

M / 624 / 770
540.912

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 de Projet de Fin d'Etudes
2^{ème} Année Master

Optimisation et interfaçage graphique de la conception des réseaux de distribution et de transport des fluides

Filière : Génie des Procédés
Spécialité: Matériaux et Génie des Procédés : Génie Chimique

Présenté par :
DEHANE Aïssa

Sous la direction de :
Dr.Lahiouel.Y

Juin 2012

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 de Projet de Fin d'Etudes
2^{ème} Année Master

**Optimisation et interfaçage graphique de la conception des
réseaux de distribution et de transport des fluides**

Filière : Génie des Procédés

Spécialité: Matériaux et Génie des Procédés : Génie Chimique

Présenté par :

DEHANE Aïssa

Sous la direction de :

Dr.Lahiouel.Y

Juin 2012

SOMMAIRES

REMERCIEMENT	i
LISTE DES FIGURES	ii
LISTE DES TABLEAUX	iii

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE 1 / LES RESEAUX DE DISTRIBUTION

1. Introduction	2
2. Description de systèmes de distribution	2
1.1. Conduites en série	2
1.2. Conduites en parallèle	2
1.3. Réseaux ramifiés	3
2.4. Réseaux maillés	4
3. Notion de longueur équivalente	4
4. Lois de conduites en séries et en parallèles	5
4.1. Conduites en série	5
4.2. Conduites en parallèle	6
5. Régimes d'écoulement	7
5.1. Types d'écoulement	7
5.2. Régimes d'écoulement	7
5.2.1. Nombre de Reynolds	8
5.2.2. Régime laminaire	8
5.2.3. Régime transitoire	9
5.2.4. Régime turbulent	9
6. Equations de base	9
6.1. Equation de continuité	10
6.2. Equation de BERNOULLI	10
6.2.1. Relation de BERNOULLI généralisée	11
7. Pertes de charge	12
8. Théorie des graphes	12
8.1. Définition	12
8.2. Graphe orienté et non orienté	13

8.3. Classes de graphes	13
8.4. Chaines et cycles dans un graphe	14
8.5. Arbres et arborescences	15
8.6. Isthmes	16
8.7. Matrice d'incidence	16

CHAPITRE 2 / OPTIMISATION DE LA CONCEPTION DES RESEAUX

1. Introduction	18
2. Equipement et accessoires du réseau de distribution	18
3. Age des canalisations	20
4. Les Méthodes et Algorithmes de résolution	20
5. Problème d'optimisation de réseaux de conduites	21
6. Techniques de base utilisées dans l'optimisation de la configuration	23
6.1. Les algorithmes génétiques	23
6.2. L'algorithme du plus court chemin	25
6.3. L'algorithme de l'arbre minimal	26

CHAPITRE 3 / PROGRAMME ET APPLICATION

1. Introduction	28
2. Description du programme	29
2.1. Principaux paramètres utilisés et leur notation	29
3. Fonctionnement du programme	30
3.1. Etape 1 (Introduction des données)	30
3.2. Etape 2 (Calculs et résultats)	30
3.3. Etape 3 (Ajout / suppression de conduites)	32
4. Organigramme	33
5. Résultats et commentaires	40
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	62

Remerciement

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.

Ma gratitude va d'abord à 'Dr Lahiouel.Y' qui m'a honoré de sa confiance par son encadrement, j'étais tout au long du travail impressionné par ses qualités humaines, puissent ces lignes être l'expression de ma profonde reconnaissance.

Comme je tiens à témoigner ma reconnaissance à tous mes professeurs durant toutes les années d'étude à l'université de 8 mai 45 pour leurs conseils rigoureux et leur aide précieuse. Ainsi je tiens à remercier tous ceux qui par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

Enfin au terme de ces remerciements je rends hommage à mes parents, à mes frères et sœurs sans oublier mon neveu 'Abdou' et mes nièces 'Sawsane' et 'Lina'.

LISTE DES FIGURES

FIGURE-----	PAGE
Figure 1.1 : Conduite en parallèle	2
Figure 1.2 : Réseau ramifié	3
Figure 1.3 : Réseau maillé	4
Figure 1.4 : les graphes orientés et non orientés	13
Figure 1.5 : Classes de graphe	14
Figure 1.6 : Chaines et cycles dans un graphe	14
Figure 1.7 : Arbres et arborescences	15
Figure 1.8 : Graphe d'un réseau de fluide	15
Figure 1.9 : Isthmes	16
Figure 1.10 : graphe orienté	17
Figure 3.1 : Réseau obtenu par les algorithmes génétiques	43
Figure 3.2 : Réseau obtenu par Loganathan.....	50
Figure 3.3 : Réseau obtenu par la méthode de la longueur minimale avant modification.....	55
Figure 3.4 : réseau obtenu par la méthode de la longueur minimale avant modification.....	60

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU-----	PAGE
Tableau 3.1 : Données du réseau avec des nœuds loin	40
Tableau 3.2 : Données du réseau avec des sources loin	44
Tableau 3.3 : Données du réseau (troisième cas)	47
Tableau 3.4 : Données du réseau (quatrième cas)	50
Tableau 3.5 : Données du réseau (cinquième cas)	55

INTRODUCTION

Introduction générale:

L'hydraulique est incontournable dans le domaine de l'environnement. En effet, elle a une place déterminante dans la compréhension, l'analyse et le diagnostic des réseaux.

Le réseau de distribution est un ensemble de conduites reliées les unes aux autres d'où l'objectif principal est de ramener un fluide d'une certaine source jusqu'au point de consommation de ce dernier, pour y fournir un débit maximal.

Les problèmes cruciaux dans le comportement avec ces réseaux résident dans l'analyse et la conception de ces derniers, tous ces problèmes présentent le souci d'un nombre important de chercheurs qui tentent d'arriver à des solutions optimales utilisant différentes techniques et méthodes probables pour atteindre les objectifs voulus.

Dans le présent travail nous nous intéressons aux techniques utilisées pour la conception optimale des réseaux de fluides afin de proposer une méthode qui permet d'offrir une solution optimale pour la conception de plusieurs réseaux proposés après une comparaison établie avec différents résultats obtenus par des méthodes qui ont été déjà publiées.

CHAPITRE I

LES RESEAUX DE DISTRIBUTION

1. Introduction:

Dans le traitement des problèmes compliqués on essaye toujours de simplifier le système dans le but de pouvoir le traiter, donc ce besoin nous appelle à avancer quelques notions nécessaires pour faciliter la manipulation de problèmes proposés, ces notions ont été organisées de façon graduelle.

Les notions proposées dans ce chapitre décrivent les différents compartiments du réseau à traiter ainsi que les interactions entre eux, d'autres notions supplémentaires sont présentées afin de bien clôturer notre besoin.

2. Description de systèmes de distribution :

A partir du ou des sources d'alimentation, un fluide est distribué dans un réseau de canalisations sur lesquelles les branchements seront piqués en vue de l'alimentation des points de consommation.

Une canalisation se compose d'éléments droits (tuyaux), d'éléments de raccordements (raccords) et de pièces spéciales (coudes, cônes, tés, etc.).

La construction d'un réseau de distribution d'un fluide n'est pas uniforme d'un milieu à un autre et dépend des particularités de ce dernier.

2.1 Conduites en série :

Des conduites sont en série si elles sont connectées bout à bout de sorte que le fluide s'écoule continûment sans branchement. Le débit volumique, à travers les conduites en série, reste constant.[1]

2.2 Conduites en parallèle :

Des conduites sont en parallèle si elles sont connectées de façon que l'écoulement se divise en deux ou plusieurs branches qui se rejoignent en aval, comme le montre la figure suivante [1]:

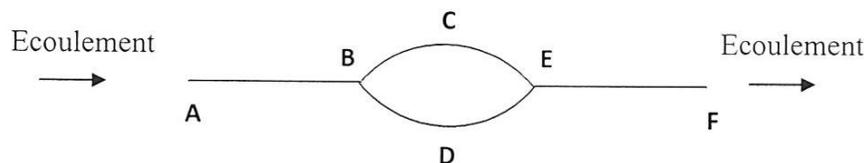


Figure 1.1 : Conduite en parallèle

- pour résoudre les problèmes relatifs aux conduites en parallèle, on applique trois principes importants :

- 1) Le courant total, entrant dans chaque jonction, doit être égal à celui qui en sort.
- 2) La perte de charge entre deux jonctions (par exemple les jonctions B et E dans la figure) est la même dans toutes les branches connectées à ces jonctions.
- 3) Dans le domaine des vitesses courantes, le pourcentage du flux total, dans chaque branche, est constant (c.-à-d. dans les branches BCE et BDE et d'autres pouvant se trouver entre les jonctions B et E) et cela quelles que soient les pertes de charge entre les jonctions.

2.3 Réseaux ramifiés :

Le réseau ramifié, dans lequel les conduites ne comportent aucune alimentation en retour, se terminant par des antennes (des branches d'un réseau dont un des nœuds n'est pas connecté, le débit à ce nœud doit être connu).

Le réseau ramifié présente l'avantage d'être économique, mais il manque de sécurité et de souplesse en cas de rupture (un accident sur la conduite principale prive tous les points de consommation en aval). [2]

Le problème principal qui se pose ici est la détermination des débits, et éventuellement des charges pour chaque tronçon de conduite.

Ce type de réseau ne comporte pas de mailles et seules les équations de nœuds (continuité) sont utilisées pour le calculer.[6]

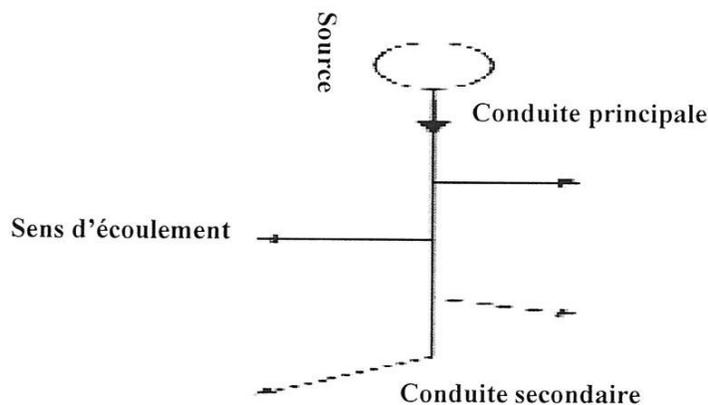


Figure 1.2 : Réseau ramifié [12]

2.4. Réseaux maillés :

Un réseau maillé est un ensemble de conduites qui forment des boucles fermées dites mailles.

L'avantage de ce type de réseau c'est qu'il permette l'alimentation en retour en cas de panne dans une conduite et cela après isolation du tronçon défectueux [12], ainsi il assure une répartition plus uniforme des pressions et des débits dans tout le réseau.

Comme dans le cas des réseaux ramifiés, le problème consiste à déterminer les débits dans tous les tronçons qui, une fois connues, permettront de calculer les charges en chaque point du réseau.

- On peut trouver le réseau maillé avec réseau ramifié sous forme d'un réseau mixte.[13]

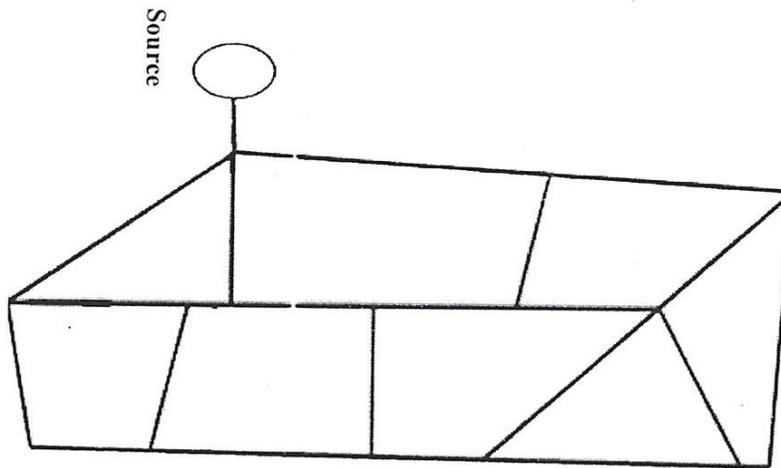


Figure 1. 3 : Réseau maillé

3. Notion de longueur équivalente :

Une conduite est équivalente à une autre ou à un autre système de conduites lorsque, pour une perte de charge donnée, le débit de la conduite équivalente est le même que celui de la conduite initiale ou d'un système initial. On peut établir qu'une conduite est équivalente à une autre (ou à un système de conduites) lorsque, pour un débit donné, on observe la même perte de charge dans la conduite équivalente que la conduite initiale. Donc les pertes de charge régulières et singulières sont converties pour déterminer la longueur équivalente L_{cq} de

la conduite que créerait la même perte de charge. Par exemple, la longueur équivalente L_{cq} d'une singularité, de coefficient de perte de charge K , est donnée par :

$$\lambda \cdot (L_{cq}/D) \cdot (V^2/2 \cdot g) = K \cdot (V^2/2 \cdot g) \quad (1.1)$$

Donc,

$$L_{cq} = K \cdot (D/\lambda) \quad (1.2)$$

En réalité, il y a un nombre infini de conduites équivalentes pour un système donné de conduites connectées en série ; il faut donc spécifier le diamètre de la conduite équivalente que l'on souhaite obtenir et on détermine la longueur ou bien, on se donne la longueur de la conduite équivalente dont on a besoin et on trouve le diamètre.

Le calcul des conduites équivalentes est assez direct ; il implique la recherche de pertes de charge, les débits et les sections étant connus, ou bien la recherche de débits, les pertes et les sections étant données. [1]

4. Lois de conduites en séries et en parallèles :

Bien souvent, avant de faire l'analyse d'un réseau, il est nécessaire de le simplifier en regroupant en série ou en parallèle un certain nombre de conduites pour former des conduites équivalentes. [6]

4.1. Conduites en série :

a) La perte de charge totale est égale à la somme des pertes de charge de chaque conduite :

$$h_T = h_1 + h_2 + \dots + h_j \quad (1.3)$$

b) Le débit est le même pour toutes les conduites :

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_j \quad (1.4)$$

c) La perte de charge est liée au débit par une relation du type :

$$h = R Q^n \quad (1.5)$$

Où le coefficient R est la résistance de la conduite. Cette résistance ne dépend que des propriétés de la conduite c'est-à-dire la rugosité, le diamètre et la longueur.

Avec la formule de Darcy-Weisbach, on a :

$$R = \frac{8 f L}{\pi^2 g D^5} \quad \text{et} \quad n = 2 \quad (1.6)$$

Pour la formule de Hazen-Williams, on a :

$$R = \left(\frac{1}{C_{HW} \beta} \right)^{1,85} \frac{L}{D^{4,87}} \quad \text{et} \quad n = 1,85 \quad (1.7)$$

β est le coefficient d'unités ($\beta = 0,2785$ (S.I.), $\beta = 0,4322$ (S.A))

Donc pour des conduites en série, la résistance équivalente s'exprime comme la somme des résistances de chaque conduite :

$$R_e = \sum_{i=1}^j R_i \quad (1.8)$$

4.2. Conduites en parallèle :

a) Le débit total est égal à la somme des débits de chaque conduite :

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_j \quad (1.9)$$

b) La perte de charge est la même pour toutes les conduites:

$$h_T = h_1 = h_2 = \dots = h_j \quad (1.10)$$

c) Le débit est lié à la perte de charge par une relation du type :

$$Q = K h^m \quad (1.11)$$

où K est la conductance de la conduite. La conductance est liée à la résistance par la relation :

$$K = \frac{1}{R^m}$$

Avec : $m = 1/n$.

Donc pour des conduites en parallèle, la conductance équivalente s'exprime comme la somme des conductances de chaque conduite :

$$K_e = \sum_{i=1}^j K_i \quad (1.12)$$

5. Régimes d'écoulement :

5.1. Types d'écoulement :

On distingue deux types d'écoulements :

- **les écoulements en charge :**

Les écoulements dits « en charge » sont ceux dans lesquels le fluide emplit complètement la canalisation dont l'écoulement est assuré par la différence de pression d'une façon naturelle ou par l'intermédiaire d'une pompe (dans le corps humain, c'est le cœur qui joue ce rôle).

Dans les écoulements en charge, la difficulté réside dans la détermination de la répartition des débits et des pressions dans les différents tronçons du réseau surtout dans le cas des réseaux maillés. [11]

- **les écoulements à surface libre (interface entre l'eau et l'air) :**

On désigne par écoulements à surface libre les écoulements dans lesquels le fluide qui s'écoule est en contact avec l'atmosphère. Cette configuration apparaît dans les canaux, les rivières ou les grandes étendues d'eau comme les lacs, les mers ou les océans. [3]

Dans les écoulements à surface libre, la difficulté majeure est de déterminer les caractéristiques de la surface libre : position, forme, vitesse . . .

- Dans les écoulements en charge ou à surface libre, en canaux rectilignes, les variations de rugosité de la paroi sont à l'origine d'écoulements secondaires générés par l'anisotropie de la turbulence et les variations transversales du frottement pariétal.[11]

5.2. Régimes d'écoulement :

- Le régime d'un écoulement se caractérise par la fluctuation temporelle des vitesses et des pressions au sein de la veine liquide.

