

M/624749

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de mastère

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : "Génie Civil"

Domaine: "Sciences et Technologie"

Spécialité : "Hydraulique urbaine ", Option : Hydraulique et techniques des eaux

Présenté par : Elbekri Abderrahmane

Benoughidene Nasreddine

Thème : Calcul d'équilibrage des réseaux d'alimentation en eau potable

Sous la direction de : Dr. Toumi Abdelouaheb

2011/2012



12/2859



Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné le pouvoir afin de réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur le professeur : Toumi, qui nous a encadrés avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ses conseils nous ont été bien utiles, notamment pour la rédaction de ce mémoire.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce modeste travail. Leurs remarques ont été à l'origine de discussions riches et passionnantes.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignants de département de Génie Civil et d'Hydraulique.

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui me sont les plus chers au monde :

Mes parents.

Mes chers frères

Ceux qui sont toujours à mon côté pour me soutenir

et m'encourager.

A tous les enseignants du département du génie civil

et à Monsieur le Professeur : J. OUMI en particulier.

A toute la promotion de 2^{ème} année master Hydraulique 2012

Je dédie ce travail.

DAHA. H. H.

Résumé
Introduction générale

Sommaire

Chapitre I	Réseau d'alimentation en eau potable	
1.1	Introduction	1
1.2	Historique succinct des réseaux d'eau	1
1.3	Adduction	1
1.4	Choix des types de canalisation	2
1.5	Paramètres du réseau	2
1.6	Classification des réseaux	3
1.7	Conception d'un réseau de distribution d'eau potable	6
1.8	Exigences relatives au réseau	10
1.9	Éléments constituant un réseau de distribution d'eau potable	11
1.10	Conclusion	15

Chapitre II	Méthode de calcul des réseaux maillés de distribution d'eau potable	
2.1	Introduction	16
2.2	Méthodes analytiques	16
→ 2.2.1	Méthode de Hardy Cross	16
→ 2.2.2	Méthode de WOOD et CHARLES	24
→ 2.2.3	Méthode de NEWTON- RAPHSON	31
2.3	Méthode graphique	36
2.4	Méthodes expérimentales par analogie	40
→ 2.4.1	Analogie hydraulique ou pneumatique	40
→ 2.4.2	Analogie électrique	42
2.5	Conclusion	43

Chapitre III	Organisation informatique	
3.1	Introduction	44
3.2	Description du programme	44
3.3	Programme de la méthode de Hardy Cross	45
→ 3.3.1	Description des séquences de calcul	45
→ 3.3.2	Organigramme de calcul détaillé	46
3.3.3	Programme de calcul des réseaux maillés	52
3.4	Conclusion	63

Chapitre IV	Application et Interprétation des résultats	
4.1	Introduction	64
4.2	Présentation des données	64
4.3	Présentation des résultats	67
4.4	Interprétation et discussion des résultats	69
4.5	Influence de la variation de la rugosité sur les pressions aux nœuds	69
4.6	Influence des pertes de charge singulières sur les pressions aux nœuds	74
4.7	Cas où les pertes de charge linéaires sont calculées par la formule quadratique de Darcy Weisbach	82
4.8	→ influence Pdcg	
4.8	Conclusion	99

Conclusion générale
Bibliographie

Introduction générale

L'alimentation en eau potable des populations est une priorité principale, pour l'état, à cause de la nécessité vitale de l'eau pour la vie. Vu la taille élevée de certaines agglomérations et le nombre croissant, sans cesse, des consommateurs, la conception des réseaux d'eau capables d'en assurer la distribution en milieu urbain a rapidement posé des problèmes complexes à résoudre.

Le problème principal qui se pose aux concepteurs des réseaux de distribution d'eau potable consiste à dimensionner correctement le réseau lors des besoins critiques (par exemple le cas de pointe plus incendies ou le cas des heures creuses), et connaître son comportement vis-à-vis la variation de la demande en eau c'est-à-dire la variation des performances du réseau (par exemple la variation des pressions aux différents nœuds et des vitesses de circulation d'eau dans les différents tronçons).

Le grand nombre de conduites et leur interconnexion qui caractérisent la structure d'un réseau font qu'il n'est pas facile de calculer rapidement, avec suffisamment de précision, les pertes de charges, les pressions et les débits dans tous les points des conduites pour un cas de consommation donné. La raison en est relativement simple. La distribution des débits dans le réseau est conditionnée par le principe de l'énergie minimum, par conséquent, la moindre modification du réseau entraîne une redistribution des débits.

Comme on le voit, la solution du problème dépend simultanément de ce qui se passe dans chaque élément du réseau. Une autre difficulté provient du fait que la relation qui décrit le lien entre le débit d'une conduite et la perte de charge qu'il entraîne est non linéaire ce qui ne simplifie pas la tâche du concepteur.

Au cours des dernières décennies, la métrologie de calcul des réseaux maillés de distribution d'eau a beaucoup évolué grâce aux possibilités offertes par les ordinateurs.

Parce que l'outil informatique est de nos jours devenu incontournable dans n'importe quel domaine ; nous nous sommes intéressés à la programmation, dans le but de parvenir à résoudre facilement, rapidement, simplement et surtout avec plus de précision, les problèmes posés par le calcul des réseaux maillés de distribution d'eau.

L'objectif de notre travail consiste donc en l'élaboration de programme (logiciel) de calcul d'équilibrage des réseaux maillés.

Nous allons commencer par une étude, en général, des réseaux d'alimentation en eau potable. Ensuite nous allons élaborer un programme de la méthode la plus répandue qui est celle de HARDY CROSS à laquelle nous allons appliquer un cas de réseau maillé, avant de conclure sur son efficacité.

Chapitre I

Réseau d'alimentation en eau potable

1.1 Introduction

Lorsque l'humanité ne s'est pas sédentarisée, les problèmes de l'eau se limitèrent seulement à la recherche d'un endroit d'approvisionnement facile d'accès (rivières, chutes, sources). Mais, avec l'apparition de collectivités de plus en plus importantes, c'est-à-dire à la naissance des cités, l'urbanisation éloignait la population du milieu naturel, et restreignait la diversité des sources d'approvisionnement en eau, le besoin d'apporter cette eau de la main s'est alors fait ressentir.

1.2 Historique succinct des réseaux d'eau

Dès l'antiquité la plus reculée, un millénaire avant Jésus-Christ, les premières civilisations hindoues et assyriennes ont réalisé des travaux considérables pour capter l'eau et l'amener à la ville. Plus tard, les Grecs et Romains en Europe et Afrique, les Incas en Amérique, réalisèrent des aqueducs, ouvrages hardis et remarquables ; mais il s'agissait de conduites gravitaires et alimentant essentiellement des fontaines et des points d'eau. Faut de matériaux résistant bien à la pression et de fontainerie adaptée, seuls des embryons de réseau ont été constitués pour desservir des thermes ou quelques palais, grâce à des tuyaux en plomb ou en poterie chez les Romains, en bois assemblé comme les douves d'un tonneau, ou en bambou en Amérique et en Asie [1].

1.3 Adduction

1.3.1 Définition

Le terme d'adduction s'applique à l'ensemble des installations qui permettent de canaliser l'eau d'un endroit à un autre, c'est-à-dire du point de captage d'eau jusqu'au réservoir de stockage.

Il existe deux types d'adduction :

1.3.2 Adduction gravitaire

Le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de dessert de l'agglomération. Elle s'effectue soit par :

- **Les aqueducs** : Il est fait appel à l'écoulement libre de l'eau c'est-à-dire sans pression grâce à la pente, ordinairement uniforme sur tout le parcours.
- **Les conduites forcées** : Il est fait appel à l'écoulement sous pression, pour l'écoulement d'un même débit, les pertes de charge seront plus importantes dans une conduite forcée que dans un aqueduc à faible pente présentant le même diamètre.

1.3.3 Adduction par refoulement

Le captage se situe à un niveau inférieur à celui du réservoir d'accumulation.

Les eaux du captage seront refoulées dans cette conduite grâce à une station de pompage.

Nous examinerons les conduites dans lesquelles devra être établie cette canalisation, tout d'abord du point de vue technique, puis de point de vue économique.

1.4 Choix des types de canalisation

Le choix entre les différents types de conduites est basé sur des critères techniques et économiques à savoir :

- Le diamètre.
- La pression interne supportée par la canalisation.
- Condition de pose et agressivité du sol.
- Prix et transport.

1.5 Paramètres du réseau

1.5.1 Débit

Les conduites doivent pouvoir transiter les débits pendant les heures de pointes.

Chapitre I : Réseau d'alimentation en eau potable

1.5.2 Vitesse

Les vitesses dans les différents tronçons du réseau, doivent respectés deux conditions la première est que la vitesse ne doit pas être inférieure à 0,5m/s, et la deuxième est que la vitesse maximale tolérée est de 1,5m/s, il est préférable que les vitesses soient comprises entre 0,6m/s et 1,2m/s.

1.5.3 Pression

Les pressions moyennes présentent les avantages suivants

- Consommation normale assurée pour édifice dix d'étages ou moins.
- Connexion directe de lance d'incendie
- Fluctuation relative de pression plus faible.

Encas d'incendie, il faut prévoir la possibilité d'augmenter la pression, ce qui peut se faire par les moyens suivants

- Pompe supplémentaire à la station de pompage.
- Pompage mobile par camion pompe
- Système double avec conduites spéciales pour débit de feu
- Système pseudo double avec grosses conduites principales et réductrices de pressions pour l'alimentation normale.

1.6 Classification des réseaux

On peut classer les réseaux d'alimentation en eau potable suivant deux critères majeurs, ces critères nous permettent de donner deux principales classifications des réseaux qui sont :

1.6.1 Classification selon la disposition des réseaux dans l'agglomération

1.6.1.1 Le réseau unique

Dans le cas d'un relief plat ou moyennement accidenté on peut utiliser juste un seul réseau et avoir de bonnes conditions techniques (pression).

1.6.1.2 Le réseau en zones étagées

Il est utilisé quand l'agglomération a un relief accidenté.

1.6.2 Classification selon la disposition des tronçons dans le réseau

1.6.2.1 Le réseau ramifié

Le schéma de ce type de réseau est conçu de telle façon que les conduites reliées en série aient une forme arborescente (présente des ramifications).

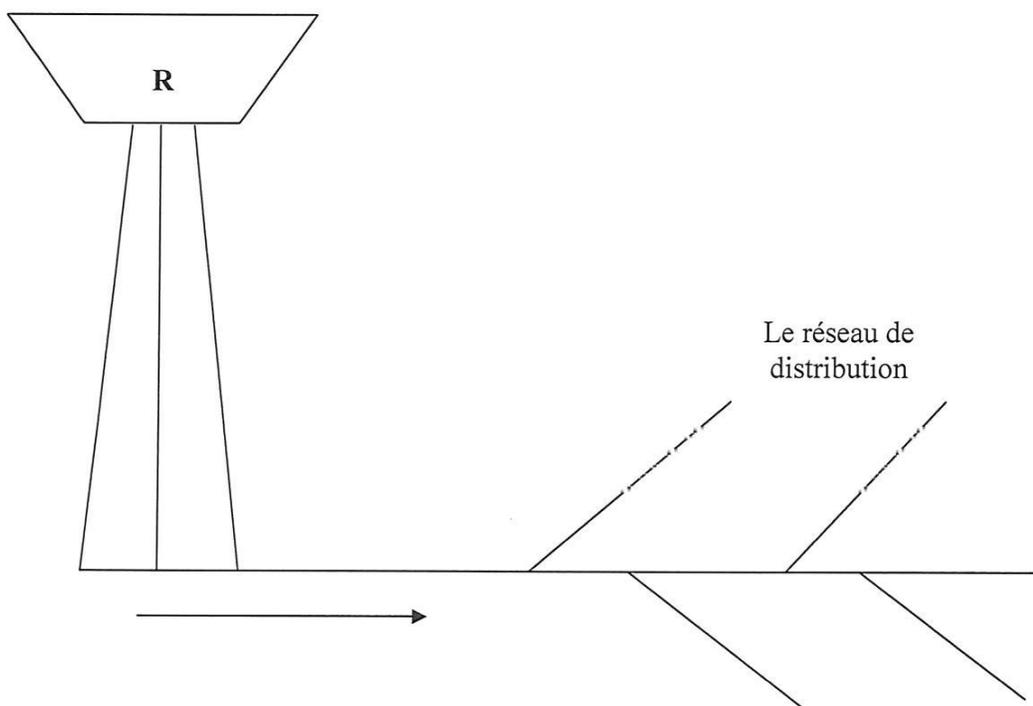


Figure 1-1 : Schéma d'un réseau ramifié

Comme il est indiqué dans la figure (1-1), chaque conduite se termine par une conduite en impasse (pour les conduites destinées à l'alimentation domestique).

Pour le réseau ramifié, l'écoulement se fait dans un seul sens.

Ce schéma n'est utilisé que pour les zones dont l'agglomération est éparpillée et le système d'alimentation ne peut être qu'à partir d'un réservoir de tête. Il présente l'avantage d'être économique, mais il manque de sécurité. En cas de rupture, un accident sur la conduite principale prive d'eau tous les abonnés qui se trouvent en aval. [2]

1.6.2.2 Le réseau maillé

Les conduites dans un réseau maillé sont disposées, comme le nom l'indique, en mailles bouclées de manière qu'elles aient une communication entre elles de la façon que la figure (1-2) illustre :

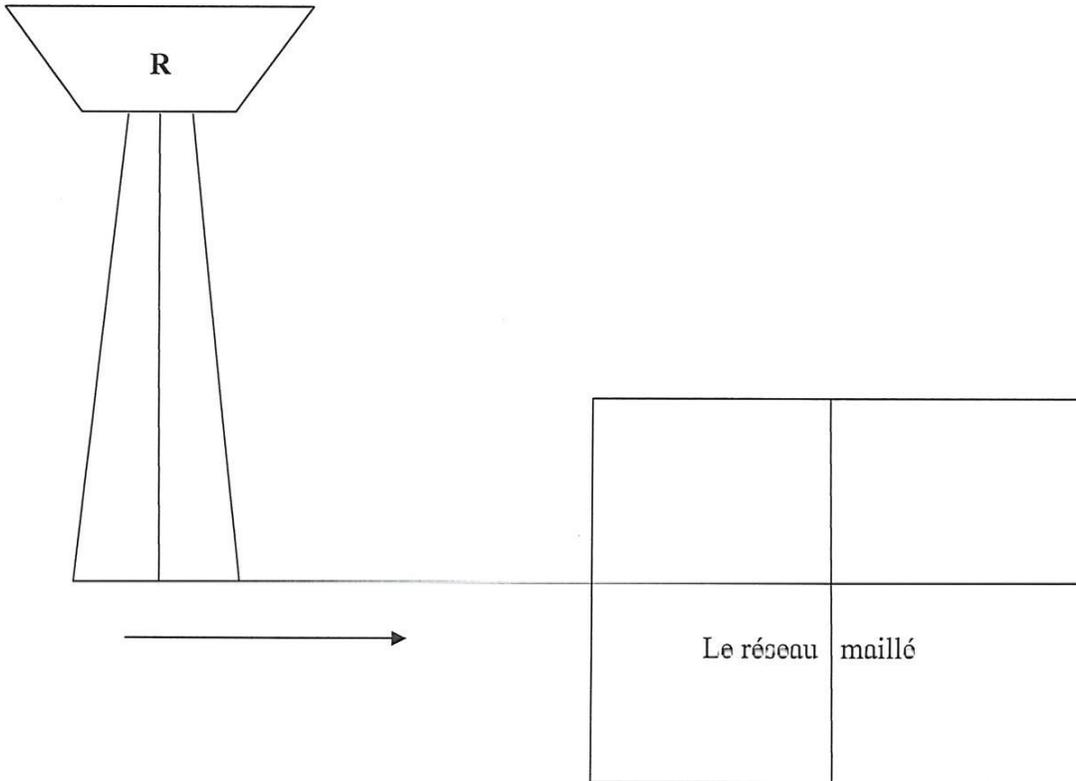


Figure 1-2 : Schéma d'un réseau maillé

Contrairement au réseau ramifié, le réseau maillé est plus souple et plus sécurisant parce qu'il permet une alimentation en retour pour tous les tronçons.

