisation est un mode de transport de matières gazeuses, liquides, solides ou polyphasiques, réalisé au moyen de conduites constituant généralement un réseau ou système de transport.

L'évacuation gravitaire des effluents (eaux usées, eaux pluviales) par tuyauteries peut entrer dans cette acception. Cependant, les produits généralement visés par le terme transport par canalisation sont: le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et autres gaz combustibles, les produits chimiques [1].

Selon le produit transporté, les canalisations ont des noms ainsi que des réglementations, des techniques de construction et d'exploitation différentes.

Les principaux systèmes de transport par canalisation concernent:

- le gaz naturel, transporté par gazoduc.
- les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc.

Il existe bien d'autres produits acheminés sur des distances parfois importantes, justifiant le terme de transport, par différenciation avec des distributions locales:

- l'eau douce, principalement l'eau potable et d'irrigation, dans des conduites ou aqueducs.

## **1.2. HISTORIQUE DU TRANSPORT PAR CANALISATION**

Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau potable et d'irrigation existent depuis les temps historiques les plus anciens. Certains de ces réseaux utilisaient déjà sur certains tronçons des canalisations maçonnées, en bois ou en métal ductile (plomb,...).

Au XIXe siècle, la civilisation industrielle a vu se développer des installations complexes (haut fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.) qui comprenaient des systèmes de transport locaux par canalisations en fonte, bois, acier, céramique [2].

Le premier concept industriel de transport par canalisation aurait été formulé par le Russe *Dimitri Mendeleïev* en 1863. Il suggéra une solution technique utilisant des tubes pour transporter du pétrole.

Un autre Russe, *Vladimir Choukhov*, avec la société Branobel (acronyme de *Brothers Nobel*) passent pour avoir construit l'un des premiers oléoducs à la fin du XIXe siècle, entre 1878-1880 près de Bakou.

Peu de temps auparavant, un oléoduc reliant un champ de production de Pennsylvanie à une gare de chemin de fer à *Oil creek* aurait été construit vers 1860 par (*Oil Transport Association*) [3].

### **1.3. PRESENTATION D'UN SYSTEME DE DISTRIBUTION (AEP)**

Le réseau de distribution est la dernière barrière avant la livraison de l'eau au robinet du consommateur. Même si l'eau qui quitte la station de traitement est de la plus haute qualité qui soit, cette qualité peut se détériorer gravement si des mesures de précaution ne sont pas prises. Dans des cas extrêmes, il peut même y avoir contamination dangereuse.

Les réseaux de distribution sont composés de conduites principales, de vannes, de prises d'eau, de conduites de branchement et d'installations de stockage. Cette infrastructure est coûteuse, mais dure longtemps. Comme elle est en grande partie invisible, l'infrastructure de distribution n'est pas toujours la priorité première dans la gestion et le financement des réseaux d'eau. Mais, à mesure que la population augmente et s'étale et que les tuyaux se corrodent, des investissements importants et constants sont nécessaires [4, 5].

Nous distinguons plusieurs étapes dans le processus de production et de l'acheminement de l'eau. La première étape est l'étape de Captage, qui consiste à recueillir les eaux souterraines ou de surfaces de la source. Vient ensuite l'étape d'Adduction qui permet de transférer l'eau de la zone de captage jusqu'à proximité de la zone de distribution. Avant d'être distribuée l'eau doit subir des traitements ce qui permet de transformer l'eau brute en eau potable. L'eau est ensuite acheminée vers les zones de stockage afin de réguler le débit dans le réseau et prévenir une pénurie d'eau en cas de défaillance ou forte demande. L'eau est distribuée à travers le réseau d'Alimentation d'Eau Potable aux usagers [6].



*Figure 1.1: Le processus de production et distribution de l'eau.*

#### **1.3.1. Captage d'eau de surface**

L'eau destinée à être traitée puis distribuée dans les réseaux publics peut être prélevée, soit par captage de sources, soit par des puits ou des forages dans des vastes nappes d'eau souterraine, soit par prise d'eau dans les rivières.

En l'absence d'eau de surface en quantité suffisante et de qualité acceptable on doit utiliser les eaux souterraines. ces eaux sont captées [5] :

- soit à leurs sources ;
- Soit au cœur même de la nappe ;
- Soit capter les eaux circulant à grande profondeur



Les eaux souterraines sont en général limpides, mais leurs caractéristiques physico-chimiques varient en fonction de site, on doit, dans chaque cas, faire une étude pour déterminer quel traitement sera nécessaire pour rendre l'eau potable.

### **1.3.2. Station de pompage**

Sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse d'eau dans les canalisations. Elle est constituée des ouvrages et des équipements suivants:

- bêche d'aspiration,
- chambre de télé-contrôle et d'automatisation,
- groupes électropompes,
- autres équipements en amont et en aval des pompes (vannes, clapets, manomètres, etc.).

On remarque l'existence de plusieurs pompes. Ceci permettra d'un côté, de minimiser la consommation de l'énergie électrique, car le débit produit est réparti sur l'ensemble des pompes, et de l'autre côté, d'assurer la continuité du service en cas de panne.

### **1.3.3. Conduite d'adduction d'eau**

La conduite d'adduction véhicule de l'eau brute ou traitée. Les conduites d'adduction servent à amener l'eau brute depuis des sites plus ou moins éloignés où elle est généralement plus abondante et moins polluée, vers les zones d'utilisation.

Ils peuvent être, à ciel ouvert (canaux, aqueducs) ou en conduites fermées, en maçonnerie ou constitués d'éléments préfabriqués (fonte, béton, etc.).

Ce sont généralement les installations de traitement ou de stockage qui définissent la limite aval de ces conduites. En leur absence cette limite peut être définie par un organe de comptage ou à défaut par une vanne de sectionnement. Lorsqu'il y a un captage (et absence de traitement), celui-ci peut être considéré comme un ouvrage de production. Dans ce cas, seules les conduites en amont seront considérées comme des conduites d'adduction [7, 8].

En fonction de la position de la source d'eau on distingue deux types d'adduction [5] :

- *adduction gravitaire*

Dans une adduction gravitaire, le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de desserte de l'agglomération.

L'adduction gravitaire s'effectue, soit par aqueduc, soit par conduite forcée. Avec les aqueducs, il est fait appel à l'écoulement libre de l'eau, c'est-à-dire sans pression.

Dans les conduites forcées, l'écoulement se fait sous pression. Dans ce cas les pertes de charge seront plus importantes que dans un aqueduc à faible pente présentant le même diamètre, quand le plan d'eau correspond au passage du débit maximal.

▪ *Adduction par refoulement*

Dans une adduction par refoulement, le captage se situe à un niveau inférieur de celui du réservoir d'accumulation. Les eaux du captage sont relevées par une station de pompage dans cette conduite de refoulement.

#### **1.3.4. Usine de traitement**

Selon la qualité de la source d'approvisionnement en eau, on peut devoir soumettre l'eau à un traitement plus ou moins élaboré. Ainsi, par exemple dans le cas d'une eau souterraine de bonne qualité désinfection seule peut produire une eau de consommation, en revanche, une eau de lac ou rivière exige un traitement plus complet.

Le traitement à effectuer sur l'eau brute aura pour but:

**→ de la clarifier**

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les matières en suspension d'une eau brute ainsi que des matières organiques dissoutes. Suivant les concentrations de l'un et de l'autre des différents polluants, on peut être amené à pratiquer des opérations de plus en plus complexes qui vont de la simple filtration avec ou sans réactif jusqu'à la coagulation – floculation – décantation ou flottation – filtration [9].

Dans la clarification, on s'efforce de débarrasser l'eau brute de ces particules colloïdales et en suspension en les retenant à leur passage dans une masse filtrante, après, éventuellement, un traitement approprié [5]:

- Une réduction des matières en suspension par décantation ;
- Une élimination de la fraction fine en quatre étapes successives :
  - ✓ Coagulation (par ajout de réactif adapté)
  - ✓ Floculation (agitation favorisant le grossissement des particules)
  - ✓ Décantation (dépôt sur le fond de « boues ») ou flottation (entraînement en surface par des bulles d'air)
  - ✓ Une filtration à travers une ou plusieurs couches de sable calibré retenant les matières en suspension. Les filtres doivent être périodiquement « lavés » en contre-courant.

La coagulation est l'une des étapes les plus importantes dans le traitement des eaux de surface. 90% des usines de production d'eau potable sont concernées. La difficulté principale est de déterminer la quantité optimale de réactif à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute.

Un mauvais contrôle de ce procédé peut entraîner une augmentation importante des coûts de fonctionnement et le non-respect des objectifs de qualité en sortie. Cette opération a également une grande influence sur les opérations de décantation et de filtration ultérieures. En revanche, un contrôle efficace peut réduire les coûts de main d'œuvre et de réactifs et améliorer la conformité de la qualité de l'eau traitée [2].

**→ de la rendre bactériologiquement pure et exempte de micropolluants**

Dans le but de rendre l'eau bactériologiquement pure. La désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Elle permet d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes présents dans l'eau [9].

Le principe de la désinfection est de mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps avec une eau supposée contaminée. Cette définition fait apparaître trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact et la concentration résiduelle en désinfectant. Une bonne désinfection via les réactifs oxydants demande la combinaison d'une concentration  $C$  avec un temps de contact  $t$ . Cette valeur varie avec les microorganismes concernés, le type de désinfectant et la température.

Les quatre principaux désinfectants utilisés en production d'eau potable sont les suivants :

- Le chlore
- Le dioxyde de chlore
- L'ozone
- Le rayonnement UV.

La concentration en oxydant est pratiquement le seul paramètre sur lequel l'opérateur peut intervenir. Il faut retenir que l'efficacité de la désinfection dépend, en partie, du suivi de la concentration en oxydant. L'évolution de la concentration en oxydant est liée à la demande en oxydant de l'eau. Cette demande dépend de la qualité de l'eau, du  $pH$ , des températures (différentes entre été et hiver), des matières organiques.

**→ éventuellement, un affinage et amélioration des eaux**

Les procédés de traitement permettent d'obtenir, à la sortie de l'usine de production une eau d'excellente qualité. Mais l'objectif de la distribution publique de l'eau est l'amener à domicile (soit robinet de consommateur). Le voyage de l'eau dans le réseau va avoir une durée très variable, de quelques heures à plusieurs jours : en moyenne deux jours environ. Pendant ce voyage, l'eau sera en contact avec les matériaux constituant le réseau public et les canalisations à l'intérieur des habitations.

Une ou plusieurs étapes particulières de traitement sont destinées à préparer l'eau à ce voyage. L'eau suit un cycle naturel dans lequel les éléments chimiques qu'elle contient évoluent. L'eau de pluie contient naturellement du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Lors de sa pénétration dans un sol calcaire, c'est-à-dire riche en carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ), elle se charge en calcium  $CaO_2^+$  et en ions bicarbonates  $HCO_3^-$ . En fait, le calcium est dissous par l'eau chargée en  $CO_2$  [9]. On dit qu'elle est incrustante. En revanche, quand l'eau de pluie traverse une roche pauvre en calcium (région granitique), elle reste très chargée en  $CO_2$  dissous.

Cette eau est, en général, acide. On dit qu'elle est agressive. Il y a typiquement deux problèmes distincts : corriger une eau agressive et corriger une eau incrustante. La correction d'une eau agressive peut s'effectuer de plusieurs façons. Premièrement, on peut éliminer le  $CO_2$  par aération. Du fait de l'élimination du  $CO_2$ , le  $pH$  augmente et se rapproche du  $pH$  d'équilibre. Deuxièmement, on peut ajouter une base à l'eau. L'ajout de base permet

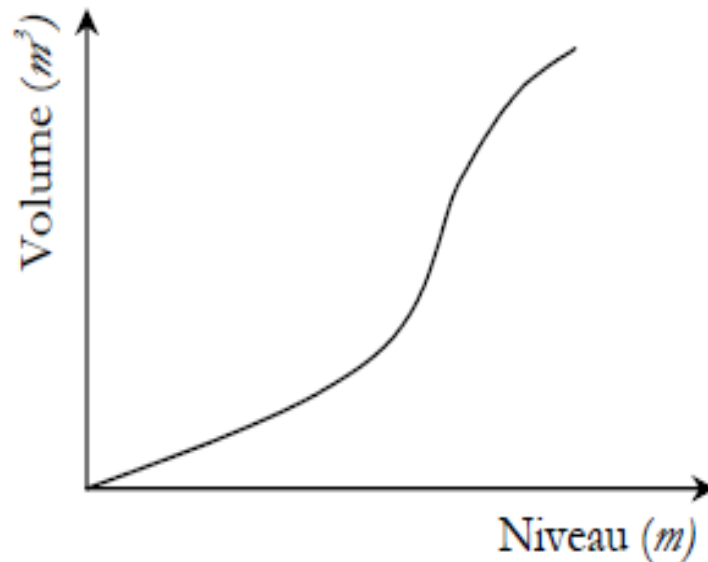
d'augmenter le  $pH$  et d'atteindre le  $pH$  d'équilibre. La correction d'une eau incrustante peut se faire par traitement direct correspond à un ajout d'acide.

### **1.3.5. Réservoir**

Pour pouvoir satisfaire à tout moment, la demande en eau potable des abonnés, on crée des réservoirs qui permettent de gérer les pointes de consommation. Lors de la conception des réservoirs, on est amené à faire plusieurs choix concernant le type de réservoir, son emplacement, sa capacité et son équipement. Les caractéristiques topologiques de la région ainsi que les conditions hydrauliques de la distribution seront des facteurs importants pour le choix de l'ouvrage.

Les réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, dont le volume d'eau peut varier au cours du temps. Cette variation est décrite par la courbe de volume, qui pour un point de stockage (Réservoir, château d'eau) définit la relation entre le niveau d'eau et le volume qu'il contient. Cette relation tient compte de la forme géométrique du point de stockage. Les caractéristiques d'un réservoir sont [6]:

- L'altitude du radier qui correspond à un niveau zéro de l'eau.
- Le diamètre du réservoir ou sa courbe de volume.
- Les niveaux : initial, minimal et maximal de l'eau.



*Figure 1.2 : Exemple de courbe de volume d'un réservoir*

Les réservoirs peuvent aussi être construits dans un réseau de distribution d'eau, dans un souci d'équilibre. Ils se remplissent quand le taux de filtration ou de pompage dépasse la demande et se vident dans le cas contraire. Ils permettent l'équilibrage des pressions dans les systèmes

de distribution et de là, ils réduisent les fluctuations de la pression causées par une demande variable.

Les fonctions dévolues d'un réservoir répondent en fait à plusieurs impératifs ; technique et économique.

- ✓ **Les fonctions techniques** : le réservoir assure trois fonctions principales. Une fonction de régulation, le volume stocké assure la compensation de l'écart entre le volume produit et le volume distribué. Une fonction de sécurité d'approvisionnement, le stockage doit permettre de faire face à toute une série de disfonctionnement du réseau. Et la fonction de défense incendie.
- ✓ **Les fonctions économiques** : le dimensionnement du stockage influe de près sur les investissements réalisés sur le réseau de distribution.

### **1.3.6. Réseaux de distribution**

A partir du ou des réservoirs, l'eau est distribuée dans un réseau de canalisations sur lesquelles les branchements seront piqués en vue de l'alimentation des abonnés (domestique, commerce, industriel, administration). En amont du réseau de distribution, il y a les ouvrages de prélèvement, d'adduction, de traitement et de pompage qui ne font pas partie du réseau de distribution. En aval, il y a d'une part les appareils de fontainerie qui sont des abonnés d'un type particulier, d'autre part les installations propres des abonnés [6].

Un réseau de distribution est constitué:

- de réservoirs et d'équipement hydraulique,
- de conduites de transfert,
- de conduites de distribution,
- de conduites de branchements,
- de points de livraison,
- de tous les appareils de robinetterie et de régulation.

## **1.4. STRUCTURE DE RESEAU D'AEP**

La structure du réseau AEP dépend de la localisation des abonnés, de leur importance et du niveau de demande à assurer. La structure traduit les dimensions des conduites, la capacité des réservoirs, le nombre de pompes et la puissance fournie. La structure du réseau tient compte d'éléments géographiques tels que [4] :

- la dispersion des abonnés ;
- la présence d'obstacles naturels ;
- la présence de routes ;
- d'autres réseaux enterrés.

### 1.4.1. Les conduites

Les conduites permettent l'acheminement de l'eau d'un point à un autre point du réseau. Une conduite est un segment de tuyau ou canalisation délimitée par deux points de consommation d'eau appelés *nœuds* [4,5]. Chaque conduite est caractérisée par:

- un nœud initial et un nœud final
- une longueur donnée  $L$
- un diamètre  $D$
- un coefficient de rugosité traduisant la perte de charge
- un état : ouvert, fermé.

Nous distinguons entre les conduites en fonction de leur rôle dans le réseau et la nature du matériau les constituants. Le transport de l'eau vers les zones de stockage nécessite des conduites de diamètre important (300-800 mm) [3]. Pour la distribution les conduites sont de diamètres inférieurs (80-250 mm) et enfin les branchements qui sont de plus faible diamètre (40-60 mm) qui permettent d'acheminer l'eau jusqu'au abonnés à partir des conduites de distribution. Une autre distinction peut être effectuée en se basant sur la nature du matériau constituant la conduite, plusieurs conduites sont disponibles présentant des caractéristiques physiques et mécaniques distinctes [6].

**Le tableau 1.1** : Certains types de conduite selon le matériau les constituants.

<b>Matériau</b>	<b>Résistance mécanique</b>	<b>Résistance à la corrosion</b>
Béton	importante	importante
Matières Plastiques	faible	importante
Acier	importante	faible
Fonte grise	faible	importante
Fonte ductile	faible	importante

### 1.4.2. Les nœuds

Les nœuds représentent des points de jonction entre les conduites. Ils correspondent à des points d'entrée ou de sortie d'eau. Il existe deux catégories de nœuds [6] :

➤ *Les nœuds à débit fixe*

Ces nœuds se caractérisent par une cote au sol connue et un débit connu (demande), l'inconnue est la pression au nœud qui doit être calculée. Ils correspondent à des points de consommation dans le réseau. Ces nœuds peuvent décrire la consommation d'un ou de plusieurs abonnés de même type. Nous distinguons entre les abonnés selon le type de consommation: domestique, industrielle, administration. La consommation au nœud exprimée par la demande peut être constante ou variable.

➤ *Les nœuds à charge fixe*

Ce sont des nœuds où la charge est fixée ou dont la cote piézométrique de l'eau est connue. Il peut s'agir d'un réservoir dont le niveau d'eau varie en fonction du temps.

### 1.4.3. Topologie du réseau d'AEP

La topologie du réseau est la représentation schématique des différents nœuds d'un réseau et de leurs liaisons physiques (conduites, pompes, vannes). La disposition des nœuds et des conduites dépend de la localisation des abonnés, présence de routes, obstacles naturels, présence d'autres réseaux. En termes de topologie, nous distinguons :

❖ *Les réseaux ramifiés*

Ce type de réseau se présente selon une structure arborescente à partir du nœud à charge fixée assurant la mise sous pression. Cette configuration est justifiée par la dispersion des abonnés. Cependant, ce type de topologie réduit la fiabilité du réseau dans le cas d'une rupture d'une conduite, privant en eau les utilisateurs en aval du point de rupture. Elle caractérise généralement les réseaux de distribution d'eau en milieu rural [6].

❖ *Les réseaux maillés*

Comportant un certain nombre d'antennes en boucle et pouvant assurer la distribution en eau, cette configuration caractérise les réseaux de distribution d'eau en milieu urbain où il existe une concentration des abonnés. La présence de boucle ou de maille réduit les risques de coupure en cas de rupture de conduites, car assurant une redondance dans l'acheminement de l'eau et limitant l'impact d'une rupture sur la desserte en eau. Dans la réalité les deux configurations coexistent dans un même réseau. En milieu rurale, le réseau sera formé par plus d'antenne et ramifications, alors qu'en milieu urbain on constatera plus de mailles.

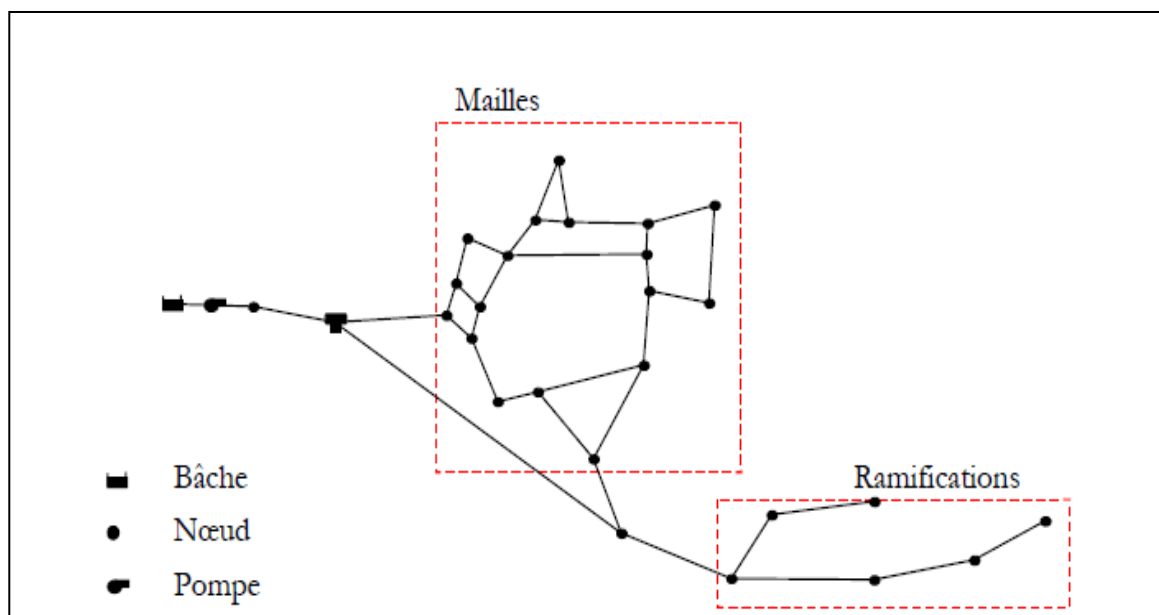


Figure 1.3: Représentation schématique d'un réseau d'alimentation en eau potable

## 1.5. PHENOMENES A L'ORIGINE DE L'EVOLUTION D'UNE CANALISATION

La figure 1.4 montre les différentes causes qui peuvent entraîner l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable et donc augmenter le risque d'apparition d'une défaillance [8].

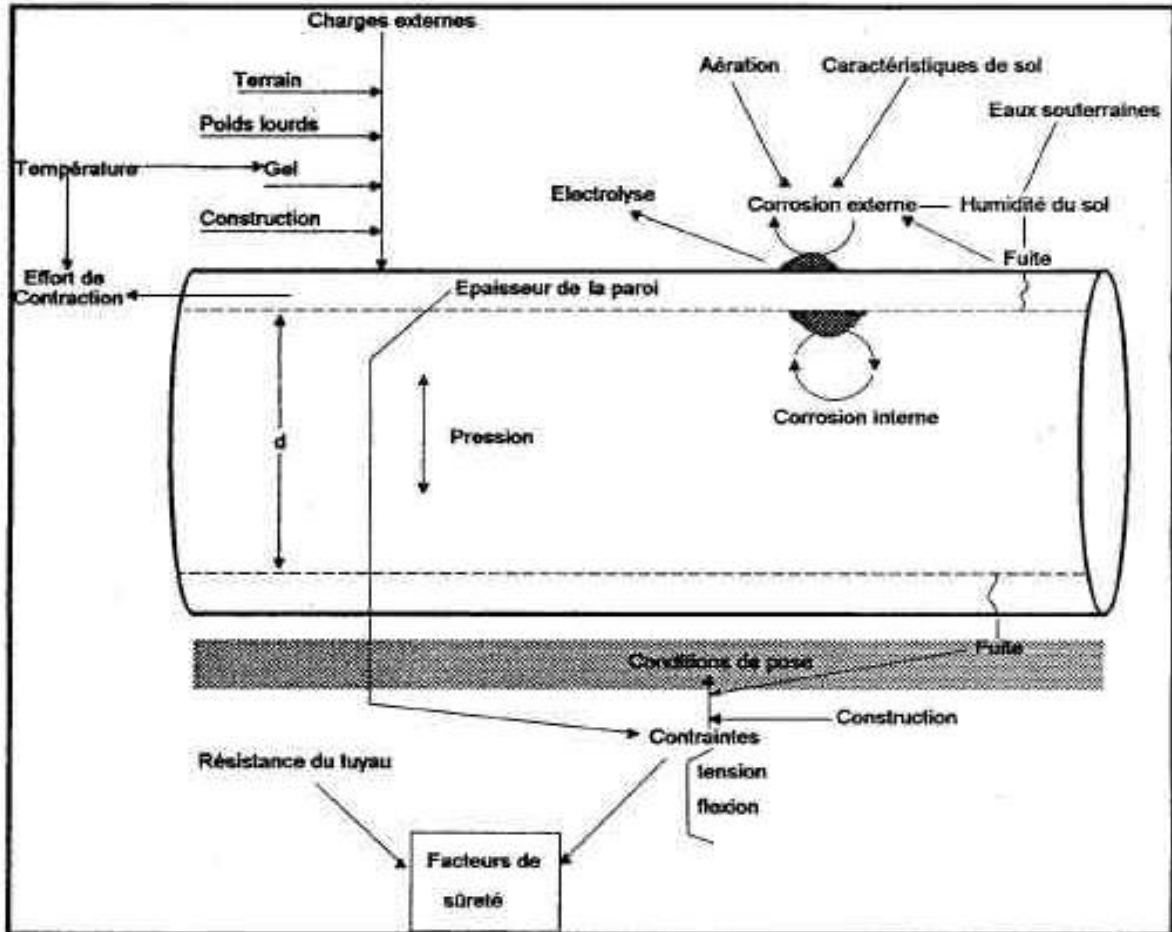


Figure 1.4 : Causes de l'affaiblissement de conduites d'eau potable

Elles sont regroupées en différentes classes :

- Les éléments propres au type de la canalisation, soit liés à la structure typique de la canalisation et de sa nature,
- Les éléments liés à l'exploitation des réseaux,
- Les éléments extérieurs au réseau.

La difficulté majeure réside dans le fait qu'une canalisation d'eau potable fait partie d'un ensemble des structures pouvant avoir des relations entre elles et pouvant subir des événements tout à fait fortuits, dont il est impossible de fournir toutes les causes simultanées, pouvant être à l'origine des défaillances.



### **1.5.1. Éléments propres au type de la canalisation**

#### **✚ Phénomène de corrosion**

La corrosion touche entre le quart et la moitié des canalisations, en particulier les anciennes canalisations en fonte grise et en acier non revêtues. Par conséquent, la corrosion est le problème le plus courant dans les systèmes de distribution. En plus d'affaiblir les parois des conduites, la corrosion peut faciliter le développement de gros tubercules (ensembles de matières pouvant comprendre du tartre, des algues et des bactéries) dans les conduites, ce qui réduit le débit et la pression de l'eau, allonge le temps de séjour de l'eau dans les conduites et favorise la corrosion. Par ailleurs, la qualité de l'eau peut être réduite à cause du dégagement, dans l'eau, de sous-produits solubles ou particuliers de la corrosion. C'est particulièrement le cas avec les nouvelles conduites dans les systèmes qui emploient de l'eau dure, avant qu'une couche protectrice de tartre ne s'accumule sur les surfaces intérieures. La corrosion n'affecte pas nécessairement la salubrité de l'eau potable de manière directe, mais elle réduit la durée de vie des conduites et, dans les conduites plus anciennes, augmente la probabilité de fuites, de bris et de contamination. Il y a deux types de corrosion:

- Corrosion interne liée à la qualité de l'eau (figure 1.5).
- Corrosion externe correspondant à un échange d'ions entre le sol et la paroi de la conduite (figure 1.6).



**Figure 1.5:** Conduite de diamètre 80 mm ayant subi des dépôts ferriques de corrosion interne

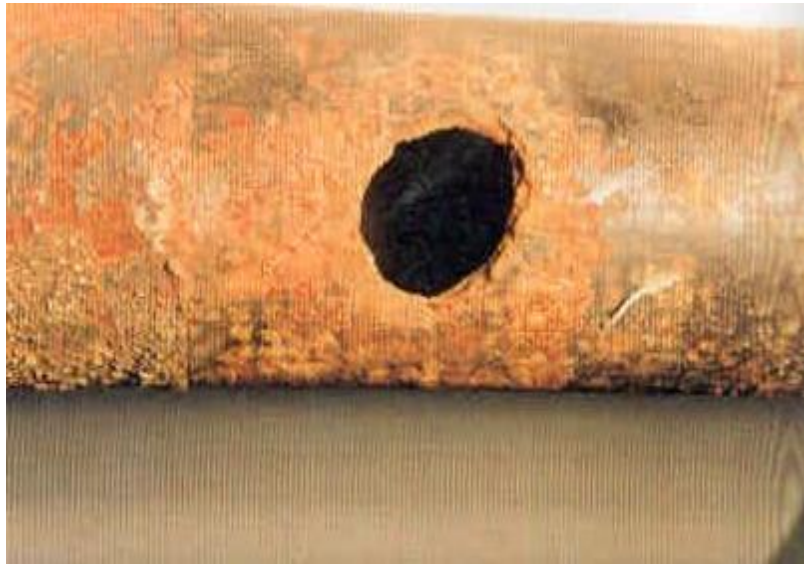


Figure 1.6 : Conduite de diamètre 80 mm ayant subi une corrosion externe

#### ✚ Le matériau

Tout matériau de canalisation d'eau potable doit se conformer à certaines spécifications techniques, assurant une durabilité suffisante de la canalisation [5].