- Les régimes d'écoulement varient suivant : les vitesses, viscosité, section de conduite, rugosité et masse volumique. [11]

5.2.1. Nombre de Reynolds :

L'étude des écoulements a été initiée par les travaux d'Osborne Reynolds (1883) et portent précisément sur le critère de transition du régime laminaire au régime turbulent dans un écoulement de conduite.

Reynolds a montré en 1883 qu'il existe deux sortes d'écoulement suivant la valeur d'un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds et noté Re :

$$Re = (VD/\nu) \quad \text{ou} \quad Re = (\rho VD/\eta) \quad (1.13)$$

V est une vitesse typique de l'écoulement, D une taille caractéristique et ν la viscosité cinématique du fluide, η viscosité dynamique du fluide.

Entre le régime laminaire et le régime turbulent, il existe une région intermédiaire où le profil de vitesse est mal connu. [4] La limite entre le régime laminaire et le régime turbulent est caractérisée par la valeur critique RC du nombre de Reynolds :

Si $R < RC$, l'écoulement est laminaire,

Si $R > RC$, l'écoulement est turbulent.

le passage pas logique

c'est quoi RC

c'est quoi le R

En règle générale, RC est compris entre 2000 et 3000, mais il dépend de la canalisation (forme, état des parois), de sorte que des valeurs plus petites ou plus grandes ne sont pas exclues. [7]

5.2.2. Régime laminaire :

L'écoulement du liquide est dit permanent si, en tout point de la conduite, les paramètres hydrauliques (Q , V , h , p , ...) dans une section donnée ne changent pas en fonction du temps, c'est-à-dire :

$$\frac{Q}{t} = 0, \frac{V}{t} = 0, \frac{p}{t} = 0, \dots etc \quad (1.14)$$

L'expérience montre que pour $Re < 2000-2100$ (conduite cylindrique $Re < 2000$) l'écoulement reste parfaitement laminaire ; le filet de colorant reste mince, régulier et parallèle à la paroi et une perturbation introduite dans l'écoulement s'amortit progressivement.

Cet ordre est maintenu tant que la vitesse d'écoulement reste inférieure à une certaine valeur.

5.2.3. Régime transitoire :

L'écoulement du liquide est dit non permanent ou transitoire si les grandeurs physiques (Q , V , h , p , ...) caractérisant l'écoulement dans chaque point de l'espace varient dans le temps, c'est-à-dire :

$$\frac{Q}{t} \neq 0, \frac{V}{t} \neq 0, \frac{P}{t} \neq 0, \dots etc \quad (1.15)$$

où $V = f_1(x, y, z, t)$; $P = f_2(x, y, z, t), \dots etc$.

Lorsque Re est de l'ordre de 2100 à 5600, des "paquets" d'écoulement perturbé sont transportés dans la conduite. Ces poches sporadiques de turbulence, séparées par des poches d'écoulement laminaire, sont typiques d'un régime de transition.

5.2.4. Régime turbulent :

Quand la vitesse est plus élevée ($Re > 3000$), le filet devient ondulé et très instable. Il se mélange rapidement au fluide ambiant. Des tourbillons de différentes tailles apparaissent. Le régime est dit turbulent.

Le mouvement des particules de fluide est irrégulier et désorganisé.

Dans ce cas, il apparaît que les forces de viscosité ne sont pas suffisantes pour empêcher les perturbations d'engendrer une multitude de petits tourbillons qui se superposent à l'écoulement global (une viscosité turbulente s'ajoute à la viscosité du fluide). [5]

6. Equations de base :

Le calcul des systèmes hydrauliques complexes repose sur les deux principes suivants :

- Le principe de conservation de la masse pour un fluide incompressible, ce que nous appellerons le **principe de continuité des débits**.
- le débit entrant dans un nœud est le même que celui qui en sort ainsi que celui qui coule dans la conduite qui relie les deux nœuds ;

- Le principe général de **conservation de l'énergie (équation de Bernoulli)** qui stipule que l'énergie perdue ou consommée doit être égale à l'énergie disponible.
- l'équilibre de l'écoulement, c'est-à-dire le régime permanent, est atteint lorsque la perte de charge devient égale à la charge hydraulique disponible. [6]

6.1. Equation de continuité :

La masse se conservant, cela se traduit par une équation de conservation de la masse, dite aussi « équation de continuité » [8]. Il y a donc aussi continuité de volume.

En écoulement permanent (uniforme ou non), le débit se propage en restant constant ($Q_1=Q_2$).

En écoulement permanent uniforme, la section mouillée et la vitesse moyenne sont constantes. [10]

L'équation de continuité peut être donnée sous 3 formes :

$$\frac{\rho}{t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0, \quad \left(\frac{\rho}{t} = 0\right), \quad \text{div} \vec{U} = 0 \quad (\text{Forme locale conservative}) \quad (1.16)$$

$$\frac{\rho}{t} + \rho \text{div}(\vec{U}) = 0 \quad (\text{Forme locale non conservative}) \quad (1.17)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega(t)} \rho d\Omega = 0 \quad (\text{Forme intégrale}) \quad (1.18)$$

ρ : masse volumique du fluide, \vec{U} vitesse du fluide, Ω volume de fluide.

6.2. Equation 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**.

On retrouve également la relation de Bernoulli si l'on applique la conservation de l'énergie au fluide (énergie cinétique + énergie potentielle de pesanteur + énergie potentielle de pression = Constante).

Le théorème de Bernoulli dans sa formulation classique ne s'applique qu'aux écoulements stationnaires incompressibles et sans viscosité, en tout point d'une ligne de courant l'équation de Bernoulli peut être exprimée sous plusieurs formes :

La relation de Bernoulli s'exprime en variation d'énergie (J/Kg) :

$$\frac{P}{\rho} + gz + \frac{1}{2}v^2 = cst \quad (1.19)$$

La relation de Bernoulli s'exprime en variation de pression (Pa) :

$$P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2 = cst \quad (1.20)$$

La relation de Bernoulli s'exprime en variation de niveau (m) :

$$\frac{P}{\rho g} + z + \frac{1}{2}\frac{v^2}{g} = cst \quad (1.21)$$

Où la constante « cst » s'appelle la charge. [9]

6.2.1. Relation de BERNOULLI généralisée :

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que des fluides parfaits, caractérisés par une viscosité nulle. Un fluide parfait n'existe pas.

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide réel (viscosité non nulle), il y a des pertes de charges (singulières et régulières) entre les points (1) et (2). L'équation de Bernoulli devient :

$$\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \Sigma P_s - \Sigma P_r \quad (1.22)$$

$\Sigma P_s + \Sigma P_r$ représente l'ensemble des pertes de charge singulières et régulières exprimées en énergie massique.

Dans le cas d'un écoulement 1 vers 2 avec échange de travail et perte de charge l'équation de Bernoulli devient :

$$\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) = W_{12} - \Sigma P_s - \Sigma P_r \quad (1.23)$$

7. Pertes de charge :

Tous les fluides ont, en fait une certaine viscosité; lors du déplacement des fluides des frottements apparaissent entre les différentes couches de fluide ou contre les parois de la canalisation ou d'un accident. Ces frottements entraînent donc une production de chaleur correspondant à une perte d'énergie mécanique pour le fluide. On parle de **pertes de charge**.

L'étude de l'écoulement (permanent et incompressible) d'un fluide réel a une grande envergure pour déterminer les profils des vitesses (ou des débits) et les hauteurs des charges totales le long de la conduite.

On distingue deux types de perte de charge :

- la perte de charge linéaire (ou par frottement) représentant l'énergie perdue entre les deux points,
- la perte de charge singulière qui intervient lorsque l'écoulement uniforme est localement perturbé.

8. Théorie des graphes :

Un petit dessin vaut mieux

qu'un grand discours,

Napoleon.

8.1. Définition :

On appelle graphe $G = (X, A)$ la donnée d'un ensemble X dont les éléments sont appelés sommets et d'une partie de A symétrique $((x,y) \in A \Leftrightarrow (y,x) \in A)$ dont les éléments sont appelés arêtes (arc).

Donc un graphe G est un couple consistant en un ensemble X non vide, au plus dénombrable et une suite finie A dans $X \times X$.

Donc un graphe G est un couple consistant en un ensemble X non vide, au plus dénombrable et une suite finie A dans $X \times X$.

En présence d'une arête $a = (x, y)$ qui peut être notée simplement xy , on dit que x et y sont les extrémités de a , que a est incidente en x et en y , et que y est un successeur ou voisin de x (et vice versa).

Les éléments de l'ensemble X sont appelés sommets ou nœuds. Le nombre de sommets est appelé ordre du graphe. [15]

8.2. Graphe orienté et non orienté :

On appelle graphe orienté $G = (X; A)$ la donnée d'un ensemble X dont les éléments sont appelés sommets et d'une partie A de $X \times X$ dont les éléments sont appelés arcs ou arêtes.

En présence d'un arc $a = (x, y)$ qui peut être noté simplement xy , on dit que x est l'origine (ou extrémité initiale) et y l'extrémité (terminale) de a , que a est sortant en x et incident en y , et que y est un successeur de x tandis que x est un prédécesseur de y . On dit aussi que x et y sont adjacents. [13]



Figure 1.4 : les graphes orientés et non orientés [13]

8.3. Classes de graphe :

Un graphe G est dit connexe, si pour toute paire de $\{x, y\}$ des nœuds de G , il existe une chaîne du nœud x au nœud y .

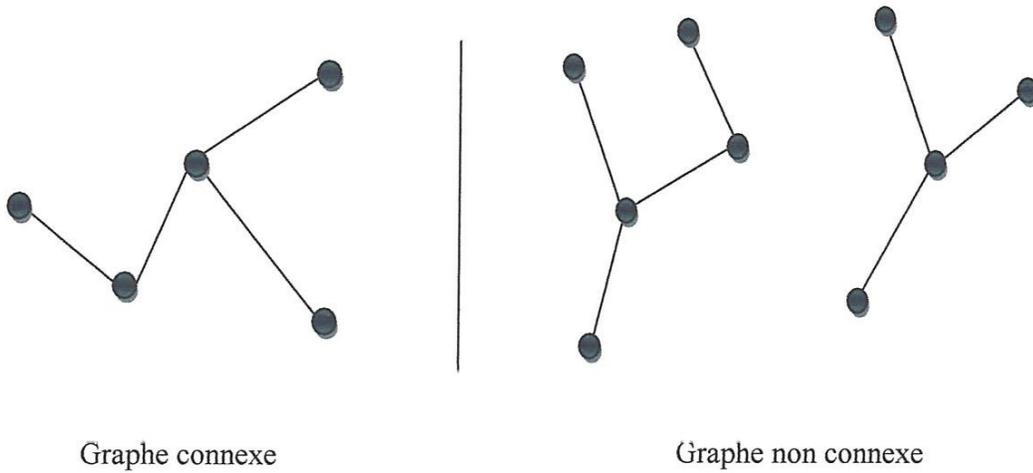


Figure 1.5 : Classes de graphe [13]

8.4. Chaines et cycles dans un graphe :

Une chaîne est une suite finie de nœuds qui sont reliés entre eux par des arcs. Si la chaîne n'utilise pas deux fois le même arc, elle est dite simple.

Exemple :

$P_1 = \{D, 4, E, 3, B, 1, A\}$ est une chaîne simple.

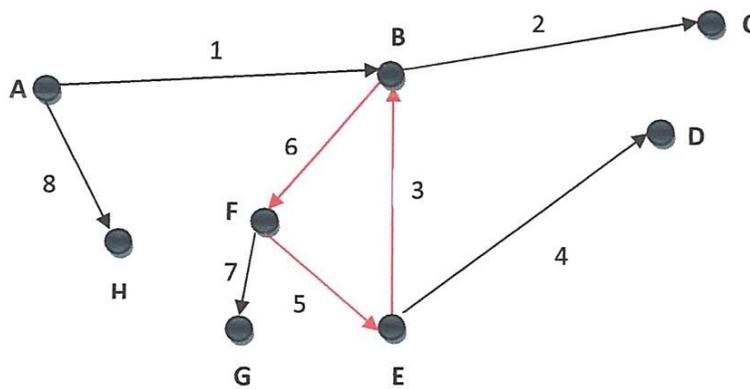


Figure 1.6 : Chaines et cycles dans un graphe [13]

Un cycle est une chaîne qui revient à son point de départ.

Exemple : $F_1 = \{B, 3, E, 5, F, 6, B\}$

8.5. Arbres et arborescences :

Un graphe connexe sans cycle simple et sans boucle est dit arbre.

Un graphe sans cycle mais non connexe est appelé forêt.

On appelle arborescence, un arbre avec un nœud distingué que l'on appelle la racine.

(Voir figure 1.7)

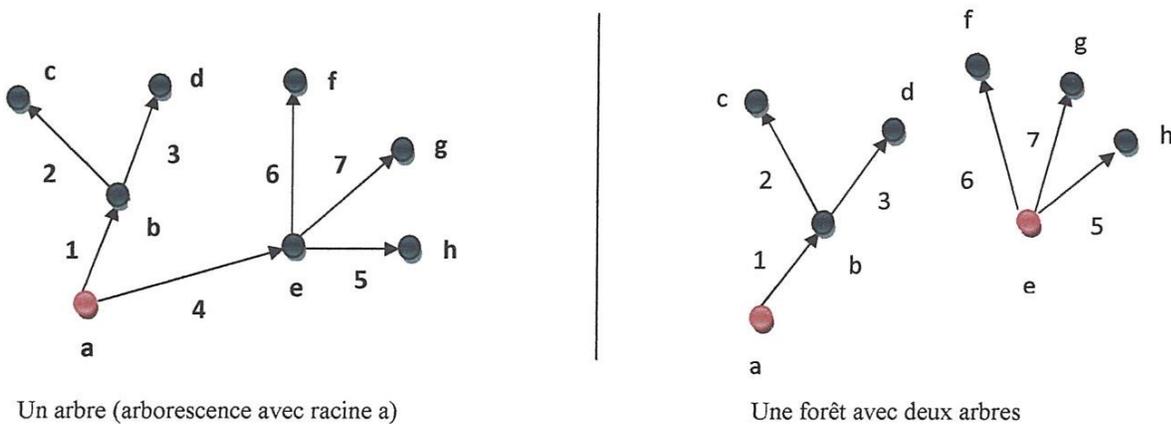


Figure 1.7 : Arbres et arborescences [13]

On peut bien sur construire, pour un graphe donné, plusieurs arbres.[14] (Voir figure 1.8)

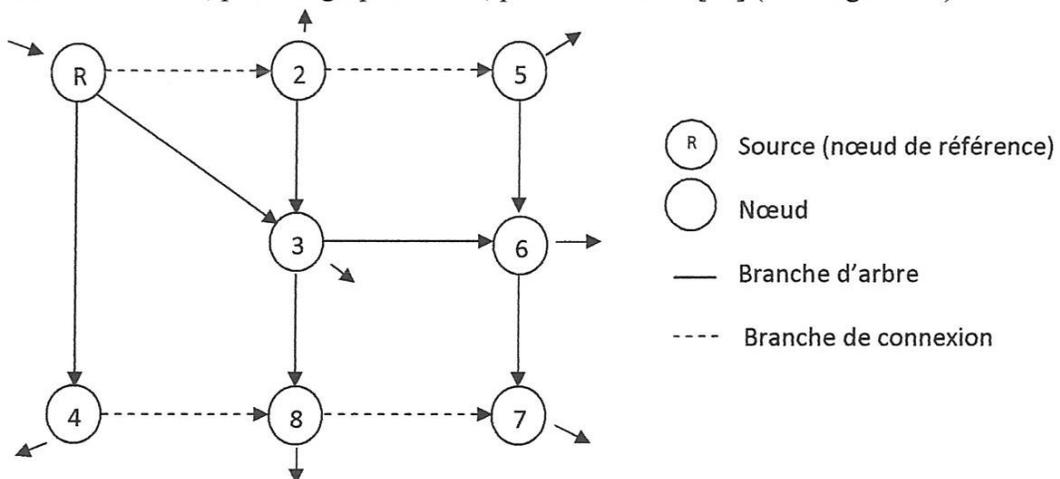
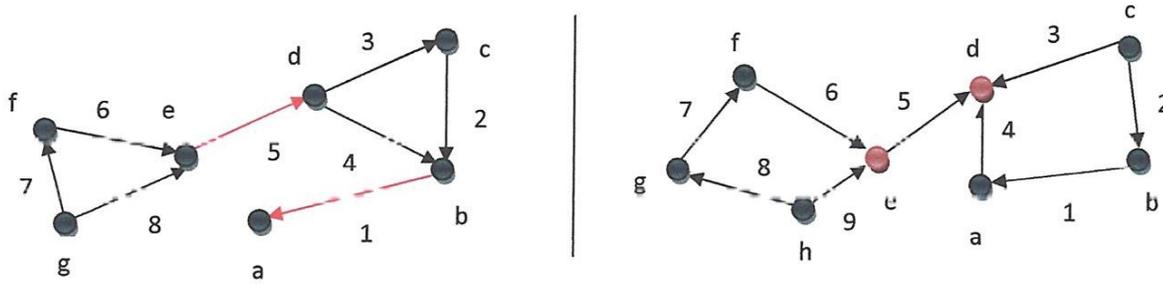


Figure 1.8 : Graphe d'un réseau de fluide [14]

8.6. Isthmes :

Un isthme est une arête dont la suppression fait croître le nombre de connexités.