Le réseau maillé présente l'inconvénient d'être plus onéreux par rapport au ramifié mais il est toujours le préféré, car il assure une meilleure répartition des débits, de pression et surtout une plus grande sécurité dans la distribution. En cas de défaillance d'un tronçon, une simple manœuvre de robinet permet d'isoler le tronçon accidenté et de poursuivre l'alimentation des abonnés d'aval, et finalement il présente une simplicité dans la manœuvre de robinets.[2]

1.7 Conception d'un réseau de distribution d'eau potable

La tâche première du concepteur consiste à évaluer les volumes d'eau à fournir à une agglomération pour en satisfaire les besoins actuels et à venir. En plus de la consommation elle-même, le concepteur doit tenir compte de divers besoins domestiques, agricoles, industriels et commerciaux, ainsi que de la protection contre les incendies. C'est en se fondant sur de telles informations qu'il doit concevoir un réseau de distribution approprié.

Nous allons présenter les moyens nécessaires pour réaliser ce travail d'analyse et de conception. Nous identifions ainsi les besoins qu'un réseau de distribution doit satisfaire et présentons les méthodes mathématique et informatique qu'on peut employer pour concevoir un réseau ou pour évaluer un réseau existant.

1.7.1 Définition d'un réseau de distribution

Un réseau de distribution d'eau comporte divers types de conduites qu'on classe selon leur fonction et en pratique, selon leur diamètre : les conduites principales les conduites secondaires et les conduites locales.

a) Conduites principales

Elles servent à relier les stations de pompage aux réservoirs, et aux divers quartiers de la ville, ont 350mm ou plus de diamètre. Ces conduites sont pourvues de chambres de drainage aux points bas, ainsi que des ventouses (purgeur d'air ou reniflards) aux points hauts.

Il n'y a pas de branchements aux maisons sur ces conduites.

b) Conduites secondaires

Elles ont 250 ou 350mm de diamètre. Raccordées aux conduites principales, avec les quelle elles forment des réseaux maillés, elles sont distantes les unes des autres d'environ 1000m. On peut effectuer de branchements aux maisons sur ces conduites.

c) Conduites principales de distribution

Elles desservent les bouches d'incendie placées tous les 100 ou 150m selon la densité du territoire. Les conduites sont fabriqué en béton précontraint, en font ou en PVC (on va voir plus en détail les types de conduites). Les diamètres sont calculés pour obtenir des vitesses bien précises.

d) Conduites locales

Les conduites locales sont les plus petites des conduites d'un réseau ; leur diamètre ne peut cependant être inférieur à 150mm si on veut assurer la protection contre les incendies. Comme leur nom l'indique, les conduites locales ne desservent que quelques rues.

e) Nœud, Maille et Tronçon

- ✓ Un nœud est le point de jonction de deux ou plusieurs conduites.
- ✓ Un réseau de distribution maillé est un réseau formé de plusieurs mailles.
- ✓ Un tronçon est la partie de canalisation comprise entre deux nœuds.

1.7.2 Types de matériaux des conduites

Suivant les diamètres, les pressions supportées, et les conditions d'installation on est amené à réaliser les conduites en charge avec des tuyaux de nature et de type différents.

a) l'acier

On réalise souvent maintenant des conduites en acier doux soudable. Pour les petits diamètres jusqu'à 400 mm, on peut fabriquer aussi des tuyaux en acier étirés sans soudure ; le problème de corrosion est par contre particulièrement difficile et présent aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Pour la corrosion intérieure, on se contente habituellement de revêtir l'acier de différents produits, soit à base de goudron ou de peinture anticorrosive, faite à partir de produits pétroliers ; on utilise aussi des revêtements de ciment qui donnent satisfaction.

A l'extérieur, les canalisations d'acier sont enrobées d'un revêtement protecteur composé de laine de verre et de bitume.

Les conduites en acier permettent une pose beaucoup plus souple : elles sont dé coupables, soudables et cintra blés à la demande ce qui permet d'approvisionner très peu de pièces spéciales pour le chantier de pose.

Le joint entre conduites s'effectue par simple soudage des extrémités bout à bout.

b) Matière Plastique

Les matériaux dont sont faites ces conduites présentent des avantages et des inconvénients. Les conduites en matière plastique sont légères et faciles (ont donc l'avantage de diminuer les pertes de charge). Toutefois, elles ont tendance à se déformer sous l'effet des charges et changements de température. Les joints sont facilement exécutés soit par collage, soit par soudure à l'air chaud.

c) La fonte

Les conduites en fonte sont couramment pour la distribution comme pour l'assainissement ; réalisées autrefois par moulage, elles sont maintenant exécutées en fonte centrifugée, revêtue extérieurement de goudron.

La fonte ordinaire, est maintenant remplacée par une fonte ductile, à la fois plus souple et plus résistante, qui permet de supporter des pressions de service atteignant 50 bars pour des diamètres ne dépassant pas 0,6m, et 40bars pour les tuyaux de diamètre supérieur.

La fonte ductile permet en outre le cintrage des tuyaux sur le chantier, ce qui limite l'approvisionnement des coudes.

b) le béton armé

A cause de son bon marché par rapport au métal, le béton est utilisé pour la confection des conduites.

Ce sont des conduites faites en acier soudés et revêtus de béton à l'intérieur et à l'extérieur ; le béton est comprimé (béton précontraint) dans le sens de la longueur des conduites à l'aide de fil d'acier enroulé. Ces conduites sont offertes dans des diamètres variant entre 300 et 2700 mm et en tronçons de longueurs variables (4,7 à 7,3 m). On utilise des joints à bride joints à emboîtement pour raccorder entre elles de telles conduites.

e) l'amiante de ciment

Les conduites en amiante de ciment sont rarement utilisées, étant donné qu'elles sont fragiles et qu'elles ont tendance à se fissurer. Elles ont des joints à emboîtement pour raccorder entre elles.

1.7.3 Obtention du mandat

Le concepteur obtient de l'organisme responsable (le plus souvent la municipalité) un mandat clair, précis et détaillé.

Il doit délimiter avec précision le territoire à desservir, actuellement et dans l'avenir, il arrive en effet fréquemment que ce territoire déborde des limites de la municipalité.

1.7.4 Recension des services existants

Le concepteur doit obtenir des autorités compétentes les plans récents des différents réseaux d'égouts ainsi que les plans de distribution d'eau, de gaz d'électricité et de téléphone. Ces plans doivent comprendre les équipements existants : conduites de pompage, vannes réservoirs, etc.

1.7.5 Etude du milieu physique et détermination des besoins actuels et à venir

- ❖ Etude sommaire du milieu physique et géologique.
- ❖ Définition de l'occupation actuelle et à venir du territoire : zonage et démographie.
- ❖ Etablissement de critères qui permettront d'étude les réseaux existants et à venir.
- ❖ Détermination des situations critiques en fonction desquelles on doit concevoir le réseau
- ❖ Etude du comportement et des pressions du réseau pour les conditions actuelles : par exemple, on compare les résultats d'un modèle informatisé avec les mesures faites sur le terrain.
- ❖ Evaluation de la consommation en eau actuelle et à venir à l'aide des informations existantes (production au cours des dernières années : relevés des compteurs d'eau des entreprises des commerces et des institutions etc.). L'ingénieur doit ainsi déterminer avec le maximum de précision possible :
 - ✓ La consommation totale par habitant ;
 - ✓ La consommation domestique ;
 - ✓ La consommation commerciale ;
 - ✓ Les consommations industrielles ;
 - ✓ Les consommations institutionnelles ;
 - ✓ Les pertes ;

Chapitre I : Réseau d'alimentation en eau potable

- ✓ Les variations de ces consommations ;
- ✓ Les hydro grammes de consommation des journées de consommation maximale des dernières années.

1.7.6 Détermination des choix possibles et étude économique

- Etablissement d'une liste des divers sites possible pour les conduites principales et secondaires.
- Evaluation de l'étendue des zones à desservir par chacun des nœuds.
- Simulation du comportement du réseau dans les diverses situations critiques.
- Etude économique : couts de réalisation et d'entretien des diverses solutions envisagées.

1.7.7 Choix final

- ✓ Choix du réseau qui satisfait le mieux aux besoins.
- ✓ Présentation d'un rapport détaillé à l'organisme responsable, rapport devant comporter la solution préconisée le cout de sa réalisation et un programme de construction.

La conception d'un réseau de distribution d'eau comporte de nombreuses étapes qu'on doit franchir avant de satisfaire aux besoins en eau d'une agglomération.

1.8 Exigences relatives au réseau

Pour que les performances d'un réseau de distribution soient satisfaisantes, ce réseau doit être en mesure de fournir, à des pressions acceptables, les débits et les volumes d'eau c'est pourquoi Le concepteur doit déterminer les situations les plus critiques afin de concevoir un réseau qui se comporte de façon satisfaisante dans de telle situation [3].

1.8.1 Consommation de point horaire

On doit d'abord s'assurer que le réseau se comporte de façon adéquate lors des consommations horaires de pointe actuelles et à venir.

1.8.2 Consommation journalière maximale durant un ou plusieurs incendies

Le concepteur doit en suit évaluer le comportement du réseau lorsqu'un incendie se produite au cours de la journée de consommation maximal de l'année (habituellement entres 1.5 et 3.0 fois le débit moyen journalier relatif à cette année).il doit de plus envisager la

Chapitre I : Réseau d'alimentation en eau potable

possibilité que deux incendier se produisent simultanément, et étudier le comportement du réseau selon les sites des incendies.

1.8.3 Consommation journalière maximal en cas de bris d'une conduite secondaire ou principale

Il est souvent intéressant d'étudier le comportement d'un réseau lorsqu'on doit mettre hors de tronçon de conduite secondaire ou principale, que ce soit pour le réparer ou pour l'entretenir pendant la journée de consommation journalière maximale. On cherche simplement à étudier la réaction du réseau dans de telles situations, en apportant des correctifs si la qualité du service en est trop affectée.

1.8.4 Situation particulières

On peut en outre analyser certaines situations particulières au réseau à l'étude ; on s'assure ainsi, par exemple, qu'on réservoir d'équilibre peut être rempli durant la période prévue à cette fin, notamment la nuit, lorsque la consommation est minimale, etc.

Avant de pouvoir simuler le comportement d'un réseau dans diverses situations de consommation en eau, il est nécessaire d'effectuer un premier choix en ce qui concerne le diamètre et l'emplacement des conduites.

1.9 Elément constituant un réseau de distribution d'eau potable

1.9.1 Les Réservoir

1.9.1.1 Définition

Les réservoirs sont des ouvrages hydrauliques destinés au stockage des liquides généralement l'eau potable.

1.9.1.2 Rôle des réservoirs

La présence d'un réservoir entre les ouvrages d'adduction est importante dans l'alimentation en eau potable grâce au rôle qu'il joue :

- ✓ Assurer aux heures de pointe les débits demandés.
- ✓ Satisfaire la demande en eau des consommateurs.

Chapitre I : Réseau d'alimentation en eau potable

- ✓ Assurer les pressions nécessaires en chaque point du réseau de distribution.
- ✓ Conserver l'eau à l'abri des risques de contamination.
- ✓ Régulation du fonctionnement des pompes (débit de refoulement).
- ✓ Combattre efficacement les incendies.

1.9.1.3 Classification des réservoirs

- D'après la nature des matériaux on distingue :
 - ✓ Réservoirs métallique.
 - ✓ Réservoirs en maçonnerie.
 - ✓ Réservoirs en béton armé ordinaire au précontraint.
- D'après la situation des lieux, ils peuvent être :
 - ✓ Réservoirs enterrés.
 - ✓ Réservoirs semi enterrés.
 - ✓ Réservoirs posés sur le sol.
 - ✓ Réservoirs surélevés (château d'eau).
- Enfin, d'après des considérations esthétiques ils peuvent :
 - ✓ Soit affirmer les fonctions de l'ouvrage.
 - ✓ Soit s'intégrer au paysage.

1.9.1.4 Emplacement des réservoirs

L'emplacement d'un réservoir doit être compatible avec le rôle qu'il joue c'est-à-dire donner aux consommateurs une pression suffisante aux heures de pointes, pour cela il faut que la cote de radier du réservoir soit supérieure à la plus haute cote piézométrique dans le réseau de distribution.

- Pour des raisons esthétiques le réservoir doit être placé à la limite de l'agglomération.
- Pour les raisons économiques il y a toujours intérêt à réduire la longueur des conduites d'adduction et de distribution.

1.9.1.5 Les équipements de réservoir

Les équipements de réservoir, sont installés dans une chambre de manœuvre accolée au réservoir, pour remplir leurs diverses fonctions :

a) Conduite d'adduction (d'arrivée)

Un réservoir pour l'alimentation urbaine doit être menu d'une conduite d'arrivée, d'une conduite de vidange et de trop-plein et en fin un by-pass.

b) Conduite de distribution (de départ)

Le départ de la conduite de distribution s'effectue à 0.20m au dessus du radier du réservoir afin d'éviter l'introduction des boues et des sables, le départ est prévu à l'opposé de l'adduction, menu d'une crépine s'opposera à l'arrière de l'eau et qui empêchera la pénétration des matière en suspension.

Un robinet vanne est installé sur la conduite de distribution pour permettre l'isolation en cas d'accident.

a) Conduite de vidange

La conduite de vidange est disposé au point bas du réservoir et se raccorde sur la canalisation du trop-plein, elle est équipée d'un robinet vanne pour assurer le vidange dont le fond est accessible.

d) Conduite de trop-plein

La conduite de trop-plein est destinée à empêcher l'eau qui dépasse le niveau d'eau max, la conduite de trop-plein ne comportera pas un robinet sur sont parcours, elle comportera au départ un entonnoir qu'on considère comme un réservoir circulaire à paroi mince.

e) By-pass

Le plus souvent, on prévoit une communication entre la conduite d'adduction et celle de distribution, cette liaison est dite : BY-PASS. Elle fait passer l'eau de l'adduction à la distribution sans toutefois qu'elle fasse passage par le réservoir.

Elle devient opérationnelle lors du nettoyage ou de réparation du réservoir.

Elle s'effectue selon le schéma () ; en temps normal, 1 et 3 sont ouverts et 2 est fermé.

En BY-PASS, on ferme 1 et 3 et on ouvre 2.

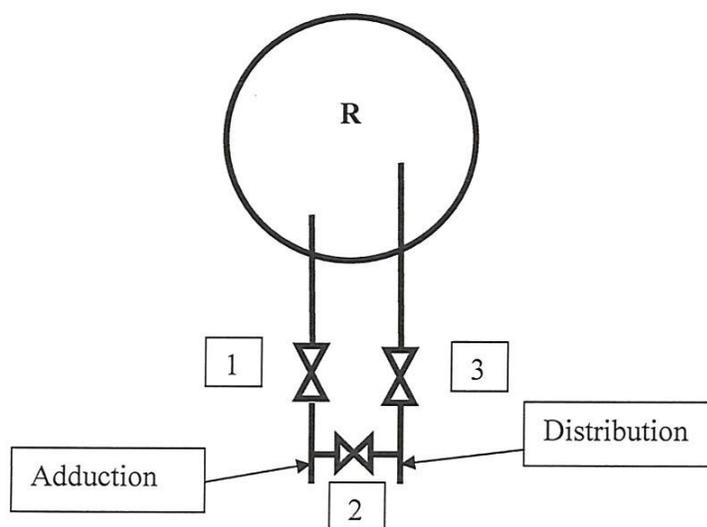


Figure 1-3 : By-pass

1.9.2 Appareils et accessoires :

a) Robinets vanne :

Les robinets vanne permet d'isoler le tronçon à réparer.

b) Tés :

Les tés servant à relier les canalisations secondaires aux canalisations principales.

c) Coudes :

Les coudes permettent de changer les directions suivant l'angle de déviation de conduite.

d) Poteaux d'incendie :

Ils sont installés sur des canalisations capables de fournir un débit d'incendie 17 (l/s).

Ces appareils doivent être répartis suivant l'importance des risques d'incendie à combattre.

En générale, le rayon d'influence pour la répartition des poteaux d'incendie est compris entre 150 et 200 m.

1.10 Conclusion

Ce chapitre fait ressortir d'abord, l'évolution des réseaux d'eau dans le temps et dans l'espace. Et puis, nous avons exposé l'essentiel des connaissances nécessaires en alimentation en eau potable pour entamer la conception d'un réseau de distribution d'eau potable d'une agglomération. Dans ce qui suit notre objectif fera alors l'objet d'une description détaillée de différentes méthodes de calcul des réseaux maillés.