Cependant les différents matériaux ont chacun des caractéristiques propres, qui peuvent faciliter certains types de défaillances. Ces facteurs sont synthétisés dans le tableau 1.2 selon les deux types de conduite : les matériaux plastiques et les métaux.

Tableau 1.2 : Causes des défaillances selon le matériau des conduites

Matériaux plastiques	Métaux
<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Vieillessement du matériau</i> : baisse de résistance, diminution de l'élasticité, de la tenue aux chocs avec le temps, action de rayons U.V. (si les tubes sont au contact de rayonnement solaire et si les anti-UV du matériau devient inactif).</li><li>- <i>Ténacité</i> : propagation d'une fissure à partir d'un défaut externe ou interne, dans le cas de fluctuation de pression.</li><li>- <i>Fissuration sous tension</i> : rupture fragile en milieu contenant des hydrocarbures.</li><li>- <i>Tenue aux chocs</i> en particulier à froid.</li><li>- <i>Perméabilité</i> à des polluants présents dans le terrain.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Anomalie de structure</i> ou de santé métallurgique.</li><li>- <i>Comportement mécanique réduit</i> : rupture sous tension (fonte grise).</li><li>- <i>Corrosion</i> : nécessité d'une protection contre la corrosion, propagation de la corrosion externe à partir d'un défaut externe (rayure, endommagement) du revêtement, choix des revêtements en fonction de l'agressivité de sol.</li><li>- <i>Incrustations internes</i> en fonction de la qualité d'eau.</li></ul>

### **Phénomène d'entartrage**

Le transport d'une eau incrustante peut provoquer un entartrage des conduites. La formation de ces dépôts calcaires a des répercussions internes sur la qualité de l'eau et sur son écoulement par réduction de la section utile de la conduite. Avec le temps, il réduit le débit de la conduite et accroît les pertes de charge. Sa présence, notamment s'il y a des inclusions, peut également influencer sur la vitesse de corrosion.

### **Le diamètre**

Le diamètre peut jouer un rôle important dans le mécanisme d'application des défaillances. Ainsi un petit diamètre est plus sensible aux efforts de traction. Les tuyaux de diamètre inférieur à 100mm ont presque toujours des ruptures transversales.

### **Les joints**

Les trois types de joints (au plomb, en caoutchouc et en matière plastique) se distinguent par leurs caractéristiques [2] :

- Les joints au plomb ne sont pas élastiques et transmettent donc les tensions d'un tuyau à l'autre.
- Les joints en caoutchouc sont bien entendu élastiques. Cependant leur vieillissement est encore mal connu.
- Pour les joints en matière plastique, certains types de joint, les joints élastomères et les joints collés, entraînent des fuites diffuses importantes. Les services technique ayant posé ce type de joint on observé bien une diminution du rendement de réseau.

## **1.5.2. Eléments liés à l'exploitation des réseaux**

### **Variation des conditions d'exploitation**

Une augmentation de la charge hydraulique peut avoir lieu, suite à une modification du régime hydraulique, comme lors du passage d'une adduction gravitaire à une alimentation sous pression ou à la réduction de section due à une réhabilitation de canalisations. Cette surcharge hydraulique peut alors entraîner une augmentation du nombre de fuite ou de rupture dans les semaines suivant le changement [5].

### **Manœuvres accidentelles sur le réseau**

Ces manœuvres sont surtout caractérisées par le phénomène du coup de bélier, phénomène très violent due à la circulation d'une onde de pression ou de dépression dans la canalisation, suite à l'ouverture/fermeture d'une vanne ou la mise en route/arrêt d'une pompe [5].

Ce phénomène peut fragiliser dangereusement la canalisation, quelquefois jusqu'à la détérioration du joint, à la fêlure du tuyau ou même à la rupture.

## **Nature de l'eau**

La nature de l'eau peut être un facteur très important de corrosion interne de la canalisation. Des interactions eau-conduite peuvent se traduire simplement par une dégradation de la qualité d'eau et par une corrosion de l'état intérieur des conduites. De nombreux facteurs physiques, chimiques électrochimiques et biologiques peuvent être à l'origine de dégradation et de corrosion internes, simultanément ou successivement. Dans ce qui suit, nous distinguerons :

### ✓ **Les phénomènes de dépôts de sédiments**

Quand l'eau circule lentement, les particules en suspension peuvent se déposer dans la conduite. Les sédiments ainsi accumulés réduisent le débit de la conduite. Ce problème est surtout courant dans les conduites d'eau de source qui sont situées en amont d'une station de traitement, car un bon traitement élimine les particules en suspension [2]. Les sédiments qui s'accumulent dans les portions de réseau où la vitesse de l'eau est particulièrement faible (réservoirs, extrémités de réseau), peuvent provenir de l'usine de traitement mais aussi du réseau de distribution. En effet, quelle que soit l'efficacité de la filière de traitement, de nombreuses particules minérales ou organiques peuvent franchir les différentes étapes du traitement et pénétrer dans le réseau. De même, divers sédiments peuvent pénétrer dans le réseau à l'occasion de travaux de réparation de fuites, notamment lors de la mise à la pression atmosphérique de la conduite.

### ✓ **Les phénomènes biologiques**

Les films biologiques sont causés par la croissance de bactéries qui peuvent proliférer dans les réseaux de distribution d'eau. La décomposition des algues qui poussent dans les eaux de surface insuffisamment filtrées est l'une des nombreuses sources possibles de matières organiques dissoutes, qui peuvent constituer une bonne source de nourriture pour la croissance bactérienne [2].

A l'intérieur du réseau, ces bactéries qui ont été seulement blessées par les opérations de traitement de l'eau, peuvent se réanimer ou se réparer en fonction de paramètres tels que la température, les nutriments présents et bien sûr le temps.

Par ailleurs, dans le réseau, certains points offrent des voies d'entrée à la contamination par des microorganismes. C'est le cas des réservoirs où l'eau est en contact avec l'air, et où les orifices mal protégés peuvent permettre le passage de poussières ou d'insectes apportant des contaminations.

Les interventions sur le réseau (réparations, branchements), les fuites (en cas de dépression) et les accidents tels que des retours d'eau ou des cassures peuvent également être responsables l'introduction de microorganismes dans le réseau.

On peut définir simplement le bio film comme l'ensemble des micro-organismes présents sur la surface interne de la conduite. Le bio film est cependant, un système dynamique où s'installe une chaîne alimentaire complexe (figure 1.7).

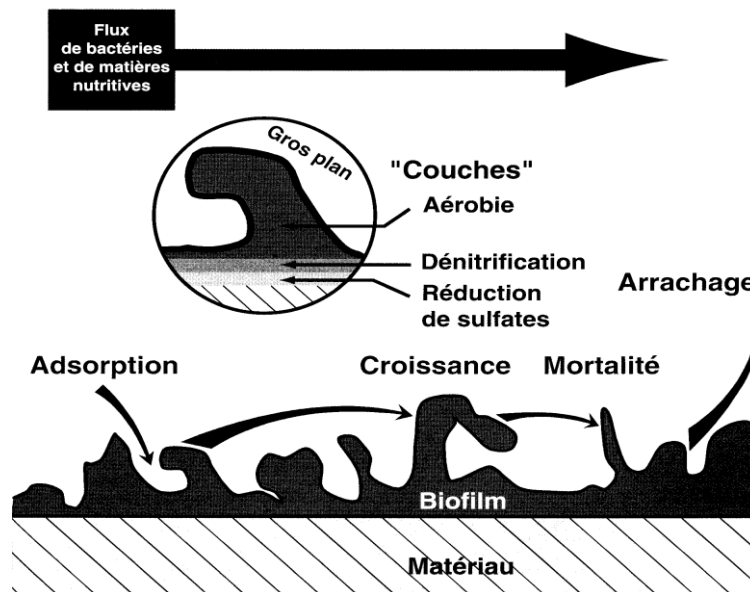


Figure 1.7 : le Bio film

#### ✚ Température de l'eau

En générale la température de l'eau dans le réseau varie très peu, même dans des régions à périodes de gel importantes. Le risque le plus important de variation de température a lieu dans les branches mortes du réseau, où l'eau peut stagner. Une rapide diminution de la température peut alors entraîner une contraction de la canalisation et une augmentation des contraintes longitudinales de traction, d'où une fragilisation des tuyaux.

### 1.5.3. Eléments extérieurs au réseau

#### ✚ Le sol et son humidité

Outre les phénomènes de corrosion externe, le sol peut avoir une action mécanique sur la canalisation suite à une variation de son humidité. Ainsi lors de périodes de fortes précipitations sur sol argileux sec, un gonflement de sol peut avoir lieu et entraîner une modification des contraintes sur la canalisation et de l'alignement de cette canalisation.

#### ✚ Les mouvements de sol

Certains phénomènes peuvent engendrer des mouvements de sol plus ou moins importants, plus ou moins instantanés. Ainsi un tassement peut avoir à cause de pentes trop importantes ou de séismes. Des contraintes, d'autant plus élevées que la canalisation est attachée à des points fixes, peuvent alors apparaître et augmenter le risque de rupture. Ainsi qu'une migration du lit de pose [2].

### **Les conditions de pose**

Le choix du matériau de remblai utilisé et le soin apporté lors de la pose ont une incidence primordiale sur le vieillissement des canalisations. Il est tout d'abord nécessaire de choisir un matériau qui permet une meilleure stabilisation de la conduite, tel le sable ou le gravier. Le sable permet également de diminuer de moitié la charge par rapport à un matériau argileux à un mètre de profondeur.

Une grande attention apportée lors de la pose a également une grande importance. En effet ceci permet d'éviter certains chocs de la canalisation, chocs qui pourraient engendrer une dégradation du revêtement extérieur, d'où une fragilisation de la conduite vis-à-vis notamment de la corrosion.

### **L'influence de tiers**

Des travaux ne concernant pas obligatoirement la distribution d'eau peuvent détériorer la canalisation de manière directe ou indirecte. Ainsi un creusement de tranchée contenant déjà une conduite d'eau potable peut soit la casser directement à cause d'une manœuvre accidentelle, soit déstabiliser le lit de pose et provoquer des glissements, écrasement ou ruptures. Une conduite peut aussi être fragilisée à cause d'engins utilisés lors des chantiers, tels les vibrateurs lourds utilisés pour la compression du remblai et du tapis routier. D'autre part les multiples creusements, en ville notamment, font que les matériaux existant dans les tranchées sont de plus en plus hétérogènes.

Il est évident que les zones à risque sont surtout les zones urbaines, où les réseaux autres que les réseaux d'eau (assainissement, gaz, câbles électriques, câbles téléphoniques) sont les plus nombreux.

### **La circulation**

Dans certains services on a pu constater que le taux de ruptures était deux fois plus important pour les conduites traversant une route principale à fort trafic que des conduites placées dans des rues d'habitation. Il est donc évident que la densité de trafic est un facteur influençant le taux de défaillances.

Ceci est bien sûr lié à la surcharge causée par trafic ainsi qu'à la résistance de la canalisation, qui, elle dépend d'autres facteurs tels la profondeur, le diamètre et le matériau de la canalisation, le matériau de remblai,...

## **1.6. PROBLEME RENCONTRES DANS UN RESEAU D'A.E.P**

Plusieurs problèmes de différentes origines peuvent survenir dans un réseau d'A.E.P; des fuites, les branchements illicites, les erreurs de compteurs, les problèmes environnementaux, pénétration de contaminants, chute de pression, des ruptures ou casses sur

les conduites et leurs accessoires. A ces problèmes s'ajoutent des problèmes de gestion du réseau. Ces différents problèmes causent le mécontentement des consommateurs qui réagissent en déposant des plaintes sur les différents services (quantité insuffisante, qualité médiocre, etc.) au niveau des services concernés [10].

Les différents problèmes survenant dans un réseau d'alimentation en eau potable peuvent être classés en quatre grandes catégories:

### **1.6.1. La qualité de l'eau**

La mesure de la dégradation de la qualité de l'eau peut permettre de caractériser l'état de la ou des conduites proches du point de mesure ou de l'endroit où a eu lieu la plainte d'un abonné. Elle peut renseigner sur l'état de corrosion de la conduite pour ce qui concerne les conduites métalliques. C'est le cas lorsque des produits de corrosion sont transportés à travers le réseau. On a par exemple le phénomène d'eau rouge, qui correspond à l'oxydation d'ions ferreux en ions ferriques principalement dans les eaux douces, acides ou désaérées. Certaines autres substances comme le manganèse peuvent également entraîner la coloration de l'eau (couleur noire).

On peut également être renseigné sur la corrosion bactérienne, en examinant les teneurs en bactéries du fer ou sulfatoréductrices. Un mauvais état des joints ou des conduites en matière plastique peut également altérer la qualité de l'eau, du fait de l'introduction de substances provenant de l'extérieur, comme des hydrocarbures.

La corrélation entre l'âge de la conduite et l'apparition d'une mauvaise qualité de l'eau est un paramètre significatif concernant le vieillissement de certains éléments de la conduite, mais la difficulté majeure reste l'identification de la conduite, car on ne peut pas situer avec précision celle qui a détérioré la qualité de l'eau.

### **1.6.2. La diminution de la capacité de transport**

Cette valeur correspond à la diminution du diamètre interne de la conduite ou à l'augmentation du coefficient de rugosité. Ceci est engendré par l'entartage calcaire sur les conduites non-revêtues d'un revêtement interne. La diminution de la capacité de transport se manifeste par la mise en évidence de l'augmentation de pertes de charges sur le réseau ou sur une partie du réseau. Cette augmentation est non induite par l'augmentation de la consommation.

### **1.6.3. Les fuites diffuses**

Les fuites diffuses sont mises en évidence lors de mesures bien spécifiques ou lorsque la tranchée d'une conduite est ouverte. Elles n'entraînent pas en général de réparation sur la conduite. Ce sont elles qui en général abaissent le rendement d'un réseau et ne lui permettent pas de dépasser un taux supérieur à 90% ou 95%.

Elles caractérisent, soit une fragilisation du tuyau par de petites ouvertures, soit un mauvais état des joints qui deviennent alors poreux. Les fuites diffuses se manifestent de différentes manières en constatant [5]:

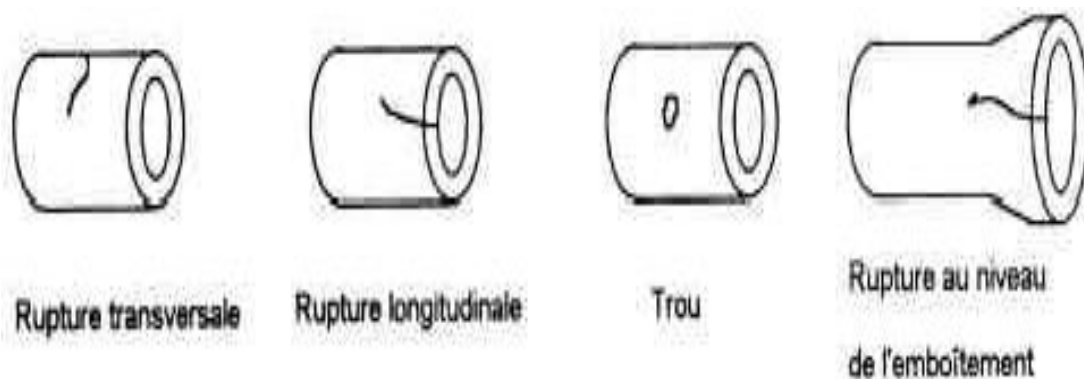
- Une diminution importante du rendement de réseau,
- Une augmentation sans raison de la production d'eau,
- Des indices visuels, des anomalies dans la distribution, bruits anormaux sur le réseau tels que :
  - ✓ La présence de végétation anormalement développés ;
  - ✓ Le terrain humide par temps sec ;
  - ✓ La baisse de pression même temporaire ;
  - ✓ Le manque d'eau chez l'abonné ;
  - ✓ L'humidité anormale sur la chaussée ;
  - ✓ Des bruits sur les branchements d'abonné.

#### **1.6.4. Les ruptures ou les fuites apparentes**

Les ruptures de canalisations peuvent être provoquées par :

- une action combinée de la corrosion sur la conduite et de mouvements de sols ;
- une augmentation de la pression interne ;
- une action violente dans le tuyau : coup de bélier, par exemple.

En général ces ruptures sont différentes selon le diamètre. En fonction du diamètre, les ruptures transversales ont lieu surtout sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages [9,5].



*Figure 1.8 : Ruptures ou fuites apparentes*

### **1.7. LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE**

En Algérie, la qualité des eaux superficielles se dégrade dans des bassins d'importance vitale sous l'effet des rejets de déchets urbains et industriels, les barrages réservoirs s'ensavent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose



d'énormes problèmes écologiques et environnementales. Nombre de villes se révèlent incapables de fournir en quantité suffisante de l'eau potable et des équipements d'hygiène. L'engorgement et la salification des terres déterminent une baisse de la productivité des périmètres irrigués. Dans un tel contexte, il devient prioritaire d'établir une stratégie pour localiser, quantifier et protéger les ressources en eau de façon à pouvoir les exploiter d'une manière rationnelle et en bonne qualité. Parmi les principaux problèmes on peut citer :

### **1.7.1. Problème de gestion des réseaux d'A.E.P en Algérie**

Les problèmes de gestion des réseaux algériens sont très divers [5]:

- Méconnaissance des besoins en eau des populations.
- Entretien quasi-nul des canalisations et de leurs accessoires.
- Coupures d'eau fréquentes.
- Fuites non répertoriées.
- Interventions trop lentes sur les fuites.
- Personnel insuffisant et non qualifié.
- Inexistence de pompes de secours au niveau des stations de pompage.

### **1.7.2. Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie**

Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie sont la rareté grandissante des ressources en eau qui résulte de la diminution des quantités disponibles par habitant, la dégradation de la quantité et les objectifs de développement économique et social imposent donc l'élaboration et la définition d'une stratégie de gestion de l'eau à moyen et à long terme. Le problème de l'eau est aggravé ces dernières années par le problème de sécheresse qui a touché l'ensemble du territoire, ont montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à l'eau. Cette ressource vitale est menacée dans sa qualité et dans sa quantité. Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement, l'Algérie enregistrera un déficit en eau de 1 milliard de m<sup>3</sup> d'ici l'an 2025 [10].

Les principaux problèmes techniques qui affectent la quantité et la qualité des ressources en eau. Il s'agit des problèmes suivants:

- Envasement des barrages en Algérie.
- Evaporation des lacs de barrages.
- Fuites dans les barrages.
- Intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers.

## **1.8. STRATEGIE POUR AUGMENTER LE STOCKAGE DE L'EAU**

Pour éviter de répercuter fatalement le déficit en eau, il faut mobiliser le maximum des ressources superficielles et souterraines, cherchant de nouvelles ressources, lutter contre les pertes et améliorer la qualité des eaux disponibles. C'est la qualité de l'eau qui est devenue un problème crucial, car depuis une trentaine d'années, cette qualité est menacée par les activités humaines. L'augmentation des besoins d'une région dans les trois grandes catégories (industrie, agriculture, particuliers) demande une planification innovatrice des ressources hydriques. Il est clair que l'Algérie enregistre d'un côté un manque énorme en ressources, au même moment où les besoins augmentent, et de l'autre côté le volume d'eau mobilisable est en diminution, et ceci est dû aux différents problèmes naturels ou humains qui touchent les sites susceptibles de capter les eaux [10]:

- Entretien des barrages actuels et lutte contre l'envasement
- Aménagement des bassins versants
- Réalisation des barrages de décantations
- Surélévation des barrages
- Réalisation des petits barrages et retenues collinaires
- Utilisation de la Recharge artificielle des nappes
- Recyclage et réutilisation des eaux usées
- Dessalement de l'eau de mer
- La lutte contre les fuites dans les différents réseaux
- Production de l'eau douce à partir de l'humidité atmosphérique.

*Chapitre 2 : Généralités sur les fluides  
et leurs caractéristiques*

## 2.1. INTRODUCTION

Les réseaux de distribution en eau constituent l'ensemble des canalisations interconnectées entre elles, et qui font suite à la bache principale. Ils sont utilisés pour permettre le transport et la distribution en eau aux différents consommateurs. Cependant une forte proportion d'eau se perd durant le transport entre les usines de traitement et les différents points de consommation. Selon une enquête réalisée en 1991 par l'association internationale de distribution d'eau (AIDE), la quantité d'eau perdue par ces réseaux se situerait entre 20 et 30% de la production totale. C'est la raison pour laquelle les exploitants ont été poussés à installer différents moyens permettant d'améliorer le rendement qui présente pour eux un souci majeur.

Ce chapitre décrit quelques généralités sur les fluides et leurs caractéristiques.

## 2.2. NOTION GENERALES SUR LA MECANIQUE DES FLUIDES

### 2.2.1. Définition d'un fluide

Un fluide est un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité, qui peut s'écouler, c'est à dire, subir de grandes variations de forme sous l'action de forces qui sont d'autant plus faibles que ces variations sont plus lentes. La notion de fluide s'oppose à celle de solide. Cependant l'un et l'autre sont considérés comme formés d'un grand nombre de particules matérielles extrêmement petites qui sont:

- solidement liées entre elles dans le cas des solides,
- libres de se déplacer les unes par rapport aux autres dans le cas des fluides.

La limite entre solide et fluide est toutefois difficile à préciser. Parmi les fluides on distingue les liquides et les gaz [3].

### 2.2.2. Définition d'un liquide

Un liquide est un fluide occupant un volume déterminé, ou du moins ce volume ne peut varier que très peu, et seulement sous l'action de fortes variations de pression ou de température.

### 2.2.3. Définition d'un gaz

Un gaz occupe toujours le volume maximal qui lui est offert. C'est un fluide essentiellement compressible.

### 2.2.4. Propriétés physiques des fluides

Les propriétés les plus importantes du point de vue mécanique sont: L'isotropie, la mobilité, la viscosité, et la compressibilité [3].

- *Isotropie* : Un fluide est dit isotrope si ses propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.

- *Mobilité* : La différence entre le comportement physique des liquides et des gaz se manifeste principalement dans le phénomène d'expansion. Sous l'influence de la force de gravité, une certaine quantité de liquide versée dans un récipient remplit le fond du récipient et forme une surface horizontale libre. Par contre, un gaz remplit la totalité d'un espace fermé auquel il a accès. Les gaz sont donc expansibles et les liquides ne le sont pas. Ce comportement est étroitement lié à la compressibilité.
- *Compressibilité* : Celle-ci peut être assimilée à la résistance du fluide à un changement de volume. Les liquides ont une compressibilité très faible. Les forces qui s'opposent à un changement de volume sont très puissantes. A l'opposé, la compressibilité des gaz est très élevée. En d'autres termes, les liquides peuvent être considérés comme hautement incompressibles, et les gaz comme hautement compressibles [11].
- *Viscosité* : Désignant la capacité d'un fluide à s'écouler, la viscosité est une propriété commune à tous les fluides. Elle est l'une des causes de la résistance qui apparaît en écoulement d'un fluide dans les conduites. Elle constitue une résistance à la déformation ou au glissement relatif de ses couches (les couches de fluide disposées plus près de la paroi ralentissent les couches supérieures) [12].

## 2.3. ECOULEMENTS EN CHARGE

L'hydraulique est l'étude des écoulements. On distingue deux types d'écoulements [13] :

- Les écoulements en charge, dans lesquels l'eau remplit complètement la canalisation, c'est le cas notamment des réseaux d'eau potable,
- Les écoulements à surface libre (interface entre l'eau et l'air), c'est le cas des rivières et des réseaux d'assainissement.

Les écoulements en charge sont des écoulements confinés à l'intérieur d'un contenant, en général une conduite. La pression à l'intérieur de ces écoulements peut être de beaucoup plus élevé que la pression atmosphérique. Même si la pression à l'intérieur de ce type d'écoulement peut atteindre la pression atmosphérique, en aucun cas nous considérons la présence de surface libre dans cette catégorie d'écoulements [14].

### 2.3.1. Distribution des vitesses dans un tuyau rectiligne

En fonction du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) les forces dans l'écoulement sont différentes. Cela a pour effet une distribution de la vitesse ponctuelle moyennée dans le temps (que l'on appelle vitesse moyenne temporelle) à l'intérieur du tuyau qui est différente suivant le régime d'écoulement. La connaissance du profil de vitesse dans une conduite permet de calculer le débit. La plupart des capteurs en réseau mesurent la vitesse moyenne temporelle en quelques points et reconstituent le profil complet de la vitesse pour en déduire le débit. Le graphique suivant compare la forme du profil de la vitesse en régimes laminaire et turbulent dans une conduite circulaire. En abscisse est représenté le rapport entre

la distance à la paroi ( $r$ ) et le rayon de la conduite ( $R$ ). L'ordonnée représente le pourcentage du rapport entre la vitesse maximale du profil et la vitesse ponctuelle  $V\left(\frac{r}{R}\right)$ . On constate que la vitesse maximale est au centre de la canalisation. Par contre, le profil de vitesse turbulent varie beaucoup plus qu'en laminaire au voisinage de la paroi. Cette zone de fort gradient de vitesse est appelée couche limite.

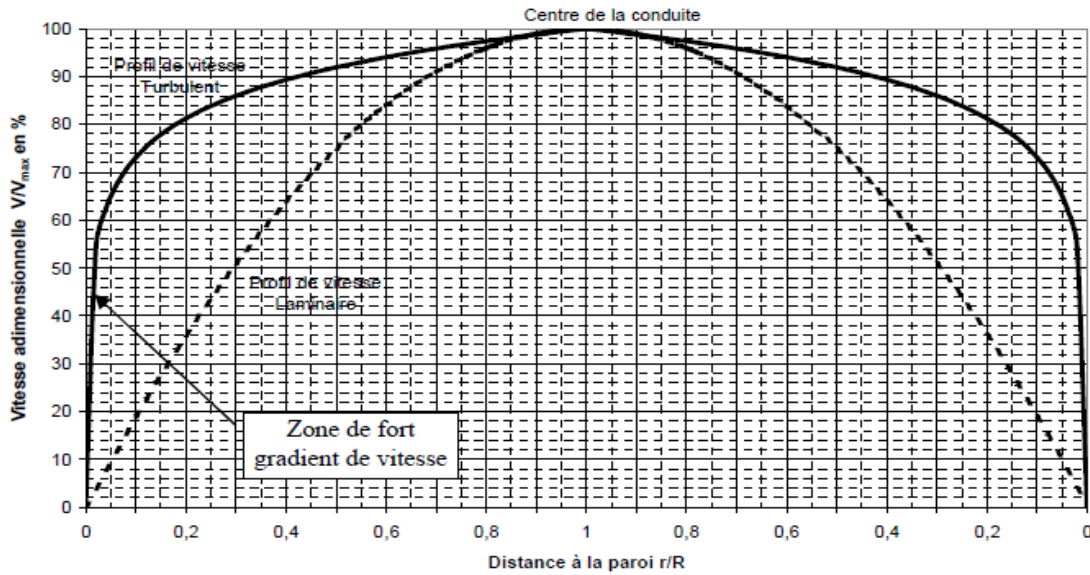


Figure 2.1: Evolution de la vitesse dans une conduite circulaire

### 2.3.2. Elargissement et rétrécissement dans une conduite

La transition entre deux conduites de diamètre différent pour un écoulement en charge provoque une répartition transversale des vitesses longitudinales totalement différentes de celles vues précédemment. On constate une zone où les veines liquides proches de la paroi se décolle sur une longueur  $L$ . Dans cette zone, on observe des recirculations à l'origine de perturbations importantes dans l'écoulement [13].

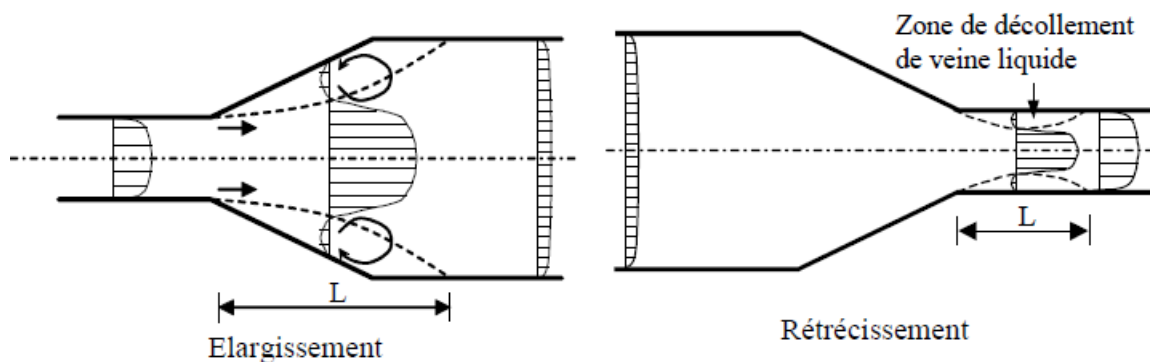
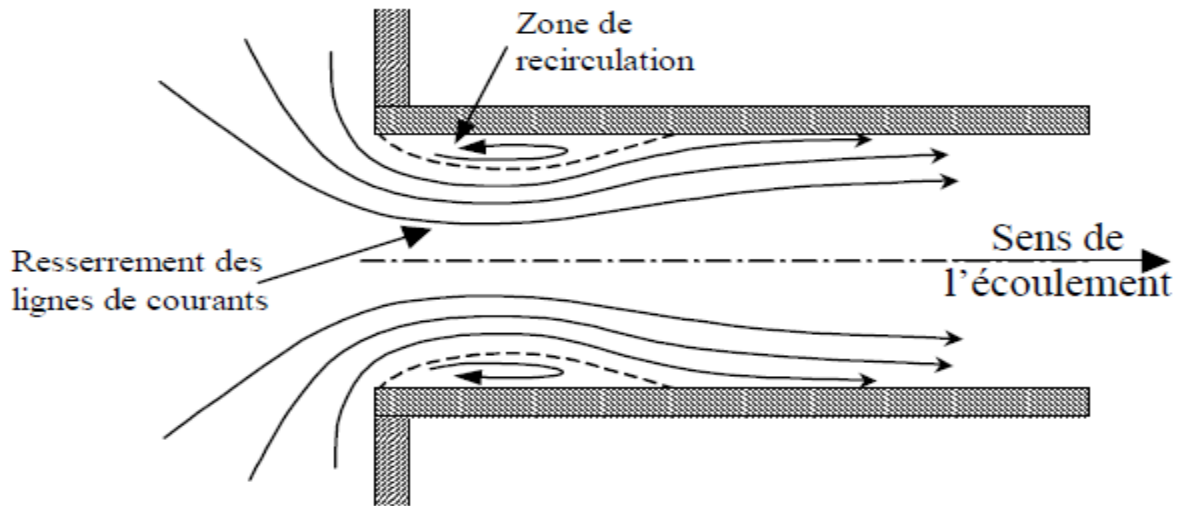


Figure 2.2: Elargissement et rétrécissement dans une conduite

### 2.3.3. Sortie d'un réservoir

La sortie d'un réservoir provoque également une modification de la répartition de la vitesse et une zone de décollement de la veine liquide. On remarque que les lignes de courant (ligne enveloppe du champ de vitesse) se resserrent au passage de la zone de recirculation. La présence de cette zone a pour effet de diminuer légèrement la section de passage de l'écoulement.