Un point d'articulation est un nœud dont la suppression fait croître le nombre de connexités.



Les arcs 5 et 1 sont des isthmes

Le nœud e et d sont des points d'articulations

Figure 1.9 : Isthmes [13]

8.7. Matrice d'incidence :

Considérons un graphe orienté sans boucle $G = (X, A)$ comportant n sommets x_1, \dots, x_n et m arêtes a_1, \dots, a_m . On appelle matrice d'incidence (aux arcs) de G la matrice $M = (m_{ij})$ de dimension $n \times m$ telle que :

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité initiale de } a_j \\ -1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité terminale de } a_j \\ 0 & \text{si } x_i \text{ n'est pas une extrémité de } a_j \end{cases}$$

Pour un graphe non orienté sans boucle, la matrice d'incidence (aux arêtes) est définie par :

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \text{ est une extrémité de } a_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La matrice d'incidence du graphe de la figure (1.10) s'écrit sous la forme suivante [15] :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

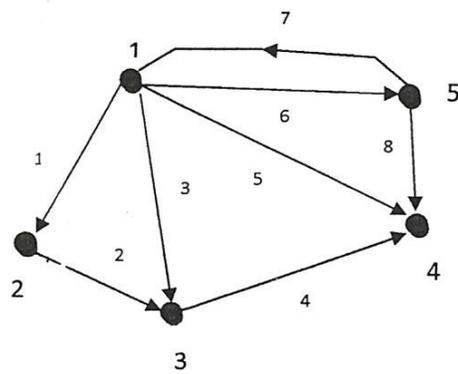


Figure 1.10 : graphe orienté. [15]

CHAPITRE II

OPTIMISATION DE LA CONCEPTION DES RESEAUX

1. Introduction :

Le réseau de distribution est un ensemble d'une ou de plusieurs sources, valves, et des conduites reliées les une par rapport aux autres en vue d'alimenter un groupement de points de consommation par un fluide.

La conception à moindre coût des réseaux de distribution d'un fluide est un problème d'optimisation dont le but est la détermination de la configuration optimale du réseau ainsi que les dimensions optimales des conduites pour assurer la performance suprême du réseau.

Historiquement, le plus d'intérêt dans les réseaux de tuyauterie a mis l'accent sur le développement d'algorithmes efficaces pour l'analyse de l'écoulement, et il y a maintenant très utile et efficace des logiciels disponibles pour la simulation des systèmes existants et proposés de nouvelles.

En revanche, il y a relativement peu d'intérêt de la recherche dans l'élaboration de méthodologies visant à optimiser la conception de réseaux de canalisations. Il y a très peu de logiciels disponibles pour un usage commercial qui aident le concepteur à produire véritablement des réseaux optimaux de canalisations. [19]

Le problème de conception a été résolu en utilisant des techniques d'optimisation comme : la programmation linéaire, programmation non linéaire, programmation dynamique et bien d'autres algorithmes comme les algorithmes génétiques.

2. Equipement et accessoires du réseau de distribution :

Il existe plusieurs organes et accessoires dans un réseau de distribution qui le complètent et jouent un rôle important pour la maintenance et la bonne tenue du réseau. [16]

a) Robinet et vanne :

Par un mouvement rapide et facile, ils permettent d'isoler divers tronçons de canalisation afin de faciliter les travaux de réparation en cas de destructions d'une partie de la canalisation. On les trouve à chaque nœud du réseau et sur le parcours d'une longue conduite.

b) Ventouses :

Elles sont placées dans les points les plus hauts, leur rôle est d'évacuer l'air présent dans l'eau lors du remplissage et souvent entraîné par l'eau. Les ventouses s'obturent dès que l'air est éliminé.

c) Vidange :

On les trouve dans les points bas des conduites. Elles ont pour rôle d'évacuer les dépôts de boues et de sable qui peuvent exister dans les canalisations et qui perturbent l'écoulement normal de l'eau.

d) Bouches d'incendies :

Les bouches d'incendies sont installées au bord des trottoirs. Elles sont raccordées sur les conduites de diamètres supérieurs à 100 mm qui sont capables d'assurer un débit maximal de 17 l/s sous une pression suffisante de 10 bars, la distance entre deux bouches d'incendies est 200 m.

e) Tés :

On trouve un té dans une ramification à trois diamètres. Si les diamètres ne sont pas les mêmes, on doit prévoir des cônes de réduction pour pouvoir les raccorder.

f) Coudes :

Ils sont placés aux points de changement de direction des canalisations. Il existe plusieurs types de coudes suivant l'angle de direction et le diamètre.

g) Butées :

Les butées sont placés au niveau des coudes, des tés et des extrémités des conduites pour pouvoir résister à la poussée de l'eau, au niveau de ces points. Elles sont, en général constituées par les massifs de béton.

h) Joints :

Les joints jouent un grand rôle pour assurer l'étanchéité entre les canalisations (au niveau des points de raccordement). Pour le choix des joints, on tient compte de quelques facteurs tels que la facilité et la rapidité de confection et du montage et surtout la garantie d'étanchéité pour éviter les fuites d'eau au niveau du réseau de distribution.

3. Age des canalisations

Le vieillissement des canalisations et de leurs accessoires est, par nature, inéluctable : les matériaux se dégradent ou se fragilisent au fil du temps, l'environnement évolue et les terrains bougent.

Cependant, le vieillissement ne dépend pas que de l'âge de la conduite mais aussi :

- De son environnement : il existe des canalisations de plus de cent ans d'âge en très bon état et d'autres de dix ans à peine qui sont déjà hors d'usage, car situées en terrain instable ou agressif ou encore mal posées
- Des qualités intrinsèques des matériaux : résistance à la corrosion insuffisante, mauvais revêtement de surfaces
- Des conditions d'exploitation et de pose du réseau : remblayages exécutés avec des matériaux inadéquats et sans précautions, coups de bélier.

4. Les Méthodes et Algorithmes de résolution :

Plusieurs recherches ont été menées dans le cadre du développement de nouvelles méthodes plus robustes pour la conception des réseaux de distribution et de transport de fluide ou l'amélioration des méthodes et des algorithmes qui ont été déjà faites. Des chercheurs ont négligé l'influence de la disposition et la connectivité sur le dimensionnement des conduites de ce dernier (ex : Murphy et al. ; Dandy et al ; Halhal et al. ; Savic and Walters ; Cunha and Sousa; Boulos et al ; Wu and Simpson ; Maier et al. ; Zecchin et al.) , d'autres ont fait le contraire . La plupart des travaux dans ce domaine ont porté sur les réseaux ramifiés, qui sont peu utilisés surtout dans la distribution d'eau en raison de leur manque de fiabilité (ex : Walters and Lohbeck ; Davidson and Goulter ; Walters and Smith ; Geem et al). Certains chercheurs ont, cependant, considéré le problème plus difficile des réseaux maillés (en boucle) (ex : Davidson).

Le problème commun de la connectivité et la conception des conduites de distribution dans les réseaux ramifiés n'a pas attiré l'attention des chercheurs surtout parce qu'ils manquent de fiabilité. Pour les réseaux maillés le problème de connectivité et le dimensionnement des conduites a été adressé par peu des chercheurs à cause de sa complexité (ex : Rowel and Barnes; Morgan and Goulter ; Morgan and Goulter ; Kessler et al; Cembrowicz). [18]

Ces méthodes d'optimisation avec leurs degrés de réussite peuvent être divisées en trois classes :

- Méthodes énumératives
- Méthodes basées sur le calcul
- Méthodes basées sur la recherche aléatoire

Les méthodes énumératives sont capables de trouver une solution d'optimum global pour le problème de conception des conduites du réseau de fluide, mais elles sont très coûteuses et ne peuvent pas être utilisées dans le cas d'optimisation des réseaux dans la réalité, d'un autre côté les techniques basées sur le calcul sont efficaces mais ne sont souvent pas utilisées dans la recherche d'un optimum global pour le problème de conception des réseaux de conduites.

Les méthodes de recherche aléatoire ont montré un balancement logique entre l'efficacité dans le calcul et la capacité d'approcher un optimum global.[20]

5. Problème d'optimisation de réseaux de conduites :

Les problèmes de cheminement dans les graphes (en particulier la recherche du plus court chemin) comptent parmi les problèmes les plus anciens de la théorie des graphes et les plus importants par leurs applications. Le problème de trouver un plus court chemin correspond au problème d'optimisation.

La recherche dans le domaine de la conception des réseaux peut être divisée en deux catégories :

- Des approches qui focalisent sur l'optimisation de réseaux maillés préalablement fixés, où la redondance est fournie par spécification de diamètres ou de débits minimums.

- Des approches qui concernent le problème combiné optimisation-fiabilité-configuration, dans lequel la configuration n'est pas fixée, mais doit être déterminée de façon à optimiser la conception globale.

Dans sa forme la plus simple, le problème de conception d'un réseau de conduites pour les systèmes de gravité est généralement formulé de la manière suivante : pour une connectivité fixée de conduites et des demandes spécifiées au niveau des nœuds, la détermination de la configuration propice à moindre coût s'abite les contraintes suivantes :

- La continuité du flux doit être maintenue à toutes les jonctions ou nœuds dans le réseau.
- La perte de charge dans chaque tuyau est une fonction connue de l'écoulement dans ce tuyau.
- La perte de charge totale autour d'une maille doit être égale à zéro ou la perte de charge le long d'un chemin entre deux réservoirs doit être égale à la différence d'altitude.
- Les minimum et maximum des limites de charge de pression doivent être satisfaits en certains nœuds du réseau.
- Les contraintes des diamètres minimum et maximum peuvent s'appliquer à certaines conduites du réseau.

En outre, il peut y avoir des conduites existantes dans le système avec des diamètres connus. On peut généralement supposer des conditions d'écoulement stationnaires dans le réseau.

Goulter (1987) a suggéré que la conception à un coût minimum pour une connectivité donnée peut être obtenue par un réseau ramifié. [21]

Dans la pratique, les mailles sont une caractéristique essentielle dans les systèmes de distribution réels car ils fournissent une voie d'écoulement de remplacement s'il ya une défaillance ou maintenance dans une conduite. On peut atteindre un degré de redondance dans l'optimisation de réseau de canalisations en veillant à ce que la disposition des mailles appropriées et en spécifiant des diamètres minimums pour toutes les conduites. [14]

6. Techniques de base utilisées dans l'optimisation de la configuration :

Le problème d'optimisation de la longueur totale des réseaux de distribution d'un fluide 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 la minimiser le cout de conception. Les méthodes de résolution utilisent, généralement l'un des trois principaux algorithmes, l'algorithme du chemin le plus court, de l'arbre minimal, et les algorithmes génétiques.

6.1 Les algorithmes génétiques :

Parmi les méthodes de recherche aléatoire, les algorithmes génétiques ont gagné beaucoup de popularité dans les dernières années dans le domaine d'optimisation du réseau de conduites. Des recherches ont focalisé sur le développement des méthodologies d'optimisation du réseau de conduites en utilisant des algorithmes génétiques simples, d'autres recherches plus récentes concentré sur l'étude d'optimisation du réseau de conduites en développant des nouveaux algorithmes génétiques moins coûteux que les algorithmes existants.

Les algorithmes génétiques font partie de la famille des algorithmes évolutionnaires. Ils s'inspirent de l'évolution naturelle des espèces. Avec ce type de méthodes, il ne s'agit pas de trouver une solution analytique exacte mais de trouver une bonne solution satisfaisante dans un temps de calcul raisonnable. La première description du processus des algorithmes génétiques a été donnée par Holland en 1975, puis Goldberg (1989) les a utilisées pour résoudre des problèmes concrets d'optimisation.

Le but de ces algorithmes génétiques est d'optimiser une fonction pré-définie, appelée fonction objet, ou fitness ; ils travaillent sur un ensemble de solutions candidates, appelé "population" d'individus en utilisant des opérateurs inspirés de la biologie définie sur la population elle même. Ces algorithmes combinent à la fois les principes de la survie des individus les mieux adaptés et les échanges d'information pseudo aléatoires.

A chaque génération, un nouvel ensemble d'individus est créé avec des informations provenant des individus de la génération précédente, ainsi que des parties nouvelles. Selon les théories de l'évolution, seuls les éléments de la population les mieux adaptés à leur environnement ont une

chance de survivre et de produire une descendance, donc de transmettre leur hérédité biologique à la nouvelle génération.

Un algorithme génétique simple, qui donne de bons résultats dans beaucoup d'applications, est composé de trois opérateurs : [14]

- Reproduction
- Croisement (communément appelé cross-over)
- Mutation

Les étapes de l'algorithme génétique :

- Prendre arbitrairement des chemins reliant le nœud de source aux nœuds de demande (solution initiale)
- Calculer la valeur du "fitness" (fonction objet), qui est la longueur du chemin
- Coder les chemins par les numéros des nœuds pris dans une suite séquentielle entre le nœud source et le nœud destination en se basant sur la topologie du réseau
- Appliquer les opérateurs génétiques :
 - La mutation : l'opérateur de mutation génère un chemin alternatif au chemin existant en modifiant légèrement le parcours. La mutation est réalisée en choisissant, dans un premier temps, un nœud au hasard à partir des nœuds du chemin, appelé un nœud de mutation. Ensuite, un autre nœud est arbitrairement sélectionné parmi ses voisins, les nœuds directement liés au nœud de mutation.

Enfin, en utilisant le principe du chemin le plus court, des chemins alternatifs reliant la source au nœud sélectionné et ce dernier à la destination sont générés

- Le croisement : Le croisement échange des sous-chemins entre deux chemins. Les chemins doivent avoir la même source et la même destination. Les sites du croisement se limitent aux nœuds communs aux deux chemins. On sélectionne arbitrairement un nœud comme nœud de croisement parmi les nœuds communs et on procède à l'échange des sous-chemins ;

- Calculer la valeur du "fitness" des nouveaux chemins ;
- Si la valeur se retrouve améliorée, prendre le nouveau chemin ;
- Revenir en la troisième étape

Le processus étant itératif, l'arrêt se fait quand il n'y plus d'amélioration dans la valeur du "fitness". [14]

6.2 L'algorithme du plus court chemin :

L'objectif de l'algorithme du chemin le plus court est de trouver la connexion la plus petite 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'un fluide.

Un chemin joignant un sommet X_a à un sommet X_b est dit de longueur minimale s'il minimise cette longueur $l(u)$ dans l'ensemble de tous les chemins u joignant X_a à X_b c'est-à-dire, la longueur : [22]

$$L(u) = \sum_{(x_i, x_j)} l_{ij} \quad \forall u \in U \text{ soit minimale}$$

L'algorithme du chemin le plus court peut être résumé dans les trois points :

- Parcours systématique du réseau à partir de l'origine (processus itératif)
- A chaque nœud visité, une étiquette est associée
- Cette étiquette est potentiellement mise à jour à chaque visite du nœud

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 a été évalué et sont appelés des nœuds connectés, les autres, des nœuds non connectés) celui le plus proche de la source. Les étapes à chaque itération sont :

- Enumérer tous les nœuds connectés en relation avec des nœuds non connectés
- 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.

- 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 » ;
- 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.

Deux algorithmes déterministes principaux sont utilisés pour la recherche du plus court chemin dans un graphe : Algorithme de Dijkstra-Moor et Algorithme de Bellman-Ford.

Il existe aussi d'autres algorithmes destinés aux différents domaines comme : télécommunication, traitement du signal, la modélisation est légèrement différente (probabiliste), et le problème est alors résolu par l'Algorithme de Viterbi.

6.3 L'algorithme de l'arbre minimal :

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

L'algorithme de résolution est aussi un processus itératif. L'objectif de chaque itération est de trouver parmi tous les nœuds non connectés celui le plus proche du réseau de 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. S'il existe plusieurs nœuds avec une distance minimale, choisir arbitrairement un et seulement un.
- Les nœuds flottants résultants à la fin, on les relie aux nœuds les plus proches pour assurer le branchement total de notre arbre.

Il existe de nombreux algorithmes de recherche d'un arbre minimal. On citera, entre autres, l'algorithme de Borůvka (le premier algorithme inventé pour ce problème), l'algorithme de Prim et l'algorithme de Kruskal. [16]

CHAPITRE III

PROGRAMME ET APPLICATION

1. Introduction :

L'orientation vers l'informatisation des domaines de nos jours implique aux ingénieurs d'intégrer l'outil informatique dans leurs solutions aux problèmes confrontés par ces derniers, c'est le cas pour les problèmes de conception des réseaux à bas prix ou de réhabiliter des réseaux existants.