Chapitre II

Méthodes de calcul des réseaux maillés de distribution d'eau potable

2.1 Introduction

La résolution du problème posé par les réseaux maillés a donné naissance à diverses méthodes dont chacune possède ses propres principes. Alors, pour l'équilibrage d'un réseau maillé, on dispose des :

- ✓ Méthode analytiques ;
- ✓ Méthodes graphiques ;
- ✓ Méthodes expérimentales par analogie.

2.2 Méthodes analytiques

Au cours des dernières décennies, le calcul des réseaux maillés de distribution d'eau potable a connu une importante évolution.

En effet, plusieurs études ont été élaborées. Ces études ont débouché sur plusieurs méthodes de résolution parmi lesquelles, trois sont principalement utilisées :

- ✓ La méthode de Hardy Cross ;
- ✓ La méthode de Charles et Wood ;
- ✓ La méthode de Newton-Raphson.

2.2.1 Méthode de Hardy Cross

La méthode de Hardy Cross est la plus ancienne et la plus utilisée des différentes méthodes d'équilibrage des réseaux maillés de distribution d'eau potable.

Elle consiste à calculer, par approximations successives, les débits circulant dans les conduites d'un réseau maillé, connaissant les caractéristiques des canalisations (longueur, diamètre, ...) et les débits entrants au niveau des nœuds, et cela après une répartition arbitraire.

Hardy Cross s'est basé sur deux lois inspirées de celles de Kirchhoff utilisées en électricité.

2.2.1.1 Loi des nœuds (Loi de continuité)

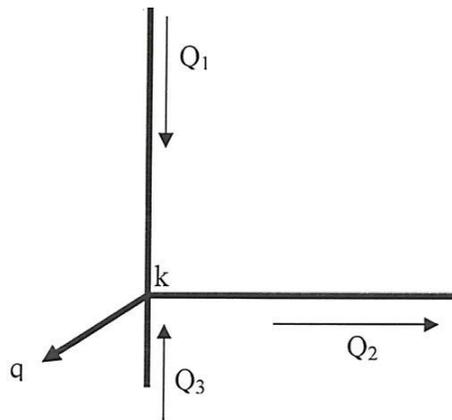


Figure 2-1 : Débit à un
nœud k

La somme algébrique des débits en un nœud est nulle, c'est-à-dire que la somme des débits qui arrivent à ce nœud est égale à la somme des débits qui le quittent. Nous avons alors au niveau du nœud k :

Par convention, les débits qui arrivent au nœud sont positifs et ceux qui sortent sont négatifs. Ce qui nous donnera pour le cas de la figure précédente :

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 - q = 0 \quad (2-1)$$

Cette équation est linéaire, puisque les variables Q_{ik} (débits) sont affectées de l'exposant 1.

2.2.1.2 Loi des mailles (loi de conservation d'énergie)

Dans une maille, la somme algébrique des pertes de charges est nulle.

$$\sum \Delta H_{ij} = 0 \quad (2.2)$$

ΔH_{ij} : Etant la perte de charge dans le tronçon j de la maille i.

Par convention, nous admettons que les débits qui circulent dans le sens des aiguilles d'une montre sont positifs et ceux qui circulent dans l'autre sens sont négatifs.

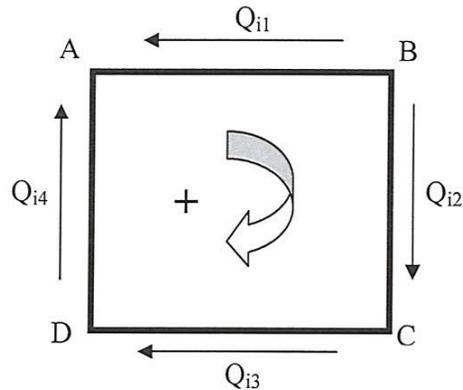


Figure 2-2 : perte de charge en une maille

Si on applique la loi des mailles à la maille de la figure précédente, on aura :

$$\sum \Delta H_{ij} = \Delta H_{12} + \Delta H_{13} + \Delta H_{14} - \Delta H_{11}$$

$$\text{Ave : } \Delta H_{ij} = R_{ij} \cdot Q_{ij}^{\alpha} \quad \text{et} \quad R_{ij} = \frac{\gamma \cdot L_{ij}}{d_{ij}^{4,871} C_{HW}^{\alpha}} \quad (2-4)$$

R_{ij} : Résistance de la conduite ij

γ : Constante $\gamma = 10,679$

L_{ij} : Longueur de la conduite ij

d_{ij} : Diamètre de la conduite ij

C_{HW} : Coefficient de HAZEN WILLIAMS

Cette équation est non linéaire puisque les variables Q_{ij} sont toutes affectées d'un exposant différent de 1.

Donc, pour chaque maille, il existe une équation non linéaire qui représente la conservation de l'énergie.

En résumé, pour un réseau doté de n nœud et de m mailles, on peut identifier

- $n-1$ équations linéaires
- m équations non linéaires.

Le total donne t équations, t étant égale au nombre de tronçons du réseau.

2.2.1.3 Principe de la méthode de Hardy Cross

$$\sum_j \Delta H_{ij} = \sum_j R_{ij} \cdot Q_{ij}^\alpha$$

Le principe de conservation des pertes de charges pour chaque maille se traduit par :

$$\sum_j \Delta H_{ij} = \sum_j R_{ij} \cdot Q_{ij}^\alpha = 0$$

Comme la répartition initiale des débits est arbitraire et non exacte, alors cette loi n'est pas ordinairement vérifiée dès la première itération. Pour se rapprocher de la solution exacte des débits, on apporte une correction telle que :

$$Q_{ij}^{(1)} = Q_{ij}^{(0)} + \Delta Q^{(0)}$$

Avec : $Q_{ij}^{(1)}$: Débit corrigé

$Q_{ij}^{(0)}$: Débit estimé

$\Delta Q^{(0)}$: Débit correctif

D'après cette relation, le débit corrigé à l'itération k sera :

$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q^{(k)}$$

En remplaçant la valeur du débit corrigé $Q_{ij}^{(k+1)}$ dans l'équation de conservation de l'énergie, nous obtenons :

$$\sum_j \Delta H_{ij}^{(k+1)} = \sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k+1)}]^\alpha = 0$$

D'où :

$$\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q^{(k)}]^\alpha = 0$$

Ou bien :

$$\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha \cdot \left[\frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right]^\alpha = 0$$

En développant $\left[1 + \frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right]^\alpha$ en série de TAYLOR au voisinage de la solution, on aura :

$$\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha \left[1 + \alpha \frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} + \alpha \frac{(\alpha - 1)}{2!} \frac{(\Delta Q^{(k)})^2}{(Q_{ij}^{(k)})^2} + \dots \right] = 0$$

En négligeant tous les termes infiniment petits, c'est-à-dire, tous les termes dont la puissance est supérieure ou égale à deux, l'équation devient :

$$\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha \left[1 + \alpha \frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right] = 0$$

Ce qui donne :

$$\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha + \alpha \cdot \Delta Q^{(k)} \sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^{\alpha-1} = 0$$

Et de la, nous pouvons obtenir la valeur algébrique de la correction $\Delta Q^{(k)}$ relative à une maille :

$$\Delta Q^{(k)} = \frac{-\sum_j R_{ij} \cdot [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha}{\alpha \sum_j R_{ij} \frac{[Q_{ij}^{(k)}]^\alpha}{Q_{ij}^{(k)}}}$$

D'une autre manière :

$$\Delta Q^{(k)} = \frac{-\sum_j \Delta H_{ij}^{(k)}}{\alpha \sum_j \frac{\Delta H_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}}$$

Le processus itératif est arrêté si la correction $\Delta Q^{(k)}$ devient suffisamment petite pour être négligée :

$$\max \left| \frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k+1)}} \right| \leq \varepsilon$$

Ou bien :

$$\max \left| \frac{Q^{(k+1)} - Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon$$

ε : Étant le critère de convergence. [5]

2.2.1.4 Exemple d'application

Appliquons la méthode de HARDY-CROSS pour un réseau qui contient deux mailles. Soit la figure suivante :

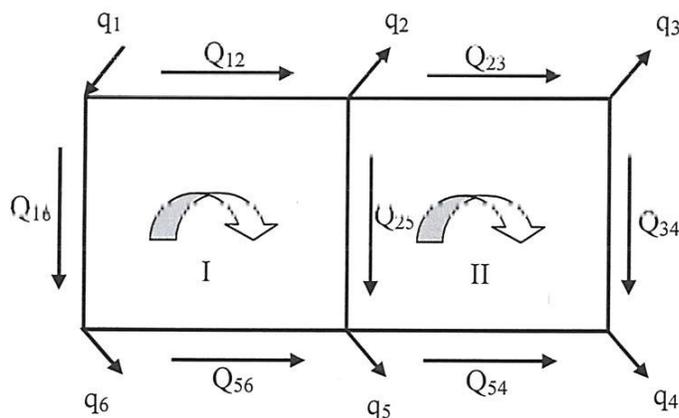


Figure 2-3 : Exemple d'application

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ Sont les débits concentrés aux nœuds. ??

$Q_{12}^{(0)}, Q_{16}^{(0)}, Q_{56}^{(0)}, Q_{25}^{(0)}, Q_{23}^{(0)}, Q_{34}^{(0)}$ et $Q_{54}^{(0)}$ La répartition initiale des débits dans chaque tronçon des mailles.

Cette répartition doit vérifier la loi de continuité, on aura donc :

$$\left. \begin{aligned} Q_{12}^{(0)} + Q_{16}^{(0)} &= q_1 \\ Q_{12}^{(0)} - Q_{23}^{(0)} - Q_{25}^{(0)} &= q_2 \\ Q_{34}^{(0)} + Q_{23}^{(0)} &= q_3 \\ Q_{54}^{(0)} - Q_{34}^{(0)} &= q_4 \\ Q_{56}^{(0)} + Q_{25}^{(0)} - Q_{54}^{(0)} &= q_5 \end{aligned} \right\} ?$$

Nous devons aussi vérifier la loi de conservation de l'énergie :

$$\Delta H_{12}^{(0)} + \Delta H_{25}^{(0)} - \Delta H_{56}^{(0)} - \Delta H_{16}^{(0)} = 0$$

$$\Delta H_{23}^{(0)} + \Delta H_{34}^{(0)} - \Delta H_{45}^{(0)} - \Delta H_{25}^{(0)} = 0$$

Comme ces deux dernières équations ne sont pas vérifiées dès le premier coup, nous procéderons à la correction des débits :

Soit $\Delta Q_1^{(n)}$ et $\Delta Q_{11}^{(n)}$, les débits correctifs.

$$\Delta Q_1^{(0)} = \frac{-\left(\Delta H_{12}^{(0)} + \Delta H_{25}^{(0)} - \Delta H_{56}^{(0)} - \Delta H_{16}^{(0)}\right)}{\alpha \left(\frac{\Delta H_{12}^{(0)}}{Q_{12}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{25}^{(0)}}{Q_{25}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{56}^{(0)}}{Q_{56}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{16}^{(0)}}{Q_{16}^{(0)}}\right)}$$

$$\Delta Q_{11}^{(0)} = \frac{-\left(\Delta H_{23}^{(0)} + \Delta H_{34}^{(0)} - \Delta H_{45}^{(0)} - \Delta H_{25}^{(0)}\right)}{\alpha \left(\frac{\Delta H_{23}^{(0)}}{Q_{23}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{34}^{(0)}}{Q_{34}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{45}^{(0)}}{Q_{45}^{(0)}} + \frac{\Delta H_{25}^{(0)}}{Q_{25}^{(0)}}\right)}$$

Ensuite, nous calculons les débits corrigés de la façon suivante :

$$Q_{12}^{(1)} = Q_{12}^{(0)} + \Delta Q_1^{(0)}$$

$$Q_{56}^{(1)} = Q_{56}^{(0)} + \Delta Q_1^{(0)}$$

$$Q_{16}^{(1)} = Q_{16}^{(0)} + \Delta Q_1^{(0)}$$

$$Q_{23}^{(1)} = Q_{23}^{(0)} + \Delta Q_{11}^{(0)}$$

$$Q_{34}^{(1)} = Q_{34}^{(0)} + \Delta Q_{11}^{(0)}$$

$$Q_{45}^{(1)} = Q_{45}^{(0)} + \Delta Q_{11}^{(0)}$$

$$Q_{25}^{(1)} = Q_{25}^{(0)} + \Delta Q_1^{(0)} - \Delta Q_{11}^{(0)} \quad \text{Par rapport à la maille I ou}$$

$$Q_{25}^{(1)} = Q_{25}^{(0)} - \Delta Q_1^{(0)} + \Delta Q_{11}^{(0)} \quad \text{Par rapport à la maille II}$$

Pour un tronçon adjacent à deux mailles, la correction de son débit se fait avec la somme algébrique, du débit correctif de l'une des mailles pris avec son signe et, du débit correctif de la maille adjacente pris avec le signe contraire.

Pour chaque itération k , on calcule les nouveaux débits de chaque tronçon.

$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q_t^{(k)} \quad (t : \text{étant l'indice du tronçon}) \quad (2-11)$$

Pour un tronçon adjacent à deux mailles t et n , le débit corrigé par rapport à la maille t est :

$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q_t^{(k)} - \Delta Q_n^{(k)} \quad (2-12)$$

La correction de chaque itération k sera de la forme :

$$\Delta Q_n^{(k)} = \frac{-\sum_j \Delta H_{ij}^{(k)}}{\alpha \sum_j \frac{\Delta H_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}}$$

Nous arrêtons le processus itératif une fois que la condition suivante est satisfaite :

$$\max \left| \frac{Q^{(k+1)} - Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon$$

ε : Le critère de convergence.

2.2.1.5 Limites de l'analyse de la méthode de HARDY-CROSS

On recourt depuis longtemps aux techniques informatiques pour analyser ou modifier les réseaux existants, ou pour concevoir des nouveaux réseaux. Cependant, on est confronté à certains problèmes lorsqu'on utilise les méthodes reposant sur ces techniques ; c'est ainsi que les problèmes inhérents à la méthode de Hardy Cross sont :

- Convergence lente vers la solution finale.
- L'impossibilité, dans certains cas, de résoudre les problèmes, ce qui a incité les concepteurs à rechercher de techniques d'analyse et de calcul plus efficaces et mieux adaptables par les ordinateurs. Dans certains programmes, on utilise de la sorte la méthode de Newton Raphson ou celle de linéarisation de Wood et Charles, étant donné que ces méthodes permettent d'intégrer à l'étude ; beaucoup plus facilement qu'on ne peut le faire avec la méthode de Hardy Cross ; des éléments comme les postes de pompage, les vannes de réduction de pression, les réservoirs élevés, etc. [3]

2-2-2 Méthode de WOOD et CHARLES

Le dimensionnement d'un réseau de distribution d'eau de consommation a fait l'objet de diverses études. En plus de la méthode de Hardy Cross qui est usuellement utilisée par les praticiens, la méthode de Wood et Charles, appelé aussi méthode de linéarisation, est souvent utilisée.

2-2-2-1 Principe de la méthode de Wood et Charles

L'étude de l'équilibrage des réseaux maillés en régime permanent est approchée dans cette méthode par l'algèbre linéaire, et les techniques d'analyse numérique.

Le système d'équations à résoudre fait introduire :

- Les $n-1$ équations de continuité de chaque nœud,
- Les m équations de conservation d'énergie de chaque maille.

Ce système d'équations non linéaires en termes de pertes de charge est remplacé dans cette méthode par un système linéaire traduisant un système laminaire dans les conduites, la résistance hydraulique sera formulée en termes de pertes de débit.

Donc, le principe de cette méthode est la linéarisation de l'équation de pertes de charge.

$$\Delta H_{ij} = R_{ij} \cdot Q_{ij}^{\alpha} \quad (2-13)$$

$$\Delta H_{ij} = R_{ij} \cdot (Q_{ij}^{(0)})^{\alpha-1} Q_{ij}$$

On substitue

$$\Delta H_{ij} = (Q_{ij}^{(0)}) Q_{ij} \quad (2-14)$$

Avec :

ΔH_{ij} : Pertes de charges dans le tronçon j de la maille i

R_{ij} : Résistance hydraulique dans le tronçon j de la maille i

Q_{ij} : Débit dans le tronçon j de la maille i

Une fois cette linéarisation est effectuée pour l'ensemble des m équations relatives aux mailles, on obtient un système d'équations linéaires.