*Figure 2.3: Sortie d'un réservoir*

### 2.3.4. Coude

En raison de la courbure de la conduite, un mouvement hélicoïdal des lignes de courant peut s'établir. La présence de ce mouvement de rotation persiste sur une longueur en aval du coude (à peu près 50 fois le diamètre de la conduite). Lorsque la courbure est importante, des zones de recirculation peuvent apparaître. Le mécanisme interne de l'écoulement au travers d'un coude n'est pas encore bien connu, en dépit du grand nombre de chercheurs qui se sont penché sur l'analyse de cet élément important.

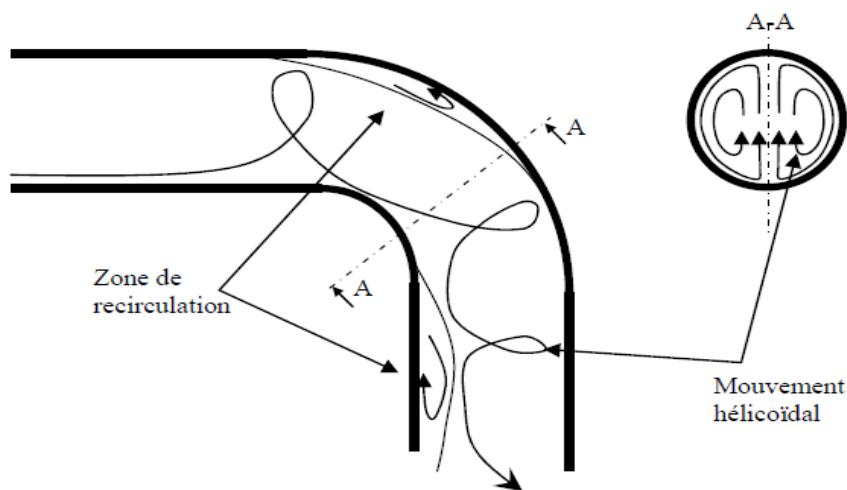


Figure 2.4 : Evolution des lignes de courant dans un coude circulaire

### 2.3.5. Jonction et bifurcation

L'écoulement dans une jonction provoque une zone de séparation et une zone de mélange. L'écoulement de la branche dans laquelle la vitesse est la plus faible est entraînée par l'eau provenant de la branche ayant une vitesse plus élevée. Ce phénomène est à l'origine de décélérations et d'accélération de l'écoulement dans les deux branches.

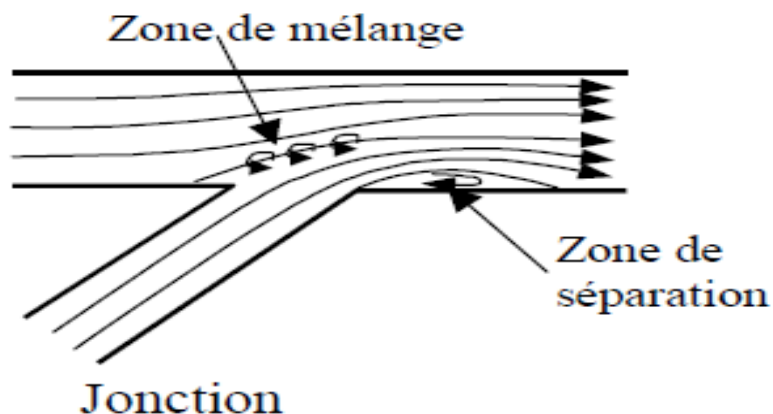


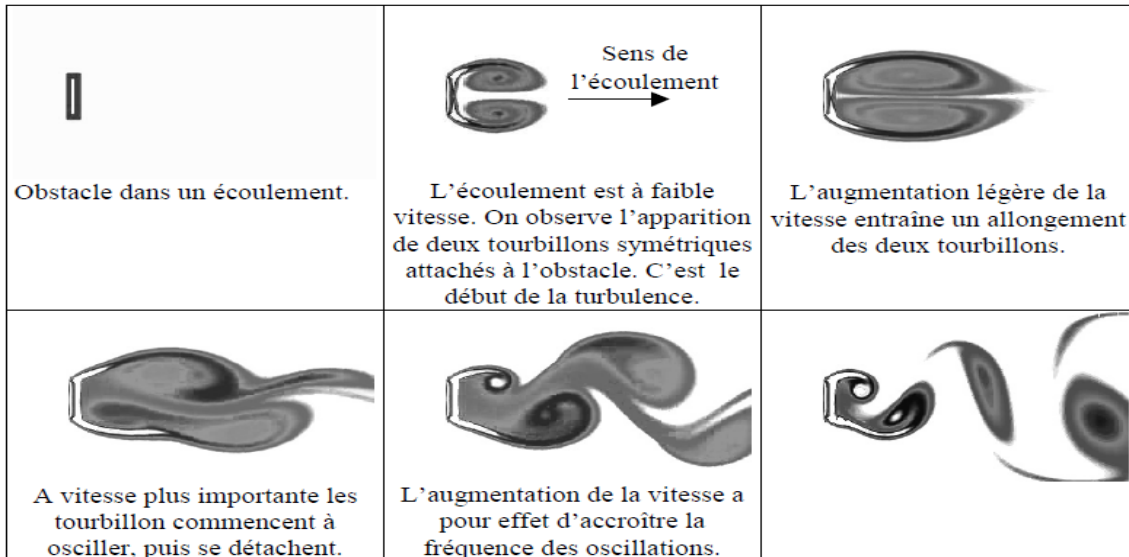
Figure 2.5 : L'écoulement dans une jonction

L'écoulement dans une bifurcation se comporte de manière légèrement différente du fait de la dérivation latérale. Une zone de séparation apparaît également dans la branche latérale.

### 2.3.6. Obstacles dans un écoulement en charge

Les figures suivantes montrent l'évolution des tourbillons à l'aval d'un obstacle dans un écoulement en fonction de l'intensité de la vitesse.





**Figure 2.6 :** l'évolution des tourbillons à l'aval d'un obstacle dans un écoulement en fonction de l'intensité de la vitesse

Les vannes à opercule ou les vannes papillons créent un obstacle dans les conduites. Ce sont des organes de contrôle du débit.



Vanne à opercule



Vanne papillon

**Figure 2.7:** Les vannes à opercule et les vannes papillon

## 2.4. EQUATIONS DE PERTES DE CHARGE

Le fluide est caractérisé par le fait que ses molécules sont très mobiles les unes par rapport aux autres. Elles se déplacent sous l'action de très faibles efforts. Le fluide n'offre alors aucune résistance aux déformations, à la rencontre des solides. En particulier, il épouse la forme du récipient qui contient. C'est ce qui constitue de fluidité.

En réalité, le fluide parfait n'existe pas, pas plus qu'il n'existe de solide indéformable. Les fluides naturels sont constitués par des molécules présentant quelque adhérence entre elles, ce

qui tend à gêner leurs mouvements relatifs, c'est ce qui constitue la viscosité. La viscosité provoque une dissipation de l'énergie cinétique de la masse fluide en mouvement, cette énergie est transformée en chaleur. C'est au mouvement relatif des molécules les unes par rapport aux autres, qu'est due cette dissipation d'énergie. L'effet est d'autant plus accentué que la vitesse de déformation du fluide est plus considérable [15].

#### 2.4.1. Lois fondamentales de l'écoulement

Dans un réseau deux ou plusieurs conduites peuvent se rencontrer en une jonction. L'équation de continuité pour un débit stationnaire incompressible en un tel nœud établit que la somme des débits massique(ou volumique) entrant dans la jonction doit être égale à la somme de débits massique(ou volumique) la quittant. Ainsi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0, \quad \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right), \quad \text{div}(\rho U) = 0 \quad (2.1)$$

C'est l'équation de continuité d'un fluide conservatif.

#### 2.4.2. L'équation de Bernoulli

Le théorème de Bernoulli énoncé en premier par Daniel BERNOULLI, est une équation intégrale de l'équation de NAVIER-STOKES qui exprime la **conservation de l'énergie**.

Le principe de conservation de l'énergie appliqué entre deux points 1 et 2 dans un fluide peu visqueux et sans et sans transfert d'énergie de ce fluide mène à l'équation de Bernoulli :

$$\frac{P_1}{\delta} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\delta} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.2)$$

Appliquer l'équation de Bernoulli à une conduite où s'écoule uniformément un fluide et considérer par conséquent une vitesse constante à travers la longueur en incluant les pertes par frottement donne l'équation suivante :

$$\frac{P_1}{\delta} + Z_1 = \frac{P_2}{\delta} + Z_2 + h_f \quad (2.3)$$

Si une station de pompage est introduite entre les points 1 et 2 l'équation devient :

$$\frac{P_1}{\delta} + Z_1 + H_P = \frac{P_2}{\delta} + Z_2 + h_f \quad (2.4)$$

Pour une application pratique aux systèmes de distribution d'eau l'équation d'énergie est généralement écrite sous forme suivante :

$$h_1 + Z_1 + H_P = h_2 + Z_2 + h_f \quad (2.5)$$

## 2.5. PERTES DE CHARGE

En hydraulique, la perte de charge correspond à l'énergie dissipée par le frottement du liquide. Cette énergie doit être compensée afin de permettre au liquide de se déplacer. On l'exprime couramment sous la forme d'une pression, bien qu'elle soit en fait représentative d'une dissipation d'énergie et qu'elle apparaisse dans l'équation de Bernoulli comme une hauteur de colonne d'eau. Lorsque l'on est en présence de frottement, le théorème de Bernoulli ne s'applique plus et la charge n'est plus constante. On parle alors de perte de charge.

Un fluide réel, en mouvement, subit des pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge linéaire) ou sur les "accidents" de parcours (pertes de charge singulières).

Dans des conduites de faible longueur ayant plusieurs installations mineures, la perte de charge peut être plus importante que la perte de charge par frottement. Cependant, dans les réseaux de distribution d'eau, les pipelines sont longs et le terme de perte de charge mineure peut être utilisé sans confusion.

### 2.5.1. Expressions des pertes de charge

Lorsqu'on considère un fluide réel, 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.

La différence de pression  $p = p_1 - p_2$  entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine:

- Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle pertes de charge régulières ou systématiques.
- La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.); ce sont les pertes de charge accidentelles ou singulières.

### 2.5.2. Les pertes de charges linéaires ou régulières

Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de *frottements*. Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires caractérisées par une hauteur, notée  $k$ , et appelée *Rugosité*.

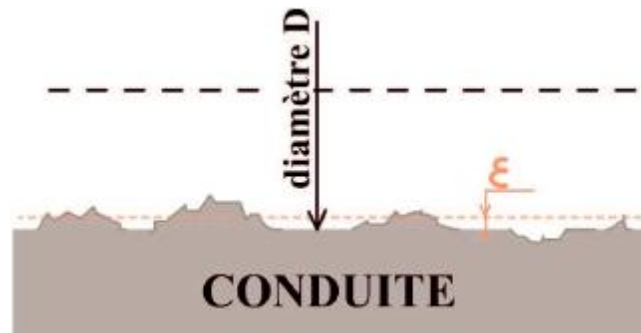


Figure 2.8 : La rugosité par rapport au diamètre de la conduite

Afin de comparer la rugosité par rapport au diamètre de la conduite, on introduit le rapport :

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \quad (2.6)$$

$\varepsilon$ : Rugosité Relative

Les pertes de charge régulières sont le plus souvent calculées à partir de l'équation de Darcy-Weisbach.

$$\Delta h = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} \quad (2.7)$$

Avec :

- $f$  - Coefficient de frottement (sans unité)
- $v$  - vitesse moyenne du fluide dans le tuyau (m/s)
- $L$  - longueur du tuyau (m)
- $D_h$  - diamètre hydraulique (m),
- $g$  - accélération de pesanteur ( $m/s^2$ )

#### 2.5.4. Les Pertes de Charge Locales ou Singulières

En plus de pertes de charge linéaires, la perte de charge singulière se produit localement au niveau d'une modification brusque de la nature physique de la section d'écoulement. L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme. La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent. Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par:

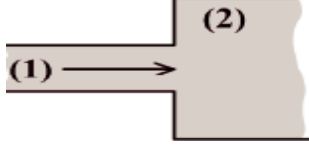
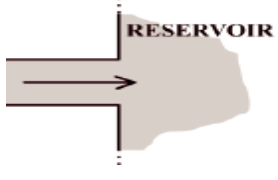
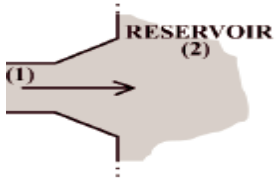
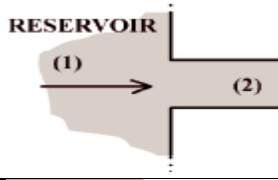
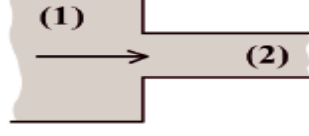
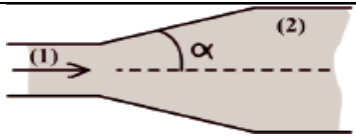
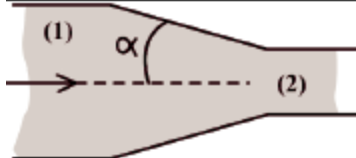
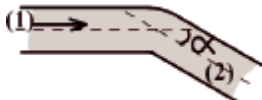
- un branchement de section de la conduite,
- un changement de direction (coude),
- un branchement ou raccordement,
- un dispositif de mesure et contrôle de débit.

Comme pour les pertes de charge linéaires, les pertes de charges singulières se traduisent par la relation:

$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

K est fonction des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds.

**Tableau 2.1:** Exemple de singularités présentes dans un écoulement.

FORME DE L'OBSTACLE	COEFFICIENT DE LA PERTE DE CHARGE SINGULIERE
	$k = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$
	$k \approx 1$ en pratique: $1,06 > k > 1,1$
	$k = 0,2 + 2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$
	$k \approx 0,5$
	$k = \left(\frac{1}{C_C} - 1\right)^2$ avec $C_C \approx 0,59 + 0,41 \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3$
	$k = 0,46 Re^{-0,06} \cdot \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^{0,5}$
	$k = a \cdot \left(\frac{1}{C_C} - 1\right)^2$ avec $a = \sin \alpha$ pour $\alpha < 90^\circ$ $a = 1$ pour $\alpha > 90^\circ$
 $R$ : rayon de courbure du coude	<b>LISSE :</b> $k = \left[0,13 + 1,85 \cdot \left(\frac{D}{R_C}\right)^{3,5}\right] \cdot \frac{\alpha}{90}$ <b>RUGUEUX:</b> $k = 0,42 \left(\frac{D}{R_C}\right)^{0,5}$

## 2.6. PHENOMENES HYDRAULIQUES

### 2.6.1. Le coup de bélier

Lorsqu'un liquide circule dans une canalisation à une vitesse de quelques mètres par seconde, il se produit dans certaines circonstances le phénomène du *coup de bélier*. C'est le cas notamment lors de la fermeture brutale d'une vanne ou de l'arrêt d'une pompe. Ces événements peuvent correspondre à des manœuvres normales sur la canalisation ou à des incidents (panne d'une pompe, erreur de manipulation des vannes, etc.) [17].

L'importance technique des coups de bélier est extrêmement grande. L'amplitude et la soudaineté des surpressions et dépressions qui sont mises en jeu peuvent détériorer la conduite ou les organes qui y sont branchés. Il est nécessaire par conséquent d'empêcher la production de telles perturbations ou du moins de les atténuer [7].

Le coup de bélier est un ensemble de phénomènes hydrauliques complexes provenant de la modification brutale du champ de vitesse et de pression dans une conduite. Le coup de bélier peut se produire, par exemple, dans le cas de la fermeture brutale d'une vanne :

1. Pour  $t=0$ , le profil de pression est stationnaire, avec une courbe de hauteur manométrique horizontale en raison de l'absence de pertes de charge par frottement la vitesse d'écoulement est stationnaire  $V_0$ .
2. La fermeture soudaine du robinet à l'extrémité de la tuyauterie entraîne une augmentation subite de la pression  $\Delta h$ , l'évasement de la tuyauterie qui l'accompagne étant indiqué ici. L'onde de surpression générée se déplace à la vitesse de propagation des ondes dans le sens contraire de l'écoulement stationnaire et s'accompagne de l'arrêt de la vitesse d'écoulement qui passe à  $V = 0$  dans la zone de surpression. Ce processus intervient dans le laps de temps  $0 < t < \frac{1}{2} T_r$ ,  $T_r$  étant le laps de temps dont a besoin l'onde pour parcourir le tuyau sur toute sa longueur dans les deux sens.
3. Quand  $t = \frac{1}{2} T_r$ , l'onde de surpression est arrivée au réservoir. Là, du fait du niveau constant, aucune augmentation de pression ne peut arriver. L'onde de pression est réfléchiée par changement de signe. En l'occurrence, c'est la vitesse d'écoulement qui change de signe, elle se dirige maintenant vers le réservoir.
4. Une onde de dépression  $-\Delta h$  se dirige vers le robinet et atteint celui-ci au temps  $t = T_r$ . Elle est accompagnée d'une modification de la vitesse qui passe à la valeur  $-V_0$ .
5. Au droit du robinet fermé, la vitesse se modifie et passe de la valeur  $-V_0$  à la valeur  $V = 0$ . Il en résulte un saut de pression négatif de  $-\Delta h$ .
6. L'onde de dépression  $-\Delta h$  se déplace dans l'intervalle  $T_r < t < \frac{3}{2} T_r$  de nouveau vers le réservoir, tandis que, parallèlement à cette onde, la valeur  $v$  devient égale à 0.
7. Au temps  $t = \frac{3}{2} T_r$  l'onde atteint le réservoir et la pression repasse à la hauteur manométrique du réservoir.

8. Dans l'intervalle  $\frac{3}{2}T_r < t < 2T_r$ , l'onde de surpression provenant du réservoir se déplace de nouveau vers le robinet à opercule, tandis que, parallèlement à cette onde,  $V$  redevient  $V_0$ .
9. Quand  $t = 2T_r$ , l'état initial à  $t = 0$  est de nouveau atteint et le processus peut se dérouler une nouvelle fois.

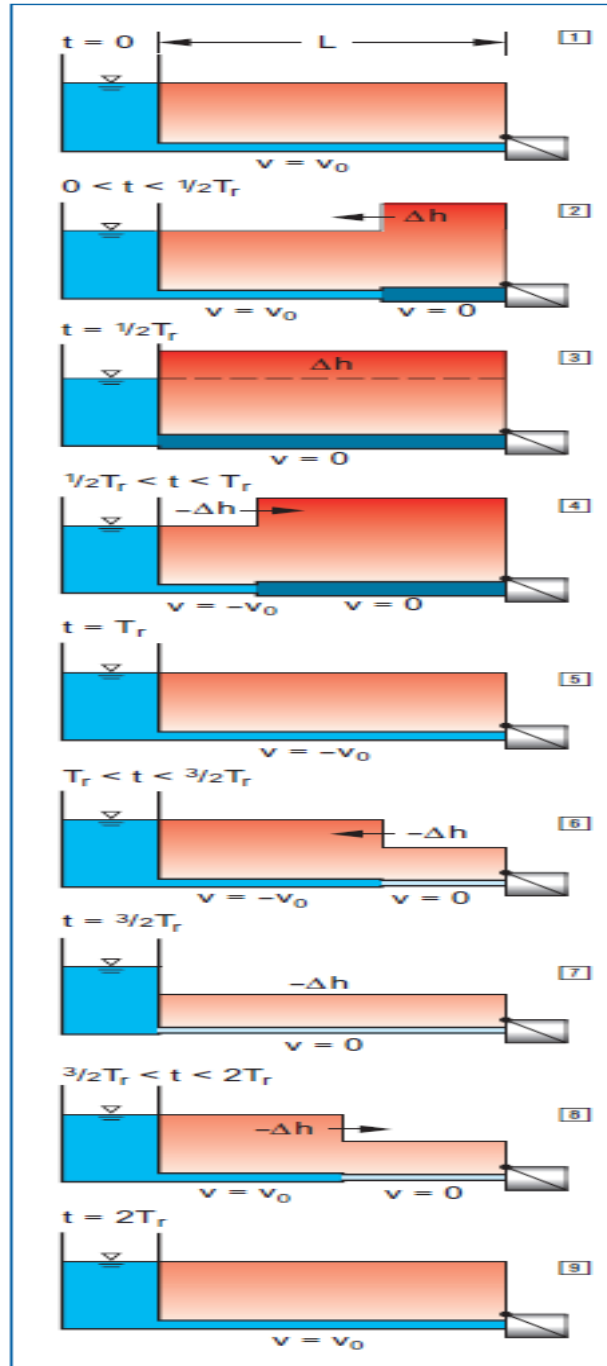


Figure 2.9 : Le coup de bélier

Le phénomène est complexe et difficile à quantifier mais quelques règles se dégagent.

Un coup de bélier sera d'autant plus fort que :

- la vitesse de l'eau est élevée ;
- la longueur de la canalisation est grande ;
- le diamètre de la canalisation est petit ;
- la fermeture de l'eau est rapide.

### 2.6.2. Cavitation

La cavitation désigne la formation de bulles de vapeur dans les parties basse pression d'un système et l'effondrement subséquent de ces bulles quand elles atteignent les parties hautes pression.

La pression doit baisser sous la pression de vapeur qui correspond à la température du liquide pour que l'ébullition commence, et elle doit ensuite augmenter au-dessus de la pression de vapeur pour provoquer l'effondrement des bulles.

Quand les bulles s'effondrent, les vitesses d'implosion et des pressions très élevées sont générées. Ce phénomène a des conséquences importantes et nombreuses qui peuvent se manifester sous forme de [18]:

- vibrations, avec toutes leurs conséquences, par exemple fatigue du matériel;
- piqûres dues au martèlement répété;
- bruit ;
- instabilités de fonctionnement et chutes des performances.

Les endroits les plus critiques où peut se produire la cavitation dans un circuit d'eau sont les réductions et les élargissements soudains de la section transversale, et les changements d'écoulement du flux.

La figure (2.14) illustre une réduction soudaine de la section transversale d'une conduite. On y montre la distribution de pression dans une buse où  $P_1$  est la pression du fluide en amont,  $P_2$  la pression en aval et  $P_{vap}$  la pression de vapeur du fluide.

Les bulles de vapeur se produiront dans la région du tuyau où la pression est inférieure à la pression de saturation. Les bulles s'effondreront plus loin dans le tuyau où la pression augmente au-dessus de la pression de saturation.

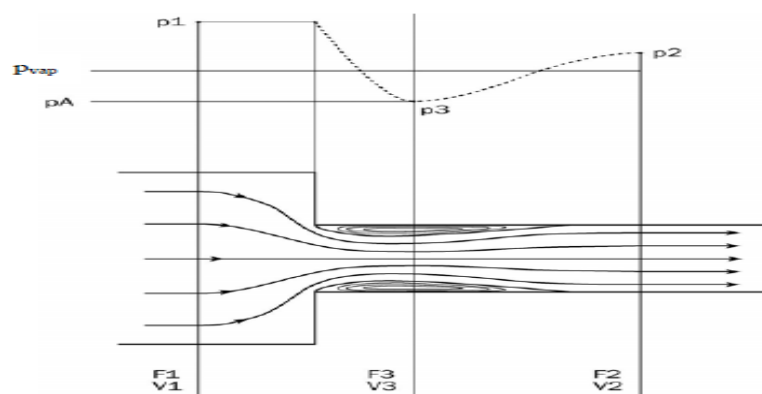


Figure 2.10 : La réduction soudaine de la section transversale d'une conduite



La cavitation ne cause pas nécessairement des dommages, même si elle produit du bruit et des vibrations d'intensité moyenne. Les dommages dépendent de l'importance de la cavitation (c.-à-d. le nombre et la taille des bulles formées) et de l'endroit où elles s'effondrent. Quand la cavitation est prononcée, c'est que de nombreuses bulles s'effondrent à la surface, ou près de celle-ci. Ce phénomène accélère les piqûres et produit des vibrations élevées. Dans les cas extrêmes, la vibration peut détruire très rapidement une tuyauterie (en quelques minutes ou quelques heures).

*Chapitre 3 : Etude de fiabilité et  
estimation du coût optimal*

### **3.1. INTRODUCTION**

Le système de distribution a pour objectif de fournir l'eau en quantité et qualité satisfaisantes, à des conditions spécifiques, sans nuisance pour le système et pour l'environnement. En outre, l'accomplissement de la mission doit garantir la non-nuisance aux biens et aux personnes. La simulation et l'analyse jouent un rôle important dans la planification et la conception des réseaux et des systèmes de distribution d'un fluide, permettant au concepteur d'optimiser le réseau et les canalisations. Elles permettent ainsi de prévoir le comportement du système de réseau de distribution dans différentes conditions.

L'optimisation de dimensionner des nouveaux réseaux (diamètre et longueur) cherche à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique. L'intérêt d'optimiser la longueur de réseau de distribution et les diamètres des conduites est de minimiser le coût de transport d'eau potable.

Il n'existe pas de règles précises pour la simplification de réseau, mais certaines sont fréquemment utilisées:

- Suppression des conduites de petits diamètres ou de petites longueurs
- Suppression des conduites en antenne
- Suppression des nœuds intermédiaires
- Agglomération de plusieurs abonnés en un même nœud
- Concaténation de conduites de même diamètre et même matériau
- Distinction entre abonnés de nature différente : domestique, industriel, autres.

L'analyse économique porte sur l'ensemble des coûts liés aux réseaux d'AEP et aux conduites à savoir les coûts directs: d'installation des conduites, d'inspection, de réparation, de maintenance et de remplacement.

La conception optimale des réseaux de distribution d'eau est un problème réel qui consiste à trouver le meilleur moyen de transporter l'eau à partir des sources pour les utilisateurs. De nombreux chercheurs ont rapporté des algorithmes pour minimiser le coût du réseau de distribution en utilisant une grande variété de techniques, telles que la programmation linéaire, programmation non linéaire, mais sans altérer la performance et la fiabilité des réseaux de transport [19].

### **3.2. ETUDE DE LA FIABILITE HUDRAULIQUE DES RESEAUX**

Les premiers travaux menés par (Shamir & Howard, 1979), (Walski & pellicia, 1982) se sont intéressés à l'impact de la détérioration structurelle sur les coûts de maintenance et la détermination d'un optimum économique définissant un seuil pour le renouvellement des conduites. Todini (2000) est revenu sur cette approche et a identifié des insuffisances à une approche purement économique. Un réseau construit et géré en fonction d'un optimum économique peut ne pas répondre à des contraintes techniques. Des problèmes de dimensionnement des conduites ou de déficience de pression sont relevés. L'auteur revient sur l'importance de la topologie du réseau dans la prise de décision, en comparant la fiabilité d'un

réseau maillé et celle d'un réseau ramifié. Cependant, la topologie du réseau n'est pas seulement dictée par le gestionnaire ou le concepteur du réseau d'eau mais respecte des contraintes liés à la disposition des usagers, les routes, la présence d'obstacles naturels, la présence d'autres réseaux : gaz, électricité. Todini a introduit la notion de résilience qui traduit la capacité du réseau à pallier une défaillance ou une rupture et limite son impact sur le fonctionnement du réseau. Pour l'auteur le réseau doit être en mesure de faire face à des incidents dont l'effet est temporaire dans le temps mais pouvant engendrer des dégradations importantes. Même si la notion de résilience n'est pas évoquée sous ce nom, on y fait souvent allusion. Il apparaît que la fiabilité du réseau dépend de sa capacité à limiter l'incidence d'un événement sur son fonctionnement. Ormsbee & Kessler (1990) définissent la redondance comme mesure de la fiabilité. Ils définissent deux types : typologique et hydraulique. La redondance typologique assure l'existence d'un chemin (physique) de la source au nœud de consommation. La redondance hydraulique assure la capacité d'un chemin redondant (autre) qui fournit une pression adéquate pour les demandes au niveau des nœuds pour des conditions de charges spécifiques. Pour Xu et al (1999) la fiabilité du réseau est mesurée par sa capacité à assurer la demande aux nœuds à une pression minimale requise. La fiabilité dépend de la défaillance des organes hydrauliques (casses des conduites, arrêt des pompes, fuites dans le réseau), de la diminution de la capacité hydraulique du réseau en raison de la détérioration de conduites (dépôts sur les parois, augmentation de la rugosité) et de la variation de la demande et son évolution dans temps qui peuvent remettre en cause le dimensionnement du réseau et donc sa performance [6].