Pour cela toutes ces tâches peuvent être facilitées par l'utilisation d'un programme informatique bâti sur une méthode construite préalablement.

Comme on a souligné dans le chapitre précédent qu'il y avait peu d'intérêt pour la construction des logiciels à usage commercial, en revanche pour les méthodologies d'analyse des réseaux, alors dans notre travail on suggère un programme écrit en utilisant le langage FORTRAN. Après une modification dans la méthode de la longueur minimale (optimisation de la conception) afin d'arriver à un optimum le plus possible, la démarche du programme se fait en parallèle avec un interfaçage graphique de façon à guider le concepteur vers cet optimum.

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 itérative suivant les affichages graphiques faites à l'aide d'un logiciel **GNUPLOT** pour le traçage du réseau, l'intermédiaire entre le langage FORTRAN et le logiciel GNUPLOT est assuré par la création des fichiers **TXT** au fur et à mesure que les données sont traitées par le programme.

Dans les différentes étapes de conception du réseau (maillé ou ramifié) le programme laisse le choix au concepteur dans la manière de construction du réseau afin d'arriver au réseau voulu avec le coût minimal possible, ainsi il laisse la possibilité d'ajouter ou de supprimer des conduites après la construction du réseau maillé (confirmation de la redondance).

Afin de faciliter la tâche du concepteur des messages de guidage, d'indication et d'avertissement sont établis.

2. Description du programme:

2.1 Principaux paramètres utilisés et leur notation :

Les différentes variables utilisées dans ce programme sont :

a : Nombre de sources

b : Nombre de nœuds

x(i) : abscisse

y(i) : ordonnée,

Cap (i) : capacité de la source,

Dem (i) : demande aux nœuds de demande,

capTs : capacité totale des sources,

demTn : demande totale des nœuds,

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

L (i) : demande totale des nœuds qui appartiennent au groupe i,

disg (i,j) : distance entre les nœuds et la source du même groupe,

sprop(i) : colonne de classement des sources suivant leurs capacités,

dissn (i,j) : distance entre la source i et le nœud j,

NCN(i) : nombre de conduites branchés au nœud i,

tot : longueur totale du réseau,

pipe : nombre total des conduites du réseau.

3. fonctionnement du programme :

L'algorithme de la longueur minimale modifié précédemment développé et représenté dans ce chapitre, est interprété ici sous forme d'un programme simple étagé sur trois parties :

Partie 1 : c'est la partie de construction des groupes et de l'ajout ou la suppression des conduites.

Partie 2 : dans cette partie le maillage du réseau est achevé, cela est assuré par une sous-routine **network**.

Partie 3 : cette étape reste toujours nécessaire dans les cas où on a besoin de confirmer la redondance de notre réseau.

La démarche du programme peut être organisée comme suit:

3.1. Etape 1 (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,

3.2. Etape 2 (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.

Le programme jumèle la partie des calculs avec la partie d'affichage des résultats. 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 façon 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 doivent pas être 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 soit 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 processus de construction des groupes, et un autre message le suit indiquant la création des groupes sous forme graphique par le biais du logiciel GNUPLOT, donc le concepteur doit 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.

Dans la phase de la construction du réseau maillé, le programme propose pour chaque nœud ayant un degré inférieur à 2 de le relier avec le nœud le plus proche donc le concepteur suggère un nombre de nœuds suivant l'affichage des groupes, le programme va choisir le nœud le plus proche de ce dernier. Le processus progresse ainsi jusqu'au maillage de tout le réseau.

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.

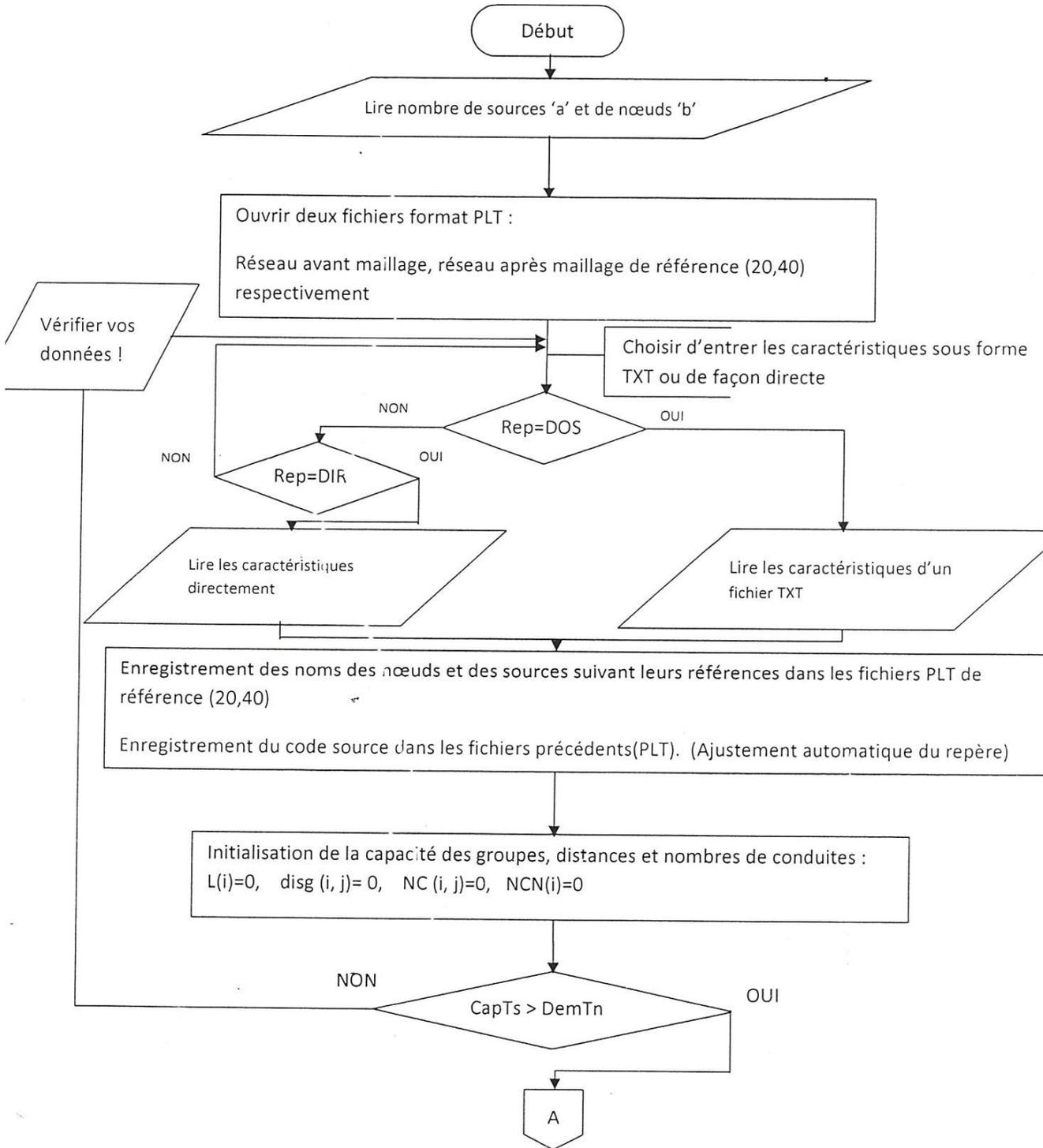
3.3. Etape 3 (Ajout / suppression de conduites):

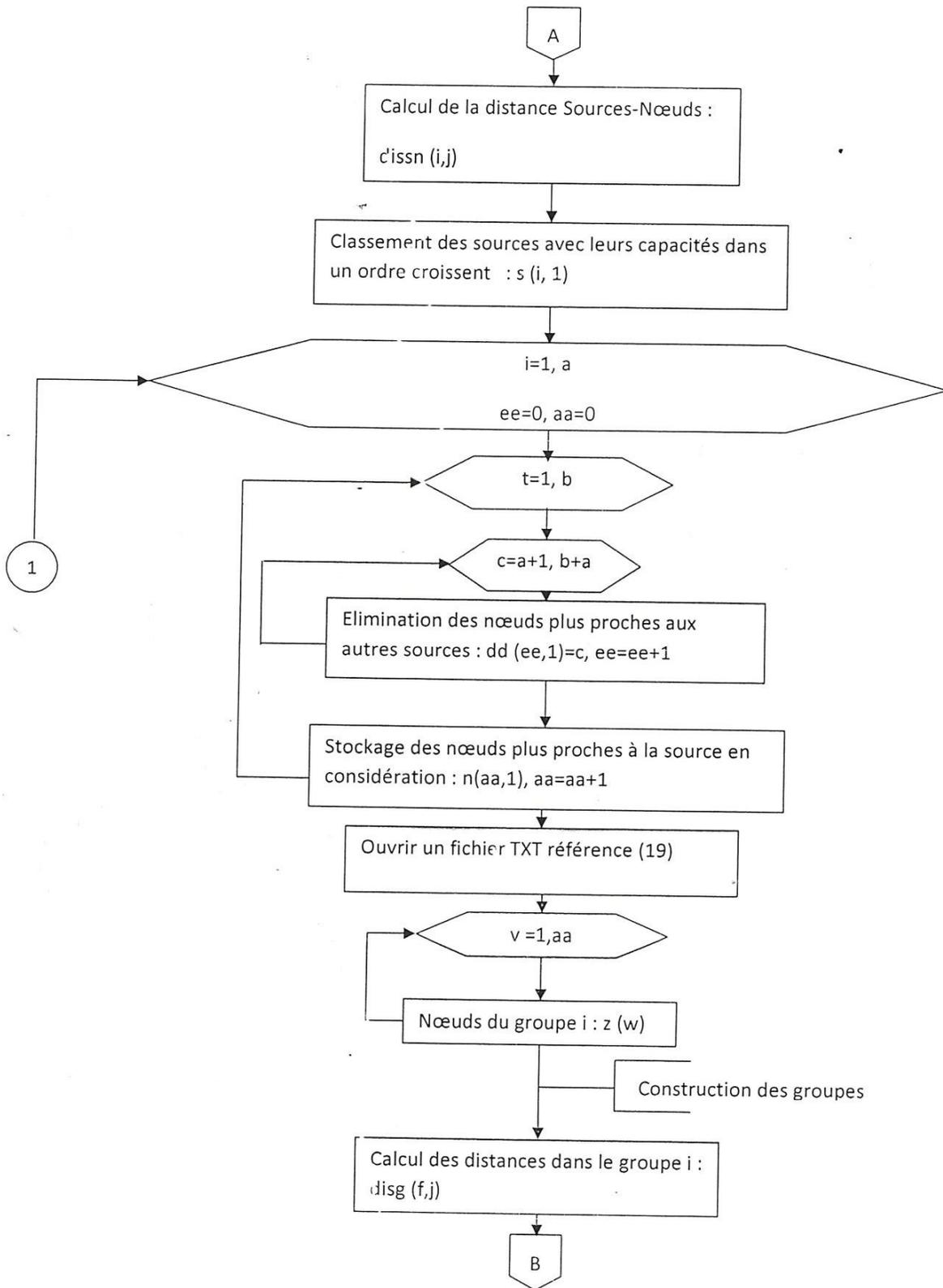
Cette partie du programme essaye de combler les vides dans la conception du réseau, pour cela le programme va ajouter ou supprimer des conduites et n'est nécessaire que dans quelques cas seulement.

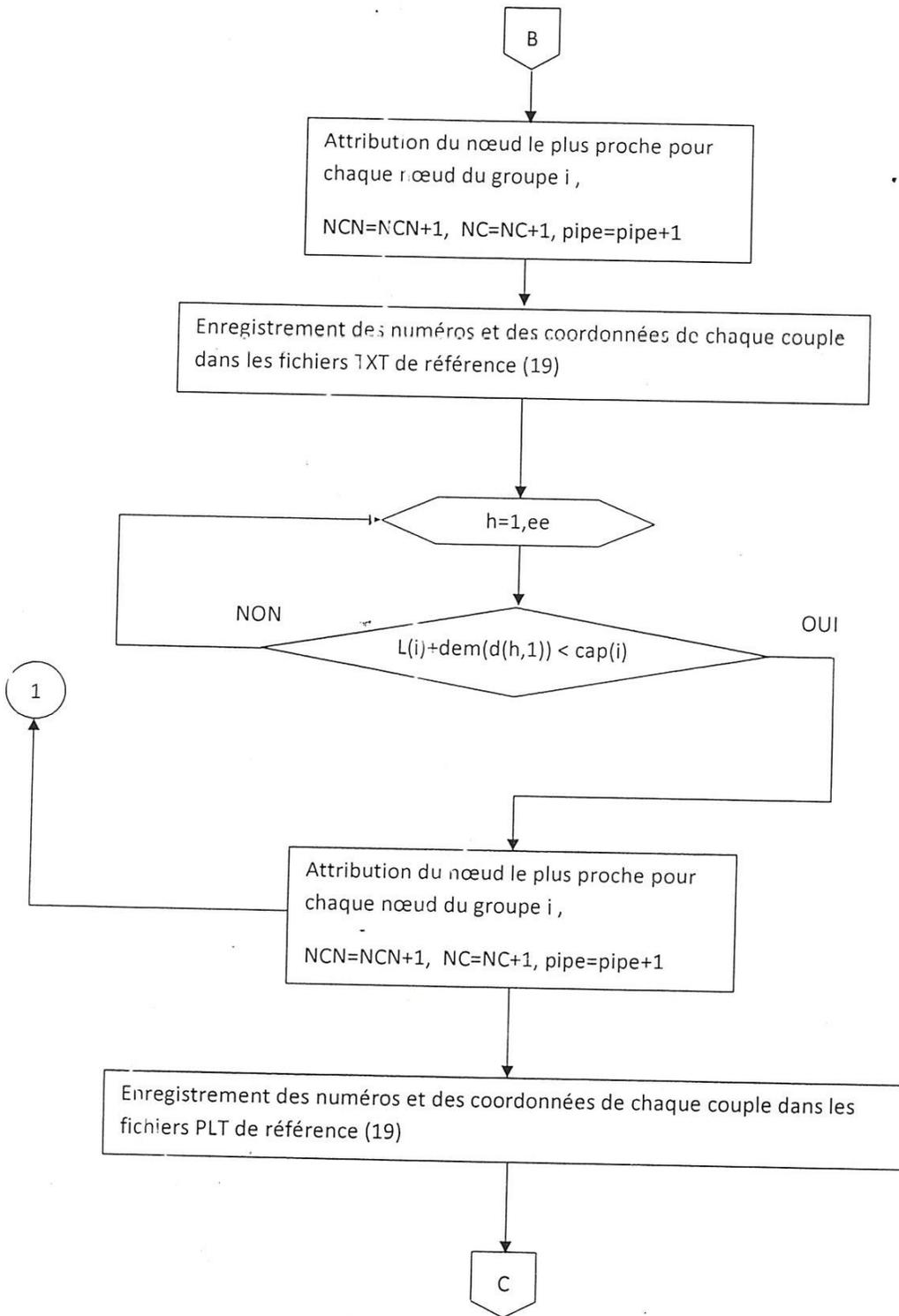
Ces opérations s'effectuent de façon simple où le concepteur introduit les numéros des nœuds (frontières de la conduite), l'affectation de ces modifications implique la modification de la longueur totale du réseau, à la fin de la conception du réseau un affichage final du réseau commenté par l'affichage de la longueur totale du réseau, le nombre total des conduites utilisées dans cette conception et la vérification du degré des nœuds.