Un des avantages de cette méthode repose sur le fait qu'on n'est pas obligé d'évaluer des débits initiaux dans le réseau à la première itération ;

On suppose ainsi que

$$(R_{ij}^{(0)}) = R_{ij} \quad (2-15)$$

Ce qui revient à simplement à écrire que

$$Q_{ij}^{(0)} = 1 \quad (2-16)$$

Cette linéarisation des m équations relatives aux mailles aboutit à un système d'équations linéaires formé par les équations aux nœuds et aux mailles à t inconnues avec :

$$t = m+n-1 \quad (2-17)$$

Où m : Nombre de mailles
 n : Nombre de nœuds
 t : Nombre de tronçons

Ces équations sont :

$$\sum_i Q_{ij} + q_i = 0 \quad (2-18)$$

$$\sum_{i,j \in M} R_{ij} \cdot Q_{ij} = 0 \quad (2-19)$$

Sous forme matricielle :

$$A_0 \cdot Q = B \quad (2-20)$$

Avec :

A_0 : la matrice des données avec m rangées relatives aux équations de mailles, elles renseignent les coefficients de résistance R_u et $(t-m)$ lignes relatives équations de continuité aux nœuds, les éléments de ces lignes ont pour valeurs +1 ou -1 suivant le sens du débit.

B : un vecteur dont les composantes valent zéro (0) s'il s'agit d'une équation de maille ou qui correspondent aux valeurs des débits soutirés s'il s'agit d'une équation de nœud.

Q : un vecteur solution qui représente les débits dans l'ensemble des conduites du réseau. L'inverse de la matrice A_0 permet d'obtenir la solution du système :

$$Q_1 = A_0^{-1} \cdot B \quad (2-21)$$

Le vecteur de solution Q , plus ou moins éloigné de la solution exacte est corrigé grâce à un processus itératif avec :

$$A_1 \cdot Q = B \quad (2-22)$$

A_1 désigne la nouvelle matrice des données dont les coefficients de résistance initiaux des m rangées relative aux équations de mailles ont été changés en fonction du débit par la transformation suivante :

$$\left(R_{ij}^{(1)} \right) = \left(R_{ij}^{(0)} \right) \left(Q_{ij}^{(1)} \right)^{\alpha-1} \quad (2-23)$$

On obtient par la résolution de ce système, le deuxième vecteur solution Q_2 . Ce dernier représente les nouvelles valeurs des débits qui servent à recalculer les nouvelles valeurs des coefficients de résistance pour l'itération suivante.

Donc, à la $k^{\text{ème}}$ itération, on aura :

$$A_k \cdot Q = B \quad (2-24)$$

Et

$$\left(R_{ij}^{(k+1)}\right) = \left(R_{ij}^{(k)}\right) \left(R_{ij}^{(k+1)}\right)^{\alpha-1} \quad (2-25)$$

Avec $k=0, 1, 2, \dots$

Le processus itératif est arrêté quand le maximum de la différence des débits aux itérations k et $k-1$ est inférieur à une tolérance fixée préalablement :

$$\max \left| \frac{Q_{ij}^{(k+1)} - Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon \quad (2-26)$$

ε : Critère de convergence.

L'application de la méthode de linéarisation telle qu'elle est proposée, a permis de remarquer et de confirmer l'observation faite par WOOD ET CHARLES quant à l'oscillation des valeurs du vecteur solution sans jamais l'atteindre, et il est aussi remarqué que cette dernière se produit après deux itérations. Pour cette raison, les auteurs de la méthode recommandent qu'après deux itérations, on utilise la relation :

$$Q_0 = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (2-27)$$

Où, Q_1 et Q_2 représentent les valeurs du débit dans les deux dernières itérations. [5]

2.2.2.2 Exemple d'application

Soit le réseau de la forme suivante :

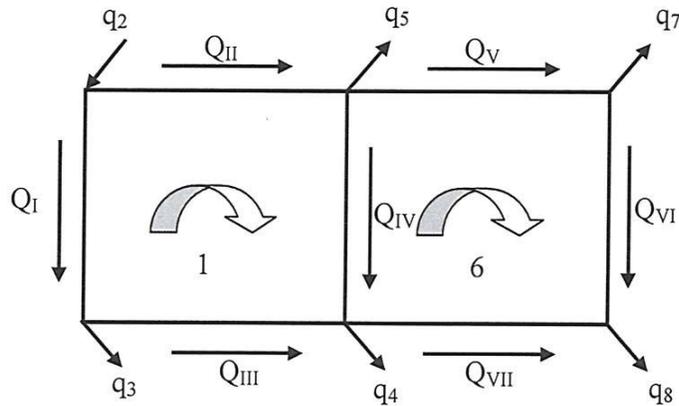


Figure 2-4 : Exemple d'application

En appliquant les lois de Kirchoff, on aura les équations suivantes :

$$1 : -R_I \cdot Q_I^\alpha + R_{II} \cdot Q_{II}^\alpha - R_{III} \cdot Q_{III}^\alpha + R_{IV} \cdot Q_{IV}^\alpha = 0$$

$$2 : Q_1 + Q_n = q_2$$

$$3 : Q_I - Q_{II} - q_3$$

$$4 : Q_{III} + Q_{IV} + Q_V = q_4$$

$$5 : Q_{II} - Q_{VI} - Q_V = q_5$$

$$6 : -R_{IV} \cdot Q_{IV}^\alpha + R_V \cdot Q_V^\alpha - R_{VI} \cdot Q_{VI}^\alpha - R_{VII} = 0$$

$$7 : Q_{VI} - Q_{VII} = q_8$$

La première étape consiste à rendre linéaires les équations relatives aux mailles en donnant aux débits initiaux la même valeur qui est égale à l'unité, c'est-à-dire que :

$$Q_I^{(0)} = Q_{II}^{(0)} = Q_{III}^{(0)} = Q_{IV}^{(0)} = Q_V^{(0)} = Q_{VI}^{(0)} = Q_{VII}^{(0)} = 1$$

Ce qui nous donnera :

$$1 : -R_I \cdot Q_I^\alpha + R_{II} \cdot Q_{II}^\alpha - R_{III} \cdot Q_{III}^\alpha + R_{IV} \cdot Q_{IV}^\alpha = 0$$

$$2 : Q_1 + Q_n = q_2$$

$$3 : Q_I - Q_n = q_3$$

$$4 : Q_{III} + Q_{IV} + Q_V = q_4$$

$$5 : Q_{II} - Q_{VI} - Q_V = q_5$$

$$6 : -R_{IV} \cdot Q_{IV}^\alpha + R_V \cdot Q_V^\alpha - R_{VI} \cdot Q_{VI}^\alpha - R_{VII} \cdot Q_{VII}^\alpha = 0$$

$$7 : Q_{VI} - Q_{VII} = q_8$$

$$\text{Avec : } R_i^{(0)} = -R_i \times (Q_i^{(0)})^{\alpha-1}$$

$$\begin{vmatrix} -(R_I^{(0)}) & (R_{II}^{(0)}) & -(R_{III}^{(0)}) & (R_{IV}^{(0)}) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(R_{IV}^{(0)}) & (R_V^{(0)}) & -(R_{VI}^{(0)}) & (R_{VII}^{(0)}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Q_I \\ Q_{II} \\ Q_{III} \\ Q_{IV} \\ Q_V \\ Q_{VI} \\ Q_{VII} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ 0 \\ q_8 \end{vmatrix}$$

La résolution de ce système nous donne le premier vecteur Q_1 , avec :

$$Q_I = \begin{vmatrix} (Q_I^{(1)}) \\ (Q_{II}^{(1)}) \\ (Q_{III}^{(1)}) \\ (Q_{IV}^{(1)}) \\ (Q_V^{(1)}) \\ (Q_{VI}^{(1)}) \\ (Q_{VII}^{(1)}) \end{vmatrix}$$

Avec les valeurs de ce vecteur et les valeurs des résistances hydrauliques, on aura les nouveaux coefficients de résistance.

$$R_I^{(1)} = R_I \cdot Q_i^{(1)}$$

$$R_{II}^{(1)} = R_{II} \cdot Q_{II}^{(1)}$$

$$R_{III}^{(1)} = R_{III} \cdot Q_{III}^{(1)}$$

$$R_{IV}^{(1)} = R_{IV} \cdot Q_{IV}^{(1)}$$

$$R_V^{(1)} = R_V \cdot Q_V^{(1)}$$

$$R_{VI}^{(1)} = R_{VI} \cdot Q_{VI}^{(1)}$$

$$R_{VII}^{(1)} = R_{VII} \cdot Q_{VII}^{(1)}$$

Ces coefficients de résistance représentent les seules valeurs variables dans notre système d'équations à résoudre. On aura alors le nouveau système :

$$A_1 \cdot Q = B$$

Ce deuxième système nous permet de calculer les nouvelles valeurs des débits du deuxième vecteur solution Q_2

Ce niveau, et comme on a deux itérations où on a trouvé deux solutions Q_1 , et Q_2 , pour effectuer la troisième itération, on prendra la moyenne des deux solutions pour calculer les nouveaux coefficients de résistance, et par la suite la constitution du troisième système d'équations :

$$A_3 \cdot Q = B$$

On poursuit ainsi le système itératif jusqu'à la vérification du critère de convergence :

$$\max \left| \frac{Q_{ij}^{(k+1)} - Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon$$

ε : Le critère de convergence

2-2-3 Méthode de NEWTON- RAPHSON**2-2-3-1 Principe de la méthode de Newton- Raphson**

La méthode de Newton-Raphson est une méthode numérique qui permet de trouver les valeurs de la variable x pour laquelle

$$f(x) = 0 \quad (2-28)$$

A partir d'une première estimation de la valeur de x . Le développement en séries de Taylor autour d'une estimée x_0 nous donne :

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f''(x_0) \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots \quad (2-29)$$

Si x_0 est proche de la solution x de $f(x) = 0$, alors le carré de l'erreur $\varepsilon_0 = x - x_0$ (2-30)

Et les termes de degré supérieur sont négligeables.

$$\text{Sachant que : } f(x) = 0 \Rightarrow f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0) = 0 \quad (2-31)$$

$$\varepsilon_0 = x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2-32)$$

On peut donc considérer qu'une meilleure estimation de x sera :

$$x_1 = x_0 + \varepsilon_0 \quad (2-33)$$

D'une manière générale :

$$x_{k+1} = x_k + \varepsilon_k \quad (2-34)$$

$$\text{Et } \varepsilon_k = -\frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2-35)$$

Avec k : numéro d'itération.

Des équations précédentes, on obtient l'algorithme de Newton-Raphson.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (k = 0, 1 \dots) \quad (2-36)$$

Il est intéressant de généraliser l'application de la méthode de Newton-Raphson à la résolution d'un système de n équations non linéaires de la forme $f(x) = 0$.

Ou :

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

.

.

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Et par analogie, on calcule les valeurs des inconnues x_i à l'itération $(k+1)$ par la relation :

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (2-37)$$

Le vecteur de correction $\Delta x_i^{(k)}$ est obtenu directement par le système d'équations linéaires :

$$J(x_i^{(k)}) \cdot \Delta x_i^{(k)} = -F(x_i^{(k)}) \quad (2-38)$$

$J(x_i^{(k)})$: étant la matrice Jacobienne ou matrice des dérivées premières calculées à l'itération (k) .

$$J(x_i^{(k)}) = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{vmatrix} \quad (2-39)$$

Les éléments $\frac{\partial f_i}{\partial X_i}$ de la matrice Jacobienne sont calculés analytiquement en dérivant les fonctions $f_i(X_i^{(k)})$ par rapport aux $X_i^{(k)}$.

Le procédé de Newton-Raphson implique la résolution d'un système linéaire obtenue sous la forme $A \cdot X = B$.

A chaque itération, la solution peut être obtenue directement en inversant la matrice Jacobienne, c'est-à-dire :

$$\Delta X_i^{(k)} = - [J(X_i^{(k)})]^{-1} \cdot F(X_i^{(k)}) \quad (2-40)$$

Mais, il est préférable d'utiliser l'une des méthodes directes ou itératives pour la résolution de ce système. [6]

Pour l'application de la méthode de Newton-Raphson aux réseaux maillés, on a qu'à remplacer la variable x par le débit Q_{ij} d'une conduite et l'expression devient :

$$Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} - \frac{f(Q_{ij}^{(k)})}{f'(Q_{ij}^{(k)})} \quad (2-41)$$

- Version de LIEBERSTEIN (SOR-NEWTON) : qui s'applique directement sur le système d'équations déjà décrit $J(Q^{(k)}) \cdot \Delta Q^{(k)} = -F(Q^{(k)})$ en introduisant un coefficient ω pour améliorer la convergence de la méthode. [8]

2.2.3.2 Exemple d'application (version améliorée)

Soit le réseau donné par la figure ci-dessous.

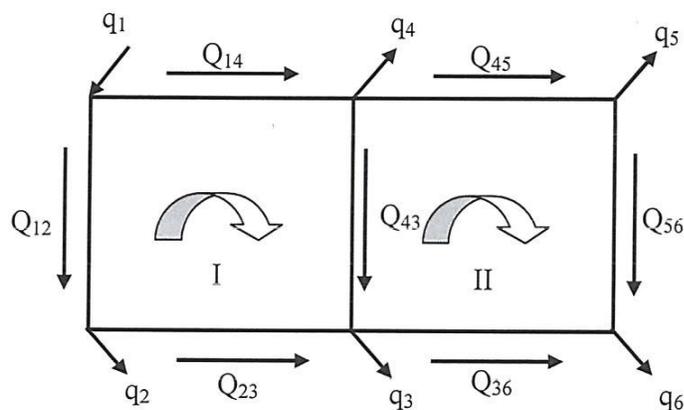


Figure 2-5 : Exemple d'application

En appliquant la loi de Kirchhoff aux mailles à notre réseau après avoir vérifié la loi des nœuds après une première répartition des débits $Q_i^{(0)}$, on aura :

$$f_1^{(0)} = -R_{12} \cdot (Q_{12}^{(0)})^\alpha - R_{23} \cdot (Q_{23}^{(0)})^\alpha + R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^\alpha + R_{14} \cdot (Q_{14}^{(0)})^\alpha$$

$$f_2^{(0)} = -R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^\alpha + R_{45} \cdot (Q_{45}^{(0)})^\alpha - R_{56} \cdot (Q_{56}^{(0)})^\alpha - R_{36} \cdot (Q_{36}^{(0)})^\alpha$$

L'application du principe de Newton-Raphson à ce système se traduit par :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial Q_1} & \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial Q_{11}} \\ \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial Q_1} & \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial Q_{11}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{(0)} \\ \Delta Q_{11}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1^{(0)} \\ -f_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial Q_1} = -\alpha R_{12} \cdot (Q_{12}^{(0)})^{\alpha-1} - \alpha R_{23} \cdot (Q_{23}^{(0)})^{\alpha-1} + \alpha R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^{\alpha-1} + \alpha R_{14} \cdot (Q_{14}^{(0)})^{\alpha-1}$$

$$\frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial Q_{11}} = \alpha R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^{\alpha-1}$$

$$\frac{\partial f_{11}^{(0)}}{\partial Q_1} = -\alpha R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^{\alpha-1}$$

$$\frac{\partial f_{11}^{(0)}}{\partial Q_{11}} = -\alpha R_{34} \cdot (Q_{34}^{(0)})^{\alpha-1} + \alpha R_{45} \cdot (Q_{45}^{(0)})^{\alpha-1} - \alpha R_{56} \cdot (Q_{56}^{(0)})^{\alpha-1} - \alpha R_{36} \cdot (Q_{36}^{(0)})^{\alpha-1}$$

On applique simultanément, après la résolution de ce système, les ΔQ_i sur les tronçons du réseau, c'est-à-dire qu'on corrige les débits initiaux par :

- Pour les tronçons de la maille I : $Q_{ij}^{(1)} = Q_{ij}^{(0)} + \Delta Q_{ij}^{(0)}$
- Pour les tronçons de la maille II : $Q_{ij}^{(1)} = Q_{ij}^{(0)} + \Delta Q_{ij}^{(0)}$
- Pour le tronçon commun aux deux mailles (le tronçon 3-4) :

$$Q_{34}^{(1)} = Q_{34}^{(0)} + \Delta Q_{11}^{(0)} - \Delta Q_1^{(0)} \text{ Pour la maille I}$$

$$Q_{34}^{(1)} = Q_{34}^{(0)} + \Delta Q_1^{(0)} - \Delta Q_{11}^{(0)} \text{ Pour la maille II}$$

Avec ces nouveaux débits, on recalcule notre réseau et on procède à la deuxième itération de la même façon.