Il apparaît que la fiabilité hydraulique du réseau dépend de sa capacité à assurer la desserte en eau des usagers en quantité suffisante et avec une pression minimale requise. Le système doit être en mesure de pallier les impacts liés à la défaillance des organes hydrauliques que comportent le réseau et la baisse de la capacité hydraulique liée à la détérioration des conduites. Afin d'accroître la fiabilité, il est nécessaire d'assurer une pression suffisante dans le réseau, soit supérieure à la pression minimale nécessaire à la desserte des abonnés.

### 3.2.1. Indices de fiabilité hydraulique

En s'inspirant des indices relevés dans la littérature, je propose deux indices permettant de mesurer le rôle d'une conduite donnée dans l'acheminement de l'eau.

#### ➤ Indice de Criticité Hydraulique

Cet indice permet de comparer la quantité d'eau desservie dans l'ensemble du réseau avant et après l'indisponibilité d'une conduite donnée. Afin de calculer l'indice de criticité hydraulique (ICH) d'une conduite  $j$ , il est nécessaire de calculer les pressions et demande aux niveaux de tous les nœuds de consommation en fonction des paliers susmentionnés. L'équation ci-dessous définit l'expression de calcul du ICH pour un réseau de  $n$  nœuds :

$$ICH_j = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Init} - Q_{Nouv})}{\sum_{i=1}^n Q_{Init}} \quad \text{avec } ICH \in ]0,1] \quad (3.1)$$

$Q_{Init}$ : demande totale sur l'ensemble du réseau ;

$Q_{Nouv}$ : consommation réelle au nœud.

ICH<sub>j</sub> est compris entre 0 et 1, plus la valeur est proche de 1, plus la conduite est importante dans le réseau. Si la valeur de (ICH) est voisine de 0, l'importance de la conduite est faible.

➤ **Indice de déficience aux nœuds**

Cet indice traduit l'impact de l'indisponibilité d'une conduite donnée sur la desserte en eau des abonnés. Il permet de recenser l'ensemble des nœuds de consommation où la desserte n'est pas assurée.

Cette procédure permet d'identifier l'ensemble des nœuds non desservis. Une fois ces nœuds identifiés, pour chaque conduite élaguée nous calculons le rapport entre le nombre de nœuds non desservis et le nombre de nœuds total constituant le réseau [6].

$$IDN_j = \frac{\text{Nombre de noeuds non desservis}}{\text{Nombre total de noeuds}} \quad (3.2)$$

### 3.3. ALGORITHMES GENETIQUES DANS LE DOMAINE D'AEP

Plusieurs travaux ont été menés en utilisant les algorithmes génétiques pour des problèmes d'optimisation dans le domaine de l'alimentation en eau potable (AEP). Ces travaux portent essentiellement sur le dimensionnement des installations et organes du réseau, ainsi que sur la gestion de la maintenance et la réhabilitation des réseaux AEP [4, 20, 6, 21].

#### 3.3.1. Les algorithmes génétiques et le dimensionnement des réseaux AEP

Le dimensionnement des conduites des réseaux d'alimentation en eau potable se traduit par la détermination des caractéristiques hydrauliques des conduites: diamètre et rugosité. D'autres applications portent sur le dimensionnement des pompes de manière à réduire les coûts liés à l'énergie. Dandy & al (1996) présentent une approche d'optimisation pour la conception des réseaux AEP, basée sur les algorithmes génétiques. Ils présentent une application sur le problème du Tunnel de New Yorks. Le travail propose des améliorations à l'utilisation antérieure d'algorithmes génétiques en apportant des modifications sur la définition des variables de décision, les opérateurs de mutation et le codage en Gray. L'approche proposée cherche à partir d'une topologie donnée du réseau et une demande de base connue, de proposer une combinaison adéquate des dimensions de conduites afin de minimiser les coûts de conception du réseau. Les contraintes considérées sont d'assurer la continuité du flux, le respect des consignes hydrauliques en termes de pression, respect de certaines dimensions pour des conduites spécifiques.

Savic & Walters (1997) présentent le développement d'un modèle GANET basé sur l'utilisation d'un algorithme génétique. Le modèle présenté permet d'assurer une conception dite optimale du réseau AEP. Le modèle considère un objectif économique qui exprime le coût d'acquisition de la conduite, ce coût est fonction du diamètre et de la longueur de la conduite. Des objectifs techniques sont considérés : la satisfaction de la demande aux nœuds de consommation et assurer une pression minimum de service. Les auteurs utilisent un algorithme génétique simple, la variable de décision représente le diamètre de conduite à utiliser, le codage utilisé permet de représenter sous forme de chromosome les dimensions de

diamètre à appliquer pour chaque conduite. Abebe (1998) propose une approche de dimensionnement des réseaux, permettant de déterminer les diamètres des conduites pour une structure donnée du réseau, avec des contraintes portant sur la pression de service et la demande au niveau des nœuds de consommation. Le modèle est appliqué sur le problème de dimensionnement du tunnel de New York. Devi & al (2004) présentent un algorithme génétique basé sur une approche multi objectif pour le dimensionnement des réseaux AEP. Les objectifs considérés sont la minimisation du coût de conception et l'accroissement de la fiabilité du réseau [22, 4, 6, 31].

### **3.3.2. Les algorithmes génétiques et le renouvellement des réseaux AEP**

Halhal & al (1997) discutent de l'importance des travaux de maintien en service des réseaux AEP à travers des travaux de réhabilitation ou de remplacement de conduite. Le choix de la meilleure alternative assurant une amélioration du réseau tout en respectant une contrainte budgétaire ne peut être obtenu par les approches d'optimisation classique, ils adoptent une approche multiobjectif utilisant le concept d'optimalité au sens de Pareto qui cherche à trouver un compromis entre un ensemble d'objectifs : technique à travers la définition de fonctions bénéfiques et un objectif purement économique à travers une fonction coût. Les auteurs proposent un outil d'aide à la décision basée sur l'utilisation d'algorithme génétique: Structured Messy Genetic Algorithm (SMGA) qui permet de coder sous forme de chromosome la conduite et l'alternative à adopter sur un même gène, l'algorithme génétique est combiné à un simulateur hydraulique adapté d'Epanet. L'approche proposée concerne exclusivement les conduites AEP. En fonction des ressources disponibles, les auteurs proposent d'améliorer la performance du réseau par l'augmentation de la capacité hydraulique du réseau en effectuant des travaux de nettoyage, réhabilitation, remplacement ou maillage. Augmenter l'intégrité du réseau en réparant les défaillances sur les conduites et améliorer la qualité de l'eau en nettoyant ou réhabilitant les canalisations [22, 6, 34].

## **3.4. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES (SIG)**

Le traitement de l'information assisté par ordinateur rend possible l'association d'informations de divers types (géographique, technique, et économiques) nécessaires pour la gestion du réseau d'adduction d'eau d'une ville donnée. L'utilisation d'un SIG permet d'accéder en temps et en heure à l'information sur la situation du réseau.

Les SIG englobent en général quatre sous systèmes (figure 3.1) [21, 5] :

- un sous-système pour l'acquisition des données géographiques qui peuvent être d'origines diverses (environnement de la conduite avec les caractéristiques des sols, la géologie...);
- un sous-système de gestion de données pour le stockage, l'organisation et la recherche de données ;
- un sous-système d'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation des données géographiques ;

- et enfin un système de présentation des résultats soit sous forme de carte par l’affichage graphique à l’écran ou par sorties cartographiques sur papier, soit sous forme de listes ou de tableaux.

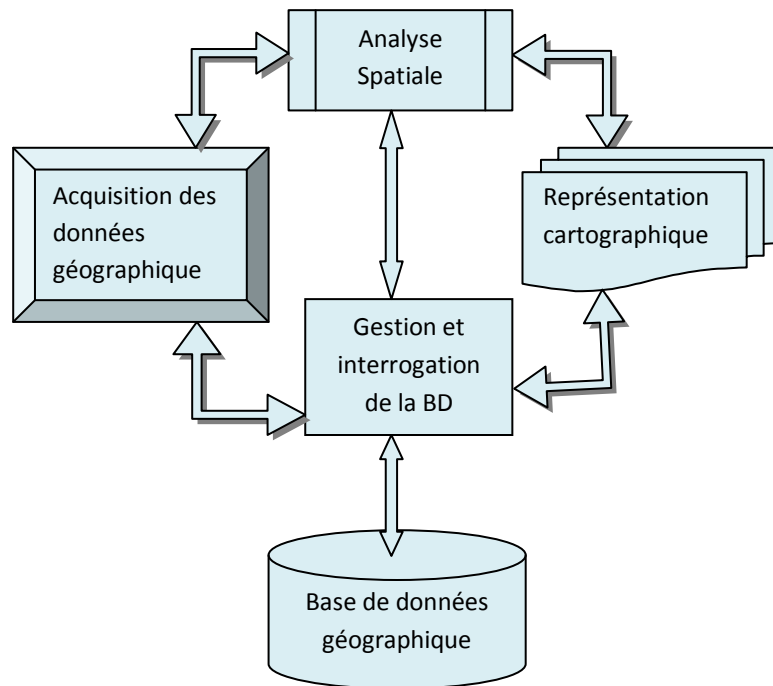


Figure 3.1 : Structure d'un Système d'Information Géographique

Les SIG sont largement utilisés dans divers domaines, comme l’environnement, et la gestion des réseaux urbains.

Les données nécessaires pour l’application de « SIG » sont :

- la topologie,
- la géologie du sol,
- la sismique,
- les réseaux d’eau potable et d’assainissement avec les plans et les descriptifs des infrastructures.

### 3.5. THEORIE DES GRAPHES ET TOPOLOGIE DES RESEAUX

La modélisation des réseaux sous forme de graphes est généralement très intuitive. D’ailleurs, la théorie des graphes a débuté avec les travaux d’Euler au XVIII<sup>ème</sup> siècle et trouverait donc ses origines dans l’étude d’un réseau (les ponts de Königsberg).

La résolution des problèmes de distribution de fluide de n’importe quelle topologie nécessite de trouver la représentation graphique du réseau qui permet d’effectuer les calculs de la manière la plus simple possible. La théorie des graphes permet la représentation explicite de la structure du réseau au moyen des propriétés d’incidence des éléments du réseau.

Un réseau de distribution d’eau potable est un ensemble de conduites, pompes, vannes, régulateurs, réservoir,...etc., connectés d’une manière spécifique. Il est utilisé pour la

distribution de fluides et est caractérisé par le débit d'écoulement du fluide et la perte de charge dans chaque tronçon ainsi que la pression au niveau de chaque nœud (point d'intersection). La Figure 3.2 montre le schéma d'un réseau de distribution et la Figure 3.3 sa représentation graphique dans laquelle les sommets sont des points (ou plutôt des cercles portant le numéro du sommet) et les arcs des segments de droites munies d'une orientation permettant de différencier l'extrémité initiale de l'extrémité finale.

Dans la partie optimisation de la configuration, l'élément de base dans la décision finale concernant le maillage d'un est la matrice d'adjacence du réseau. De là, la représentation graphique est primordiale et les notions se rapportant aux éléments d'un graphe sont utiles [15, 23].

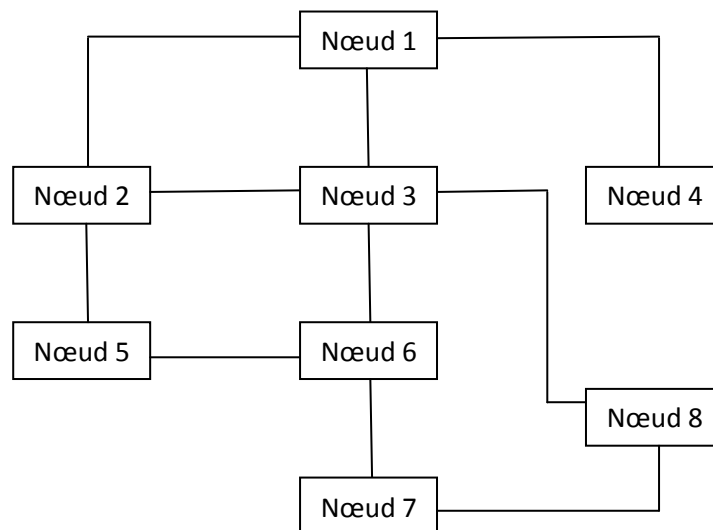


Figure 3.2: Schéma d'un réseau de distribution de fluide

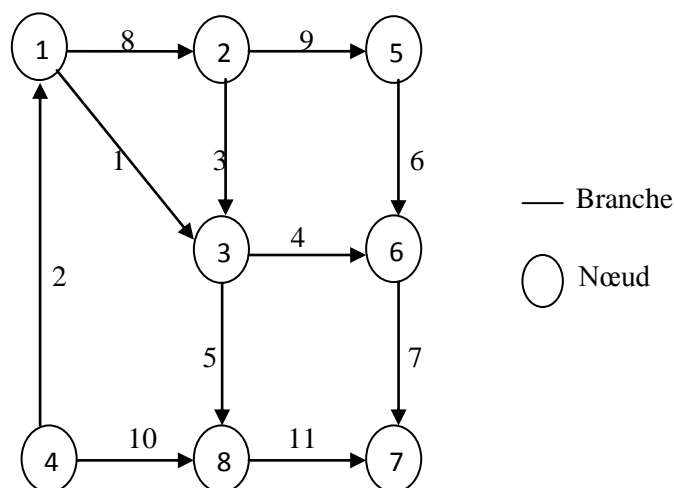


Figure 3. 3: Représentation graphique du réseau de la Figure 3.1



### 3.5.1. Théorie des graphes

Un graphe non orienté  $G_n = (V, E)$  est composé d'un ensemble d'objet  $V = [v_1, v_2, v_3, \dots]$  dont les éléments sont appelés nœuds et d'un autre ensemble  $E = [e_1, e_2, e_3, \dots]$  dont les éléments sont appelés branches, de telle sorte que chaque branche  $e_k$  est identifiée par la paire non ordonnée de nœuds  $(v_i, v_j)$ . le graphe non orienté illustré dans la Figure 3.4 a huit nœuds numérotés de 1 à 8 et 11 branches, il peut être exprime comme  $G_n = (V, E)$  :

$$V = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]$$

$$E = [(1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,5), (3,6), (3,8), (4,8), (5,6), (6,7), (7,8)]$$

Cette description représente la propriété la plus importante du graphe. Premièrement l'ensemble des nœuds et celui des branches ne sont pas classés d'une manière particulière et deuxièmement, une paire de nœuds identifiant une certaine branche n'est pas orientée.

Pour la simulation des réseaux de fluide, on suppose que les nœuds (ou sommets) représentent les points sur les canalisations ou une discontinuité existe :

- Intersection de canalisation
- Changement de section
- Point d'injection de fluide (source)
- Point de consommation de fluide (puit)

On distingue les nœuds maillés (faisant parties d'une maille) et les nœuds non maillés. Alors que les branches représentent les conduites elle-même munies d'un sens bien défini. Cela signifie qu'un graphe d'un réseau de fluide doit être un graphe orienté noté par  $G_d$ , c'est-à-dire que chaque branche a une paire ordonnée de nœuds  $(v_i, v_j)$  (Figure 3.4).

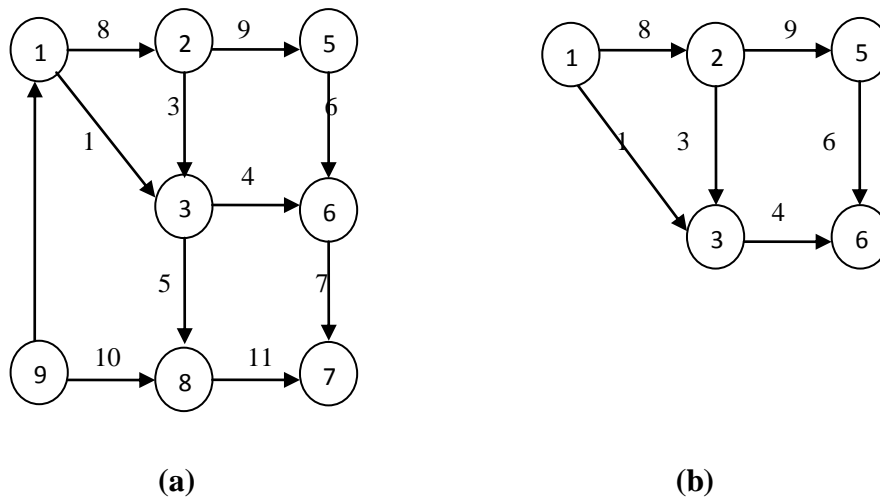


Figure 3.4 : Graphe et sous graphe orientés

Les définitions les plus marquantes et les plus utiles sont indiquées ci-après.

*Degré d'un nœud* : Le nombre de branches incidentes au nœud  $v_i$ , est appelé le degré du nœud et représenté par  $d(v_i)$ .

*Graphe régulier* : Un graphe dans lequel tous les nœuds sont du même degré est appelé un graphe régulier.

*Chemin* : Un chemin dans un graphe est défini comme une séquence finie d'une alternance de nœuds et de branches qui commence et se termine par un nœud. Une branche donnée ne doit pas apparaître plus d'une fois dans un chemin simple.

*Chemin ouvert* : Un chemin dont le nœud terminal est différent du nœud de départ est appelé un chemin ouvert.

*Tronçon ouvert* : Un tronçon ouvert, est un chemin ouvert qui n'utilise pas le même nœud plus d'une fois.

*Tronçon maillé* : Un tronçon maillé (ou une maille) est un chemin fermé qui n'utilise pas le même nœud plus d'une fois excepté pour le nœud initial qui est le même que le nœud final.

*Longueur d'un tronçon* : Le nombre de branches dans un tronçon est appelé la longueur du tronçon.

*Arbre* : Un arbre est l'ensemble des branches, joignant tous les nœuds du graphe et ne formant pas de mailles. On peut bien sûr construire, pour un graphe donnée, plusieurs arbres. Si un réseau contient plus d'un nœud de référence, alors un ensemble d'arbres égal au nombre de nœuds de référence est construit. Chaque arbre relie un ensemble de nœuds via un circuit unique vers un nœud de référence. Un nœud donné ne peut pas appartenir à plus d'un arbre. Un graphe  $G_s$  est un sous graphe du graphe  $G$  ( $G_d$  ou  $G_n$ ) si tous les nœuds et toute les branches de  $G_s$  sont inclus dans  $G$ .

Par exemple le graphe montré dans la Figure 3.4(b) est sous graphe illustré dans la Figure 3.4(a). Un graphe non orienté  $G_n$  est dit connecté s'il existe un chemin entre n'importe quelle paire de nœuds du graphe. Un graphe orienté  $G_n$  est dit connecté si le graphe non orienté qui lui est associé est connecté. Autrement, le graphe est déconnecté. Il peut être vu qu'un graphe déconnecté est composé de deux ou plusieurs sous graphe. Un arbre est un graphe connecté  $G_d$  sans mailles. Il existe un seul chemin entre chaque pair de nœuds dans un arbre.

Un arbre  $T$  est appelé arbre d'un graphe connecté  $G_n$  si  $T$  est sous graphe de  $G_n$  et contient tous ses nœuds. Par exemple le sous graphe tracé en gras dans la Figure 3.4 est un arbre du graphe illustre. Les branches qui appartiennent à un arbre  $T$ , sont appelées branches arborescentes et celles qui n'appartiennent pas à  $T$  sont appelées des cordes (ou branches de connexion). Evidement, les branches arborescentes et les cordes sont définies pour un arbre donné.

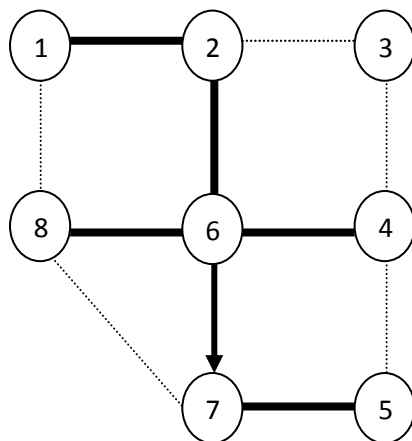


Figure 3.5 : Arbre d'un graphe

Il est parfois commode de considérer un graphe connecté  $G_n$ , comme l'union de deux sous graphes  $T$  et  $\bar{T}$  c'est-à-dire :

$$T \cup \bar{T} = G_n$$

$T$  étant l'arbre et  $\bar{T}$  dans  $G_n$ . Puisque le sous graphe  $\bar{T}$  est le vecteur des cordes, il est tout à fait convenable de l'appeler ensemble des cordes (branches de connexion) ou co-arbre de  $T$ . Un arbre doit toujours être un graphe connecté. Un co-arbre peut être un graphe connecté ou un graphe non connecté. En ajoutant une corde à  $T$ , une seule maille est créée.

Une fois l'arbre sélectionné, les branches restantes doivent être des branches de connexion et ainsi, les mailles sont automatiquement définies. Il en suit que si un graphe a  $NN$  nœuds, et  $NR$  nœuds de référence, alors l'ensemble des arbres contiendra  $(NN-NR)$  branches arborescentes de  $NM$  maille calculé suivant la formule :

$$NM = NB - NN + NR \quad (3.3)$$

Le nombre total de nœuds dans un réseau est donné par :

$$NN = NR + ND \quad (3.4)$$

Par conséquent l'équation devient :

$$NM = NB - ND \quad (3.5)$$

Dans l'analyse d'un réseau, numéroter et orienter un graphe est nécessaire pour faciliter :

- L'entrée des données du réseau dans un programme de calcul,
- La génération de l'arbre et les mailles du réseau.

La longueur la plus courte d'un chemin élémentaire (c'est-à-dire le nombre de branches dans le chemin le plus court) entre deux nœuds  $v_i$  et  $v_j$  dans un graphe connecté  $G_d$  est appelé distance  $d(v_i, v_j)$ .

### **3.5.2. Topologie d'un réseau**

Une matrice est le moyen le plus simple et le plus utile pour représenter un graphe d'un réseau  $G$ . 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 un ensemble de matrices basées sur sa topologie. Considérons le réseau représenté par le graphe de la Figure 3.6. Il est composé d'un nœud source (nœud de référence = nœud 1), sept nœuds puits (nœuds 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8) et onze conduites ou branches (branche 1 à 11).

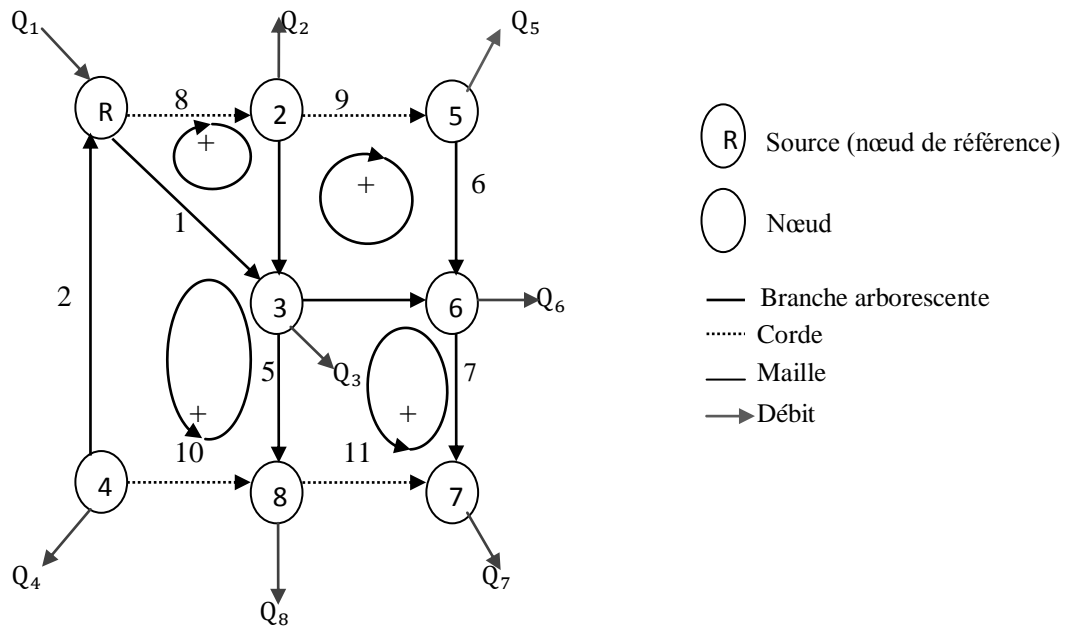


Figure 3.6 : Eléments du graphe d'un réseau

L'analyse d'un réseau nécessite le choix d'au moins un nœud de référence afin de faciliter la génération de l'arbre. Mathématiquement, le nœud de référence est désigné comme le nœud indépendant. Toutes les quantités des nœuds et des branches en sont dépendantes. La pression au nœud source est habituellement connue et ce dernier est souvent utilisé comme le nœud référence. Cependant, tout nœud du réseau peut avoir sa pression définie et peut être utilisé comme nœud de référence.

Les nœuds en charge sont des points où les débits sont placés sur le réseau. Ces débits peuvent être positifs, négatifs ou nuls.

L'interconnexion d'un réseau peut produire un chemin fermé connu comme une maille. Dans la Figure 3.6 la maille 1 est composé des branches 8, 3, 1, la maille 2 est composé des branches 9, 6, 4, 3, la maille 3 est composée des branches 1, 2, 10, 5, la maille 4 est composée des branches 11, 7, 4, 5, une cinquième maille composée des branches 8, 3, 5, 10, 2 peut être définie, mais elle est redondante si les mailles 1, 2, 3, 4 sont déjà définies. Les mailles 1, 2, 3, 4 sont indépendantes et représentent l'ensemble fondamental des mailles de ce réseaux, alors que la cinquième ne l'est pas, car elle peut être dérivée des mailles 1 et 3 en éliminer la branche commune 1.

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. De la même façon un sens est donné à chaque maille suivant le sens de la branche de connexion.

### 3.5.2.a. La matrice d'incidence branche-nœud

Le raccordement d'un réseau peut être décrit par une matrice, appelée matrice d'incidence branche- nœud  $A = [a_{ij}]$ . Cette matrice est rectangulaire, avec un nombre de lignes  $n$  égal au

nombre de nœuds (nœuds références y compris), et un nombre de colonnes  $m$  égal au nombre de branches dans le réseau.

L'élément  $a_{ij}$  dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  de la matrice correspond au nœud  $i$  et à la branche  $j$ , est défini comme suit:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{si la branche } j \text{ est vers le nœud } i \\ -1 & \text{si la branche } j \text{ est sortant du nœud } i \\ 0 & \text{si la branche } j \text{ n'est pas connectée au nœud } i \end{cases}$$

Une autre matrice d'incidence peut être créée de la matrice d'incidence branche-nœud, elle est la même seulement elle ne contient pas la ligne correspondant au nœud référence. Cette matrice est appelée *matrice d'incidence réduite branche-nœud*  $A_1 = [a_{ij}]_{n1 \times m}$  où  $n1$  est le nombre de nœuds de réseau en excluant tous les nœuds références, l'élément  $a_{ij}$  de la matrice  $A_1$  est définie de manière identique que les éléments de la matrice d'incidence  $A$  [24].

### 3.5.2.b. La matrice d'incidence branches-maillles

Les mailles d'un réseau peuvent être représentées par une matrice d'incidence branches-maillles. Cette matrice est rectangulaire, avec un nombre de lignes  $k$  égal au nombre de mailles indépendantes, et avec un nombre de colonnes égal au nombre de branches dans le réseau ( $m$ ). L'élément  $b_{ij}$  dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  de la matrice  $B$  correspondent à la maille  $i$  et à la branche  $j$ , et défini comme suit:

$$b_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{si la branche } j \text{ à le même sens que la maille } i; \\ -1 & \text{si la branche } j \text{ à sens opposé à celui de la maille } i; \\ 0 & \text{si la branche } j \text{ ne fait pas partie de la maille } i. \end{cases}$$

## 3.6. OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN RESEAU

Pour optimiser la construction d'un réseau de transport et/ou de distribution d'un fluide, il est nécessaire de formuler correctement et complètement le modèle mathématique du système. Pour minimiser le coût de conception d'un réseau on doit en premier lieu formuler le coût de réseau en fonction des paramètres qui ont une influence directe sur ce dernier. Généralement le coût d'un réseau est proportionnel à la quantité du métal utilisée dans la conception, c'est-à-dire qu'il est directement proportionnel aux dimensions des conduites (Diamètre, épaisseur, longueur) et comme l'épaisseur est fonction du diamètre le coût sera seulement une fonction de deux variables : le diamètre et la longueur des conduites.

Le problème d'optimisation est traité en deux étapes [25, 35]:

1. Optimisation de la longueur totale du réseau, et de là minimisation des longueurs des conduites.
2. Optimisation du choix des diamètres.

### 3.6.1. Optimisation de la longueur

Le problème d'optimisation de la longueur totale des réseaux de distribution d'eau étant un problème de connectivité. Le travail consiste à relier les nœuds de demande entre eux et aux différentes sources en essayant de minimiser la longueur totale du réseau proposé et de là

minimiser le coût de conception. Les méthodes de résolution utilisant, généralement l'un des trois principaux algorithmes [15] :

### **3.6.1.1. Les algorithmes génétiques (AG)**

Les AG sont des méthodes de plus en plus utilisés dans les problèmes d'optimisation le fonctionnement (longueur, diamètre) d'un réseau [15, 20, 6, 26, 27, 28, 29]. Ce sont des techniques d'optimisation basées sur le principe de l'évolution naturelle : une population initiale d'individus, initialisée aléatoirement évolue selon le principe Darwinien de la survie du plus adapté, le meilleur ayant plus de chance de survivre alors que le moins bien adapté aura tendance à disparaître (Goldberg, 1989). De nouveaux individus sont créés à chaque génération en utilisant des opérateurs de variation comme le croisement et la mutation. La probabilité de survie d'un nouvel individu va dépendre de sa fonction d'adaptation ("fitness"). Le choix d'une technique d'optimisation mathématique, comme les AG, pour résoudre le problème du remplacement des conduites ou conception d'un réseau s'appuie essentiellement sur le fait qu'il existe un grand nombre de combinaisons possibles à évaluer et tester afin de pouvoir identifier celles dont les coûts sont les plus faibles.