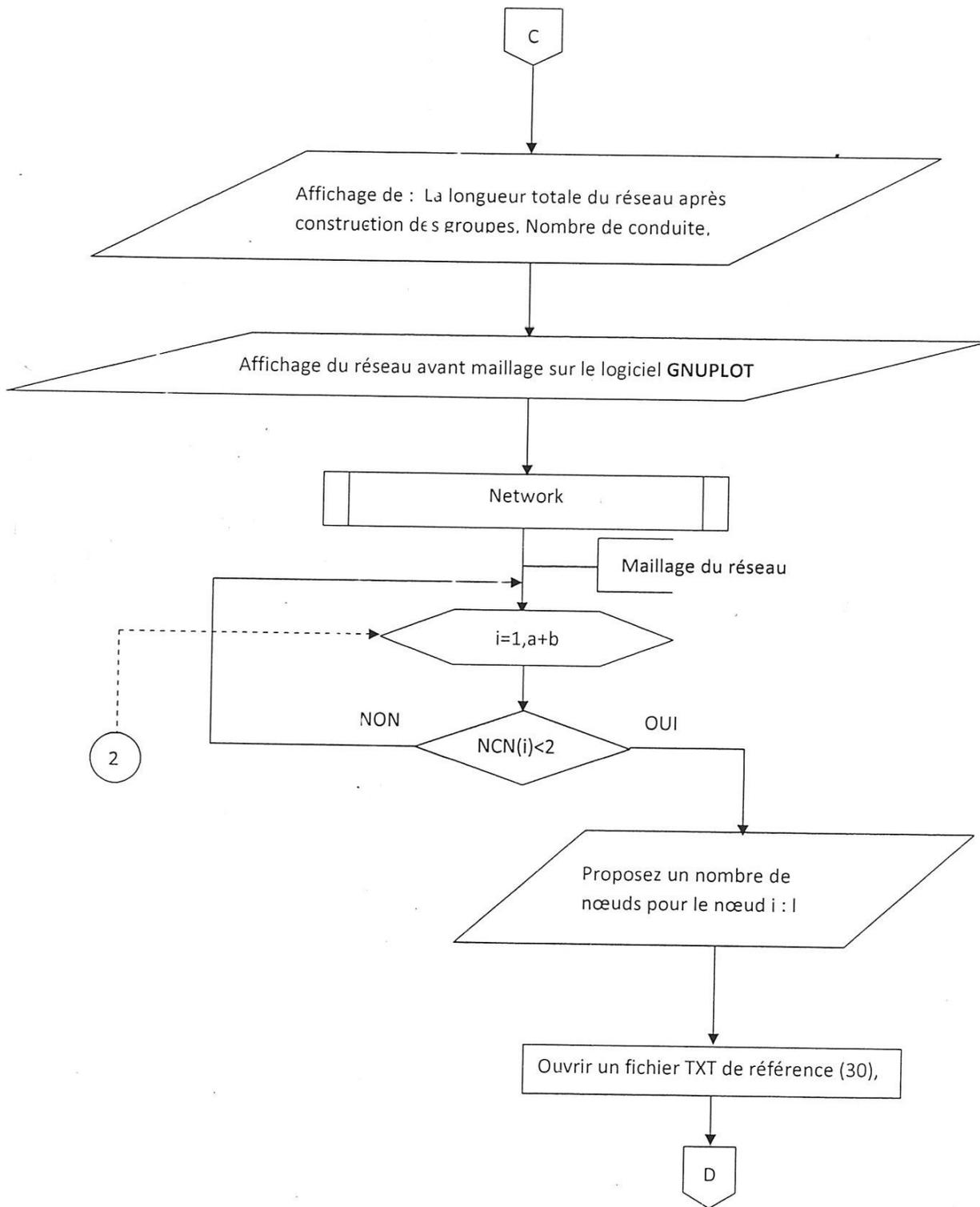
N.B : la longueur du réseau, le nombre des conduites et le degré de chaque nœud s'affiche à chaque fois sur la page du fortran dès qu'il y a des mises à jour dans les données.

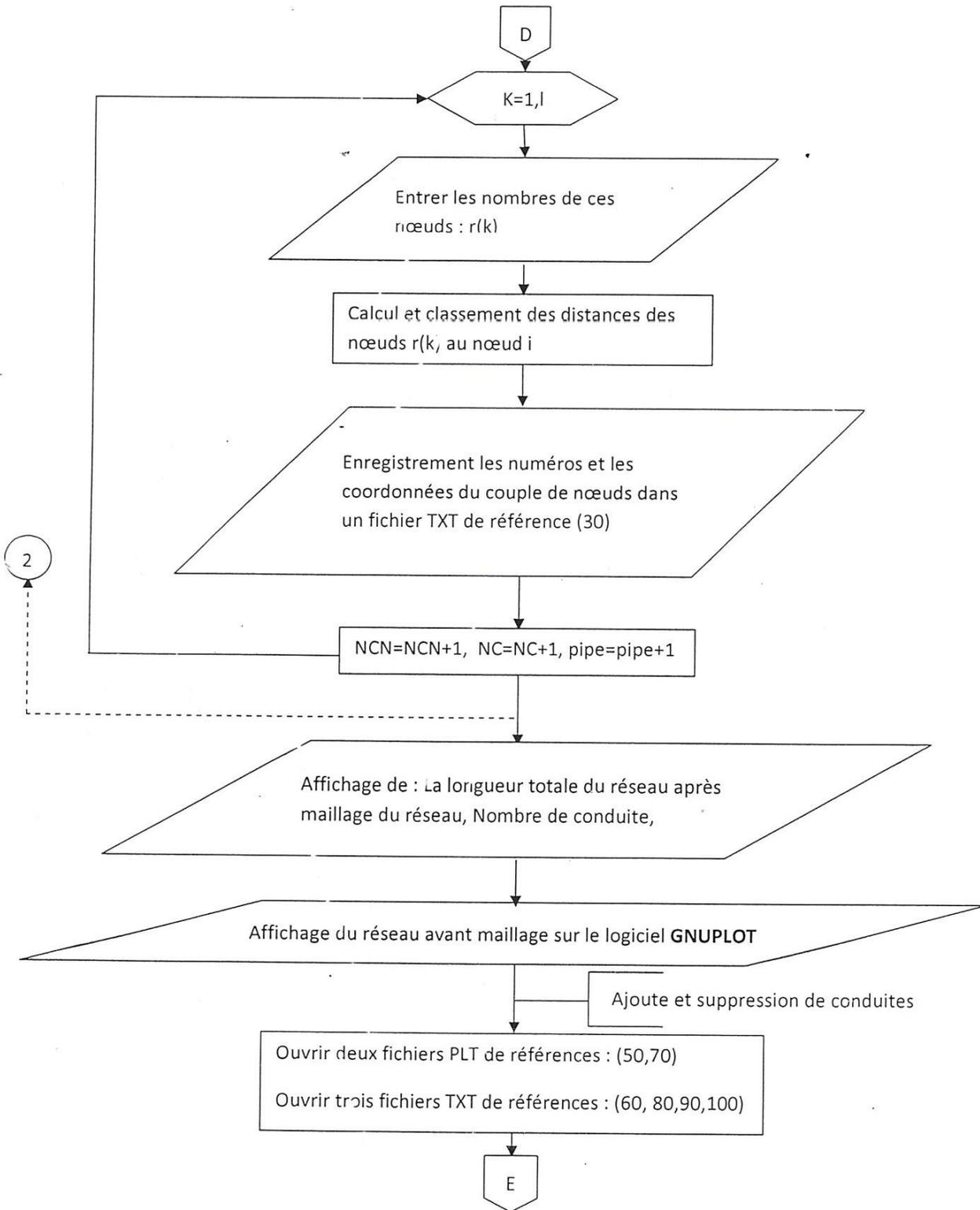
4. Organigramme :

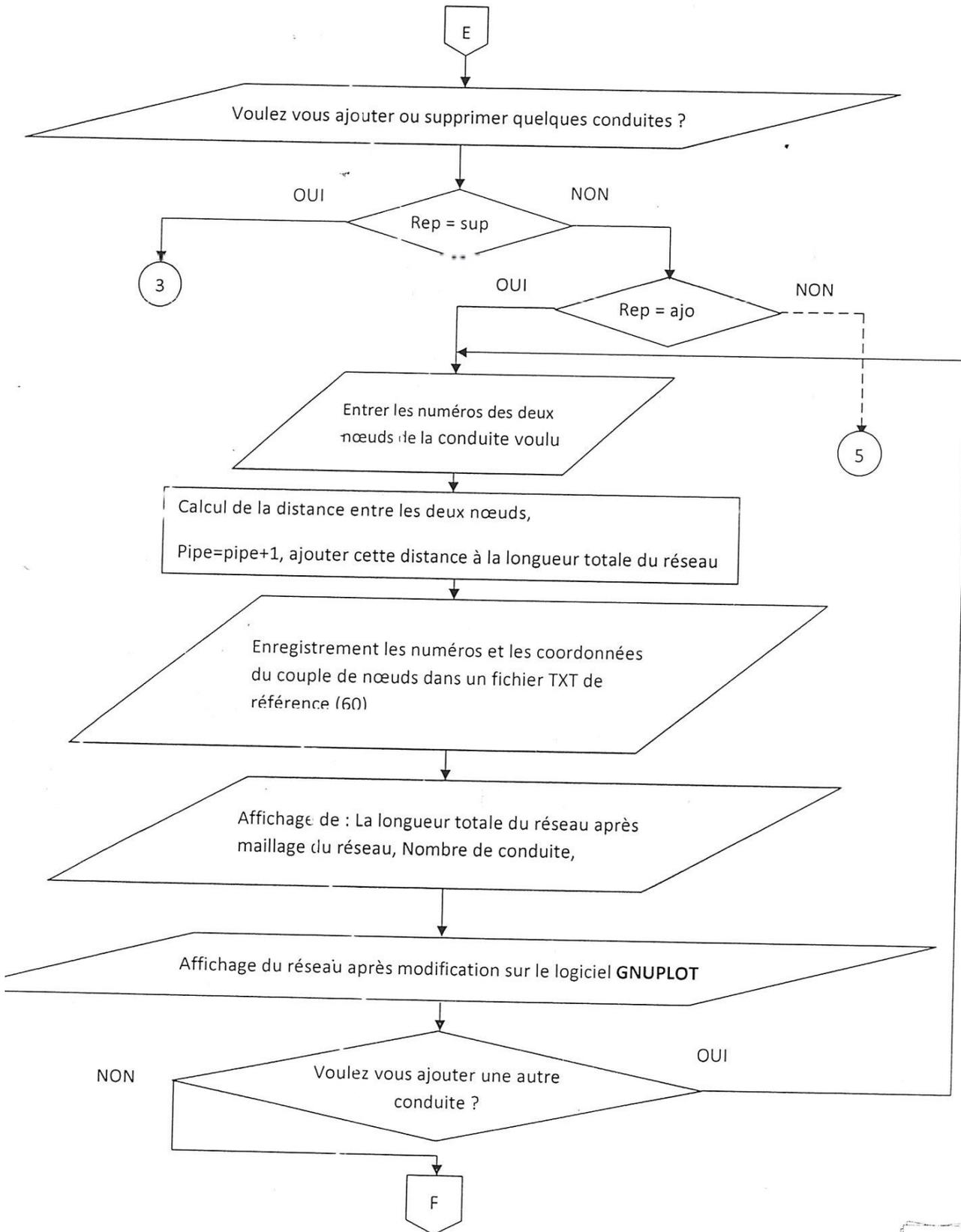


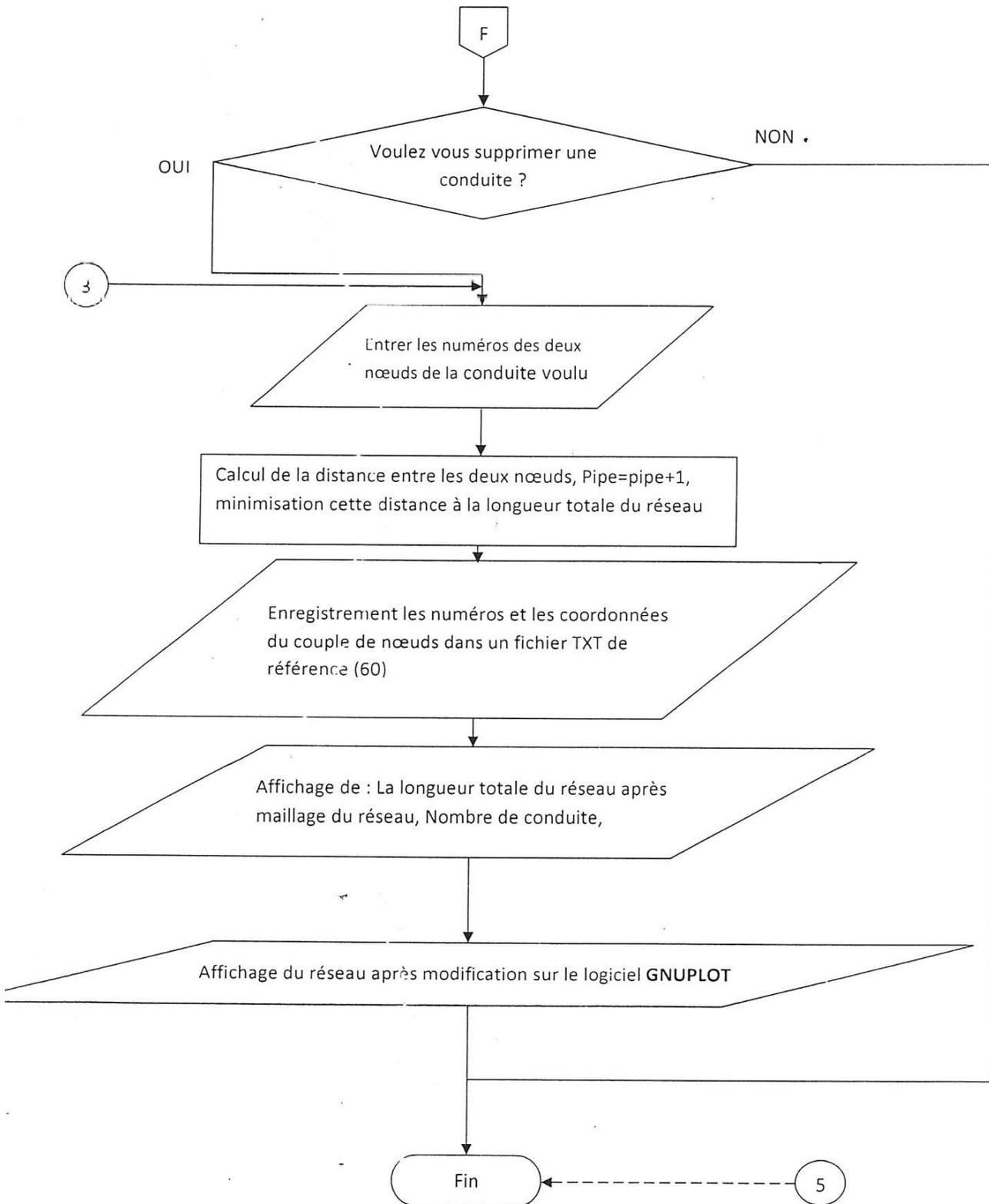












5. Résultats et commentaires :**Cas 1 : réseau de distribution avec des nœuds loin**

Tableau 3.1 : Données du réseau avec des nœuds loin

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)
	X	Y	
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

- Introduction des données d'une façon directe

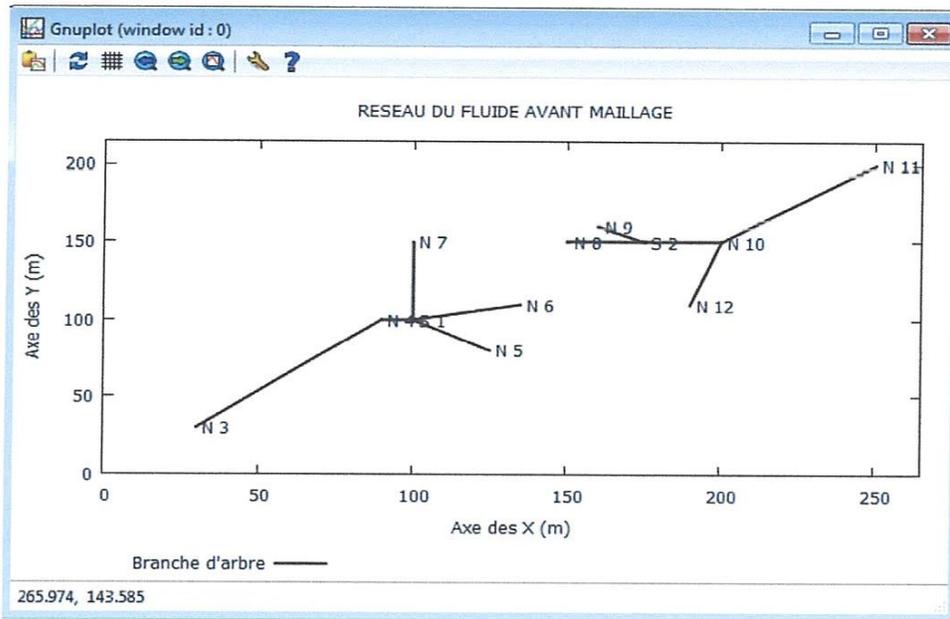
```

c:\f9556\LEONI-1.exe
ENTRER LE NOMBRE DE SOURCES :2
ENTRER LE NOMBRE DE NOEUDS :10
ENTRER "dos" POUR FAIRE ENTRER LES CARACTERISTIQUES SOUS FORME <TXT> ET "DIR" P
OUR LES FAIRE ENTRER DIRECTEMENT (DIR)
entrer l'absce,l'ordonnee et la capacite du source 1 respectivenent:100
100
250
entrer l'absce,l'ordonnee et la capacite du source 2 respectivenent:175
150
250
entrer l'absce,l'ordonnee et la demande du noeud 3 respectivenent :30
30
50
entrer l'absce,l'ordonnee et la demande du noeud 4 respectivenent :90
100
50
entrer l'absce,l'ordonnee et la demande du noeud 5 respectivenent :125
80

```

Etape 1 : Construction des groupes :

On a deux groupes sous forme de réseaux ramifiés :