Le processus itératif est ainsi répété jusqu'à satisfaction de la condition suivante :

$$\left| \frac{Q^{(k+1)} - Q^{(k)}}{Q^{(k+1)}} \right| \leq \varepsilon \quad \varepsilon : \text{Le critère de convergence.}$$

2.3 Méthode graphique

La méthode graphique consiste à représenter chaque tronçon du réseau de la canalisation par la courbe $\Delta H = f(Q)$ liant la perte de charge totale le long du tronçon considéré au débit qui le traverse. Cette courbe appelée « caractéristique de la canalisation », est donc simplement la représentation graphique de la formule de l'écoulement.

$$\Delta H = R \cdot Q^\alpha \quad (2-47)$$

α étant de l'ordre de deux, la courbe caractéristique d'une canalisation sera donc une parabole.

2.3.1 Courbe caractéristique d'une canalisation

Nous pouvons envisager deux cas :

- Canalisation assurant un service d'extrémité
- Canalisation assurant un service route uniforme.

2.3.1.1 Canalisation assurant un service d'extrémité

Dans ce cas, la courbe et tracée comme le montre la figure ci-dessous.

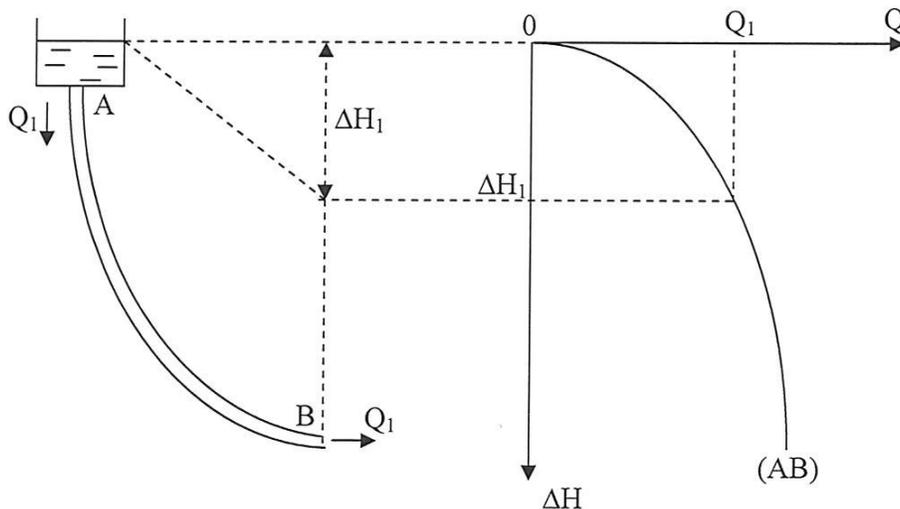


Figure 2-6 : Courbes caractéristiques d'une canalisation assurant un service d'extrémité

2.3.1.1 Canalisation assurant un service route uniforme

Le tracé de la courbe dans ce cas est comme suit :

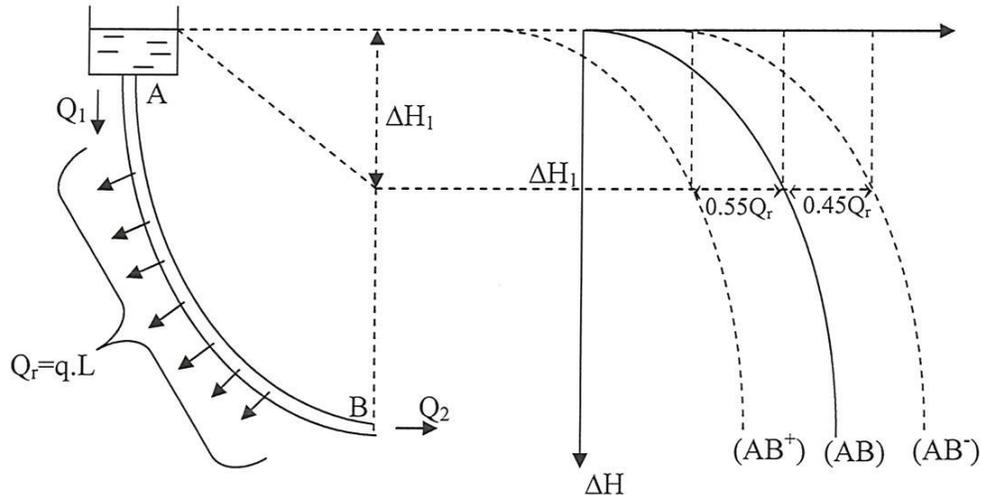


Figure 2-7 : Courbes caractéristiques d'une canalisation assurant un service route uniforme

Le débit fictif à prendre en compte pour le calcul est $Q_2 + 0.55Q_r$, afin de tracer (AB).

On est ainsi conduit à tracer la caractéristique (AB^+) par translation $00' = -0.55Q_r$, parallèlement à l'axe des débits (AB). La caractéristique (AB^-) est tracée par la translation $00' = 0.45Q_r$, parallèlement à l'axe des débits (AB).

2-3-2 Caractéristique résultante des canalisations**2-3-2-1 Canalisation disposées en série**

Il est évident que la courbe caractéristique résultante de plusieurs canalisations disposées en série AB, BC, CD, sera la parabole (ABCD) dont les ordonnées (pertes de charge) seront la somme des ordonnées des caractéristiques (AB), (BC), et (CD) de chaque canalisation.

Dans ce cas, la courbe est tracée comme le montre la figure suivante.

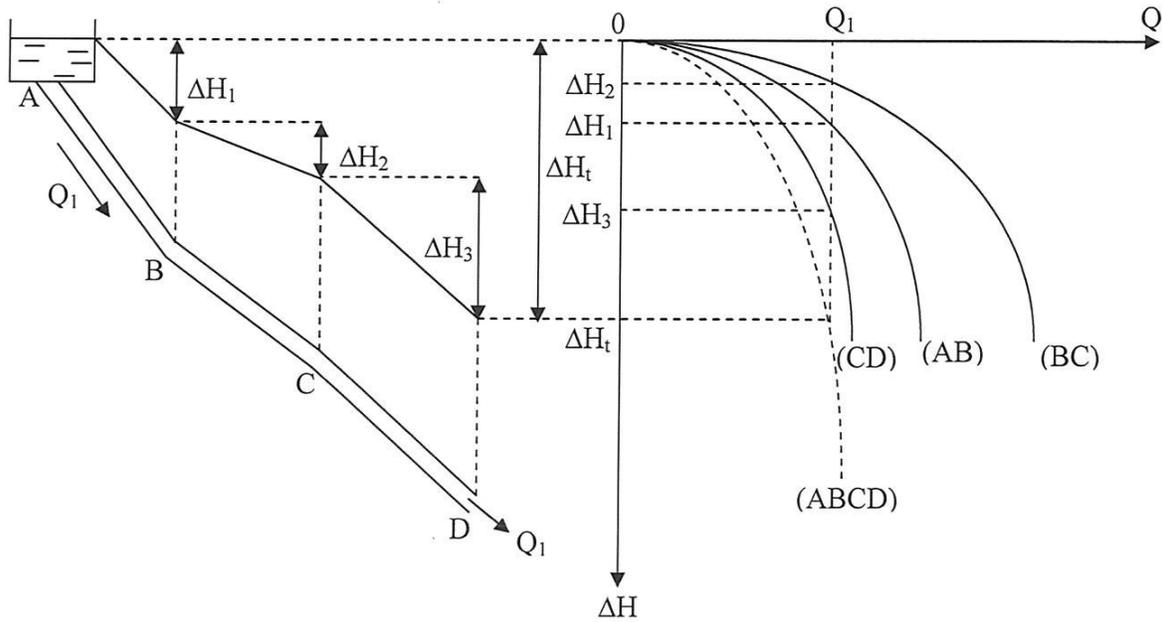


Figure 2-8 : Courbe caractéristique de canalisations disposées en série

2-3-2-1 Canalisation disposées en parallèle

De manière analogue, la courbe caractéristique de deux ou plusieurs canalisations disposées en parallèle sera la parabole dont les abscisses (débits) seront la somme des abscisses des caractéristiques de chaque tronçon.

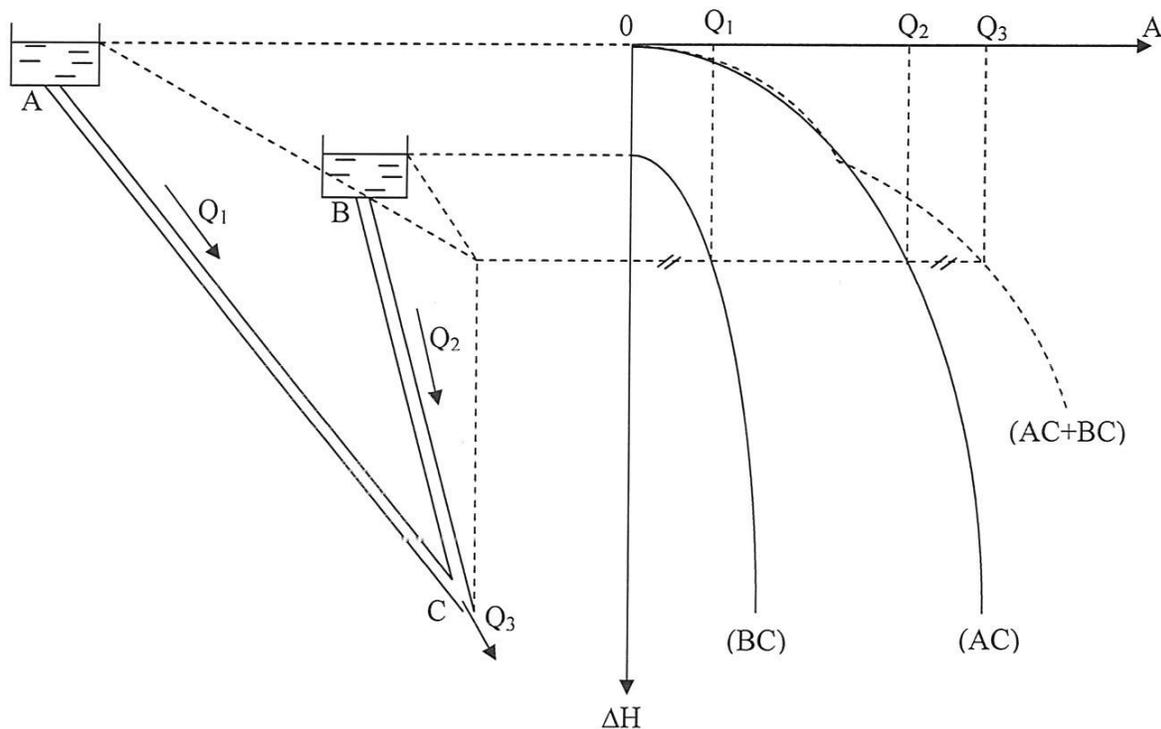


Figure 2-9 : Courbe caractéristique de canalisations disposées en parallèle

2-4 Méthodes expérimentales par analogie

En raison de la complexité des méthodes analytiques ou graphiques, des méthodes analogiques ont été expérimentalement réalisées. Elles permettent d'obtenir plus rapidement la solution des problèmes posés par l'écoulement dans les réseaux maillés de distribution d'eau potable.

Les méthodes analogiques appartiennent essentiellement à deux catégories :

- ✓ Méthode par analogie hydraulique ou pneumatique
- ✓ Méthode par analogie électrique

2-4-1 Analogie hydraulique ou pneumatique

La formule d'écoulement par orifice noyé est :

$$Q = m \Omega \sqrt{2gh} \quad (2-53)$$

$$\text{Ou : } h = k.Q^2 \quad (2-54) \quad \text{avec } k = 1/2g^2 \Omega^2 \quad (2-55)$$

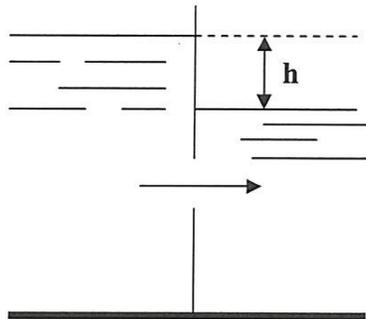
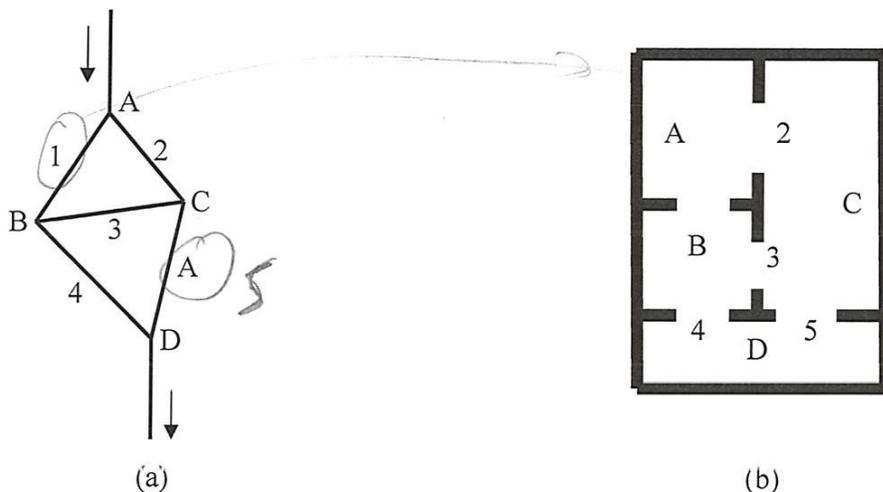


Figure 2-10 Ecoulement par un orifice noyé

Elle est analogue à la formule quadratique de la perte de charge dans un tronçon de canalisation :

$$\Delta H = RQ^2 \quad (2-55)$$

On peut donc réaliser un modèle d'un réseau maillé en remplaçant chaque nœud A, B, C, D, du réseau réel par une cuve percée sur une ou plusieurs de ces faces d'orifices calibrés 1, 2, 3, 4 dont la section Ω et le coefficient de débit m réaliseront un coefficient $k = 1/2g^2 \Omega^2$ proportionnel au coefficient de résistance R du tronçon de canalisation correspondant. Chaque cuve communiquera avec la ou les cuves voisines par tel orifice calibré, voir fig. ci-dessous :



Le modèle est alimenté par le débit convenable, les prélèvements ou les additions éventuels de débits aux divers nœuds du réseau peuvent être réalisés par des prélèvements ou des additions de débit dans les cuves correspondantes du modèle, lorsque le régime permanent est réalisé dans le modèle, il suffit de mesurer les cotes des nœuds correspondants du réseau, la différence des niveaux entre deux cuves correspond à la perte de charge entre les deux nœuds homologues du réseau.

La principale difficulté d'exploitation d'un tel modèle résulte du temps très long nécessaire à l'obtention d'un régime permanent.

On peut également remplacer les cuves par des réservoirs étanches et alimenter le modèle avec de l'air comprimé : la mesure des différences de pression de l'air entre deux réservoirs est homologue à la perte de charge entre les deux nœuds correspondants du réseau.

2-4-2 Analogie électrique

La loi d'ohm exprime la différence de potentiel U entre deux points d'une canalisation électrique parcourue par un courant d'intensité I et dont la résistance est R , soit :

$$U = R \cdot I \quad (2-56)$$

La formule quadratique de la perte de charge, exprime la perte de charge ΔH entre deux points d'une canalisation hydraulique parcourue par un débit Q et dont la résistance est R , soit :

$$\Delta H = R \cdot Q^2 \quad (2-57)$$

Pour que les deux phénomènes soient analogues, il faut donc que la résistance électrique R soit proportionnelle à l'intensité I du courant qui traverse, soit :

$$R = K \cdot I \quad (2-58)$$

D'où

$$U = K \cdot I^2 \quad (2-59)$$

Ces formules établissent alors l'analogie entre un réseau maillé hydraulique et un réseau maillé de conducteurs électriques.

L'intensité électrique est l'homologue du débit hydraulique et la différence de potentiel entre deux nœuds du réseau électrique est l'homologue de la perte de charge entre deux nœuds correspondants du réseau hydraulique.

La difficulté de la réalisation du modèle électrique résulte dans la nécessité d'utiliser des résistances proportionnelles à l'intensité du courant qui les traverse ; la variation correspondante de la résistance peut être soit par réglage manuel, soit automatiquement par échauffement de la résistance. [4]

2-5 CONCLUSION

Nous avons exposé dans ce chapitre, les différentes méthodes de calcul des réseaux maillés de distribution d'eau et avons surtout détaillé les méthodes analytiques, ce qui nous facilitera la conception de programme de calcul.