La difficulté d'utilisation des ces algorithmes réside dans la définition du codage à utiliser pour traduire les variable de décision du problème, les probabilités de croisement et de mutation ainsi que la fonction objectif à considérer et les contraintes liés au problème.

Un algorithme génétique simple, qui donne des résultats dans bon nombres d'applications, est Composé de trois opérations :

- ✓ reproduction
- ✓ croisement
- ✓ mutation

### **3.6.1.2. L'algorithme de l'arbre minimal**

L'objectif de l'algorithme de l'arbre minimal [15, 30, 31] est de trouver les branches (connexion) d'un réseau qui relie tous les nœuds les uns aux autres avec une longueur totale minimale.

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 nœuds déjà connectés. Les pas d'itération sont comme suit:

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

### **3.6.1.3. L'algorithme du chemin le plus court**

Le but de l'algorithme du chemin le plus court est de trouver la connexion la plus petit entre une source et une destination dans un réseau, tel que le nœud source et les nœuds de demande dans un système de distribution d'eau [15, 30, 32, 33].

Le but de chaque pas d'itération est de trouver parmi tous les nœuds non connectés (les nœuds pour lesquels le chemin le plus court à été évalué sont appelés des nœuds connectés, les autres des nœuds non connectés) celui le plus proche de la source. Les étapes à chaque itération sont:

1. Enumérer tous les nœuds connecté en relation avec des nœuds non connectés;
2. Sélectionner chaque nœud connecté de la liste des nœuds voisins non connectés le plus proche. S'il existe plusieurs nœuds avec une distance minimale égale les séparant du même nœud connecté, ils sont tous pris en considération;
3. Calculer pour chaque nœud non connecté sélectionné la distance minimale à partir de la source en faisant la somme de la distance de connexion et la distance de la source au nœud connecté «relié»;
4. Choisir le nœud avec la distance la plus courte à partir de la source comme étant le nouveau nœud connecté. S'il existe plusieurs nœuds avec une distance minimale égale, ils sont tous sélectionnés.

#### 3.6.1.4. Approche numérique

Il est supposé que la fonction coût à minimiser est basée sur les longueurs des conduites, et prend la forme :

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^N C_{Li} L_i \quad (3.6)$$

$C_{Li}$  est le coût par unité de longueur pour la conduite  $i$ ,  $L_i$  sa longueur et  $N$  le nombre de conduites constituant le réseau. Puisque les coûts sont des quantités fixes, Les variables de décision deviennent les longueurs des conduites. La fonction objective est ainsi simplifiée :

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^N L_i \quad (3.7)$$

La fonction objective (3. 6) est soumise aux contraintes :

- pour chaque source, la contrainte de la disponibilité est :

$$\sum Q_{out} \leq Q_{cap} \quad (3.8)$$

$Q_{out}$  sont les débits sortant de la source vers les nœuds de demande reliés à la source ;  
 $Q_{cap}$  est la capacité de la source ou la quantité de fluide disponible au nœud source.

- pour chaque nœud de jonction la contrainte de fiabilité doit être satisfaite :

$$\sum NC_i \geq 2 \quad (3.9)$$

$NC_i$  est le nombre de branches connectées au noeud  $i$ . Cette contrainte garantit l'existence de deux chemins différents reliant chaque nœud de demande à la source qui l'approvisionne, assurant ainsi une fiabilité du système.

### 3.6.2. Optimisation du choix des diamètres des conduites

Dans cette étape de l'optimisation à moindre coût, on considère les diamètres des conduites comme étant des variables de décision. La configuration, la connectivité et les contraintes de charges minimales imposées aux nœuds de jonction étant considérées connues. L'optimisation du choix des diamètres dans les réseaux maillés de distribution d'eau a attiré l'attention des chercheurs pour plus de deux décennies. Cependant les paramètres impliqués dans les réseaux de distribution réels sont trop complexes pour permettre l'obtention d'une solution optimale entièrement satisfaisante [15, 25].

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

- ▶ La demande en un ou plusieurs nœuds peut être imposée à la conception ;
- ▶ Les vitesses maximales et minimales de l'écoulement sont généralement imposées afin d'éviter la détérioration de la qualité de l'eau ; le bruit ;
- ▶ La formule du débit : les plus utilisées sont celles de Darcy-Weisbach et Hazen-Wailliams ;
- ▶ Diamètre et matériau : le diamètre minimal de 80mm est généralement adopté pour les réseaux publics d'AEP. Le choix du matériau dépend du coefficient de rugosité dans la formule du débit, de la pression maximale admise dans la conduite et du coût par rapport à la fonction objet ;
- ▶ Pression minimale et maximale : la pression minimale dépend principalement du niveau du service et de région à servir. La pression maximale est limitée par le matériau de la conduite et la qualité de la construction du réseau ;
- ▶ Etat d'écoulement : l'écoulement stationnaire est supposé pour la conception.

#### Approche numérique

Le modèle d'optimisation d'un réseau proposé dans l'étude [21, 34] est un problème à moindre coût pour identifier les diamètres des conduites.

L'objectif du modèle de conception est de minimiser le coût total du système, en trouvant la meilleure combinaison possible des diamètres [15, 4, 25].

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

- La fonction objet à minimiser est :

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^N C_{Di} L_i \quad (3.10)$$

$C_{Di}$  étant le coût par unité de longueur pour la conduite  $i$  pour un diamètre donné.

- La contrainte principale est la contrainte de pression de service minimum.

$$H_{\min_n} \leq H_s \pm \sum_i \sum_j S_{ij} L_{ij} \leq H_{\max_n} \quad (3.11)$$



$H_{max_n}$  est la charge de pression de service maximale (m),  $H_{min_n}$  est la charge de pression de service minimale (m),  $H_s$  est la charge de pression à la source (m),  $L_{ij}$  est la longueur de la conduite reliant les nœuds  $i$  et  $j$ ,  $S_{ij}$  est la pente de la ligne de pente hydraulique.

L'équation (3.11) est établie pour tous les nœuds critiques.

De plus la condition de longueur est établie pour tout assemblage  $i$  :

$$\sum_j L_{ij} = l_i \quad (3.12)$$

- La contrainte de la charge dans la maille doit être nulle :

$$\sum_{i \in \text{maille } j} \sum_j S_{ij} L_{ij} = 0 \quad (3.13)$$

### 3.7. TYPE DE RESEAUX

#### 3.7.1. Les réseaux ramifiés

Les réseaux de distribution d'eau ramifiés sont généralement utilisés pour les petits réseaux, les villages et les systèmes de réserve d'eau intercommunale. Les réseaux ramifiés qui concernent des modèles de conception et que le débit de conception est connu pour tous les liens. Le débit ne dépend pas du choix et du diamètre comme dans les réseaux maillés. En employant le débit connu il est possible de formuler le moindre problème de conception de coût pour les réseaux ramifiés comme programme linéaire [30, 15, 35].

D'abord un modèle de base sera développé. Le modèle de base considère le cas simple d'un réseau ramifiés avec une seule source et plusieurs finissent des nœuds. Le modèle n'inclut pas de changements multiples des stations de pompage. En conséquence, on assume qu'également la pression à la source d'approvisionnement est une valeur fixe d'entrée la prolongation du modèle de base aux sources multiples, changements multiples, et la station de pompage. Les données suivantes sont données pour le modèle de base :

- Le débit de conception  $Q$  pour chaque lien;
- La longueur  $l$  de chaque lien;
- Le coût  $c$ , par exemple en termes de valeur actuelle, pour chaque diamètre à chaque lien par mètre linéaire;
- Les altitudes au sol de tout le nœud.

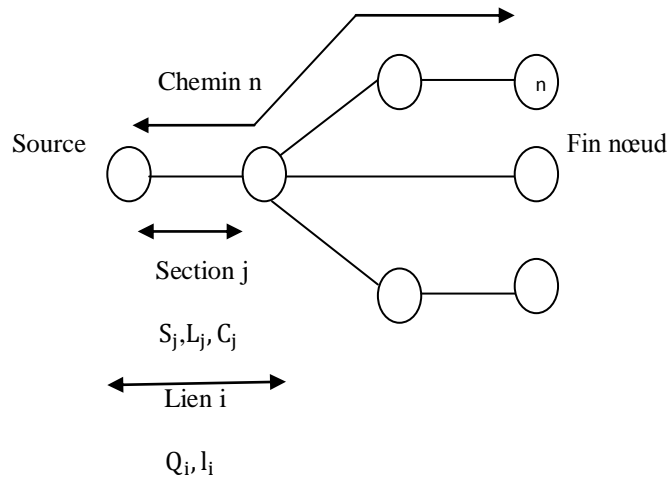


Figure 3.7: Un réseau ramifié de distribution de l'eau

L'objectif du modèle de conception est minimiser le coût, et en trouvant la combinaison la plus appropriée des diamètres. Simultanément les critères et les contraintes principales, qui sera formulée mathématiquement, est l'énonciation de contrainte de pression à aucun nœud peut tomber au-dessous de la pression de service. La contrainte de pression maximum et la contrainte de vitesse ne feront pas partie explicitement du modèle.

### 3.7.2. Les réseaux maillés

La différence entre un réseau ramifié et un réseau maillé est que la distribution d'écoulement n'est pas connue dans le réseau maillé au début de la conception. Elle dépend du choix du diamètre et est un résultat de conception. Ceci apporte une complication considérable comparée aux réseaux ramifiés. C'est d'abord supposé que la distribution d'écoulement est donnée. Les politiques pour évaluer la distribution d'écoulement et l'effet sur la moindre solution de coût, avec la supposition que la distribution du débit soit connue, le modèle de conception pour les réseaux maillés est en grande partie identique au modèle pour les réseaux ramifiés [36, 37].

La figure (3.8) montre un exemple simple se composant d'une maille et quatre liens, assumant un secteur plat les deux nœuds de fin seraient les nœuds critiques du système.

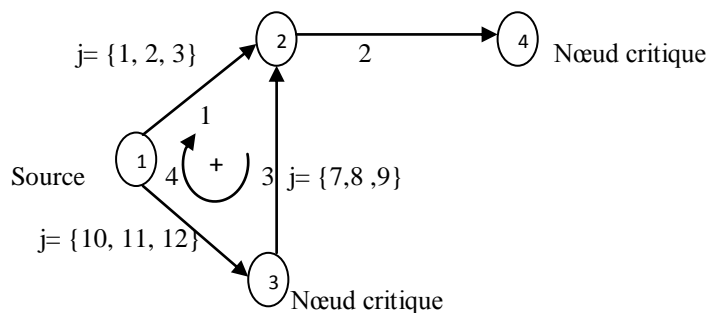


Figure 3.8: Un réseau maillé de distribution de l'eau.

# *Chapitre 4 : Interfaçage graphique et Applications*

## 4.1. INTRODUCTION

L'orientation vers l'informatisation des domaines de nos jours implique aux chercheurs d'intégrer l'outil informatique dans leurs solutions aux problèmes confrontés par ces derniers, c'est le cas pour les problèmes d'optimisation de la conception des réseaux et de fiabilité des réseaux.

Dans ce travail on a essayé d'apporter un complément au développement d'une informatisation de la conception et de l'analyse des réseaux afin d'initier les ingénieurs et concepteurs du secteur et les familiariser avec l'outil. Une interface graphique a été développée afin de rendre la lecture des résultats de conception des réseaux plus faciles à lire et surtout à modifier si nécessaire.

Le programme est écrit en langage **FORTRAN** sous **WINDOWS**. Il fonctionne en mode conversationnel et les données du réseau nécessaires pour la conception sont introduites de façon interactive suivant les affichages graphiques faits à l'aide d'un logiciel **GNUPLOT**. Pour visualiser l'interfaçage graphique d'un réseau, l'intermédiaire entre le langage **FORTRAN** et le logiciel **GNUPLOT** est assuré par la création de fichiers textes au fur et à mesure que les données sont traitées par le programme. L'interface graphique permet de schématiser le réseau étudié par l'utilisation de lignes pour les conduites et de nœuds pour les points d'intersection. Le but est de rendre compte le plus fidèlement possible de la réalité.

Dans les différentes étapes de conception du réseau, le programme laisse le choix au concepteur dans la manière de construction du réseau afin d'arriver au réseau avec le coût minimal possible, en lui offrant la possibilité d'ajouter ou de supprimer des conduites, après la construction du réseau maillé.

## 4.2. DESCRIPTION DU PROGRAMME DE CONFIGURATION

L'optimisation de la configuration ou de la longueur totale d'un réseau de transport de fluides, est la première étape pour faire l'interfaçage graphique d'un réseau.

### 4.2.1. Principaux paramètres utilisés et leur notation

Les différentes variables utilisées dans ce programme sont :

$N_s$  : nombre de sources,

$N_n$  : nombre de nœuds,

$x(i)$  : abscisse du nœud  $i$ ,

$y(i)$  : ordonnée du nœud  $i$ ,

$Cap(i)$  : capacité de la source,

$Dem(i)$  : demande du nœud  $i$  de demande,

$Distns(i,j)$  : distance entre les sources et les nœuds,

Distnn(i,j) : distance entre les nœuds,

nx(i,m) : numéro du nœud relié à la source i,

ins(i) : nombre de nœuds reliés à la source i,

indx(i) : Indice de rangement dans la table de classement pour les distances sources-nœuds

jndx(i) : Indice de rangement dans la table de classement pour les distances nœuds- nœuds

NC (i,j) : nombre de conduites entre le nœud i et j,

arr(indx(i)) : Tableau de classement des distances sources-nœuds dans l'ordre croissant,

arr1(indx(i)) : Tableau de classement des distances nœuds-nœuds dans l'ordre croissant,

LonTot : longueur totale du réseau.

#### 4.2.2. Fonctionnement du programme

L'algorithme de la longueur minimale modifié précédemment développé et présenté dans le chapitre 3, est transcrit dans cette partie sous forme d'un programme simple étagé sur trois étapes:

##### *Etape1 : Introduction des données*

L'introduction des données est faite d'une manière directe ou à l'aide d'un dossier contenant ces dernières. Après la construction des groupes, l'introduction des données sera en fonction des affichages illustrés par le GNUPLOT. Les données nécessaires à la détermination de la configuration du réseau dans une longueur totale minimale sont :

- Introduction du nombre de sources,
- Introduction du nombre de nœuds,
- Introduction des coordonnées des sources et leurs capacités,
- Introduction des coordonnées des nœuds et leurs demandes,
- Introduction du nombre maximal de connexion souhaité pour les nœuds de demande.

##### *Etape2 : Calculs et résultats*

Le programme manipule des objets en essayant de les rassembler dans des groupes. Dans notre cas, les objets sont les nœuds qui demandent le fluide, et les sources qui le fournissent. Etant données les caractéristiques des nœuds et des sources, les coordonnées cartésiennes, les demandes aux nœuds et les capacités des sources, le programme calcule les distances des sources aux nœuds et des nœuds entre eux. En considérant la source ayant la plus faible capacité, les nœuds de ce groupe doivent remplir deux conditions :

- Les nœuds sont plus proches de cette source que les autres sources.
- La demande de ce groupe de nœuds doit être inférieure à la capacité de la source du groupe.

Les nœuds qui sont plus proches d'une autre source vont être annulés du classement dans un premier temps (stockés dans une colonne), donc les nœuds du groupe vont être reliés de telle sorte que la jonction de chaque nœud repose sur le principe de la méthode du « plus court chemin » à condition que les deux frontières de la conduite ne soient pas reliées préalablement. Cette condition n'est applicable que si les deux frontières sont des points de consommation. Ce processus continuera jusqu'à ce que tous les nœuds du groupe soient connectés. S'il y a un débordement de la capacité de la source dans ce groupe le nœud le plus proche à ce groupe appartenant aux nœuds annulés (stockés préalablement) va être relié au nœud qui vient d'être connecté ou bien à la source en considération, ce processus se répète avec tous les groupes.

Dès que la construction des groupes est achevée, un message est affiché dans la page de manipulation du Fortran indiquant la fin du maillage de tout le réseau, puis un autre message le suit indiquant la création de l'interfaçage graphique par le logiciel GNUPLOT. Le concepteur doit alors consulter cet affichage graphique et de là la manipulation des éléments du réseau sera faite par les modifications entrées par le concepteur et le guidage du programme vers une solution optimale.

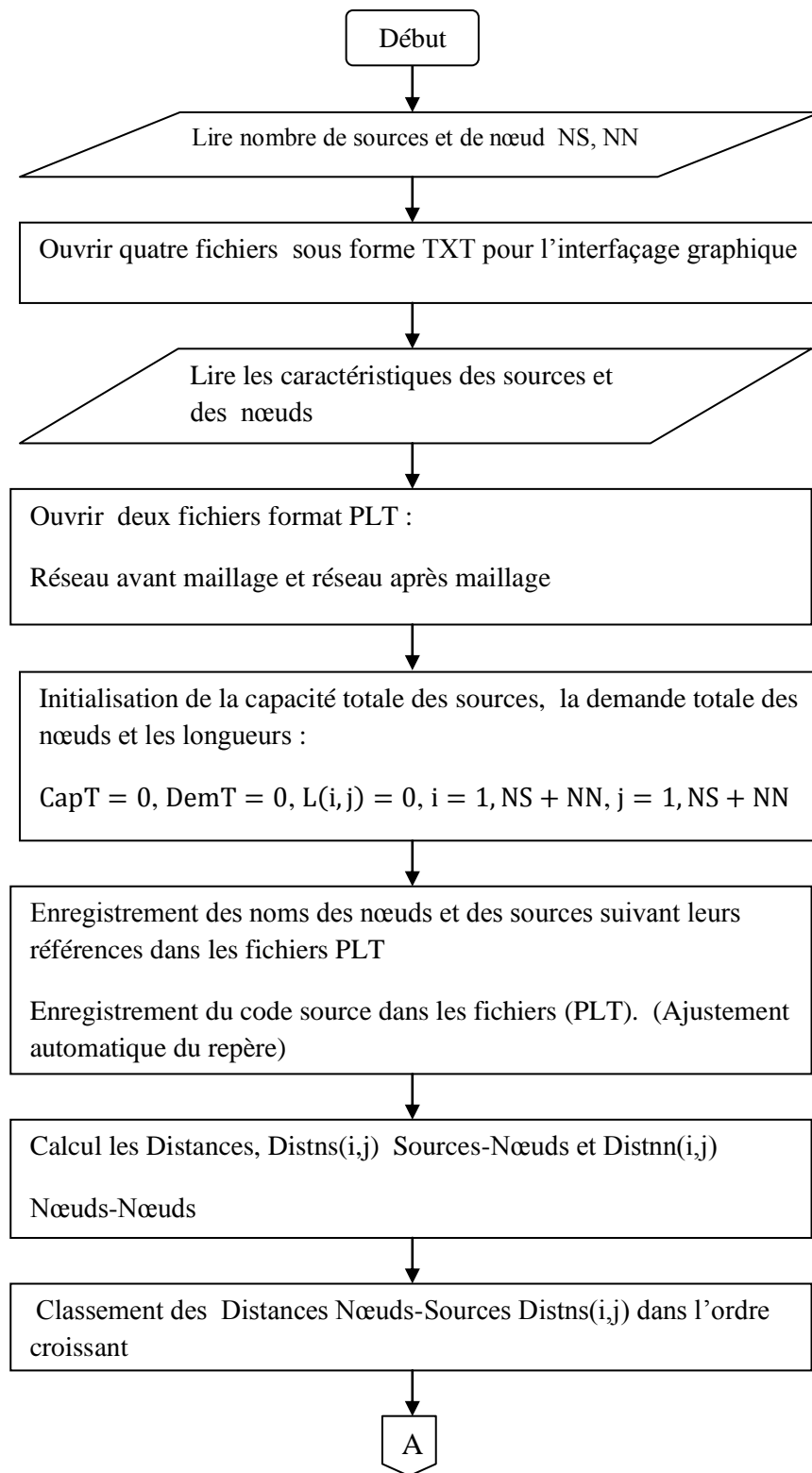
Pour les deux étapes (construction des groupes et maillage du réseau), les coordonnées des nœuds constituant les conduites et leurs numéros vont être enregistrés dans un fichier TXT pour servir à leur tour d'outil de construction du réseau par le logiciel GNUPLOT.

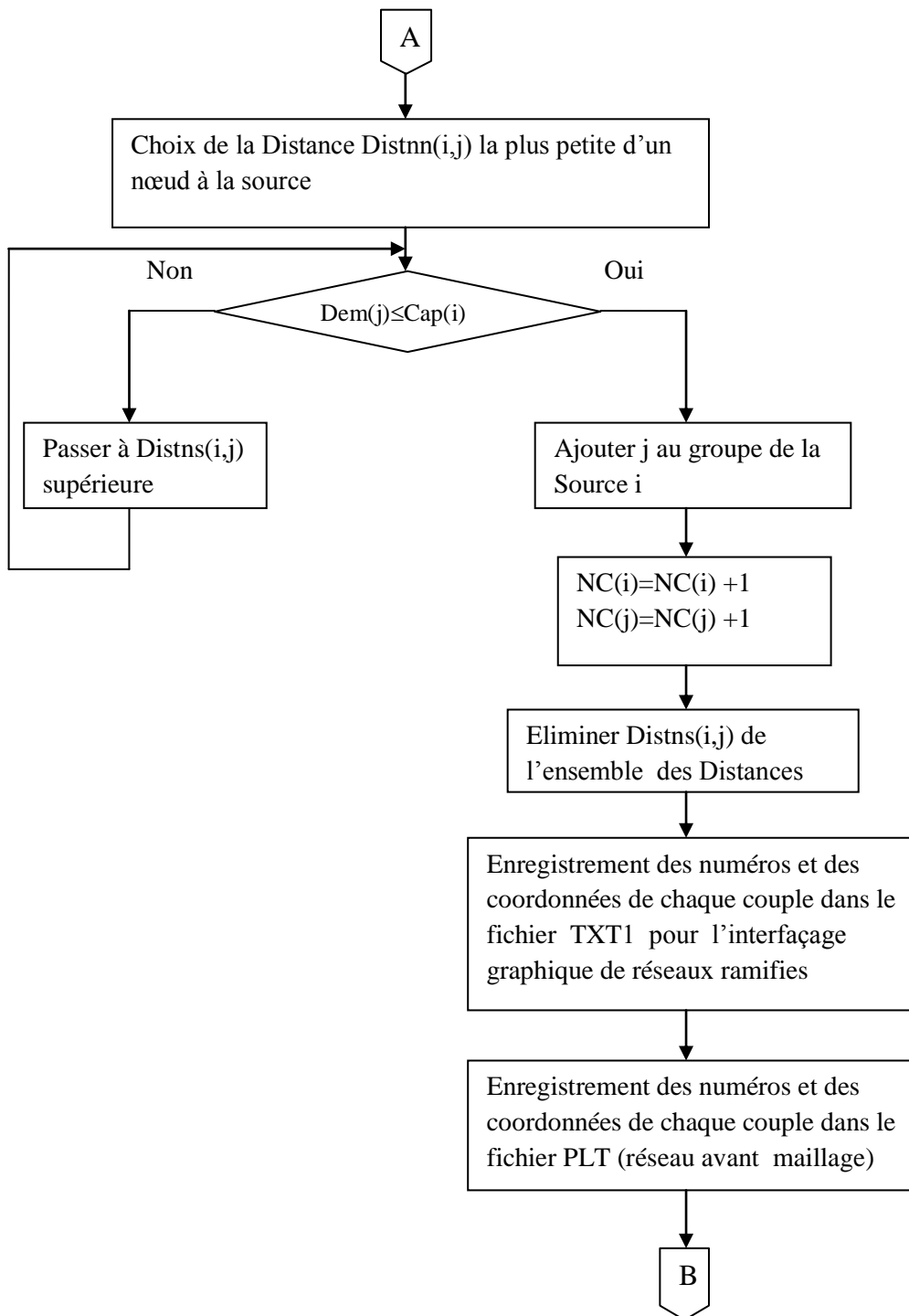
### *Etape 3 : (Ajout / suppression) des conduites*

Dans cette partie du programme va ajouter ou supprimer des conduites et n'est nécessaire que dans quelques cas seulement.

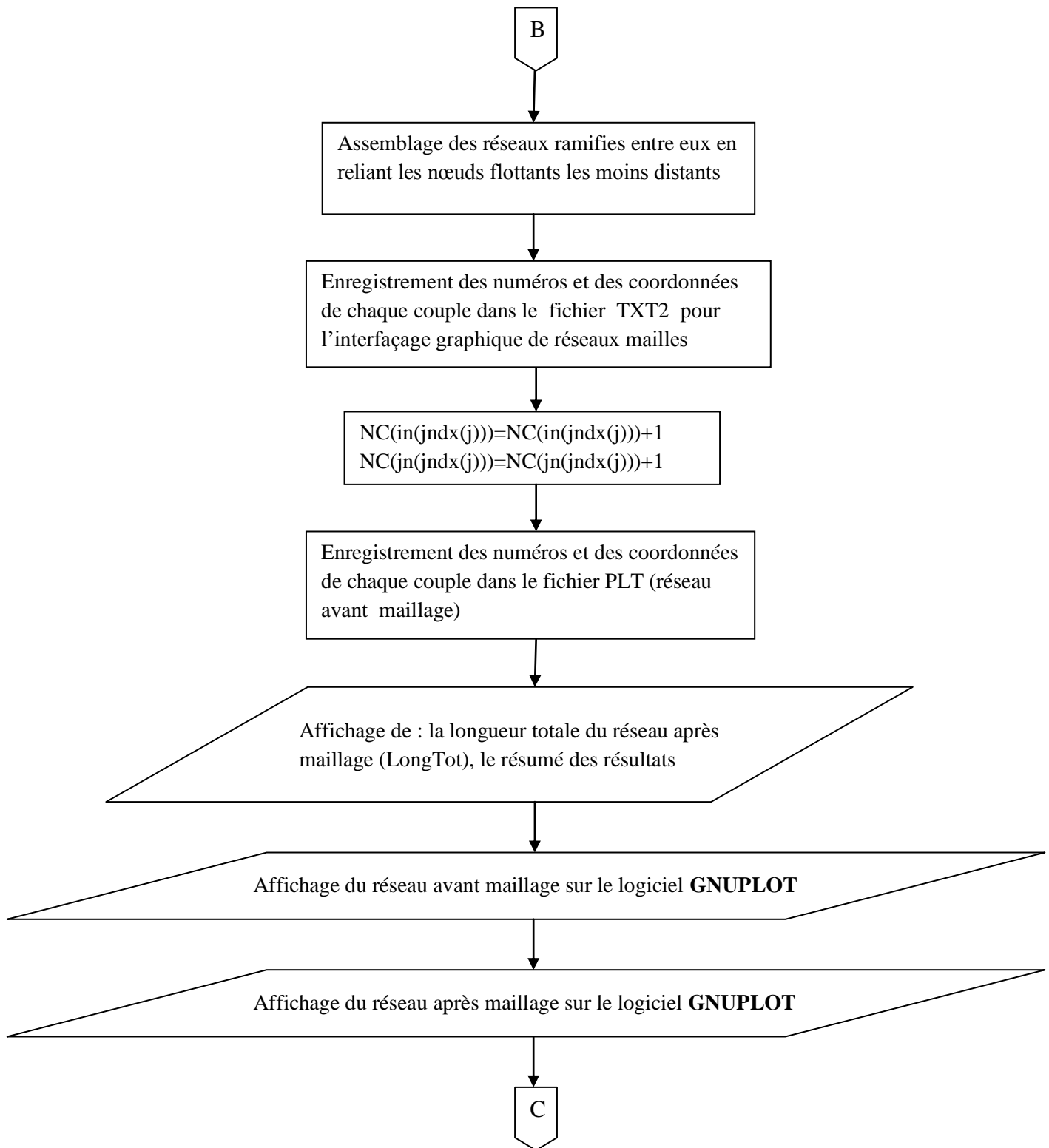
Ces opérations s'effectuent de façon simple où le concepteur introduit les numéros des nœuds (frontières de la conduite), l'affectation de ces modifications implique la modification de la longueur totale du réseau, à la fin de la conception du réseau un affichage final du réseau commenté par l'affichage de la longueur totale du réseau, et aussi de la visualisation des résultats sous forme graphique.