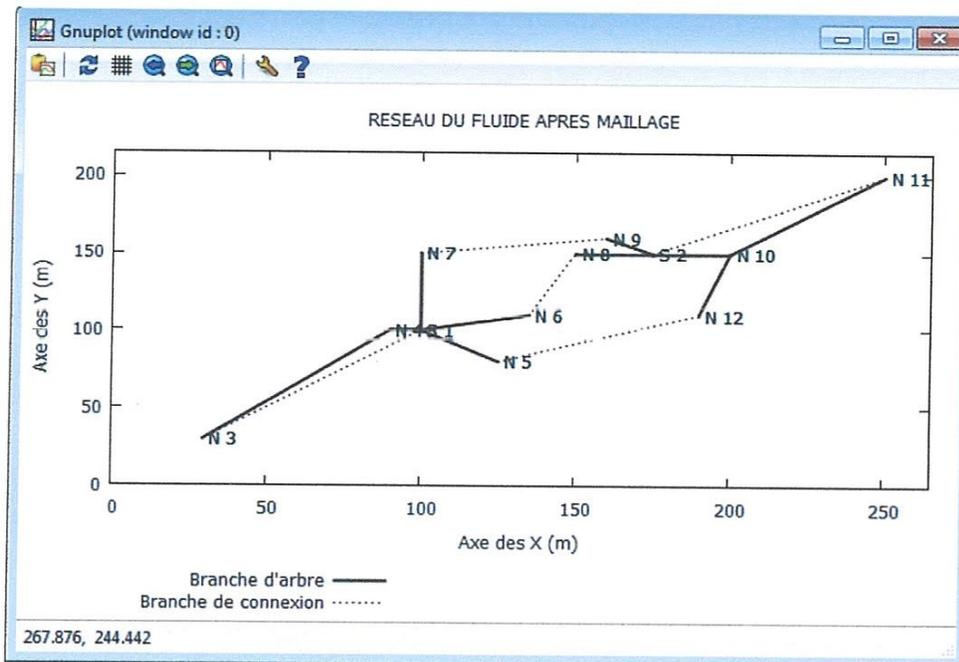
- Affichage de la longueur, nombre de conduites et vérification du degré des nœuds du réseau avant maillage respectivement :

```

c:\f9556\LEON1~1.exe

LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 400.581055 <n>
le nombre de conduites avant maillage est : 10
==> LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLES SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!
Le degre du noeud 3 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 5 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 6 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 7 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 8 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 9 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 11 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 12 est inferieur a 2 ?
    
```

Etape 2 : Maillage du réseau



- Affichage des résultats du réseau après maillage :

```

c:\f9556\LEON1-1.exe
e dernier :1
  entrer les nombres de ces noeuds :9
ok
pour le noeud 11 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :1
  entrer les nombres de ces noeuds :2
ok
LA LONGUEUR TOTALE DU RESEAU APRES MAILLAGE : 764.851501 (n)
le nombre de conduites apres maillage est : 15
==> 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 :_
    
```

Commentaires :

Le réseau obtenu par notre programme est complètement maillé.

La longueur totale obtenue par notre méthode est : 764,85 m.

La longueur totale obtenue par les algorithmes génétiques est : 753,95 m.

La comparaison avec le résultat obtenu par les algorithmes génétiques, justifie la différence entre les longueurs totales par le fait que le réseau obtenu par les algorithmes génétiques, figure (3.1), n'est pas complètement maillé. Comme on peut le constater, les nœuds 10 et 11 sont libres d'un coté 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. Et de là, le réseau obtenu par notre programme présente l'avantage de la fiabilité et de la disponibilité du fluide. Alors que la différence entre la longueur totale de notre réseau et celle du réseau de la figure (3.1) n'est que de 10,9 m. cette valeur représente 1,42 % de la longueur totale, qui est de 764,85 m.

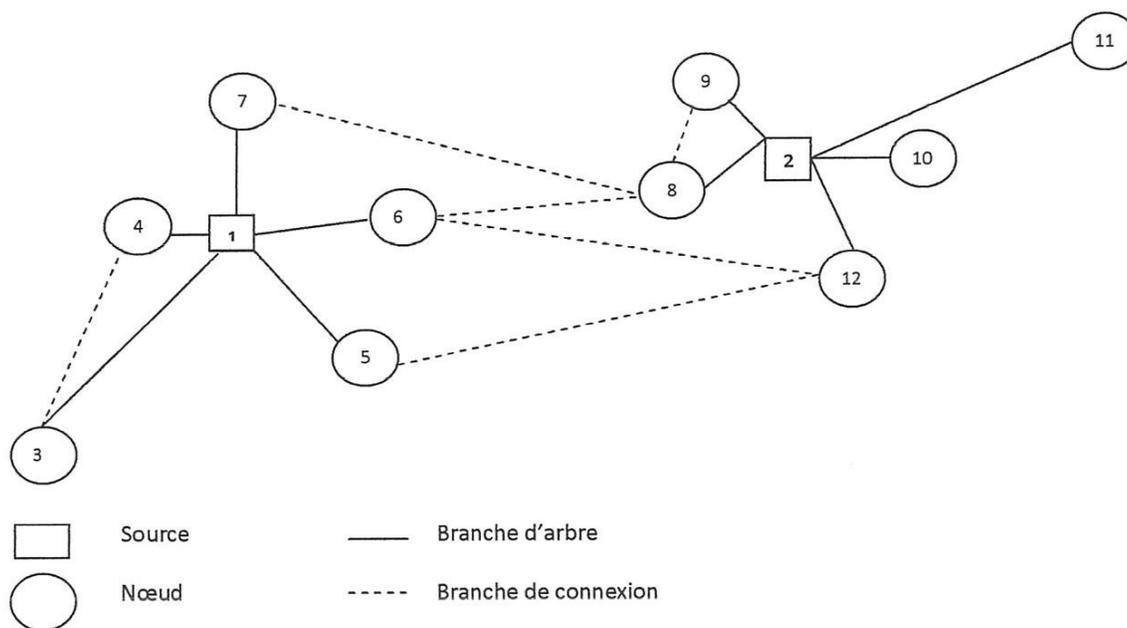


Figure 3.1 : Réseau obtenu par les algorithmes génétiques

CAS 2 : Réseau de distribution avec des sources loin

Tableau 3.2 : Données du réseau avec des sources loin

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)
	X	Y	
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



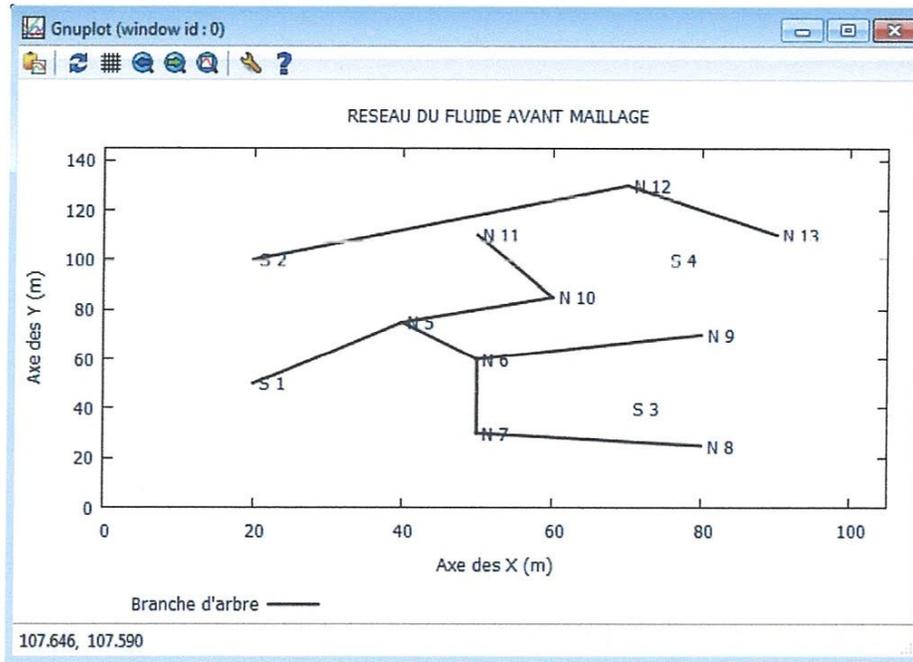
- Introduction des données :

```

c:\I9556\LEON1~1.exe
ENTRER LE NOMBRE DE SOURCES :4
ENTRER LE NOMBRE DE NOEUDS :9
ENTRER "dos" POUR FAIRE ENTRER LES CARACTERISTIQUES SOUS FORME <TXT> ET "DIR" P
OUR LES FAIRE ENTRER DIRECTEMENT DIR
entrer l'abscice,l'ordonnee et la capacite du source 1 respectivement:20
50
350
entrer l'abscice,l'ordonnee et la capacite du source 2 respectivement:20
100
350
entrer l'abscice,l'ordonnee et la capacite du source 3 respectivement:70
40
350
entrer l'abscice,l'ordonnee et la capacite du source 4 respectivement:75
100
350
entrer l'abscice,l'ordonnee et la demande du noeud 5 respectivement :40
75
    
```

Etape 1 : Construction des groupes :

On a deux groupes sous forme de réseaux ramifiés :



- Affichage des résultats du réseau après construction des groupes :

```
c:\f9556\LEONI-1.exe

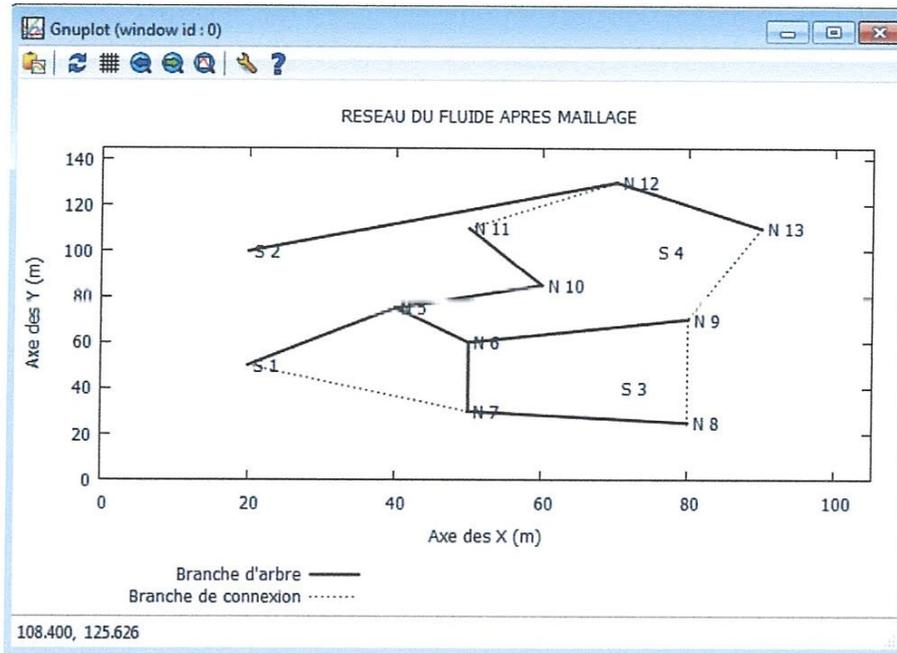
LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 277.960266 (m)
le nombre de conduites avant maillage est : 9

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

Le degre du noeud 8 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 9 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 11 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 13 est inferieur a 2 ?

pour le noeud 1 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a c
e dernier :_
```

Etape 2 : Maillage du réseau



Affichage des résultats du réseau après maillage :

```

c:\f9556\LEON1-1.exe

LA LONGUEUR TOTALE DU RESEAU APRES MAILLAGE : 428.531097 <n>

Le nombre de conduites apres maillage est : 13
==> 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 :
    
```

- **Commentaires :**

La longueur totale obtenue pour ce réseau est égale à 428,53 m (réseau maillé), en variante de la longueur obtenue par les algorithmes génétiques qui est égale à 808,55 m (réseau maillé), cela

montre l'efficacité de cette méthode surtout dans les réseaux de distribution avec des nœuds loin, puisque la longueur obtenue par le programme proposé est inférieure à la longueur obtenue par les algorithmes génétiques de 380,02 m. cette valeur représente 88,68 % de la longueur totale du réseau obtenu par notre programme.

CAS 3 :

Tableau 3.3 : Données du réseau (troisième cas)

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)
	X	Y	
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

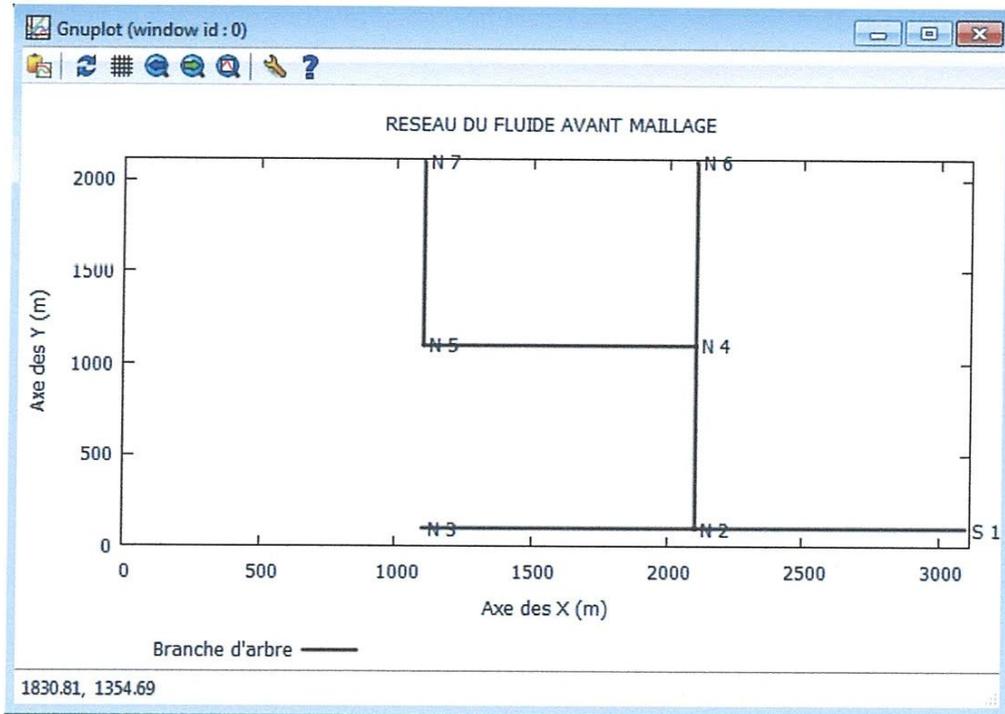
- Introduction des données :

```

c:\L9556\LEONI-1.exe
ENTRER LE NOMBRE DE SOURCES :1
ENTRER LE NOMBRE DE NOEUDS :6
ENTRER "dos" POUR FAIRE ENTRER LES CARACTERISTIQUES SOUS FORME <TXT> ET "DIR" P
OUR LES FAIRE ENTRER DIRECTEMENT DIR
entrer l'abscice, l'ordonnee et la capacite du source 1 respectivement :3100
100
1120
entrer l'abscice, l'ordonnee et la demande du noeud 2 respectivement :2100
100
100
entrer l'abscice, l'ordonnee et la demande du noeud 3 respectivement :1100
100
100
entrer l'abscice, l'ordonnee et la demande du noeud 4 respectivement :2100
1100
120
entrer l'abscice, l'ordonnee et la demande du noeud 5 respectivement :1100
1100
  
```

Etape 1 : Construction des groupes

Le réseau ramifié est sous cette forme :



- Affichage des résultats du réseau après construction des groupes :

```

c:\L9556\LEONI-1.exe

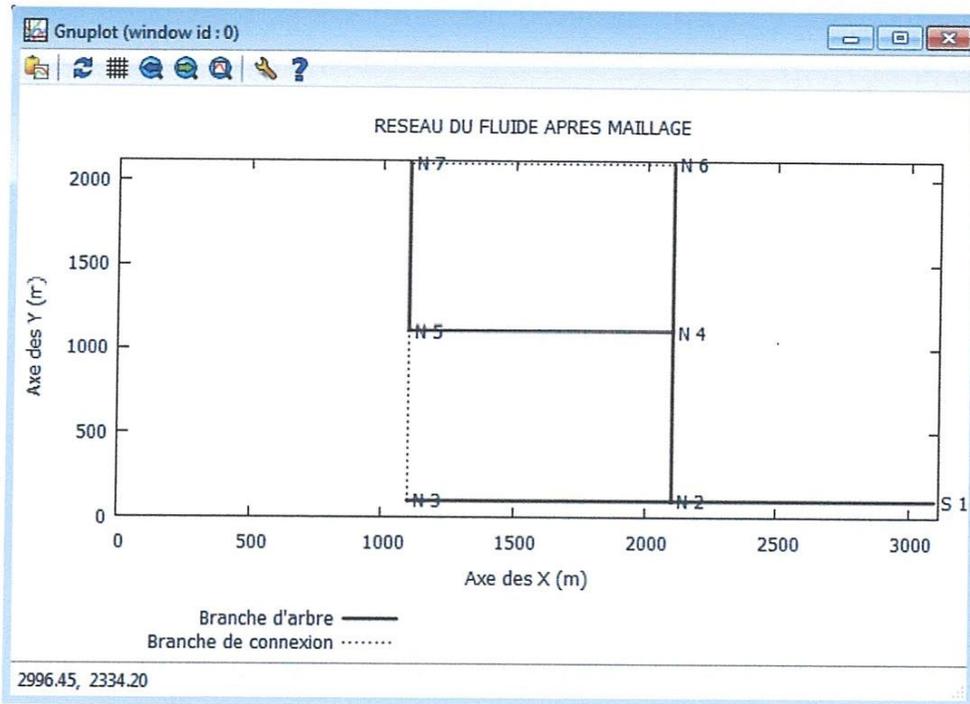
LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 6000.00000 (m)
Le nombre de conduites avant maillage est : 6

==> LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLESUR 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 :_
    
```

Etape 2 : Maillage du réseau



- Affichage des résultats du réseau après maillage :

```

c:\f9556\LEONI-1.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)
  le nombre de conduites apres maillage est : 8
==> 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 :

```

Commentaires :

La longueur obtenue dans ce cas est la même longueur obtenue par Loganathan (figure 3.2). Les réseaux obtenus dans les deux cas sont, en apparence identiques 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 méthodes.