La description de ces méthodes analytiques nous montre qu'elles sont toutes les trois basées à la fois sur la loi de continuité et sur la loi de la conservation de l'énergie. Le chapitre suivant sera consacré à l'élaboration d'un programme de calcul des réseaux maillés de distribution d'eau par la méthode de Hardy Cross.

Chapitre III
Organisation
informatique

3.1 Introduction

Les méthodes de calcul analytiques développées au chapitre précédent s'y prêtent bien à la programmation sur ordinateur. Aussi nous avons conçu et réalisé un programme de calcul du réseau maillé par la méthode de Hardy Cross en utilisant un langage évolué, le Fortran 95.

3.2 Description du programme

Ce programme réalisé est structuré comme suit :

- ✓ En-tête
- ✓ Déclarations
- ✓ Instruction

a) En-tête

Un programme commence toujours par le mot PROGRAM. Le mot suivant est le nom du programme qui peut être librement choisi, dans notre cas, ce sont HARDY-CROSS.

Le mot clé PROGRAM et le nom du programme constituent l'en-tête du logiciel.

b) Déclarations

Dans cette partie, on déclare les nouveaux types de données, on définit les constantes et les variables et on fixe les extensions sous formes de procédures et de fonctions. Nous avons utilisé des variables de type entier et réel.

Nous avons déclaré les types de données suivants : matrices d'entiers, vecteurs de réel et vecteurs d'entiers.

c) Instructions

La partie qui contient les instructions, autrement dit les ordres élémentaires, est celle qui commande le déroulement dit proprement dit du programme.

Cette partie est construite comme un bloc. Elle est introduite par un mot clé, suivi d'un nombre de quelconque d'instructions et elle se termine par le mot clé END. Le point final sert à marquer la fin du programme.

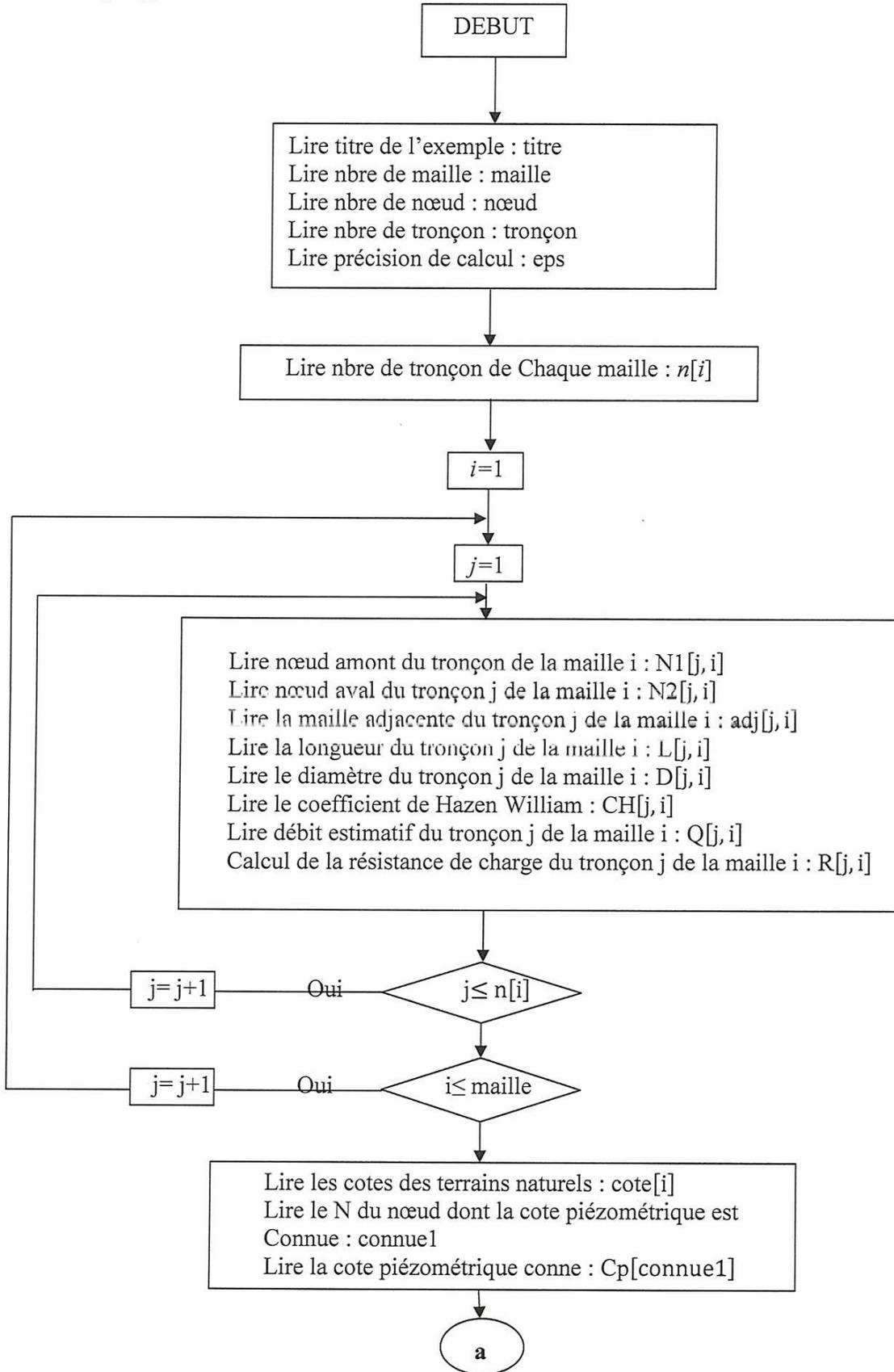
3.3 Programme de la méthode de Hardy Cross

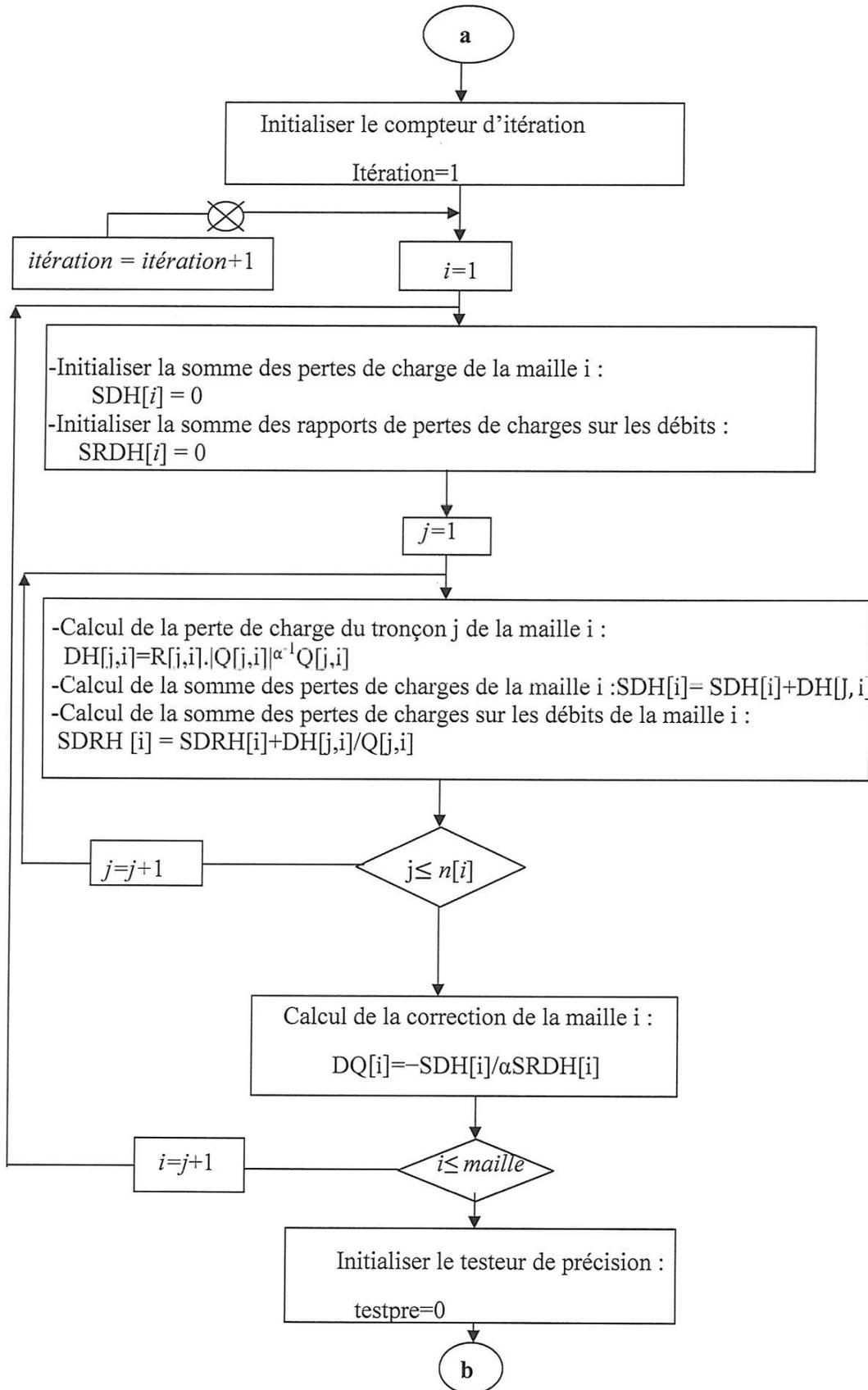
3.3.1 Description des séquences de calcul

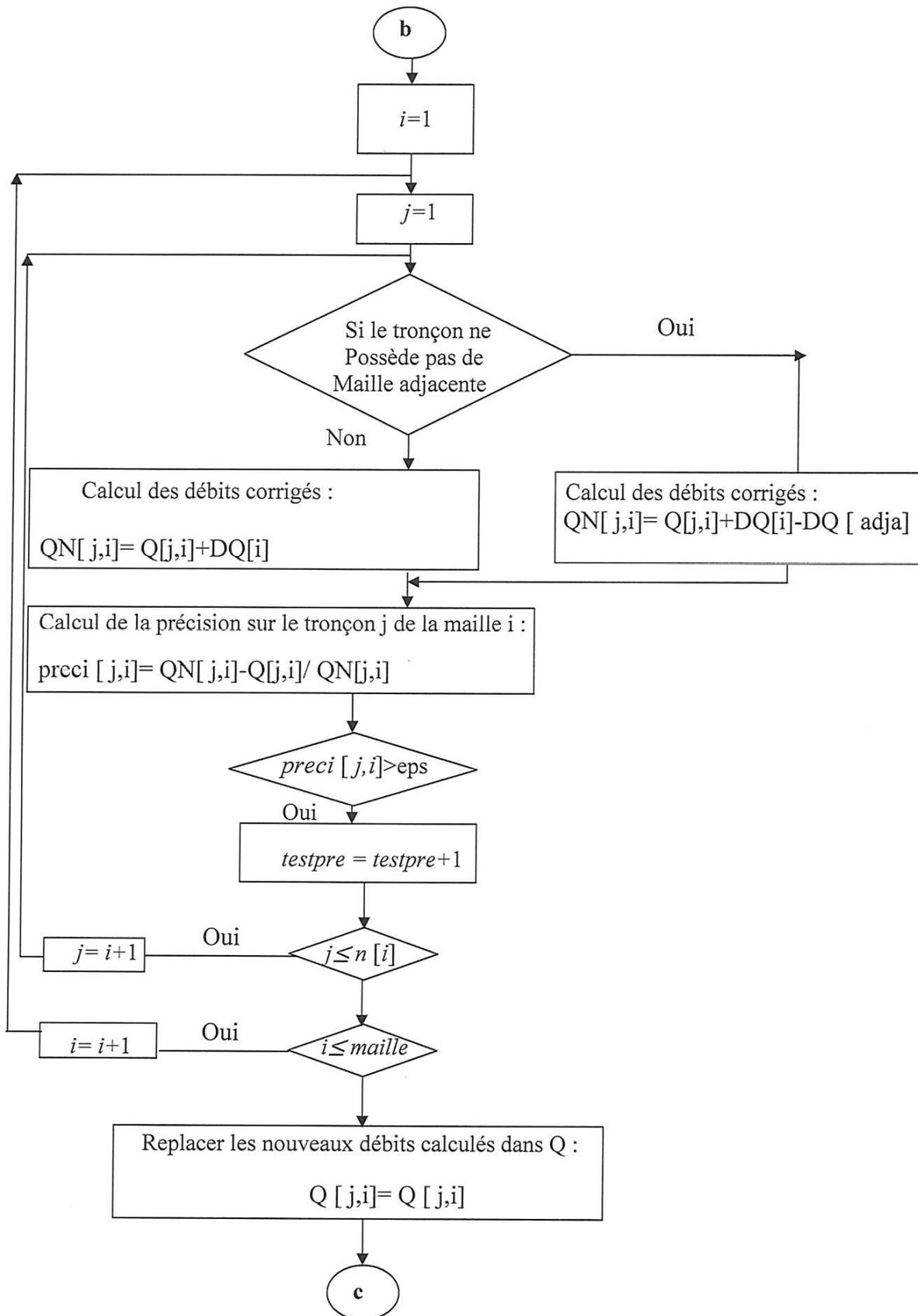
Après avoir effectué la lecture des données entrée, le programme procédera à l'exécution des séquences de calcul suivantes :

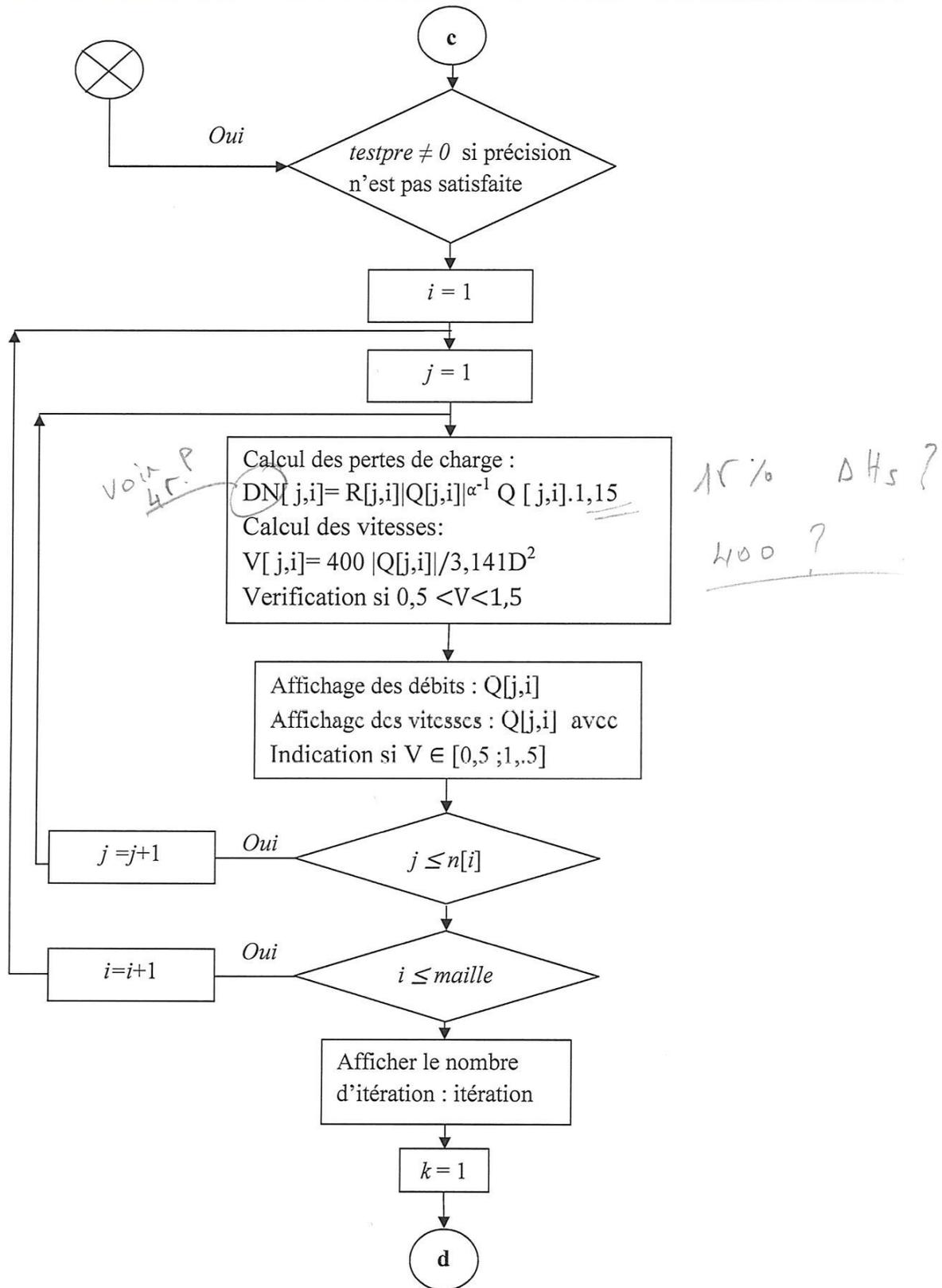
- Calcul des pertes de charges de chaque tronçon (ΔH_{ij}) : $DH[i, j]$
- Calcul de la somme des pertes de charges par maille ($\sum \Delta H_{ij}$) : $\underline{SDH[i]}$
- Calcul de la somme des rapports ($\sum \Delta H_{ij}/Q_{ij}$) : $\underline{SDH[i]}$
- Calcul du débit correctif par la maille ΔQ_i : $DQ[i]$
- Calcul du débit corrigé $Q^{(k+1)}$: $QN[I, j]$
- Calcul de l'erreur $|(Q^{(k+1)} - Q^{(k)})/Q^{(k+1)}|$ pour chaque tronçon : $preci[i, j]$
- Vérification de la condition de convergence
- Si la condition de convergence est vérifiée, tout le calcul précédent sera refait avec
- Calcul avec le débit corrigé comme débit estimatif jusqu'à la condition de convergence et une fois cette dernière est faite, nous procéderons au calcul suivant.
- Calcul des pertes de charges dans chaque tronçon (ΔH_{IJ}) : $DH[i, j]$
- Calcul des vitesses d'écoulement dans chaque tronçon : $v[i, j]$ avec indication des vitesses non normalisées
- Calcul des cotes piézométrique de chaque nœud
- Calcul des pressions pour chaque nœud
- Affichage des résultats.