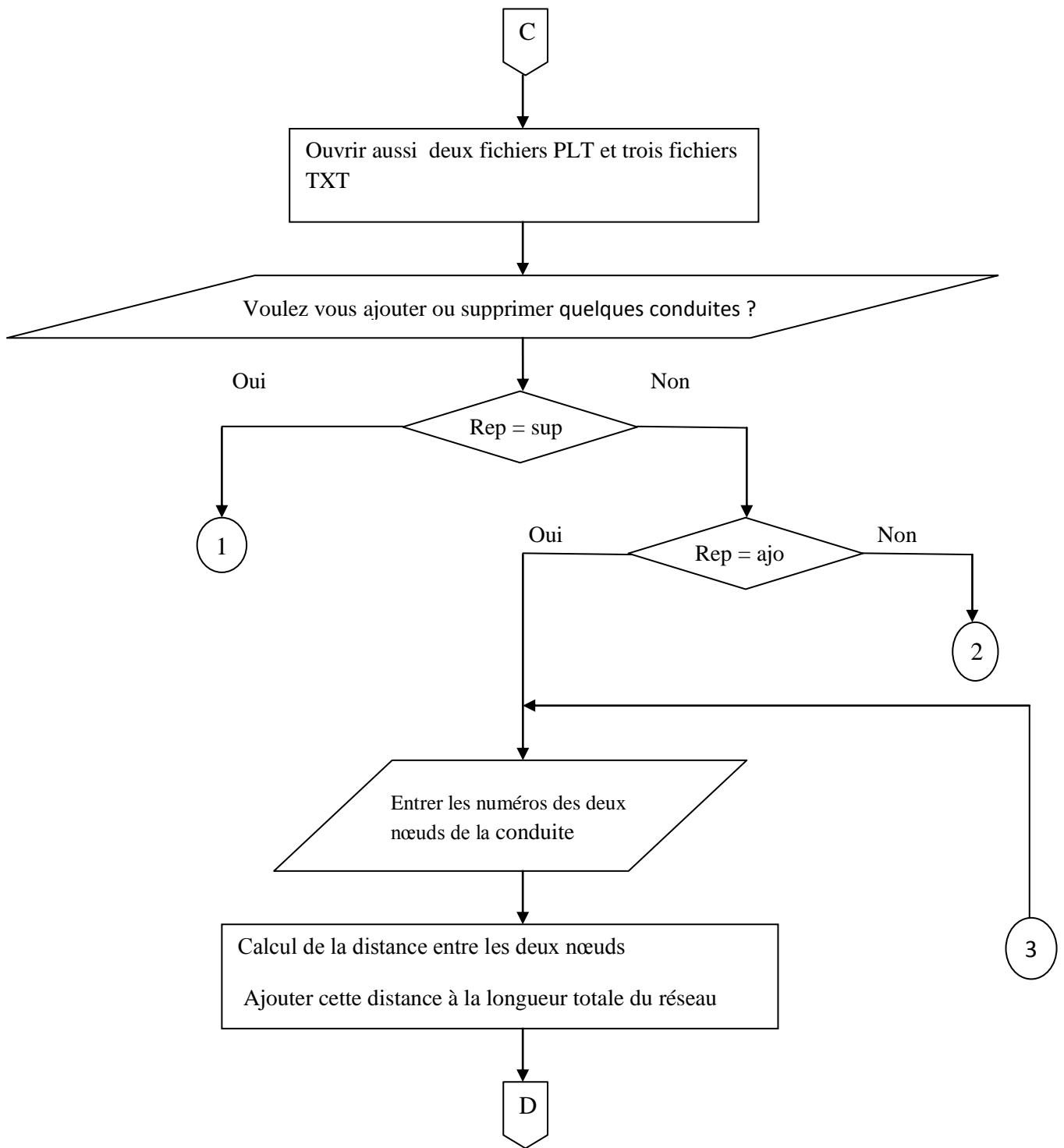
### 4.2.3. Organigramme

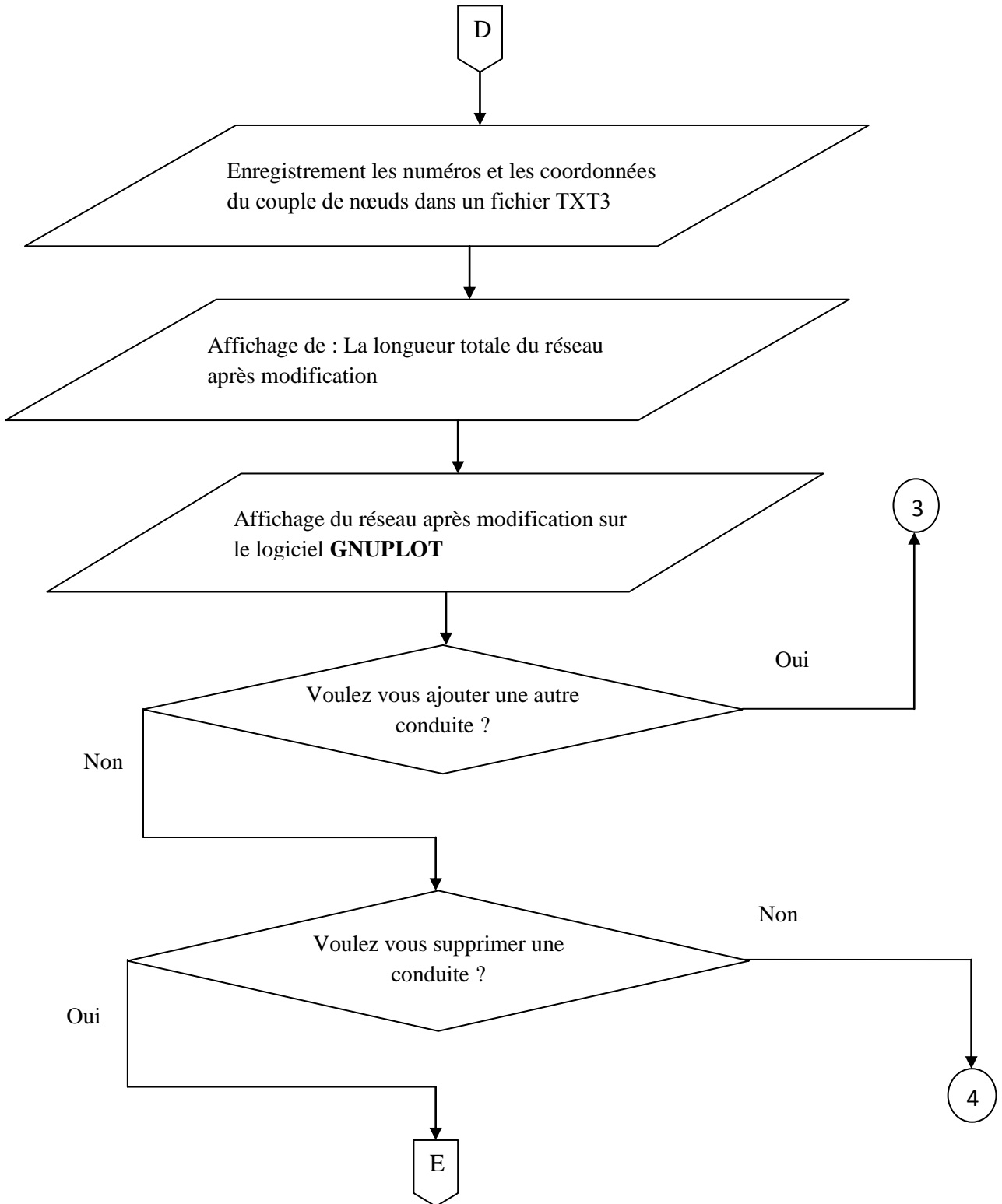


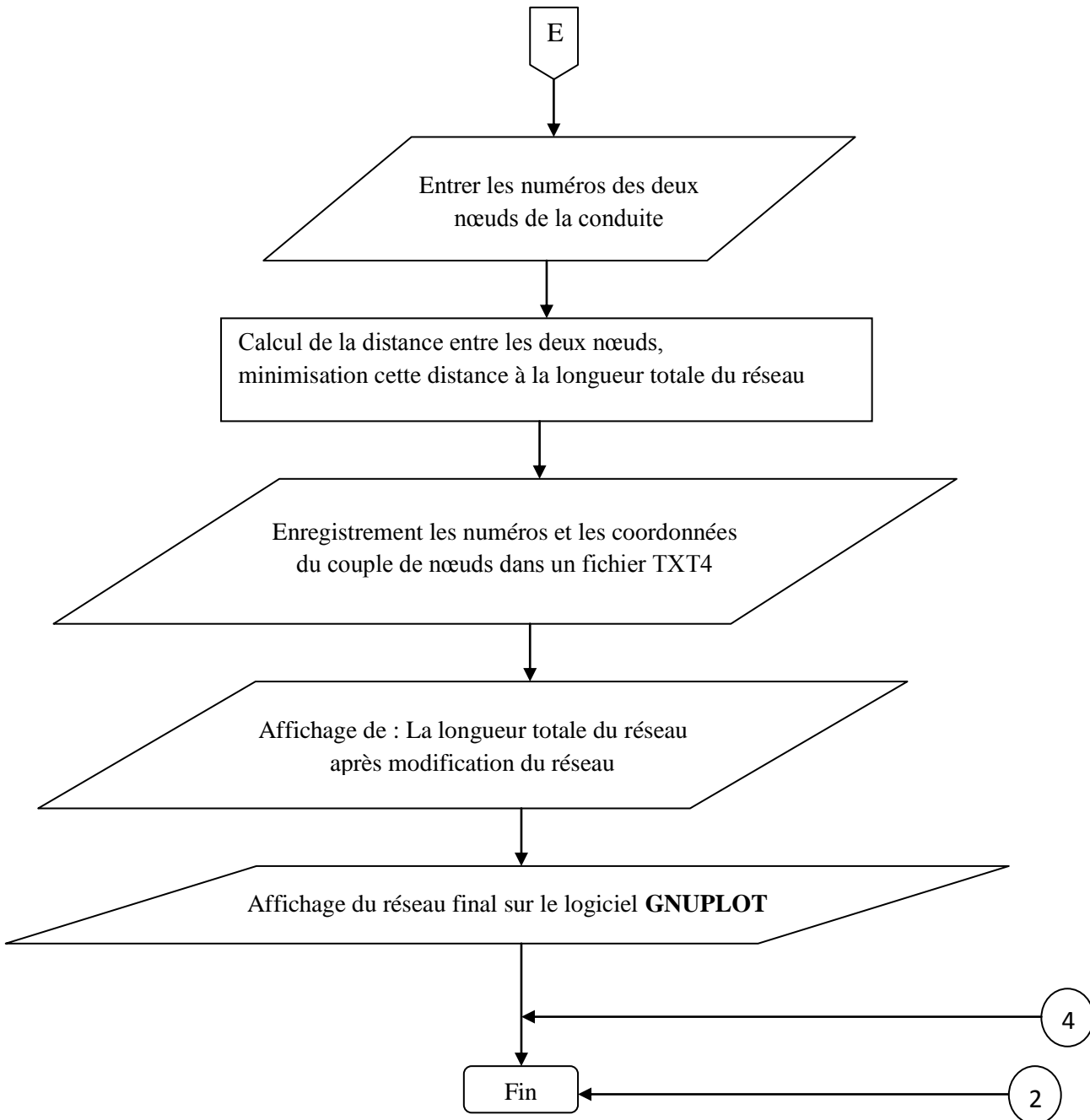












### 4.3. DESCRIPTION DU PROGRAMME DES DIAMETRES DES CONDUITES

L'optimisation des diamètres est la deuxième partie du dimensionnement des conduites.

#### 4.3.1. Principaux paramètres utilisés et leur notation

Les différentes variables utilisées dans la partie optimisation des diamètres sont :

$N_p$  : Nombre de conduites,

$L(k)$  : longueur de la conduite,

$C_{ij}$  : Les coûts des conduites

$H_{min_n}$  : La charge de pression de service minimale (m),

$H_{max_n}$  : La charge de pression de service maximale (m),

$H_s$  : La charge de pression à la source (m),

$J_{ijm}$  : La pente de la ligne de pente hydraulique,

$L_{ijm}$  : La longueur de la conduite reliant les nœuds i et j,

$J1(k)$  : Nœud de début,

$J2(k)$  : Nœud de fin.

L'optimisation du choix des diamètres des conduites se fait en utilisant la Subroutine **MSTP** qui permet de trouver l'arbre minimal en utilisant l'algorithme de PRIM et vérifie la connectivité du réseau. Il sert à trouver les arbres correspondant à une situation où le réseau est déconnecté à cause de la présence de valves de réduction de pression ; cette présence de valves pouvant résulter au cours du processus itératif de résolution en deux ou plusieurs sous-réseaux.

#### 4.3.2. Fonctionnement du programme d'optimisation du diamètre

Dans l'optimisation du choix des diamètres des conduites on utilise la méthode de programmation linéaire puisque le problème peut être écrit sous la forme linéaire, soit une fonction objet linéaire soumise à un ensemble de contraintes linéaire aussi. La méthode du SIMPLEX étant une méthode de résolution simple et facile à programmer a été choisie pour cette partie. Le programme est structuré selon les trois étapes :

##### *Etape1 : Introduction des données*

Les données nécessaires pour l'optimisation des diamètres, peuvent, en partie être le résultat de l'optimisation de la longueur totale. Ces données consistent en les conduites, définies par leurs nœuds de début et de fin, et leurs longueurs. Les paramètres coûts relatifs aux différents diamètres disponibles font partie des blocs de données du programme.

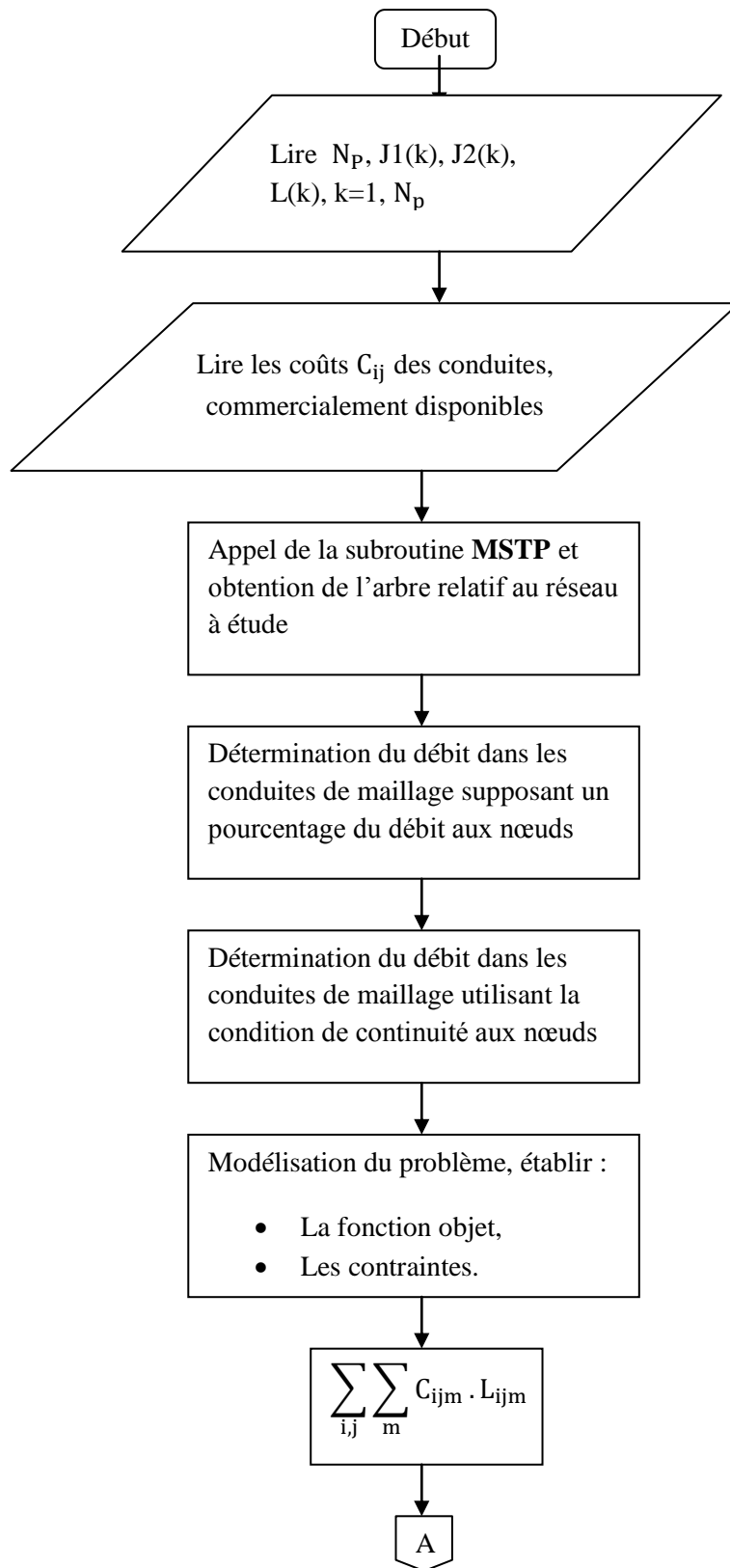
*Etape2 : Calculs*

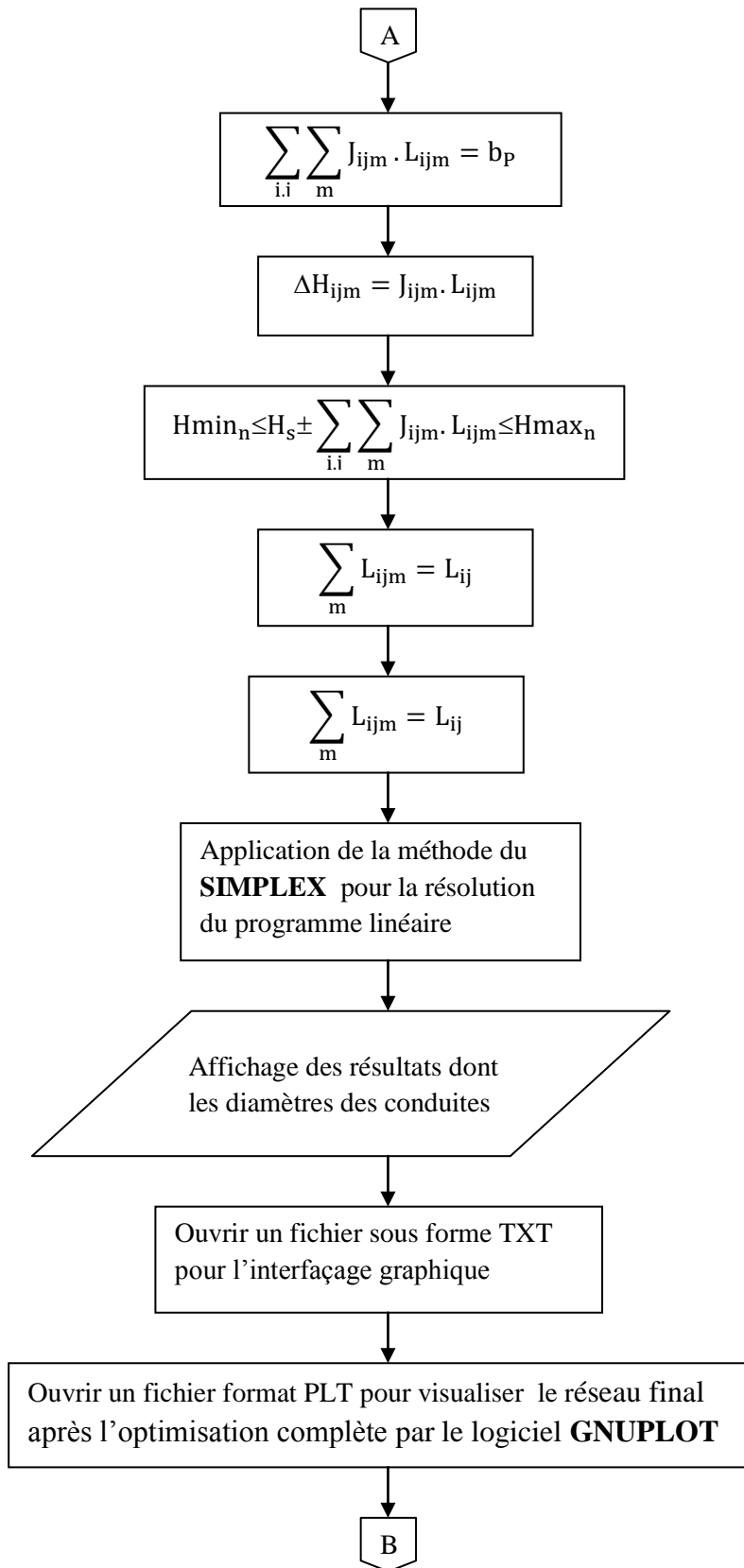
Le programme, après introduction des données, procède à l'évaluation de la distribution du débit dans les conduites du réseau. Il fait alors appel à un sous-programme, la Subroutine **MSTP** qui permet de déterminer le système ramifié correspondant en utilisant le principe de l'arbre minimal de Prim. De là, la détermination du débit se fait en progressant à partir des assemblages fermés jusqu'aux assemblages de l'arbre.

*Etape3 : Résultats*

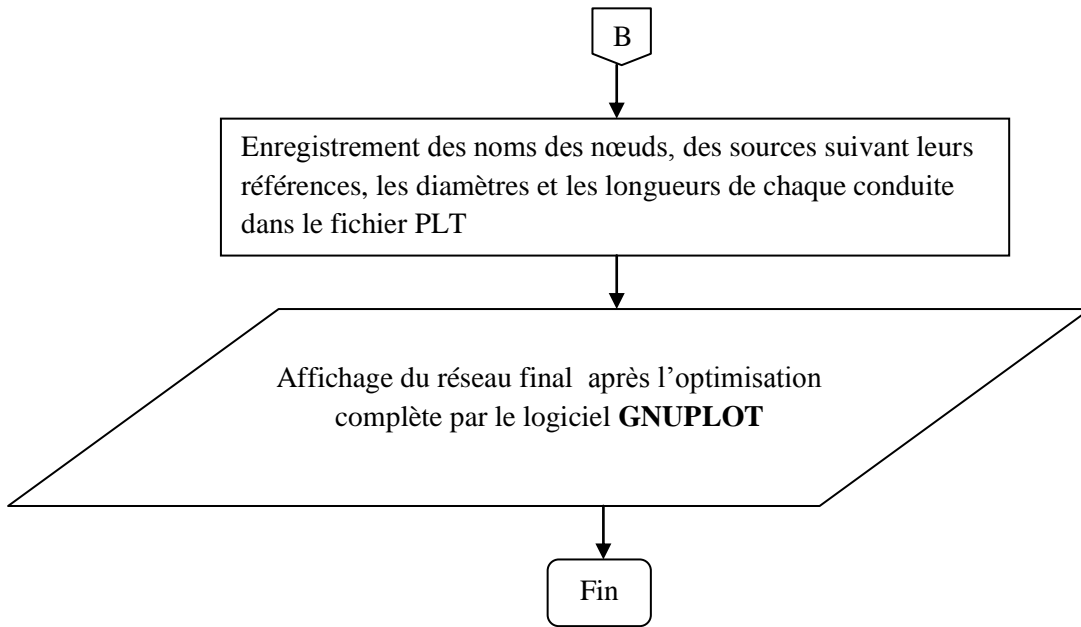
Les résultats sont fournis sous forme de tableaux de valeurs comprenant, des diamètres des conduites, des débits aux nœuds et des longueurs de chaque section. Ceci est suivi de l'interfaçage graphique du réseau dans un but de visualisation des résultats sous forme graphique.

### 4.3.3. Organigramme pour l'optimisation des diamètres









## 4.4. RESULTATS ET COMMENTAIRES

### 4.4.1. Cas d'étude de l'optimisation de la configuration

Les résultats de l'optimisation de la longueur totale de différents réseaux avec leur interfaçage graphique sont illustrés par les cas d'étude suivants :

#### Cas 1 : Réseau de distribution avec des nœuds loin

Le premier cas est un réseau avec 2 sources et des nœuds loin, au nombre 10 [15, 37, 44, 45]. Les données, coordonnées des sources et des nœuds, capacités des sources ainsi que les demandes aux nœuds sont résumées dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1 :** Données du réseau avec des nœuds loin

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m <sup>3</sup> /s)
	Abscisse	Ordonnée	
1	100	100	250
2	175	150	250
3	30	30	50
4	90	100	50
5	125	80	50
6	135	110	50
7	100	150	50
8	150	150	50
9	160	160	50
10	200	150	50
11	250	200	50
12	190	110	50

Les résultats sous forme graphique, sont donnés dans la figure 4.1 sous la forme de deux réseaux ramifiés résultant de la connexion des nœuds à la source la plus proche.

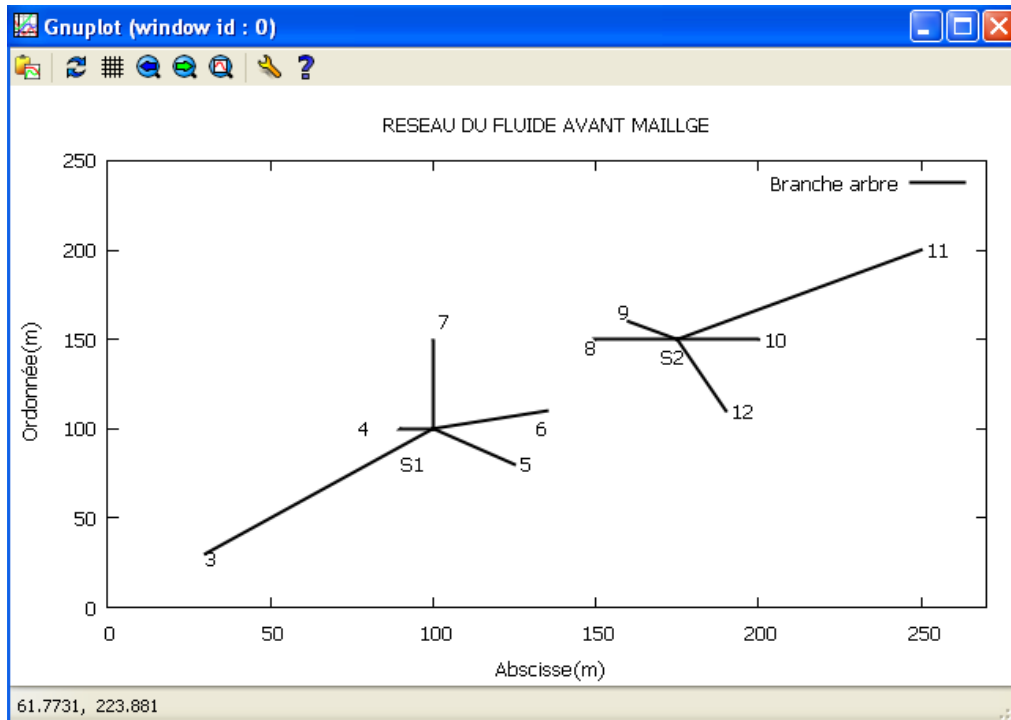


Figure 4.1 : Interfaçage graphique de deux réseaux ramifiés

L'affichage de la longueur totale après l'assemblage des réseaux ramifiés entre eux est montré dans la fenêtre d'exécution ci-dessous.

```

c:\Msdev\modflong.exe
L< 12 , 2 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 3 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 4 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 5 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 6 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 7 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 8 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 9 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 10 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 11 >= 0.00000000E+00
L< 12 , 12 >= 0.00000000E+00

  VOS RESULTATS SONT DANS LE FICHER Res41.for
  La Longueur Total su Reseau Formée est de: 1591.38110
  assemblage des noeuds aux sources dans le fichier Ramif.txt
  relie les neuds flottants les moins distancts dans le fichier Mail.txt
  ==LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL!!!GNUPLOT
  !!!

  *****

  ==LA FIGURE DU RESEAU MAILE EST DISPONIBLE SUR LOGICIEL !!!GNUPLOT!!!

  VOULEZ VOUS AJOUTER OU SUPPRIMER QUELQUES CONDUITES? REPONDER PAR <SUP> "pour s
  upprimer" ou par <AJO> "pour ajouter" si non par "NON" pour ne rien faire :
  
```

La figure 4.2 présente une interface graphique donnant toutes les possibilités de maillage des réseaux, d'après le résultat du calcul et le classement des nœuds par le programme.