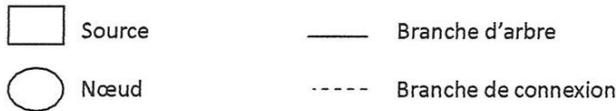
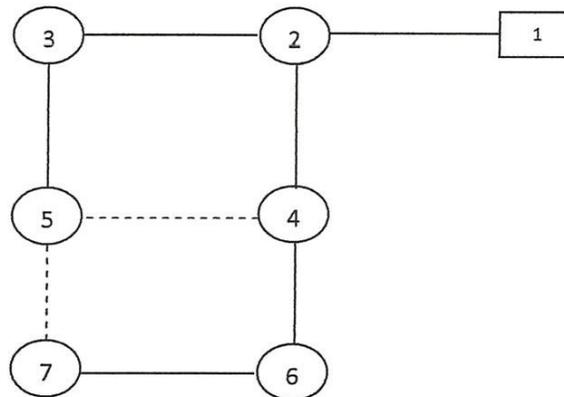


Figure 3.2 : Réseau obtenu par Loganathan

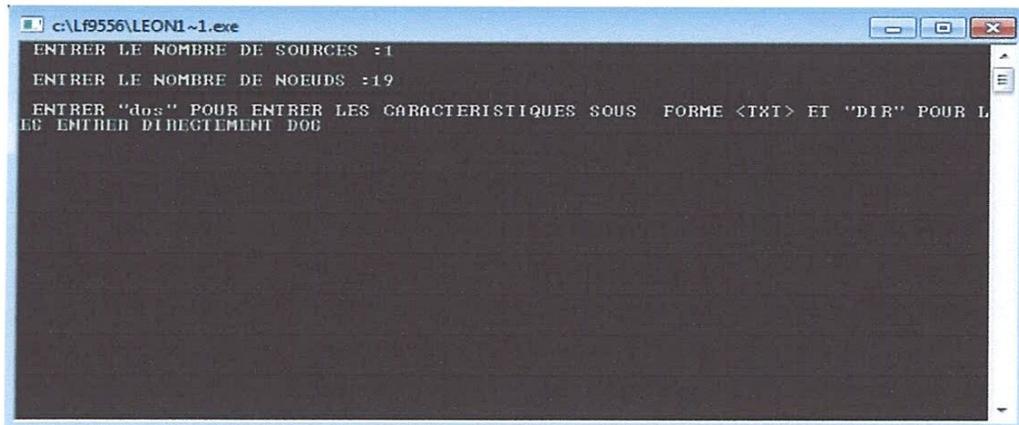
Cas 4 :

Tableau 3.4 : Données du réseau (quatrième cas)

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)	Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)
	X	Y			X	Y	
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

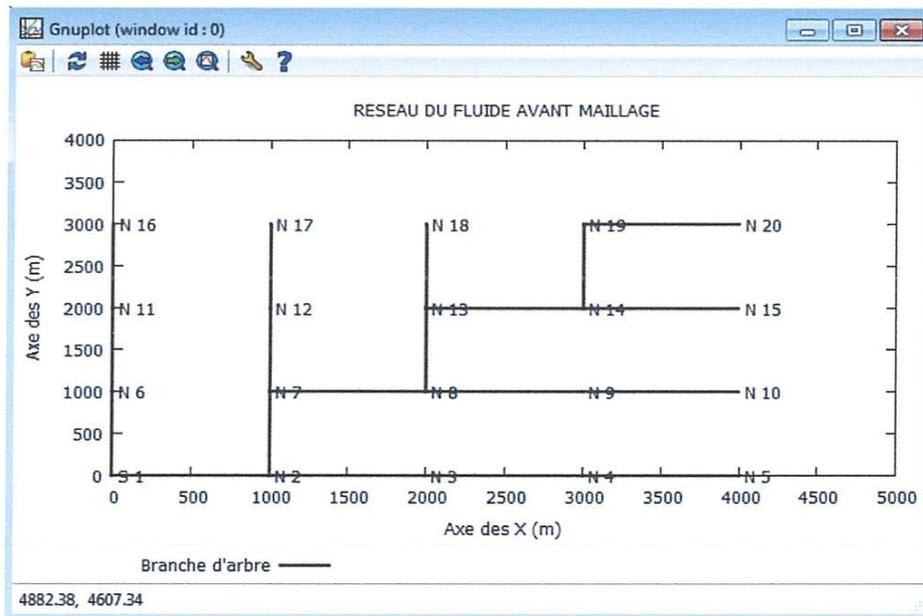
7	1000	1000	100	17	1000	3000	300
8	2000	1000	200	18	2000	3000	200
9	3000	1000	200	19	3000	3000	100
10	4000	1000	200	20	4000	3000	300

- Introduction des données :



Etape 1 : Construction des groupes

Le réseau ramifié obtenu est sous la forme suivante :



- Affichage des résultats du réseau après construction du groupe :

```

c:\f9556\LEON1~1.exe

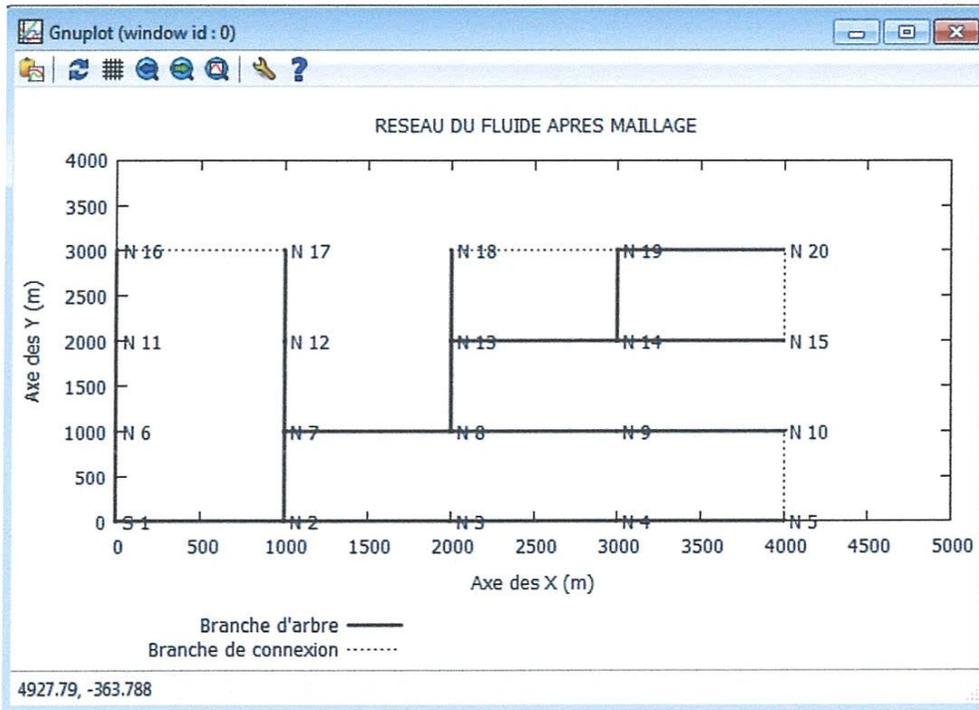
LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPEs EST: 19000.0000 (m)
Le nombre de conduites avant maillage est : 19

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

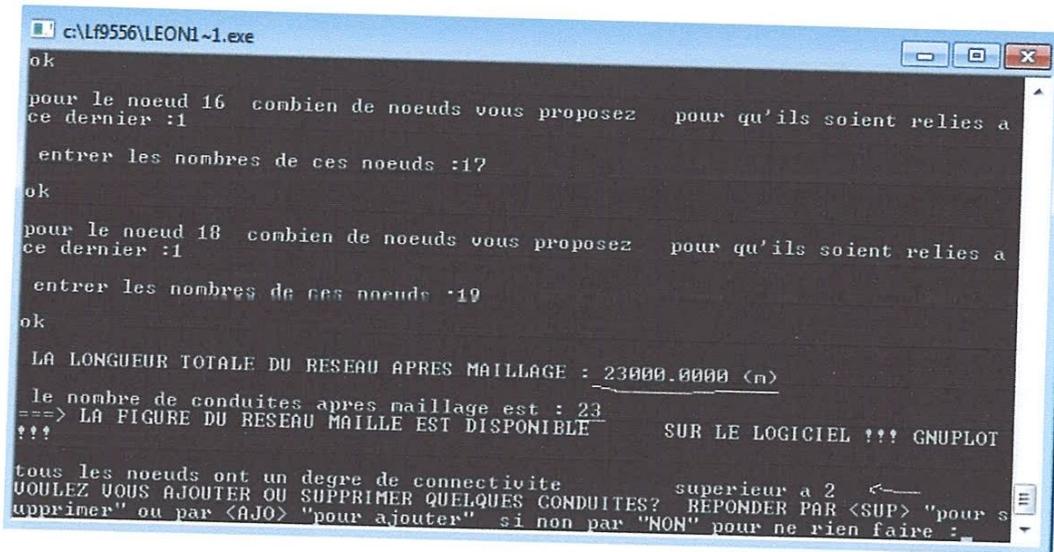
Le degre du noeud 5 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 10 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 15 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 16 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 17 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 18 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 20 est inferieur a 2 ?

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

Etape 2 : Construction des groupes



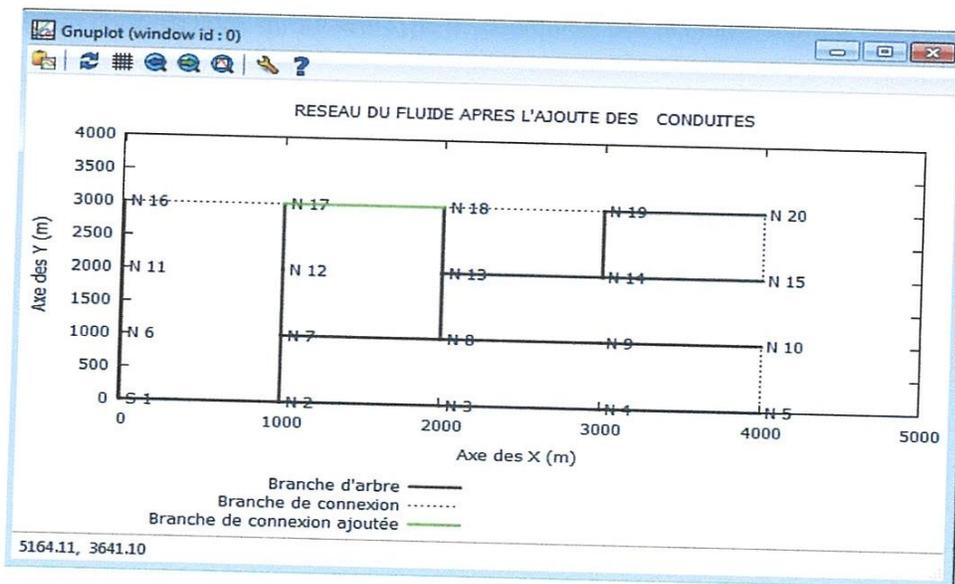
- Affichage de la longueur du réseau après maillage et le nombre de conduites :



Etape 3 : Choix pris pour ce cas

Dans cet exemple l'utilisation de cette étape est nécessaire puisque s'il y a une cassure dans la conduite entre le nœud 13 et le nœud 8 cela implique l'isolation du reste des nœuds (13, 14, 15, 19, 20, 18), donc on peut résoudre le problème par l'ajout d'une conduite entre les points de consommation 18 et 17.

Le réseau devient comme suit :



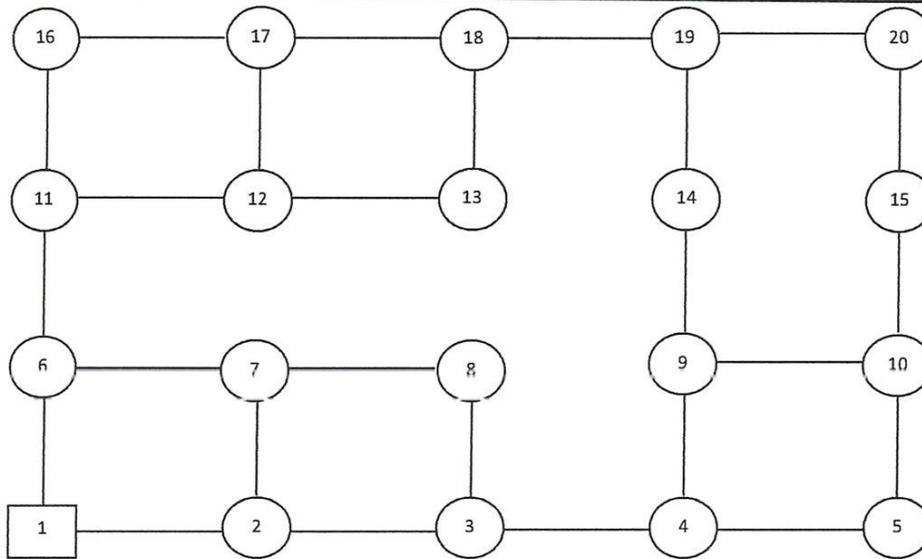


Figure 3.3 : Réseau obtenu par la méthode de la longueur minimale avant modification

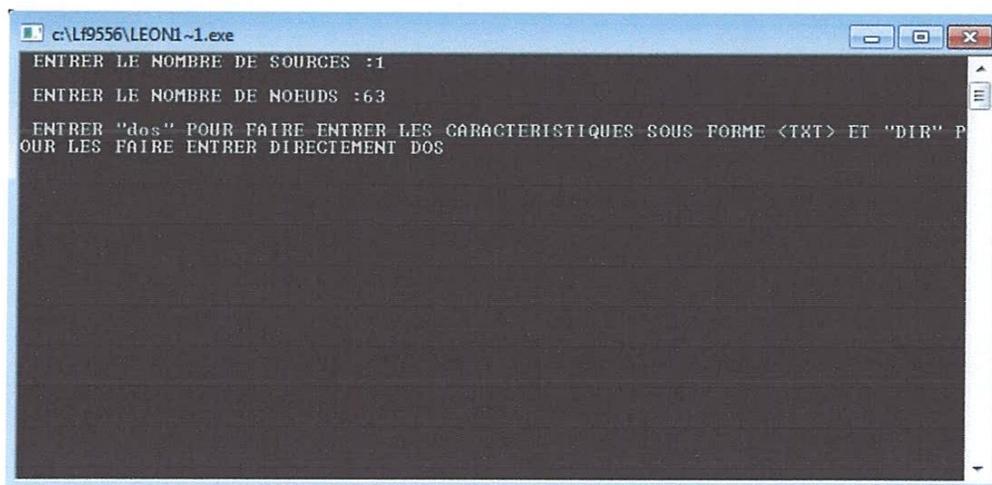
Cas 5 :

Tableau 3.5 : Données du réseau (cinquième cas)

Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)	Nœud	Coordonnée (m)		Capacité/ Demande (m ³ /s)
	X	Y			X	Y	
1	70	70	940	33	40	30	20
2	60	70	10	34	50	20	10
3	70	60	20	35	60	10	20
4	50	70	10	36	70	0	10
5	60	60	20	37	0	60	20
6	70	50	10	38	10	50	10
7	40	70	20	39	20	40	20
8	50	60	10	40	30	30	10
9	60	50	20	41	40	20	20
10	70	40	10	42	50	10	10
11	30	70	20	43	60	0	20
12	40	60	10	44	0	50	10
13	50	50	20	45	10	40	20

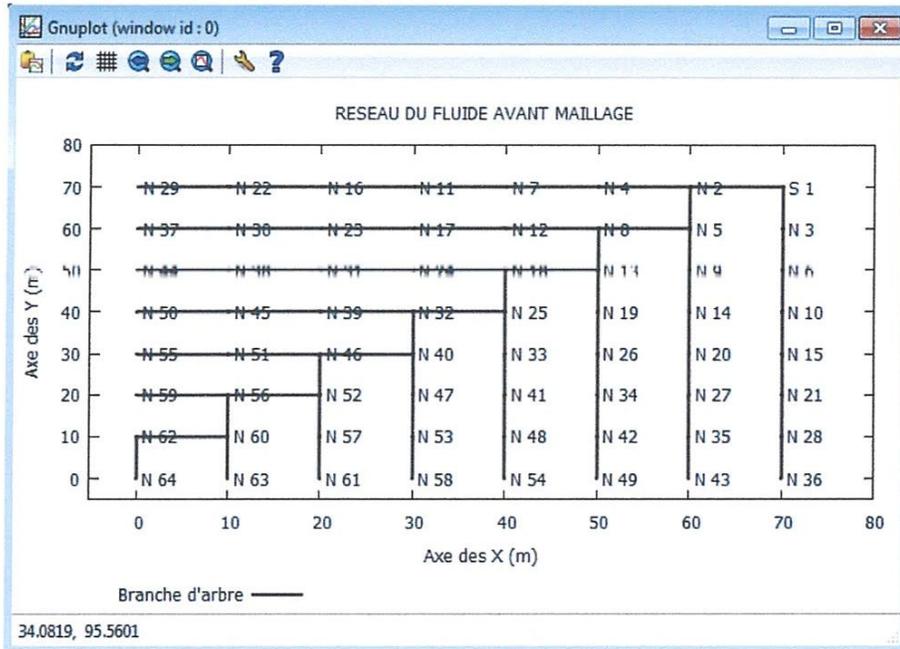
14	60	40	10	46	20	30	10
15	70	30	20	47	30	20	20
16	20	70	10	48	40	10	10
17	30	60	20	49	50	0	20
18	40	50	10	50	0	40	10
19	50	40	20	51	10	30	20
20	60	30	10	52	20	20	10
21	70	20	20	53	30	10	20
22	10	70	10	54	40	0	10
23	20	60	20	55	0	30	20
24	30	50	10	56	10	20	10
25	40	40	20	57	20	10	20
26	50	30	10	58	30	0	10
27	60	20	20	59	0	20	20
28	70	10	10	60	10	10	10
29	0	70	20	61	20	0	20
30	10	60	10	62	0	10	10
31	20	50	20	63	10	0	20
32	30	40	10	64	0	0	10

- Introduction des données : (sous forme TXT)



Etape 1 : Construction du groupe

Le réseau ramifié est de la forme suivante :

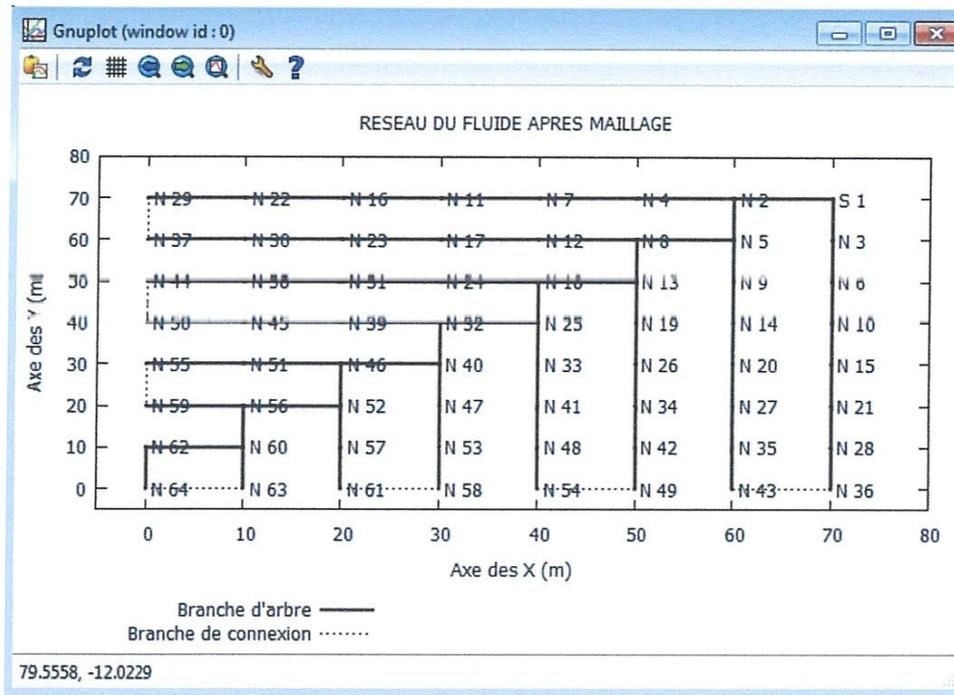


- Affichage des résultats du réseau ramifié :