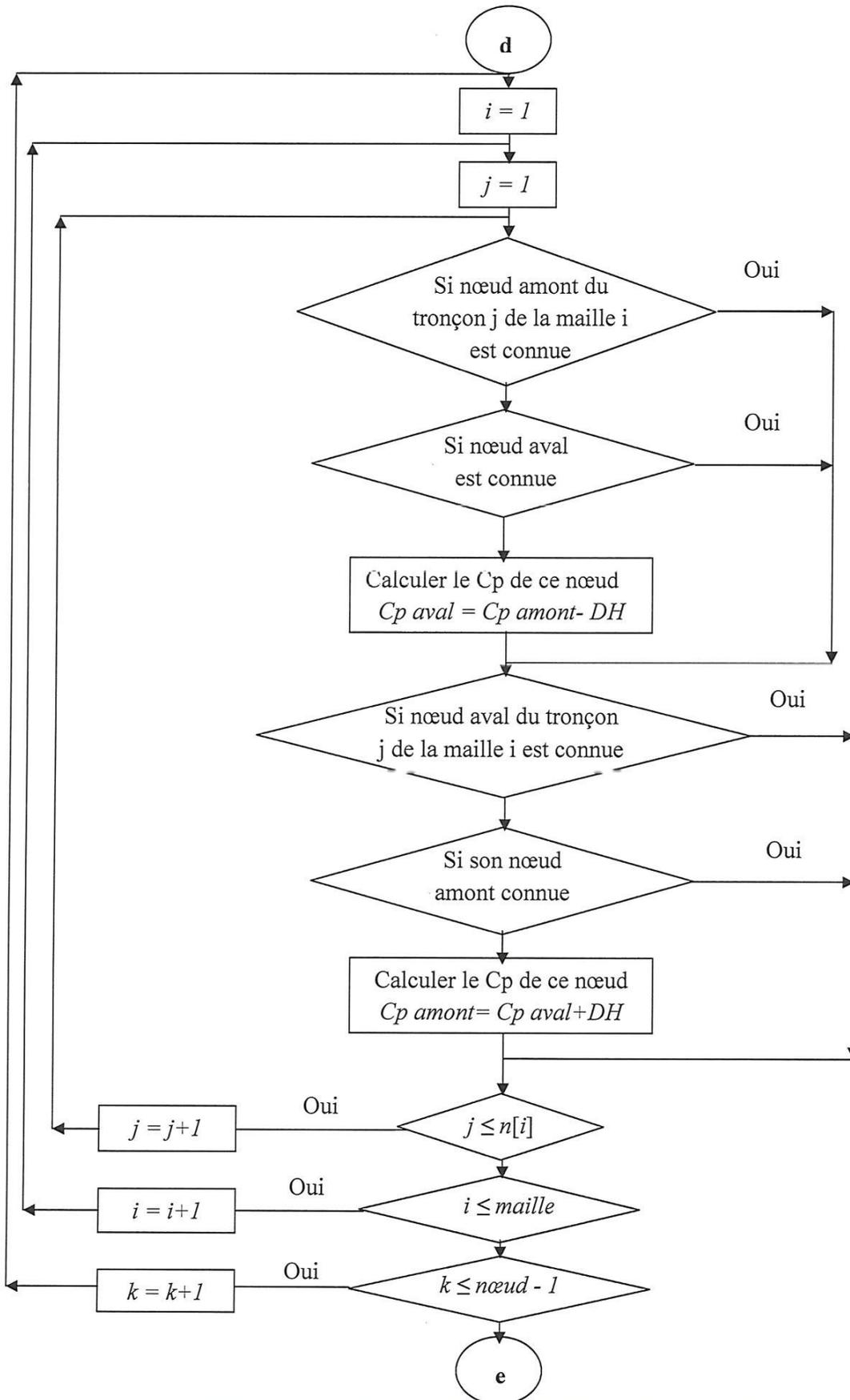
3.3.2 Organigramme de calcul détaillé











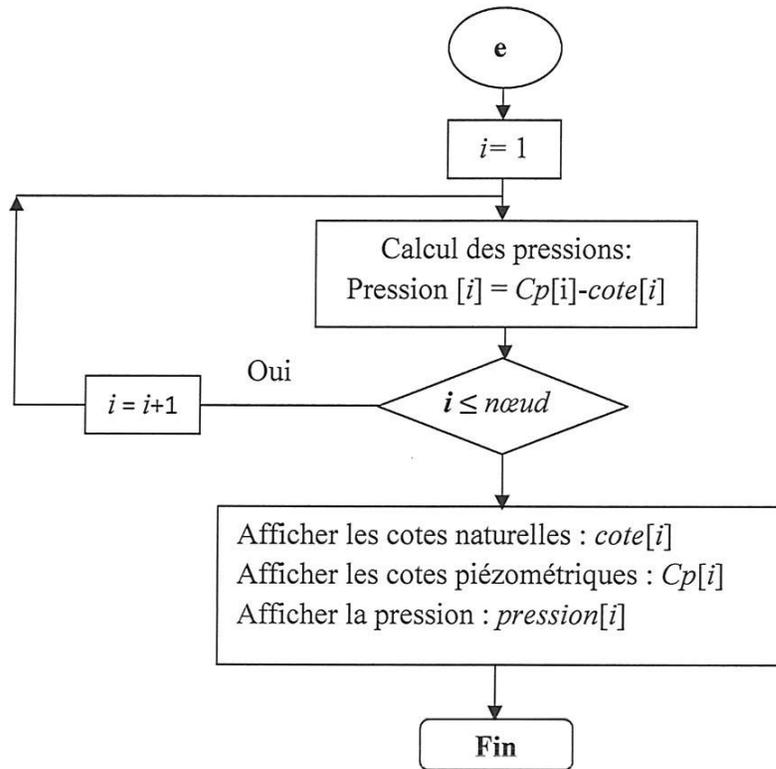


Tableau 3-1 Identification des termes utilisés dans le programme

Désignation	Identification
eps	Critère de convergence
beta	Exposant du diamètre (formule de Hazen William)
alpha	Exposant du débit (formule de Hazen William)
Cote(i)	Cotes piézométriques des nœuds
X1(j,i)	Longueurs des conduites du réseau
D(j,i)	Diamètres des conduites du réseau
Qp(j,i)	Débits initiaux du réseau
R(j,i)	Débits initiaux du réseau
Df(j,i)	Pertes de charge
Rq(j,i)	Rapports (perte de charge /débit)
F(i)	Somme des pertes de charge
Tr(i)	Somme des rapports
Dq(i)	Débits correctifs
Q(j,i)	Débits calculés
Er(j,i)	Erreurs
V(j,i)	Vitesses à la dernière itération
Cp(i)	Cotes piézométriques
Pression(i)	Pressions à la dernière itération

3-3-3 Programme de calcul des réseaux maillés

```
double precision gp(40,40),f(8),df(37,8)
double precision dq(8),tr(8),rq(37,8),pression(18)
double precision xl(37,8),d(37,8),r(37,8)
double precision er(37,8),cst(37,8),cp( 1 8)
double precision q(37,8),v(37,8),cote(18)
open (2,STATUS='unknown',FILE='hyd 1.default')
open (3,STATUS='unknown',FILE='hyd2.default')
open (4,STATUS='unknown',FILE='hyd3.default')
open (7,STATUS='unknown',FILE='resultat4.default')
write (*,*)'programme de la methode de HARDY CROSS'
write (*,*)'introduire les données de calcul du réseau'
write (*,*)'introduire la valeur du coefficient de convergence eps='
read (2,*)eps
CLOSE(2)
write (*,*)'introduire la valeur alpha et beta'
read (3,*)alpha
read (3,*) beta
WRITE(*,*)'entrer les cotes piézométriques des noeuds'
do i=1,18
READ(3,*)cote(i)
end do
CLOSE(3)
write(*,*)'entrer les valeurs des longueurs des conduites du réseau'
do j=1,5
READ (4, *)xl(j,1)
end do
do j=1,4
READ (4,*)xl(j,2)
end do
do j=1,5
READ (4,*)xl(j,3)
end do
do j=1,4
READ (4,*)xl(j,4)
end do
do j=1,4
READ (4,*)xl(j,5)
end do
do j=1,6
READ (4,*)xl(j,6)
end do
do j=1,4
READ (4,*)xl(j,7)
end do
do j=1,5
READ (4,*)xl(j,8)
end do
```

```
WRITE(*,*)'entrer les valeurs des diamètres des conduites du réseau'  
do j=1,5  
READ (4,*)d(j,1)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)d(j,2)  
end do  
do j=1,5  
READ (4,*)d(j,3)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)d(j,4)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)d(j,5)  
end do  
do j=1,6  
READ (4,*)d(j,6)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)d(j,7)  
end do  
do j=1,5  
READ (4,*)d(j,8)  
end do  
WRITE(*,*)'entrer les débits initiaux du réseau'  
do j=1,5  
READ (4,*)gp(j,1)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)gp(j,2)  
end do  
do j=1,5  
READ (4,*)gp(j,3)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)gp(j,4)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)gp(j,5)  
end do  
do j=1,6  
READ (4,*)qp(j,6)  
end do  
do j=1,4  
READ (4,*)qp(j,7)  
end do  
do j=1,5  
READ (4,*)gp(j,8)  
end do
```

```

CLOSE(4)
iter= 1
19 continue
write (*,*)'calcul des débits initiaux du réseau'
do j=1,5
r(j,1)=10.679*xl(j,1)/((d(j,1)* *beta)* (136* *alpha))
end do
do j=1,4
r(j,2)=10.679*xl(j,2)/((d(j,2)* *beta)*(136* *alpha))
end do
do j=1,5 r(j,3)=10.679*xl(j,3)/((d(j,3)**beta)*(136**alpha))
end do
do j=1,4
r(j,4)=10.679*xl(j,4)/((d(j,4)* *beta) * (136* * alpha))
end do
do j=1,4
r(j,5)=10.679*xl(j,5)/((d(j,5)* *beta)* (136* *alpha))
end do
do j=1,6
r(j,6)=10.679*xl(j,6)/((d(j,6)* *beta) * (136* * alpha))
end do
do j=1,4
r(j,7)=10.679*xl(j,7)/((d(j,7)* *beta)* (136* * alpha))
end do
do j=1,5 r(j,8)=10.679*xl(j,8)/((d(j,8)**beta)*(136**alpha))
end do
write (*,*)'calcul des pertes de charge'
do j=1,5
df(j,1)=1.15 *r(j,1)* (gp(j,1))* (ABS(gp(j,1))* *(alpha-1 .))
end do
do j=1,4
df(j,2)=1.15*r(j,2)*(gp(j,2))*(ABS(gp(j,2))* *(alpha-1.))
end do
do j=1,5

```

```

df(j,3)=1.15*r(j,3)*(gp(j,3))*(ABS(gp(j,3))**(alpha-1.))
end do
do j=1,4 df(j,4)=1.15*r(j,4)*(gp(j,4))*(ABS(gp(j,4))**(alpha-1.))
end do
do j=1,5 df(j,5)=1.15*r(j,5)*(gp(j,5))*(ABS(gp(j,5))**(alpha-1.))
end do
do j=1,6 df(j,6)=1.15*r(j,6)*(gp(j,6))*(ABS(gp(j,6))**(alpha-1.))
end do
do j=1,4
df(j,7)=1.15 *r(j,7)*(gp(j,7))* (ABS(gp(j,7))* * (alpha-1.))
end do
do j=1,5
df(j,8)=1.15*r(j,8)*(gp(j,8))*(ABS(gp(j,8))**(alpha-1.))
end do
write (^,^)'calcul des rapports (perte de charge/debit)'
do j=1,5
rq(j, 1)=df(j,1)/qp(j, 1)
end do
do j=1,4 rq(j,2)=df(j,2)/gp(j,2)
end do
do j=1,5 rq(j,3)=df(j,3)/gp(j,3)
end do
do j=1,4 rq(j,4)=df(j,4)/gp(j,4)
end do
do j=1,4 rq(j,5)=df(j,5)/gp(j,5)
end do
do j=1,6 rq(j,6)=df(j,6)/gp(j,6)
end do
do j=1,4
rq(j, 7)=df(j,7)/gp(j,7)
end do
do j=1,5 rq(j,8)=df(j,8)/qp(j,8)

```

```

end do
write (*,*)'calcul de la somme des pertes de charge'
f(1)=df(1,1)+df(2,1)+df(3,1)+df(4,1)+df(5,1)
f(2)=df(1,2)+df(2,2)+df(3,2)+df(4,2)
f(3)=df(1,3)+df(2,3)+df(3,3)+df(4,3)+df(5,3)
f(4)=df(1,4)+df(2,4)+df(3,4)+df(4,4)
f(5)=df(1,5)+df(2,5)+df(3,5)+df(4,5)
f(6)=df(1,6)+df(2,6)+df(3,6)+df(4,6)+df(5,6)+df(6,6)
f(7)=df(1,7)+df(2,7)+df(3,7)+df(4,7)
f(8)=df(1,8)+df(2,8)+df(3,8)+df(4,8)+df(5,8)
write (*,*)'calcul de la somme des rapports'
tr(1)=rq(1,1)+rq(2,1)+rq(3,1)+rq(4,1)+rq(5,1)
tr(2)=rq(1,2)+rq(2,2)+rq(3,2)+rq(4,2)
tr(3)=rq(1,3)+rq(2,3)+rq(3,3)+rq(4,3)+rq(5,3)
tr(4)=rq(1,4)+rq(2,4)+rq(3,4)+rq(4,4)
tr(5)=rq(1,5)+rq(2,5)+rq(3,5)+rq(4,5)
tr(6)=rq(1,6)+rq(2,6)+rq(3,6)+rq(4,6)+rq(5,6)+rq(6,6)
tr(7)=rq(1,7)+rq(2,7)+rq(3,7)+rq(4,7)
tr(8)=rq(1,8)+rq(2,8)+rq(3,8)+rq(4,8)+rq(5,8)
write (*,*)'calcul des débits correctifs'
dq(1)=-f(1)/(alpha*tr(1))
dq(2)=-f(2)/(alpha*tr(2))
dq(3)=-f(3)/(alpha*tr(3))
dq(4)=-f(4)/(alpha*tr(4))
dq(5)=-f(5)/(alpha*tr(5))
dq(6)=-f(6)/(alpha*tr(6))
dq(7)=-f(7)/(alpha*tr(7))
dq(8)=-f(8)/(alpha*tr(8))
write (*,*)'calcul des débits'
q(1,1)=gp(1,1)+dq(1)-dq(2)
q(2,1)=gp(2,1)+dq(1)
q(3,1)=gp(3,1)+dq(1)
q(4,1)=gp(4,1)+dq(1)-dq(8)
q(5,1)=gp(5,1)+dq(1)-dq(7)