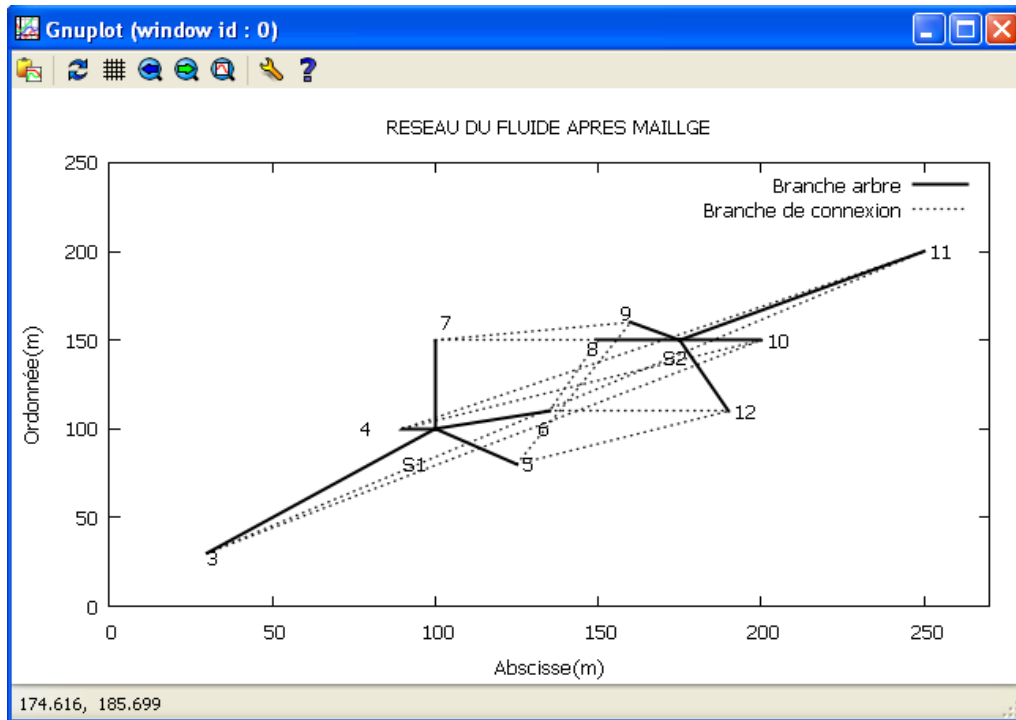


Figure 4.2 : Interfaçage graphique de l'assemblage des réseaux ramifiés

La fenêtre d'exécution suivante affiche la longueur totale du réseau après la suppression et l'ajout des conduites. L'interfaçage graphique de cette étape est présenté dans la figure 4.3.

```

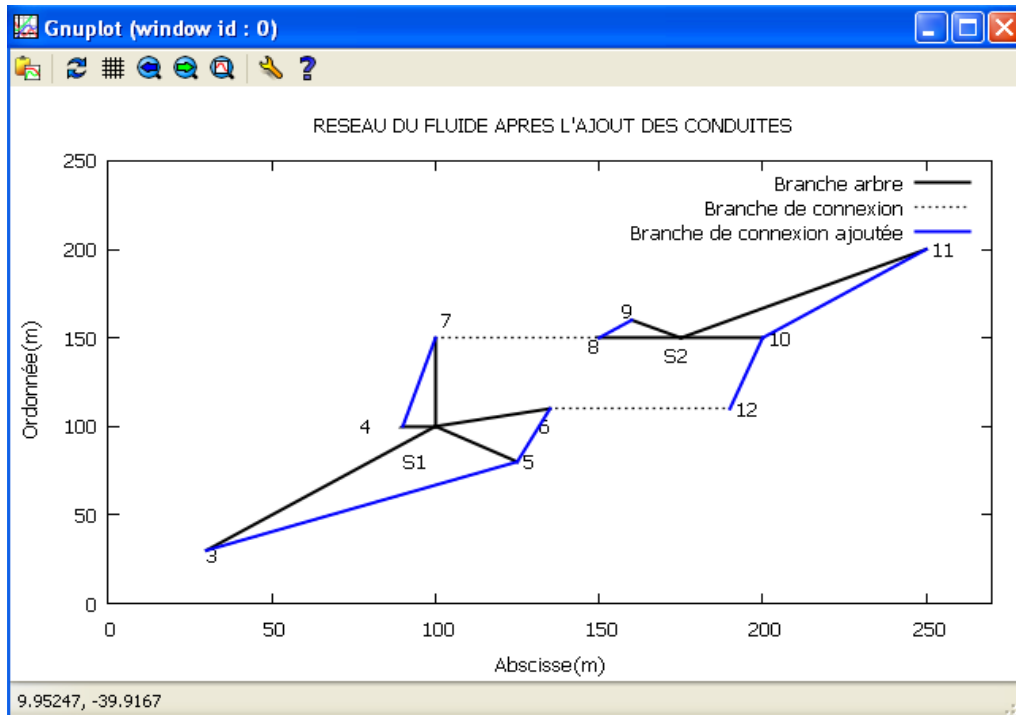
c:\Wsdev\modflong.exe
voulez vous ajouter une autre conduite, reponder oui ou non OUI
pour cette conduite entrer le numero du premier noeud:5
entrer le numero du deuxieme noeud :6

la longueur totale apres avoir ajoute une nouvelle conduite est: 615.662048 (m)
==> LA NOUVELLE FIGURE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!

voulez vous ajouter une autre conduite, reponder oui ou non OUI
pour cette conduite entrer le numero du premier noeud:8
entrer le numero du deuxieme noeud :9

la longueur totale apres avoir ajoute une nouvelle conduite est: 629.804199 (m)
==> LA NOUVELLE FIGURE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!

voulez vous ajouter une autre conduite, reponder oui ou non _
    
```



**Figure 4.3 :** interfaçage graphique d'un réseau après ajout et suppression de conduites

La longueur totale obtenue à l'aide de l'interfaçage graphique d'un réseau est de 629,80 m.

La longueur totale obtenue par les algorithmes génétiques étant de 753,95 m.

La longueur totale obtenue par le programme à l'aide de l'interfaçage graphique est meilleure que celle de la référence. La comparaison avec le résultat obtenu par les algorithmes génétiques [15,49] montre l'efficacité de l'interaction entre le calcul et la manipulation du graphe du réseau. De plus, le réseau obtenu par les algorithmes génétiques, figure 4.5, n'est pas complètement maillé. Comme on peut le constater, les nœuds 10 et 11 sont libres d'un côté et n'ont qu'une seule connexion. Chacun n'est alors alimenté que par une seule conduite principale, lui parvenant de la source 2 directement. D'autre côté le réseau montré dans la figure 4.4 est complètement maillé, ce qui garantit la fiabilité et la disponibilité du fluide.

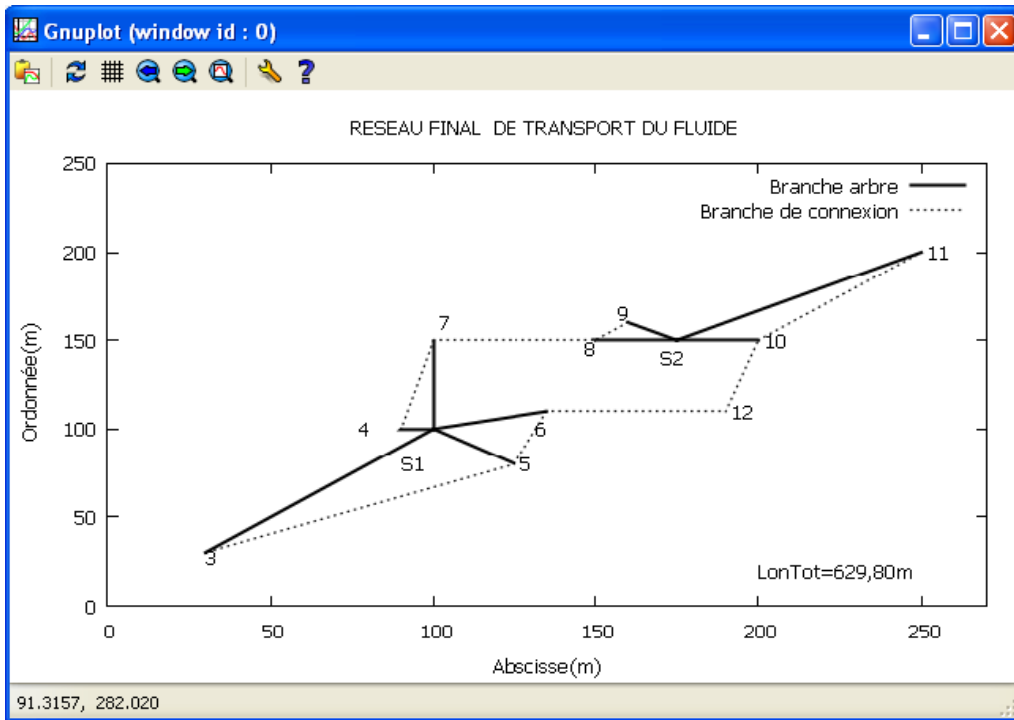


Figure 4.4 : interfaçage graphique du réseau final de deux sources

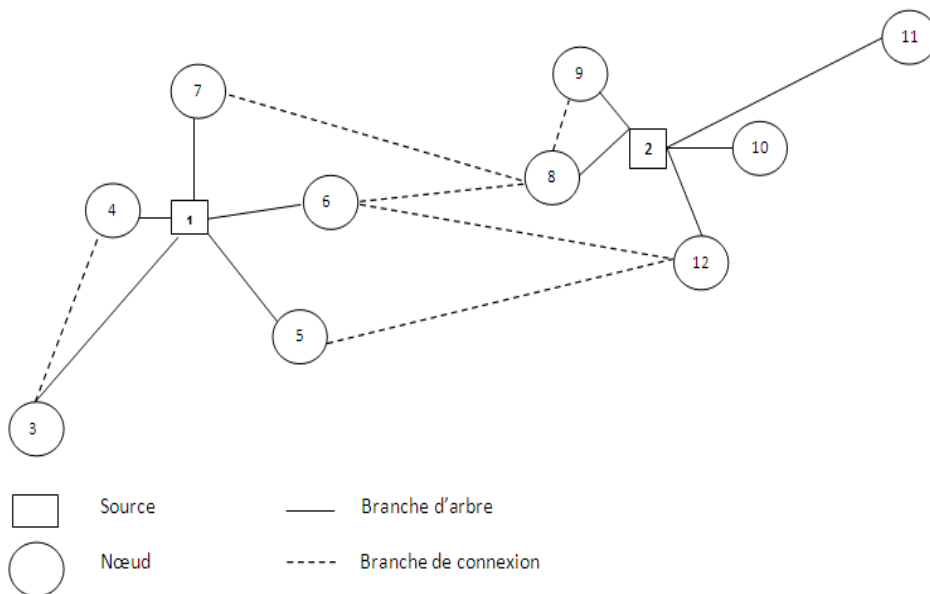


Figure 4.5 : Réseau obtenu par les algorithmes génétiques  
Réf. [49]

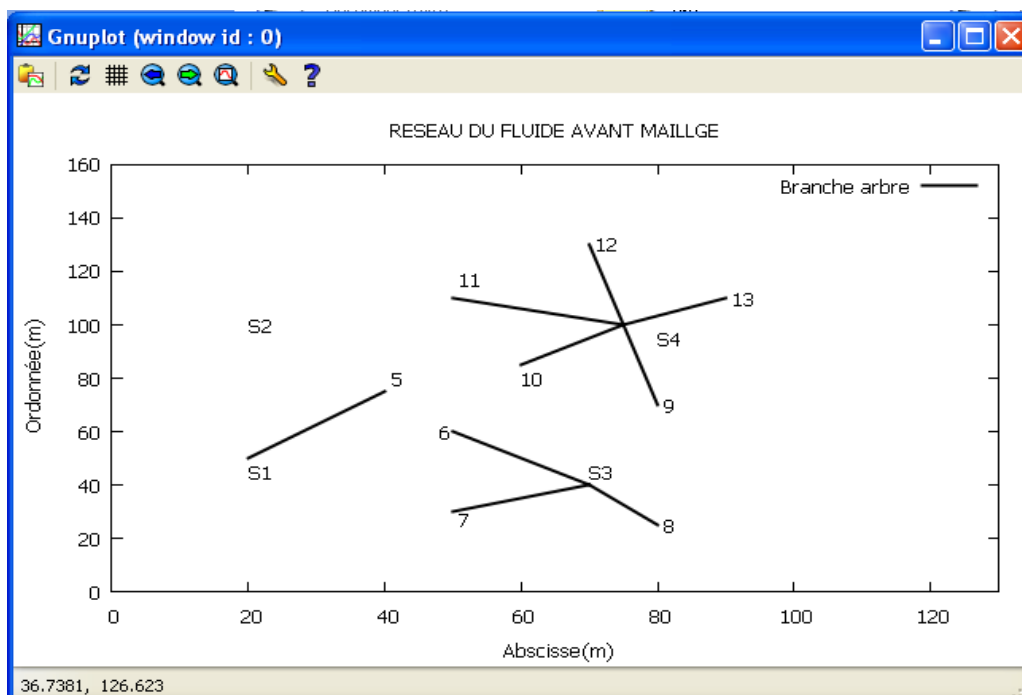
**Cas 2 : Réseau de distribution avec des sources loin**

Le deuxième cas est un réseau avec 9 nœuds et des sources loin, au nombre 4[15, 45, 48]. Les données, coordonnées des sources et des nœuds, capacités des sources ainsi que les demandes aux nœuds sont résumées dans le tableau 4.2.

**Tableau 4.2 :** Données du réseau avec des sources loin

Nœud	Coordonnées (m)		Capacité/ Demande (m <sup>3</sup> /s)
	Abscisse	Ordonnée	
1	20	50	350
2	20	100	350
3	70	40	350
4	75	100	350
5	40	75	50
6	50	60	50
7	50	30	50
8	80	25	50
9	80	70	50
10	60	85	50
11	50	110	50
12	70	130	50
13	90	110	50

La figure 4.6 représente les quatre réseaux ramifiés obtenus par l'assemblage des nœuds chacun avec la source la plus proche.



**Figure 4.6 :** Interfaçage graphique des quatre réseaux ramifiés

La longueur totale après l'assemblage de tous les nœuds entre eux, est montrée dans la fenêtre d'exécution ci-dessous. L'interfaçage graphique d'un réseau après maillage est représenté dans la figure 4.7.

```

c:\f9556\LONG1-1.exe
L< 13 , 3 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 4 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 5 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 6 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 7 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 8 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 9 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 10 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 11 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 12 >= 0.00000000E+00
L< 13 , 13 >= 0.00000000E+00

La Longueur Total su Réseau Formée est de: 555.583191
VOS RESULTATS SONT DANS LE FICHER Res4.for
assemblage des noeuds aux sources dans le fichier      Ramif.txt
relie les nœuds flottants les moins distants dans le fichier Mail.txt
==LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLE     SUR LE LOGICIEL!!!GNUPLOT
???)

*****

==LA FIGURE DU RESEAU MAILE EST DISPONIBLE SUR       LOGICIEL !!!GNUPLOT!!!

VOULEZ VOUS AJOUTER OU SUPPRIMER QUELQUES CONDUITES? REPONDER PAR <SUP> "pour s
upprimer" ou par <AJO> "pour ajouter" si non par "NON" pour ne rien faire :
    
```

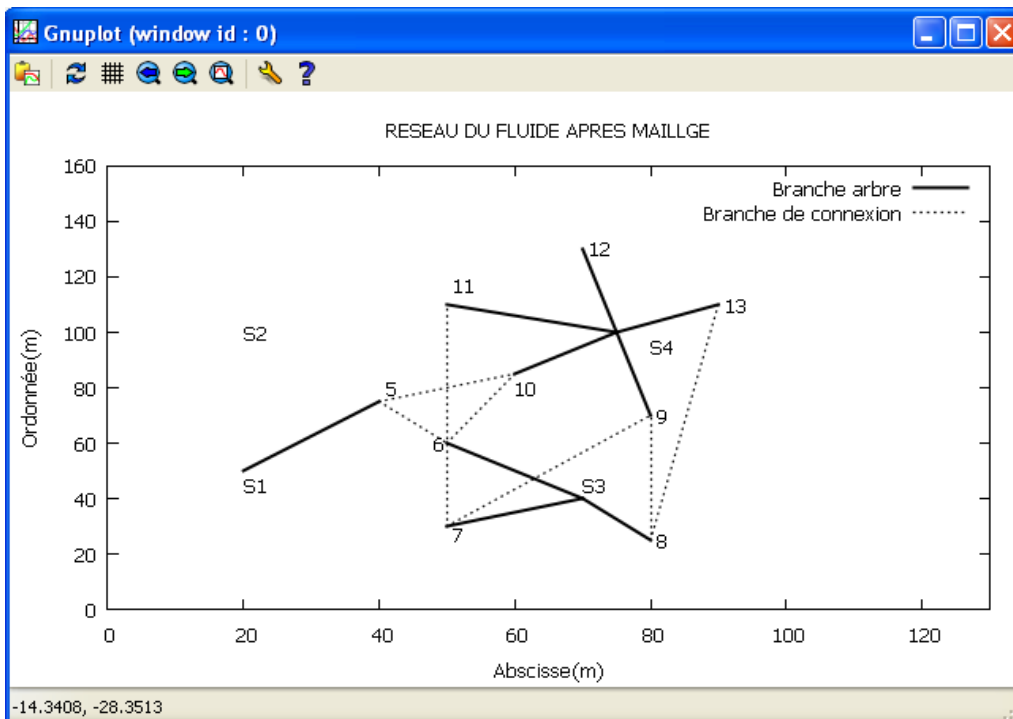


Figure 4.7 : Interfaçage graphique de l'assemblage des réseaux ramifiés.



Après la suppression et l'ajout des conduites, la longueur totale minimisée est montrée dans la fenêtre suivante.

```

C:\VF9556\Long1.exe
==> LA NOUVELLE FIGURE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL ??? GNUPLOT
???)
voulez vous ajouter une autre conduite, repondre oui ou non OUI
pour cette conduite entrer le numero du premier noeud:7
entrer le numero du deuxieme noeud :5

la longueur totale apres avoir ajoute une nouvelle conduite est: 518.337952 (m)
)
==> LA NOUVELLE FIGURE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL ??? GNUPLOT
???)
voulez vous ajouter une autre conduite, repondre oui ou non NON
SI VOUS VOULEZ SUPPRIMER UNE CONDUITE REPONDER PAR oui OU non :NON

Program Completed
Press Enter to Continue.
    
```

La figure 4.8 présente le réseau après l'ajout et la suppression des conduites en modifiant ainsi la longueur du réseau étudié.

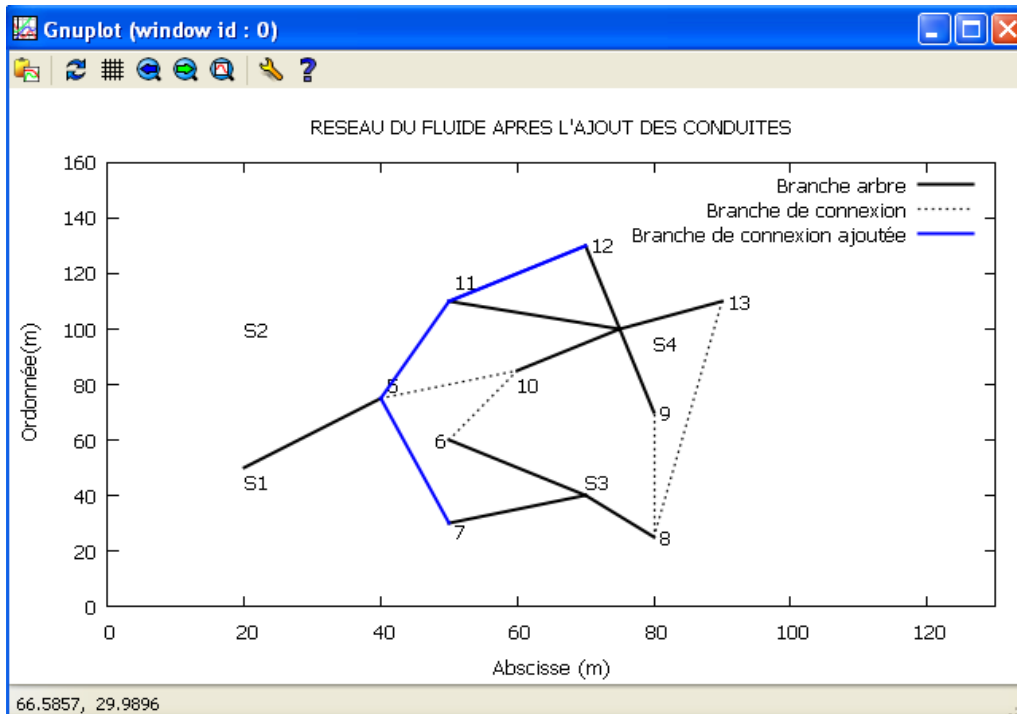


Figure 4.8 : interfaçage graphique d'un réseau après ajout et suppression de conduites

La longueur totale obtenue par notre méthode (518,33m) est inférieure à la longueur obtenue par les algorithmes génétiques qui est égale à 742,32m [52] et aussi légèrement inférieure à la longueur totale de la méthode proposée par [45] et qui est égale à 547,21m, cela montre

l'efficacité et l'utilité de l'interfaçage graphique lorsqu'il est associé à la programmation de la méthode numérique.

La figure 4.9 montre que la source 2 n'a pas été utilisée. Ceci parce que la capacité des trois autres sources 1, 3 et 4 est très supérieure à la demande de tous les nœuds.

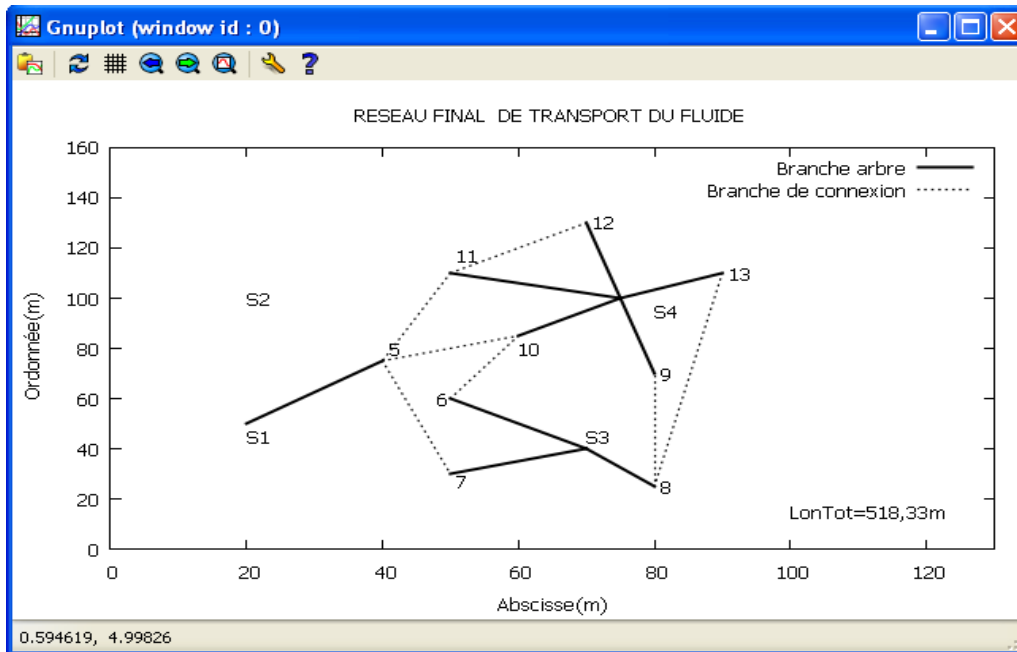


Figure 4.9 : interfaçage graphique d'un réseau final à quatre sources

### Cas 3 : Réseau de distribution avec une seule source et 19 nœuds

Le cas suivant est un réseau avec une seule source et 19 nœuds de connexion [15, 44]. Les données sont résumées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Caractéristiques du réseau

Nœud	Coordonnées (m)		Capacité/ Demande (m <sup>3</sup> /s)	Nœud	Coordonnées (m)		Capacité/ Demande (m <sup>3</sup> /s)
	Abscisse	Ordonnée			Abscisse	Ordonnée	
1	0	0	3350	11	0	2000	100
2	1000	0	300	12	1000	2000	150
3	2000	0	100	13	2000	2000	100
4	3000	0	150	14	3000	2000	300
5	4000	0	150	15	4000	2000	100
6	0	1000	150	16	0	3000	150
7	1000	1000	100	17	1000	3000	300
8	2000	1000	200	18	2000	3000	200
9	3000	1000	200	19	3000	3000	100
10	4000	1000	200	20	4000	3000	300

La longueur totale après construction est affichée avec le degré de liberté des nœuds inférieur à 2 dans la fenêtre ci-dessous.

```

c:\f9556\plot1.exe

LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 19000.0000 (m)

==> LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLES SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!

Le degre du noeud 5 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 10 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 15 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 16 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 17 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 18 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 20 est inferieur a 2 ?

pour le noeud 5 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a c
e dernier :
    
```

La figure 4.10 représente l'interfaçage graphique du réseau à une seule source avant maillage.

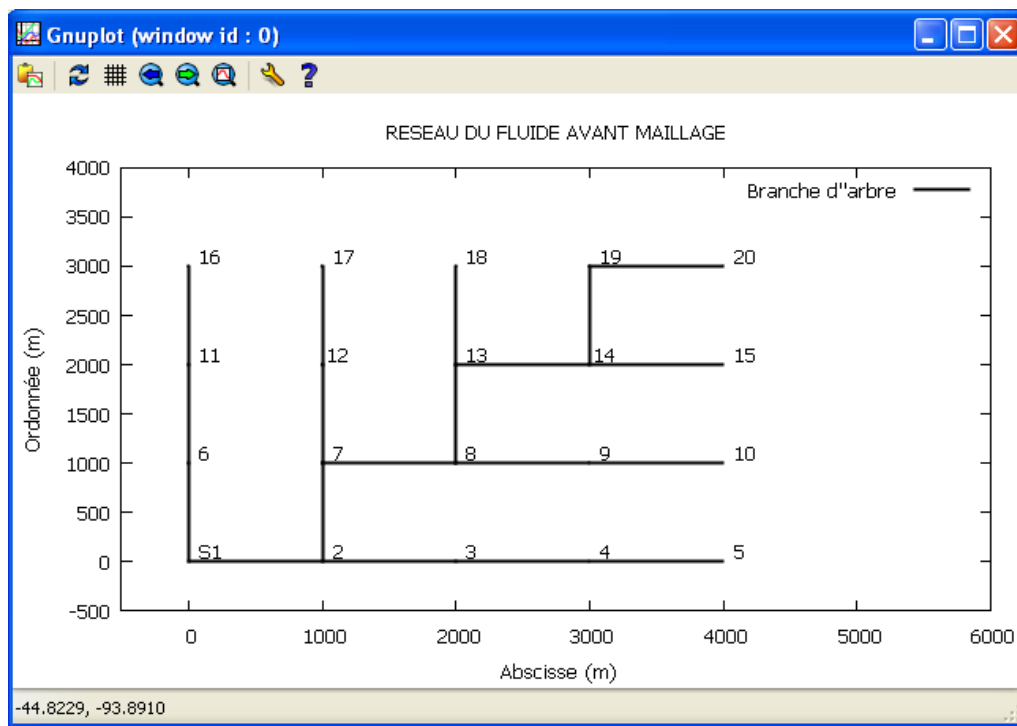


Figure 4.10: Interfaçage graphique du réseau ramifié à une seule source

La fenêtre d'exécution suivante montre la longueur totale du réseau après modification dans les conduites du réseau, suppression et/ou ajout de conduites.

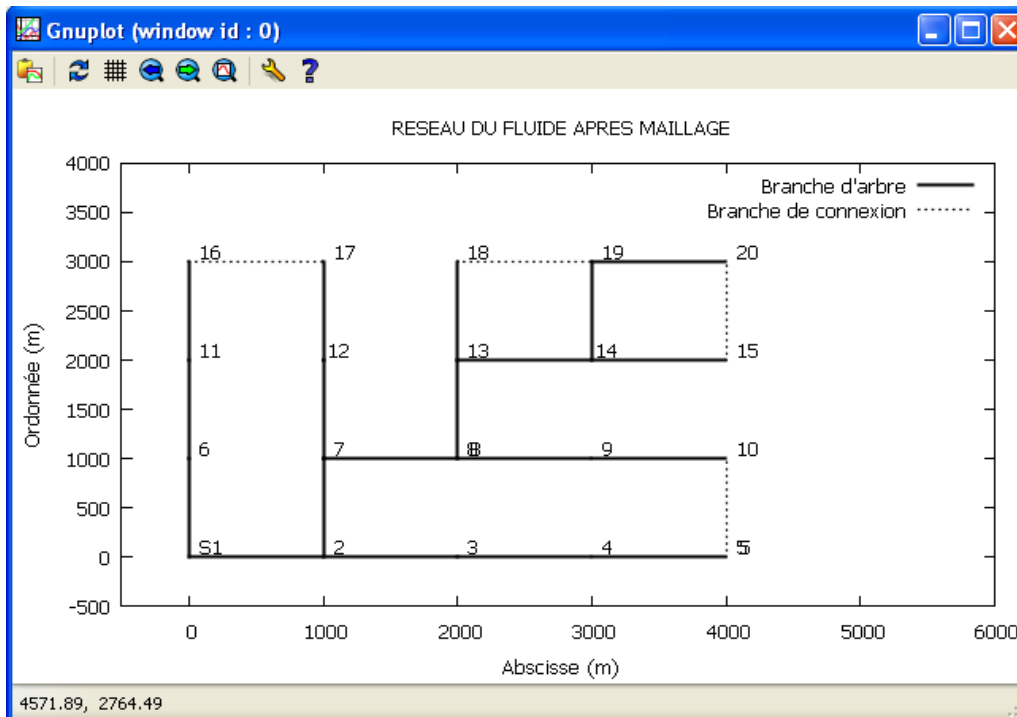
```

c:\f9556\plot1.exe
ok
pour le noeud 16 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :1

entrer les nombres de ces noeuds :17
ok
pour le noeud 18 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :1

entrer les nombres de ces noeuds :19
ok
LA LONGUEUR TOTALE DU RESEAU APRES MAILLAGE : 23000.0000 (m)
==> LA FIGURE DU RESEAU MAILLE EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!
tous les noeuds ont un degre de connectivite superieur a 2
VOULEZ VOUS AJOUTER OU SUPPRIMER QUELQUES CONDUITES? REPONDER PAR <SUP> "pour s
upprimer" ou par <AJO> "pour ajouter" si non par "NON" pour ne rien faire :
    
```

L'interfaçage graphique du réseau obtenu après maillage, est illustré dans la figure 4.11.