```

c:\f9556\LEON1~1.exe
LA LONGUEUR TOTALE APRES CONSTRUCTION DES GROUPES EST: 630.000000 <n>
le nombre de conduites avant maillage est : 63
==> LA FIGURE PRELIMINAIRE DU RESEAU EST DISPONIBLES SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!
Le degre du noeud 29 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 36 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 37 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 43 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 44 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 49 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 50 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 54 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 55 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 58 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 59 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 61 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 63 est inferieur a 2 ?
Le degre du noeud 64 est inferieur a 2 ?
pour le noeud 29 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :
    
```

Etape 2 : Maillage du réseau



- Affichage des résultats du réseau maillé :

```

c:\f9556\LEON1-1.exe
ok
pour le noeud 58 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :1
  entrer les nombres de ces noeuds :61
ok
pour le noeud 63 combien de noeuds vous proposez pour qu'ils soient relies a
ce dernier :1
  entrer les nombres de ces noeuds :64
ok
LA LONGUEUR TOTALE DU RESEAU APRES MAILLAGE : 700.000000 (m)
le nombre de conduites apres maillage est : 70
==> 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 :
  
```

Etape 3 : Modification du réseau obtenu

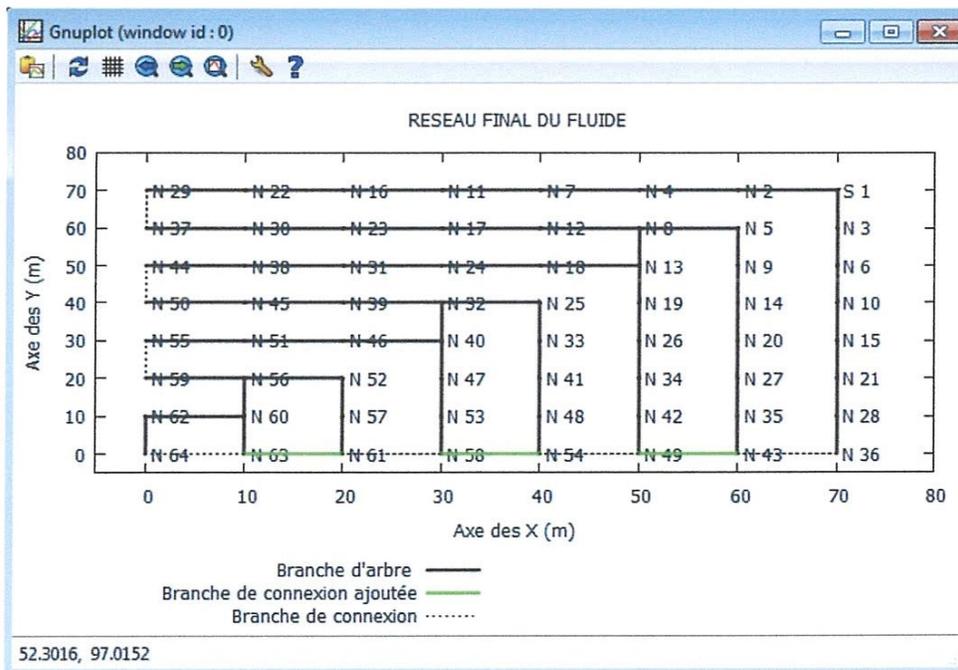
Dans cet exemple on va remplacer les conduites (2, 5), (18, 25), (46, 52) par (43, 49), (54, 58), (61, 63) respectivement pour assurer l'alimentation de toutes les sections en cas d'une cassure.

Les résultats obtenus sont donnés comme suit :

```

c:\f9556\LEON1~1.exe
entrer le numero du deuxieme noeud :58
la longueur totale apres avoir ajoute une nouvelle conduite est: 690.000000 <m
>
le nombre de conduites devient egale a : 69
==> 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:61
entrer le numero du deuxieme noeud :63
la longueur totale apres avoir ajoute une nouvelle conduite est: 700.000000 <m
>
le nombre de conduites devient egale a : 70
==> LA NOUVELLE FIGURE DU RESEAU EST DISPONIBLE SUR LE LOGICIEL !!! GNUPLOT
!!!
voulez vous ajouter une autre conduite, reponder oui ou non NON
SI VOUS VOULEZ SUPPRIMER UNE CONDUITE REPNDER PAR oui OU non :NON
tous les noeuds ont un degre de connectivite superieur a 2
    
```

- Le réseau devient comme suit :



Commentaires :

Pour ce cas une légère différence se manifeste entre les deux réseaux obtenus respectivement par notre programme (avec 700 m) et la méthode de la longueur minimale avant modification (avec 680 m) d'une part. D'autre part pour les types de conduites on a recouru à l'utilisation de trois types de conduites pour notre programme (Branche d'arbre, Branche de connexion, Branche de connexion ajoutée). La méthode de la longueur minimale avant modification utilise deux types de conduites (Branche d'arbre, Branche de connexion), cette différence est dû à la stratégie par laquelle on manipule notre réseau dans les deux méthodes (voir figure 3.4).

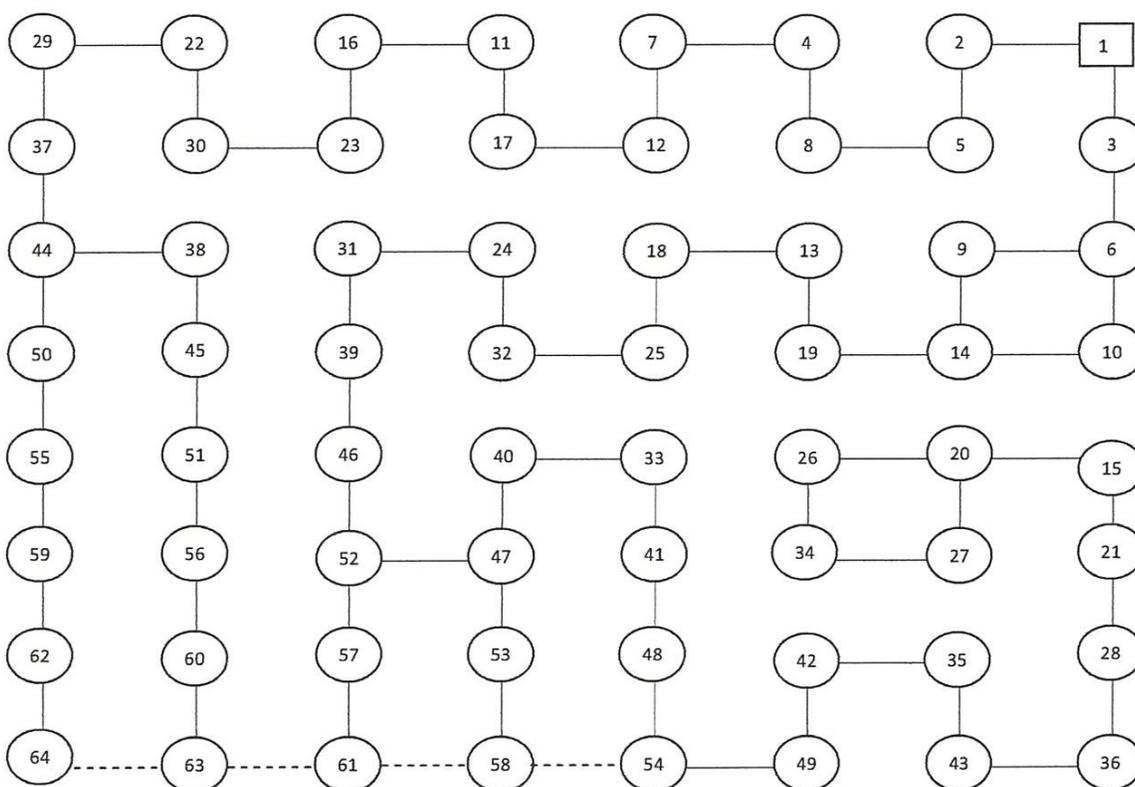


Figure 3.4 : réseau obtenu par la méthode de la longueur minimale avant modification

Conclusion générale :

Le travail déjà présenté a essayé de contribuer aux solutions proposées pour l'optimisation de la conception des réseaux ou à la réhabilitation des réseaux existants (expansion des réseaux), cet objectif est réalisé à l'aide d'un programme clair simple à être en service, ce programme repose sur une méthode heuristique dérivée de la modification d'une méthode existante déjà (méthode de la longueur minimale).

Dans le premier chapitre on a essayé de couvrir les différentes notions générales nécessaires pour traiter notre problème d'une façon méthodologique.

Dans le deuxième chapitre une présentation bien détaillée sur la méthode adoptée pour arriver à construire un programme efficace. L'organisation de la méthode a été divisée en quatre parties, puis renforcée par deux exemples à travers lesquels on tente de montrer la façon d'appliquer de la méthode dans le mode réel.

Le troisième chapitre, la figure générale du travail, révèle après une explication de la coordination entre les différents compartiments de l'ossature de la démarche du programme (Fortran - TXT - Gnuplot). Cette figure se renforce par cinq cas démonstratifs. L'observation des résultats et la comparaison de ces derniers avec ceux obtenus par les différentes méthodes (Loganathan, algorithmes génétiques, méthode de la longueur minimale avant modification) nous renseigne sur l'envergure de ce programme bâti sur une méthode heuristique.

A la fin de ce travail, on peut dire que l'objectif principal a été atteint par l'obtention d'un programme qui nous permet de concevoir des réseaux ramifiés ou maillés (suivant le besoin), dans un souci à la fois d'économie sur le coût total, la fiabilité du réseau et la disponibilité du fluide desservi.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- [1] Ranald V Giles , Mécanique des fluides et hydraulique: Cours et problèmes, 2e édition (2000).
- [2] Igor BLÏNDU, outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques, 2004.
- [3] M. Chouaib LABIOD, Thèse doctorat « ECOULEMENT A SURFACE LIBRE SUR FOND DE RUGOSITE INHOMOGENE » INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 19/07/2005.
- [4] IUT Marseille - Département GTE, TP 4: Les écoulements à surface libre: cas du ressaut hydraulique (IUT Marseille Département GTE), 2011-12.
- [5] MEMOIRE de Magistère en Hydraulique « Université Colonel Hadj Lakhdar – Batna »(Simulation numérique des écoulements polyphasiques et approches locales événementielles).
- [6] Daniel Huilier, Cour « écoulement en charges en régime permanent».GCI 21429,
- [7] Jean-François SINI, Cours mécanique des fluides 'Centrale nantes', cel-00356205, version 1 - 26 Jan 2009.
- [8] J.ROUSSEL, Cours de Mécanique des fluides, C.P.I.2 - Chem.I.St2 : 2005-2006.
- [9] Résumé de Cours « Ecole Normale Supérieure de Cachan Département de Génie Mécanique et de génie Civil ».
- [10] G-Dégoutte, Aide mémoire d'hydraulique à surface libre.
- [11] José VAZQUEZ, HYDRAULIQUE GENERALE « ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG ».
- [12] ABDELAZIZ Redha, Cours d'hydraulique générale « Centre Universitaire de Bechar », 2005-2006.
- [13] Mémoire de fin d'étude option hydraulique, Analyse des réseaux de distribution d'eau potable, université de guelma 08 mai 45, 2011.
- [14] 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.
- [15] Didier Maquin, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE « Eléments de Théorie des Graphes », Version provisoire du 3 mai 2003.
- [16] H.A, mémoire d'ingénieur d'état université de guelma08 mai « conception du réseau de distribution », 2002.

- [17] Cécile AJUSTE ; Jean-Marc BERLAND ; Jean-Luc CELERIER, Réhabilitation / remplacement des réseaux d'eau potable en zone rurale, Octobre 2004.
- [18] M. H. Afshar, APPLICATION OF MAX-MIN ANT SYSTEM FOR JOINT LAYOUT AND SIZE OPTIMIZATION OF PIPE NETWORKS Ninth International Water Technology Conference, Sharm El-Sheikh, Egypt, IWTC9 2005.
- [19] Optimization of pipe sizes for distribution gas network design « Andrzej J. Osiadacz Warsaw University of Technology and Marcin Gbrecki Regional Gas Dispatching Center, Warsaw ».
- [20] M.H. Afshar and M.A. Marino, A convergent genetic algorithm for pipe network optimization, Sharif university of technology, october 2005 ».
- [21] GENETIC ALGORITHMS COMPARED TO OTHER TECHNIQUES FOR PIPE OPTIMIZATION « By Angus R. Simpson, 1 Member, ASCE, Graeme C. Dandy, 2 and Laurence J. Murphy ».
- [22] Z.M Cours 1ère année master; théorie des graphes ; université de guelma08mai 45, 2011.