**Figure 4.11:** Interfaçage graphique du réseau maillé à une seule source

La fenêtre d'exécution suivante montre la longueur totale du réseau, après la modification dans les conduites, c'est-à-dire après l'opération de suppression et ajout de quelques conduites. La représentation graphique du réseau obtenu après l'amélioration est montrée dans la figure 4.12.

```

c:\f9556\plot1.exe
)
VOULEZ VOUS SUPPRIMER UNE AUTRE CONDUITE REPONDER PAR OUI OU NON OUI
pour cette conduite entrer le nume'ro du premier      noeud:9
  entrer le numero du deuxieme noeud :10

la longueur totale apres la suppression de la      conduite est: 24000.0000 <m
)
VOULEZ VOUS SUPPRIMER UNE AUTRE CONDUITE REPONDER PAR OUI OU NON OUI
pour cette conduite entrer le nume'ro du premier      noeud:14
  entrer le numero du deuxieme noeud :15

la longueur totale apres la suppression de la      conduite est: 23000.0000 <m
)
VOULEZ VOUS SUPPRIMER UNE AUTRE CONDUITE REPONDER PAR OUI OU NON OUI
tous les noeuds ont un degre de connectivite      superieur a 2
    
```

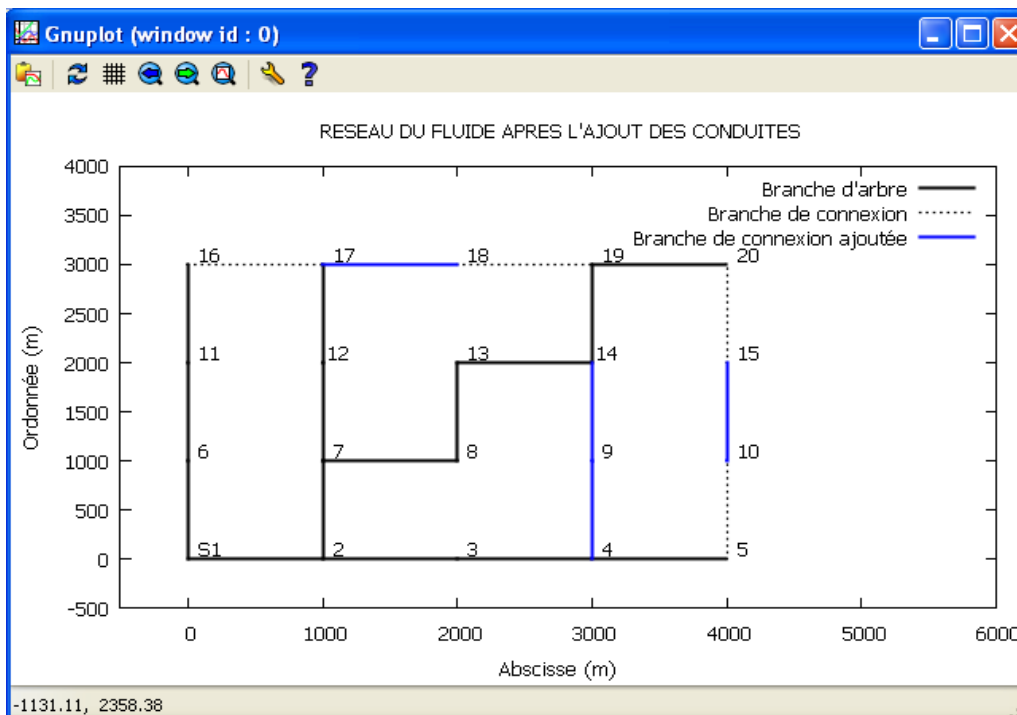


Figure 4.12 : interfaçage graphique du réseau après ajout et suppression de conduites

En examinant les deux réseaux obtenus, on constate qu'ils sont tous les deux complètement maillés, ce qui garantit la fiabilité et la disponibilité du fluide. Cependant le réseau de la figure 4.13 est de longueur totale inférieure à celle du réseau obtenu dans la figure 4.14 ; 2300m pour le premier et 2600m pour le deuxième.

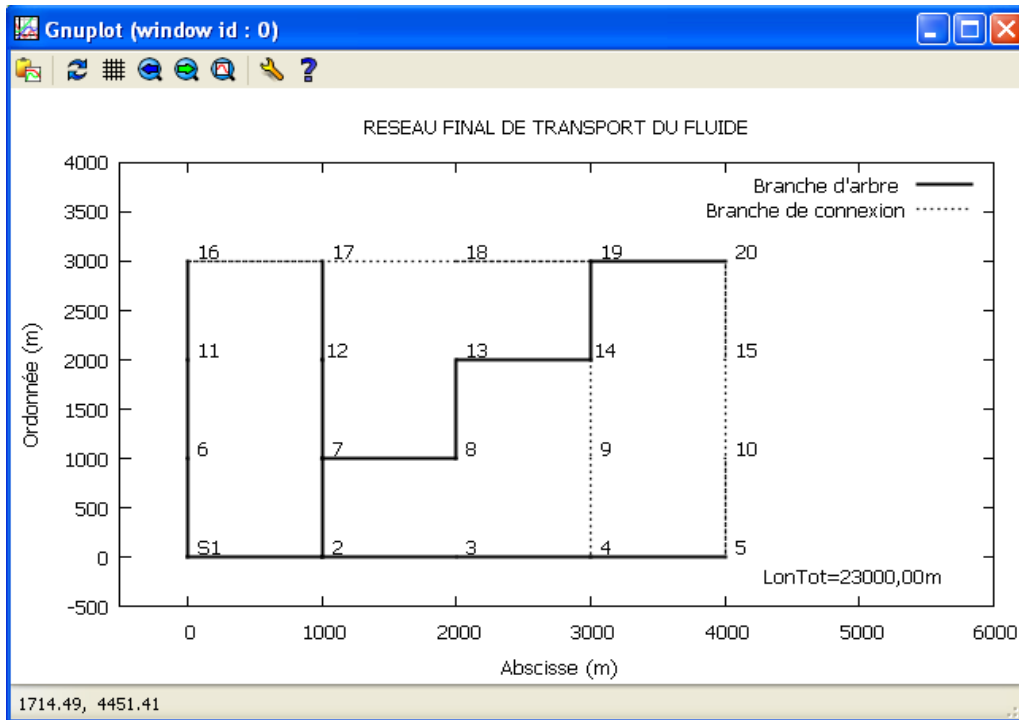


Figure 4.13: interfaçage graphique du réseau final obtenu

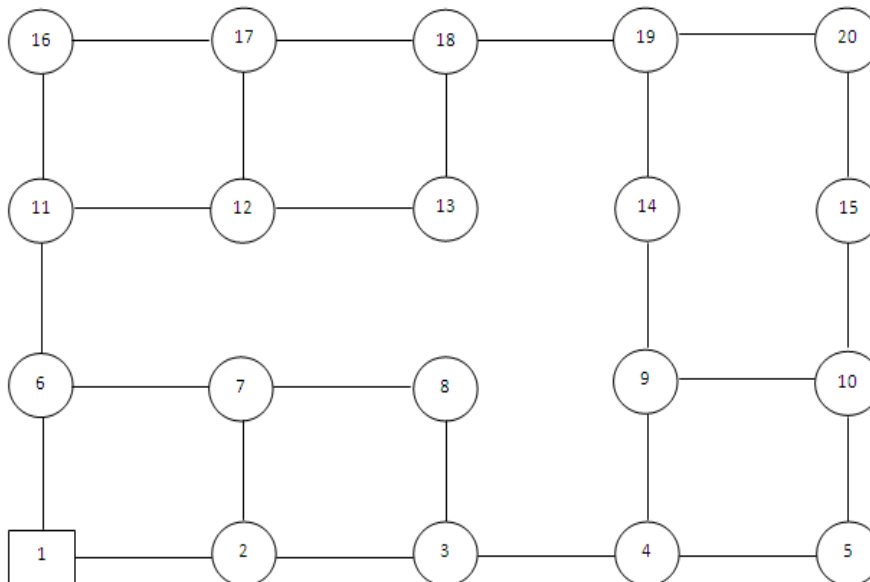


Figure 4.14 : Représentation graphique du réseau à une seule source  
Réf. [15]

#### Cas 4 : Réseau de distribution à deux mailles

Le cas suivant est un réseau avec une seule source et 6 nœuds de connexion, communément connu sous le nom de réseau à deux mailles [48, 49, 50, 49].

**Tableau 4.4 :** Caractéristiques du réseau à deux mailles

Nœud	Coordonnées (m)		Capacité/ Demande (m <sup>3</sup> /s)
	Abscisse	Ordonnée	
1	3100	100	1120
2	2100	100	100
3	1100	100	100
4	2100	1100	120
5	1100	1100	270
6	2100	2100	330
7	1100	2100	200

L'affichage des résultats du réseau obtenu après construction des groupes est dans la fenêtre suivante.

```

c:\f9556\plot2.exe
LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 6000.00000 (m)
===> LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLES SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT !!!
Le degre du noeud 3 est inferieur a 2 !
Le degre du noeud 6 est inferieur a 2 !
Le degre du noeud 7 est inferieur a 2 !
pour le noeud 1 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a c
e dernier :
    
```

L'interfaçage graphique du réseau ramifié obtenu est montré dans la figure 4.15.

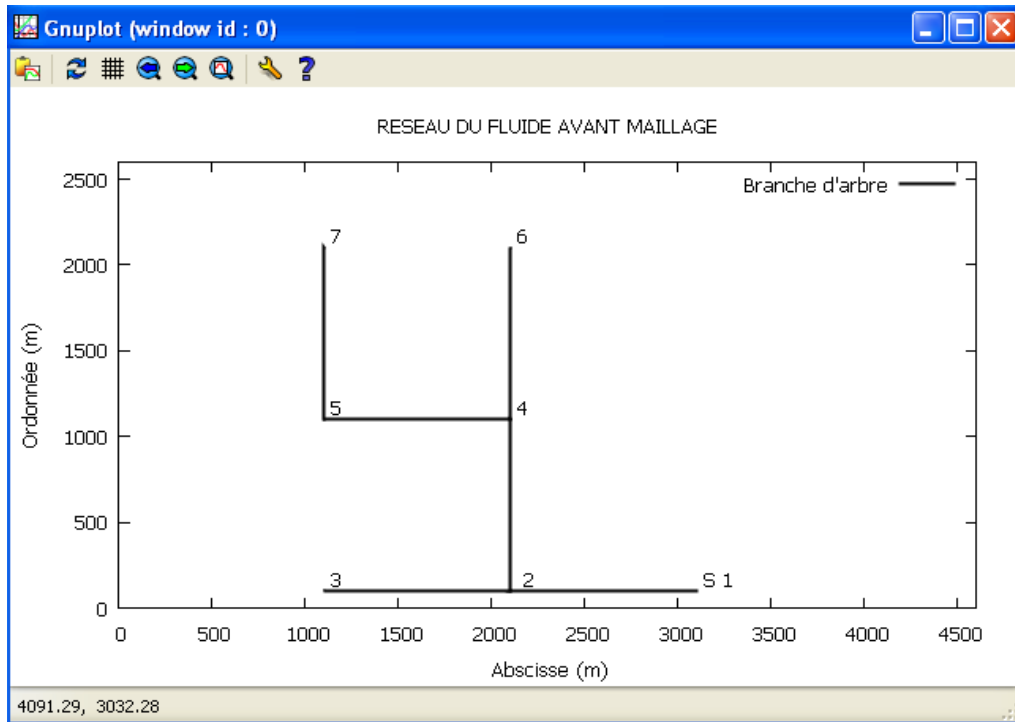


Figure 4.15 : Interfaçage graphique du réseau ramifié du réseau à deux mailles

Après le choix des nœuds à relier entre eux suite à la vérification du critère portant sur le nombre de connexion, la longueur totale du réseau obtenu après maillage est donné dans la fenêtre ci-dessous.

```

c:\f9556\plot2.exe
ok
pour le noeud 3 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a c
e dernier :1
    entrer les nombres de ces noeuds :5
ok
pour le noeud 6 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a c
e dernier :1
    entrer les nombres de ces noeuds :7
ok
LA LONGUEUR TOTALE DU RESEAU APRES MAILLAGE : 8000.00000 (m)
==> LA FIGURE DU RESEAU MAILLE EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!
tous les noeuds ont un degre de connectivite superieur a 2
VOULEZ VOUS AJOUTER OU SUPPRIMER QUELQUES CONDUITES? REPONDER PAR <SUP> "pour s
upprimer" ou par <AJO> "pour ajouter" si non par "NON" pour ne rien faire :
    
```



Le réseau obtenu dans le travail de Loganathan et al [50] présenté dans la figure 4.17 est presque identique avec le réseau obtenu dans la présente étude, présenté dans la figure 4.16, et ont alors la même longueur totale de 8000 m. Les deux réseaux sont complètement maillés et chaque nœud est relié par, au moins, deux branches au reste du réseau. Les branches d'arbre et de connexion sont au même nombre (6 et 2 respectivement) pour les deux études.

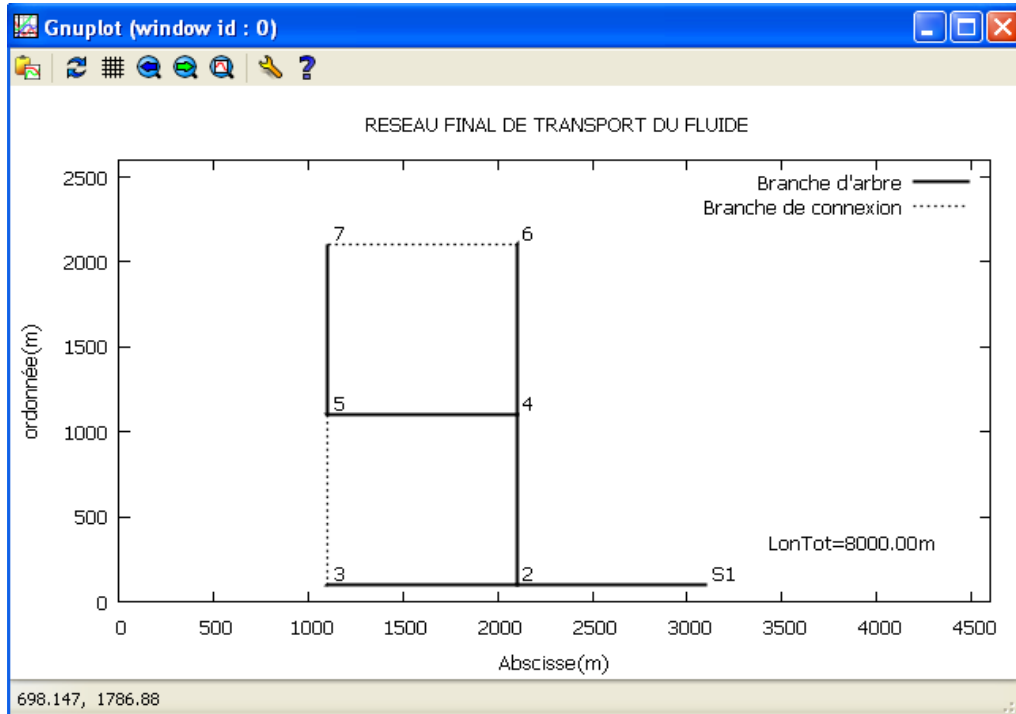


Figure 4.16 : Interfaçage graphique du réseau final à deux mailles

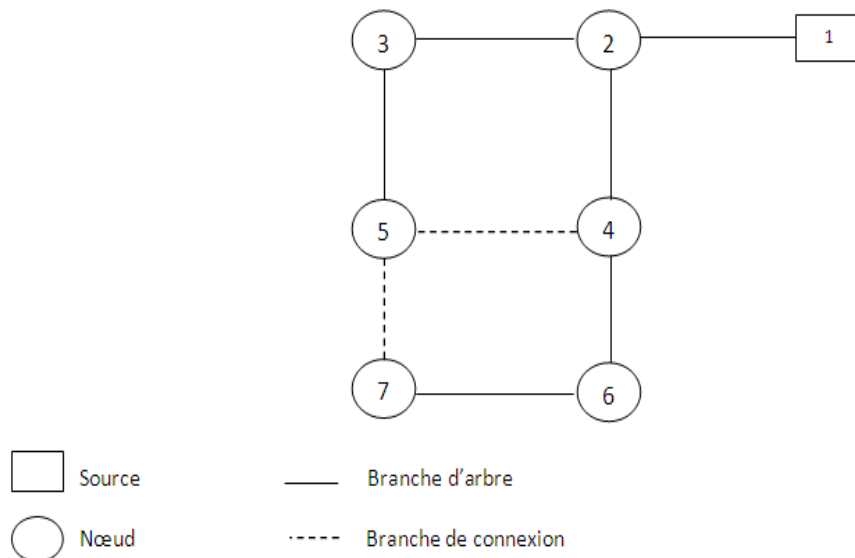


Figure 4.17 : Représentation graphique du réseau à deux mailles, Réf. [51]

#### 4.4.2. Cas d'étude d'optimisation du choix du diamètre

Le programme établi a été testé sur un réseau avec une seule source et 6 nœuds de connexion. Le réseau à deux mailles repris comme référence dans beaucoup de travaux [15, 45, 46]. Les valeurs des diamètres (mm) de conduites disponibles et leurs coûts unitaires en unités monétaires [49,43] entre parenthèses sont 50,8(5); 76,2(8); 101,6(11); 152,4(16) ; 203,2(23); 254(32); 304,8(50); 355,6(60); 406,4(90); 457,2(130); 508(170); 558,8(300) et 609,6(550). Les résultats obtenus par le programme sont résumés dans le tableau 4.5 et l'interfaçage graphique du réseau est représenté dans la Figure 4.18.

**Tableau 4.5** : Résultats de l'optimisation Complète

Nœud de début	Nœud de fin	Longueur Totale (m)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Diamètre (mm)	Longueur (m)
1	2	1000,00	1120,00	508,0	256,00
				457,2	744,00
2	3	1000,00	177,00	254,0	1000,00
2	4	1000,00	843,00	457,2	1000,00
3	5	1000,00	77,00	152,4	1000,00
4	5	1000,00	121,39	203,2	319,38
				152,4	680,62
4	6	1000,00	601,60	406,4	1000,00
5	7	1000,00	71,61	152,4	990,93
				101,6	9,07
6	7	1000,00	271,60	304,8	784,94
				254,0	215,06

Le coût total après l'optimisation complète du réseau est 488559,23 U.M.

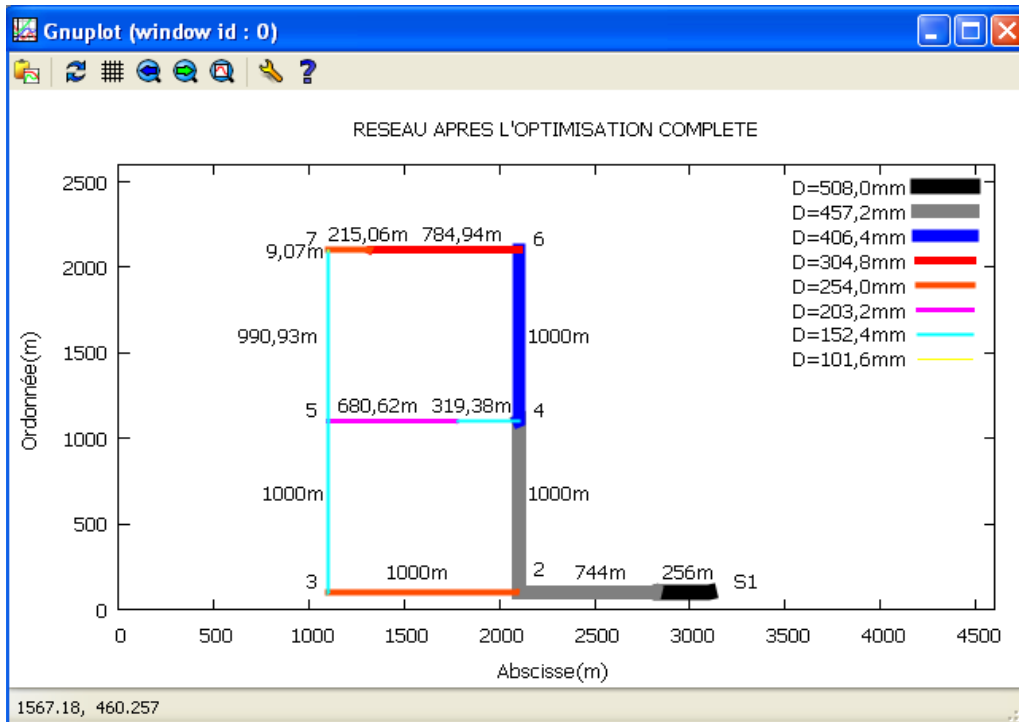


Figure 4.18 : Interfaçage graphique du réseau final à deux mailles après l'optimisation complète

# *CONCLUSION*

## CONCLUSION

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. On a proposé une méthode heuristique conçue d'une manière claire, simple et qui répond aux exigences imposées par les contraintes du problème. Cette méthode a été implémentée dans un programme informatique facile à utiliser et dont les résultats apparaissent sous forme de tableaux de valeurs et de graphes. L'utilisation d'une interface graphique a permis de revoir les résultats en les améliorant.

On s'est proposé de développer et d'appliquer, un logiciel convivial d'optimisation du comportement des réseaux de distribution d'eau potable. La conception s'est faite en deux étapes complémentaires mais indépendantes, une optimisation de la longueur du réseau et une optimisation des diamètres.

Un grand intérêt a été porté à l'utilisation de l'interfaçage graphique afin que la procédure proposée soit la plus proche possible de la réalité. Une solution obtenue par le programme est visualisée sous forme graphique avec une possibilité d'action sur le réseau obtenu, et de là des modifications sont possibles en vue d'améliorer le coût. Les cas d'études traités dans ce travail ont montré qu'une intervention directe sur l'interface graphique générée a permis une suppression (ou ajout) de conduites de façon interactive et de là une amélioration du résultat final. Les réseaux obtenus sont de valeurs plus optimales.

## **Références Bibliographiques**

- 1.** Lhomme S, L'analyse structurelle des réseaux techniques : modélisations, propriétés, vulnérabilités, Université Paris Est (EIVP) - Université Paris 7, 2012.
- 2.** Haidar. H, Réhabilitation des réseaux d'eau potable : méthodologie d'analyse multicritère des patrimoines et des programmes de réhabilitation, Institut National des Sciences Appliqués de Lyon, 2006.
- 3.** Bentoumi. M, Etude et conception d'un système de détection de fuites sur les canalisations d'eau, Université Mohamed Boudiaf- M'SILA, 2005.
- 4.** NAFI A, C.WEREY, P.LLERENA, La Programmation Budgétaire du Renouvellement des Réseaux d'eau potable en utilisant un algorithme génétique simple, Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités, Rabat-Maroc, 2006.
- 5.** Blindu I, Outil d'aide au diagnostic de Réseau D'eau Potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydraulique, Université Jean Monnet Saint-Etienne, 2004.
- 6.** Nafi A, LA Programmation pluriannuelle du Renouvellement des réseaux d'eau potable, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2006.
- 7.** Jean-luc C et Jean-Antoine F, La Dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux, Office International de l'Eau SNIDE.
- 8.** Ajuste C., BERLAND J-M., CELERIER J-L, Réhabilitation / remplacement des réseaux d'eau potable en zone rurale, Office International de l'Eau SNIDE, 2004.
- 9.** Hernández H.R, Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau Potable, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- 10.** Remini B, La Problématique de l'eau en Algérie du nord, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N°08, pp. 27-46, 2010.
- 11.** Germain. P et. Muller.P, Introduction à la mécanique des milieux continus, Masson.
- 12.** Dymont. A, Introduction à la mécanique des fluides, Cours de mécanique des fluides, Université des sciences et techniques de LILLE.

- 13.** Vazquez J, Cours Hydraulique Générale, Ecole Nationale du Génie de L'eau et de l'environnement de Strasbourg, 2010.
- 14.** Zella L., Smadhi D., L'intérêt du calcul des pertes de charge en micro irrigation, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N° 04, pp.51-68, 2005.
- 15.** Lahiouel Y, Modélisation de l'écoulement et développement d'un programme général de calcul et de conception de réseaux de distribution en eau potable, Dr en mécanique des fluides, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2006.
- 16.** Paterson R, A first cours in fluid dynamics, Cambridge university press.
- 17.** Frelin, M., 2002. Coups de bélier. Techniques de l'ingénieur, BM 4 176, 1-27.
- 18.** Candel, S., Mécanique des fluides, Ecole Centrale de Paris Ed. Dunod.
- 19.** Géraldine B, Optimisation de la Gestion d'un Réseau de Distribution d'eau potable, École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2007.
- 20.** Dridi L, Mailhot. A, M. Parizeau et Jean-Pierre Villeneuve: Planification Optimale du Renouvellement des conduites dans un Réseau de distribution d'eau potable 2006.
- 21.** Mbemmos S, Simeu-Abazi Z, Diagnostic et maintenance d'un réseau de Distribution d'eau potable, Université de Douala au Cameroun.
- 22.** Nouiri, F. Lebdi and N. Lamaddalena, Evolutionary Algorithm (EA) for flow optimization in on demand water systems networks, Options méditerranéennes, Series B, n°52.
- 23.** Lahiouel Y., Haddad A., Khezzar L., Chaoui K., Kondratas A., Development of Method of Routing Fluid Distribution Networks, MECHANIKA, Vol 42 , N°4 pp.27-34, 2003.
- 24.** Fares N., Dimensionnement, simulation et analyse des réseaux de gaz, 1<sup>ères</sup> Journées Nationales sur le traitement, le stockage, le transport et la distribution des hydrocarbures, Université de Boumerdès.
- 25.** Lahiouel Y., Lahiouel R., Azari Z., Modélisation de l'écoulement et conception et a moindre coût des réseaux de distribution, 20<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 2011.

- 26.** Smith.D.K , Walters.G, An evolutionary approach for finding optimal trees in undirected networks, *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, pp. 593-602, 2000.
- 27.** Aaron C. Zecchin, Angus R. Simpson, Holger R. Maier, Michael Leonard, Andrew J. Roberts, Matthew J. Berrisford, Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation, *J. Mathematical and Computer Modelling*, Vol.44 pp.451-468, 2006.
- 28.** Vasile Lavric., Petrica Iancu., Valentin Plesxu, Genetic algorithm optimisation of water consumption and wastewater network topology, *Journal of Cleaner Production*, Vol.13 pp .1405-1415, 2005.
- 29.** Liu Min., Wu Cheng., Genetic algorithms for the optimal common due date assignment and the optimal scheduling policy in parallel machine earliness/tardiness scheduling problems, *J. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* ,Vol.22, pp. 279–287, 2006.
- 30.** Chaouch N, La Conception optimale des réseaux de distribution et de transport des fluides: l'eau potable, Université 08 Mai 1945-Guelma, 2010.
- 31.** Montalvo.I, Izquierdo. J, Schwarze. S, Rafael Pérez-García, Multi objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction, *J. Mathematical and Computer Modelling*, Vol.52, pp 1219-1227, 2010.
- 32.** Hillier F.S.et Lieberman G.J., *Introduction to Operation Research*, 3<sup>rd</sup> Edition, Holden-Day, Inc., San Francisco, (1980).
- 33.** Osiadacz A.J., *Simulation and analysis of gas network*, E&F.N. Spon Ltd., London, 1987.
- 34.** Inmaculada Pulido-Calvo, Juan Carlos Gutiérrez-Estrada, José María Corbacho, Pipes size selection of water distribution systems of fishfarms, *J. Aquacultural Engineering*, Vol.39 pp.43–52, 2008.
- 35.** Maria da Conceição Cunha, Luisa Ribeiro, Tabu search algorithms for water network optimization, *European Journal of Operational Research*, Vol.157 ,pp.746-758, 2004.



- 36.** Vilas V. Sonak, Pramod R.Bhave, Global Optimum Tree Solution for single-source looped Water Distribution Network subjected to single loading patten, Water Resources Reseach, Vol (29), N°7, pp. 2437-2443, 1993.
- 37.** Chien-Wei Chu, Min-Der Lin, Gee-Fon Liu, Yung-Hsing Sung, Application of immune algorithms on solving minimum-cost problem of water distribution network, J. Mathematical and Computer Modelling, Vol.48, pp.1888–1900, 2008.
- 38.** Chana A.L., Hanby V.I., Chow T.T, Optimization of distribution piping network in district cooling system using genetic algorithm with local search, Energy Conversion and Management , Vol.48, pp.2622–2629, 2007.
- 39.** Francesco di Pierro, Soon-Thiam Khu, Dragan Savic, Luigi Berardi, Efficient multi-objective optimal design of water distribution networks on a budget of simulations using hybrid algorithms, J. Environmental Modelling & Software Vol. 24, pp. 202–213, 2009.
- 40.** R. Baños, C. Gil, J. Reça, F.G. Montoya, A memetic algorithm applied to the design of water distribution networks, J. Applied Soft Computing, Vol.10 pp.261–266, 2010.
- 41.** Tamar Opher, Avi Ostfeld, A coupled model tree (MT) genetic algorithm (GA) scheme for biofouling assessment in pipelines, J. Water search, Vol. 45, pp. 6277-28862, 2011.
- 42.** Bolgnesi. A, Bragalli. C, Marchi. A, Artina. S, Heritage. G Evolution by Stochastic Transmission in the optimal design of water distribution networks, J. Advances in Engineering Software, Vol.41, pp.792-801, 2010.
- 43.** Castillo L., Gansalaez A., Distribution network optimization: finding the most economic solution by using genetic algorithms, J. of operational Research, Vol.108, pp.527-537, 1998.
- 44.** BAI D., YANG P.J., SONG L., Optimal Design Method of Looped Water Distribution Network, Systems Engineering - Theory & Practice, Vol 27, N°7, pp 137–143, 2007.
- 45.** Lahiouel Y., Haddad A., Khezzar L., Chaoui K., Kondratas A., Development of Method of Routing Fluid Distribution Networks, MECHANIKA, Vol 42 , N°4 pp.27-34, 2003.
- 46.** Gupta I., Gupta A., Khanna P., Genetic algorithm for optimization of water distribution systems, Environmental Modelling & Software Vol 14 , pp.437–446, 1999.

- 47.** Elnaboulsil J., Alexandrel O., Le Renouvellement des Réseau D'eau Potable: une revue Critique, Canadian Water Resources Journal, 1996.
- 48.** Lahiouel Y., Chaoui K., Khezzar L., Haddad A., et Azari Z., Optimization of water distribution networks design by minimizing the total length, Eng. Trans., Vol.53, N°2, pp.165-183, 2005.
- 49.** Delchambre A, Rekiek B. et Delgado F.M., Application des algorithmes génétiques au problème de construction de réseaux de distribution de gaz et de l'électricité, Univ. Libre de bruxelles, 2000.
- 50.** Loganathan G.V., Sherali H.D. et Shah M.P., A Two-phase network design of water distribution networks, J. of water Resour. Planning and Management, Vol. 123, N°2, pp.67-77, 1997.