```

$$q(1,2)=gp(1,2)+dq(2)-dq(1)$$

$$q(2,2)=gp(2,2)+dq(2)$$

$$q(3,2)=gp(3,2)+dq(2)$$

$$q(4,2)=gp(4,2)+dq(2)-dq(3)$$

$$q(1,3)=gp(1,3)+dq(3)-dq(2)$$

$$q(2,3)=gp(2,3)+dq(3)$$

$$q(3,3)=gp(3,3)+dq(3)-dq(4)$$

$$q(4,3)=gp(4,3)+dq(3)-dq(5)$$

$$q(5,3)=gp(5,3)+dq(3)-dq(7)$$

$$q(1,4)=gp(1,4)+dq(4)-dq(3)$$

$$q(2,4)=gp(2,4)+dq(4)$$

$$q(3,4)=gp(3,4)+dq(4)$$

$$q(4,4)=gp(4,4)+dq(4)-dq(5)$$

$$q(1,5)=gp(1,5)+dq(5)-dq(4)$$

$$q(2,5)=gp(2,5)+dq(5)$$

$$q(3,5)=gp(3,5)+dq(5)-dq(3)$$

$$q(4,5)=gp(4,5)+dq(5)-dq(6)$$

$$q(1,6)=gp(1,6)+dq(6)-dq(5)$$

$$q(2,6)=gp(2,6)+dq(6)$$

$$q(3,6)=gp(3,6)+dq(6)$$

$$q(4,6)=gp(4,6)+dq(6)$$

$$q(5,6)=gp(5,6)+dq(6)-dq(8)$$

$$q(6,6)=gp(6,6)+dq(6)-dq(7)$$

$$q(1,7)=gp(1,7)+dq(7)-dq(6)$$

$$q(2,7)=gp(2,7)+dq(7)-dq(3)$$

$$q(3,7)=gp(3,7)+dq(7)-dq(1)$$

$$q(4,7)=gp(4,7)+dq(7)-dq(8)$$

$$q(1,8)=gp(1,8)+dq(8)-dq(7)$$

$$q(2,8)=gp(2,8)+dq(8)-dq(6)$$

$$q(3,8)=gp(3,8)+dq(8)$$

$$q(4,8)=gp(4,8)+dq(8)$$

```
q(5,8)=gp(5,8)+dq(8)-dq(1)

write (*,*)'calcul des erreurs'

do j=1,5
er(j,1)=ABS(((q(j,1)-gp(1,1)))/q(j,1))
end do
do j=1,4
er(j,2)=ABS(((q(j,2)-gp(j,2)))/q(1,2))
end do
do j=1,5
er(j,3)=ABS(((q(j,3)-gp(j,3)))/q(j,3))
end do
do j=1,4
er(j,4)=ABS(((q(j,4)-gp(j,4)))/q(j,4))
end do
do j=1,4
er(j,5)=ABS(((q(j,5)-gp(1,5)))/q(1,5))
end do
do j=1,6
er(j,6)=ABS(((q(j,6)-gp(j,6)))/q(j,6))
end do
do j=1,4
er(j,7)=ABS(((q(1,7)-gp(1,7)))/q(j,7))
end do
do j=1,5
er(j,8)=ABS(((q(j,8)-gp(1,8)))/q(1,8))
end do

tol1=er(1,1)

tol2=er(1,2)
tol3=er(1,3)
tol4=er(1,4)
tol5=er(1,5)
tol6=er(1,6)
tol7=er(1,7)
tol8=er(1,8)
```

```
do j=1,5

tol 1=max(tol 1 ,er(j, 1))
end do
do j=1,4
tol2=max(tol2,er(j,2))
end do
do j=1,5
tol3=max(to13,er(j,3 ))
end do
do j=1,4
tol4=max(tol4,er(j,4))
end do
do j=1,4
to 15 =max (to 15, er(j , 5) )
end do

do j=1,6
tol6 =max(tol6,er(j,6))
end do
do j=1,4
tol7=max(tol7,er(j,7))
end do
do j=1,5
tol8=max(tol8,er(j,8))
end do

tol9=max(tol 1,tol2)
tol10=max(tol3,tol4)
tol11=max(tol5,tol6)
tol12=max(to17,to18)
tol13=max(tol9,tol10)
tol14=max(tol 11 ,tol 12)
tol=max(tol 13,tol 14)
```

```
if (to1.LE.eps) GO TO 37
iter=iter+1
do j=1,5
qp(1,1)=q(j,1)
end do
do j=1,4
qp(j,2)=q(j,2)
end do
do j=1,5
qp(j,3)=q(j,3)
end do
do j=1,4
qp(j,4)=q(j,4)
end do
do j=1,4
qp(j,5)=q(j,5)
end do
do j=1,6
qp(j,6)=q(j,6)
end do
do j=1,4
qp(j,7)=q(j,7)
end do
do j=1,5
qp(j,8)=q(j,8)
end do
go to 19
37 continue
write (*,*)'calcul des vitesses à la dernière itération'
do j=1,5
v(j,1)=4*abs(q(j,1))/(3.1415926536*d(j,1)**2.)
end do
do j=1,5
v(j,2)=4*abs(q(j,2))/(3.1415926536*d(j,2)**2.)
end do
do j=1,5
v(j,3)=4*abs(q(j,3))/(3.1415926536*d(j,3)**2.)
end do
```

```

do j=1,4
vt(j,4)=4*ABS(q(j,4))/(3.1415926536*d(j,4)**2.)
end do
do j=1,4
v(j,5)=4*ABS(q(j,5))/(3.1415926536*d(j,5)**2.)
end do
do j=1,6
v(j,6)=4*ABS(q(j,6))/(3.1415926536*d(j,6)**2.)
end do
do j=1,4
v(j,7)=4*ABS(q(j,7))/(3.1415926536*d(j,7)**2.)
end do
do j=1,5
v(j,8)=4*ABS(q(j,8))/(3.1415926536*d(j,8)**2.)
end do
write (*,*)'calcul des pressions à la dernière itération'
do i=1,18
cp(1)=188
cp(2)=cp(1)+df(2,1)
cp(3)=cp(2)+df(3,1)
cp(4)=cp(3)+df(2,2)
cp(5)=cp(16)+df(1,3)
cp(6)=cp(7)-df(2,4)
cp(7)=cp(8)-df(3,4)
cp(8)=cp(9)-df(2,5)
cp(9)=cp(17)+df(1,6)
cp(10)=cp(11)+df(3,6)
cp(11)=cp(12)+df(4,6)
cp(12)=cp(13)+df(3,8)
cp(13)=cp(1)+df(4,8)
cp(15)=cp(1)+df(5,8)
cp(16)=cp(15)+df(3,7)
cp(17)=cp(16)+df(2,7)
cp(18)=cp(17)+df(3,5)
cp(14)=cp(15)-df(4,7)
pression(i)=cp(i)-cote(i)
end do

```

```
WRITE(7,*)'iter=-',iter
do i=1,18
WRITE(7,1)p(i)
1 FORMAT(fl 0.2)
end do
do j=1,5
write (7,5)q(j,1),df(j,1),vt(j, 1)

5 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,4
write (7,10)q(j,2),df(j,2),vt(j,2)
10 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,5
write (7,15)q(j,3),df(j,3),vt(j,3)
15 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,4
write (7,20)q(j,4),df(j,4),v(j,4)
20 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,4
write (7,25)q(j,5),df(j,5),v(j,5)
25 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,6
write (7,30)q(j,6),df(j,6),v(j,6)
30 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,4
write (7,35)q(j,7),df(j,7),v(j,7)
35 FORMAT(5x,3fl 0.2)
end do
do j=1,5
write (7,40)q(j,8),df(j,8),v(j,8)
40 FORMAT(5x,3fl 0.2)
```

```
end do  
write(7,*)'fin de programme'  
CLOSE(7)  
stop  
end
```

[7]

3.4 Conclusion

La réalisation de l'organigramme facilite beaucoup celle du programme. L'organigramme étant réalisé, et après avoir établi le programme en se basant sur l'organigramme ; à présent, nous allons procéder à l'évaluation de son fonctionnement pour pouvoir conclure sur son efficacité. Cela est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV
Application et
interprétation des
résultats

4.1 Introduction

Après avoir présenté le programme de calcul d'équilibrage des réseaux maillés conçu à partir de la méthode de HARDY-CROSS, et dans le but de tester son fonctionnement et son efficacité, nous lui avons appliqué un cas d'un réseau maillé, et puis nous avons aussi discuté les résultats obtenus.

4.2 Présentation des données

Nous avons appliqué au programme, le réseau suivant qui est un réseau maillé de huit mailles :

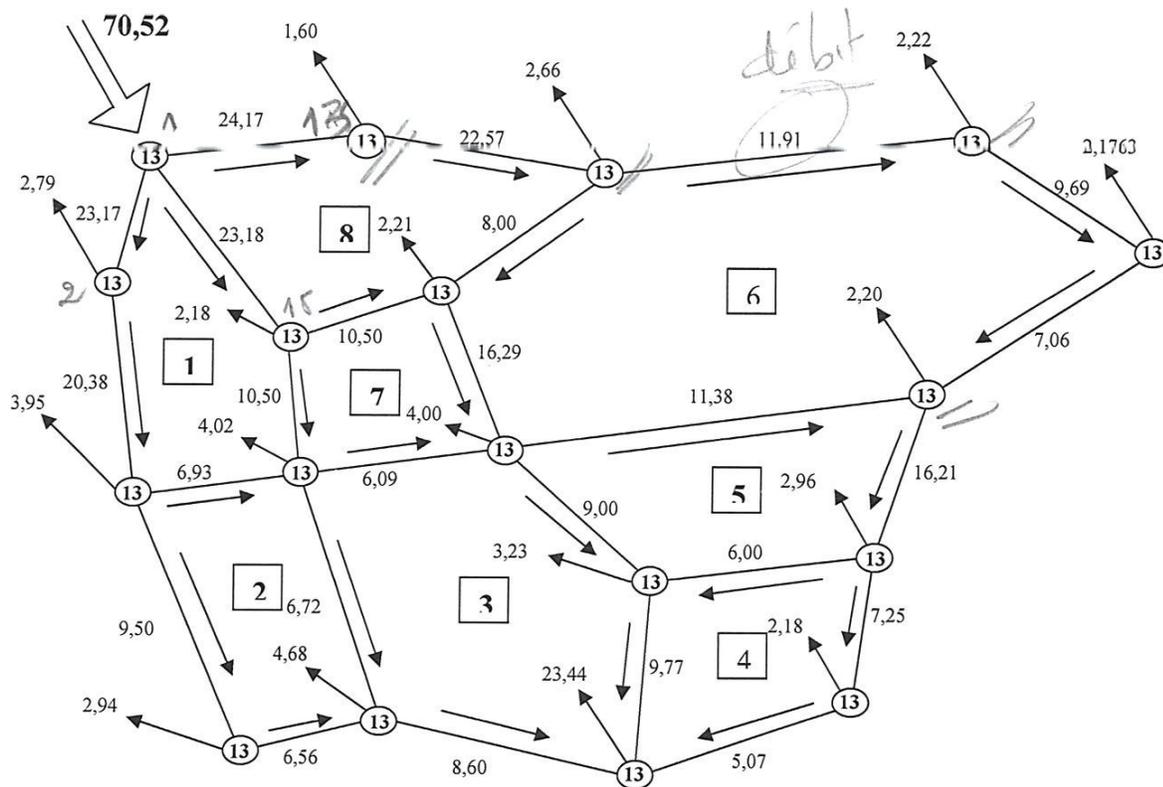


Figure (4-1) : Schéma du réseau

pour quel cas

Tableau 4-2 : Présentation des données (suite)

N° : Maille	N° : tronçon	Du nœud	Au nœud	Maille adjacente	Longueur (m)	Diamètre (mm)	CHW	Q initial (l/s)
1	25	16	3	2	540	100	136	-6.93
	1	2	1	0	622	175	136	-23.17
	2	3	2	0	400	175	136	-20.38
	14	1	15	8	328	175	136	23.18
	16	15	16	7	260	100	136	10.50
2	25	3	16	1	540	100	136	6.93
	3	4	3	0	506	100	136	-9.50
	4	5	4	0	574	100	136	-6.56
	20	16	5	3	610	100	136	6.72
3	20	5	16	2	610	100	136	-6.72
	5	6	5	0	532	100	136	-8.60
	24	18	6	4	328	100	136	9.77
	21	17	18	5	362	100	136	6.00
	19	16	17	7	280	100	136	6.09
4	24	6	18	3	328	100	136	9.77
	6	7	6	0	398	100	136	5.07
	7	8	7	0	402	100	136	7.25
	23	18	8	5	490	100	136	6.00
5	23	8	18	4	490	100	136	6.00
	8	9	8	0	190	150	136	16.21
	21	18	17	3	362	100	136	-9.00
	22	17	9	6	532	125	136	11.38
6	22	9	17	5	532	125	136	-11.38
	9	10	9	0	196	100	136	7.06
	10	11	10	0	378	100	136	9.69
	11	12	11	0	252	125	136	11.91
	17	14	12	8	310	100	136	-8.00
	18	17	14	7	290	150	136	-16.29
7	18	14	17	6	290	150	136	16.29
	19	17	16	3	280	100	136	-6.09
	16	16	15	1	260	100	136	-10.50
	15	15	14	8	208	100	136	10.50
8	15	14	15	7	208	100	136	-10.50
	17	12	14	6	310	100	136	8.00
	12	13	12	0	412	175	136	22.57
	13	1	13	0	144	175	136	24.17
	14	15	01	1	328	175	136	-23.18

Tableau 4-3 : Présentation des données (suite)

N° Nœud	Débit au nœud (l/s)	Cote (m)	HGL
1	-70.52	148.0	188.00
2	2.79	147.2	
3	3.95	146.6	
4	2.94	144.6	
5	4.68	144.2	
6	23.44	146.0	
7	2.18	141.3	
8	2.96	144.0	
9	2.23	144.3	
10	2.63	144.0	
11	2.22	145.0	
12	2.66	145.8	
13	1.60	147.4	
14	2.21	145.9	
15	2.18	146.5	
16	4.62	145.3	
17	4.00	144.8	
18	3.23	144.0	

4.3 Présentation des résultats

Les résultats obtenus par l'exécution du programme en y introduisant les données ci-dessus, sont affichés dans les tableaux suivants.

4.3.1 Résultats de calcul du réseau par le programme de la méthode de Hardy Cross

(Cas où la perte de charge linéaire est calculées par la formule de Hazen Williams)

α P 69

a) Coefficient de Hazen Williams CHW=136

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter=36

Tableau 4-4 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-4.03	0.74
	2	2	1 *	-0.02103	(-21.03)	-3.26	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-1.61	0.76
	4	1	15 †	0.02515	(25.15)	2.39	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	6.51	1.43
2	1	3	16 †	0.00585	(5.85)	4.03	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-7.46	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-3.83	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	7.26	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-7.26	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-7.67	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	5.88	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	7.51	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	1.53	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-5.88	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	2.85	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	5.24	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-2.21	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	2.21	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	1.17	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-7.51	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	4.13	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-4.13	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	1.94	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	6.86	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	2.28	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-4.55	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-2.4	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	2.4	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-1.53	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-6.51	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	5.64	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-5.64	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	4.55	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	2.49	0.95
	4	1	13 †	0.02434	(24.34)	0.99	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-2.39	1.05

Tableau 4-5 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	184.74	37.54
3	146.60	183.13	36.53
4	144.60	175.67	31.07
5	144.20	171.84	27.64
6	146.00	164.17	18.17
7	141.30	167.03	25.73
8	144.00	172.27	28.27
9	144.30	173.44	29.14
10	144.00	175.38	31.38
11	145.00	182.24	37.24
12	145.80	184.52	38.72
13	147.40	187.01	39.61
14	145.90	179.97	34.07
15	146.50	185.61	39.11
16	145.30	179.10	33.80
17	144,80	177,57	32,77
18	144.00	170.05	26.05

4.4 Interprétation et discussion des résultats

L'observation attentive de cas résultats nous permet d'affirmer l'efficacité et la fiabilité de ce programme de la méthode de Hardy Cross. En effet, la loi de la continuité est bien vérifiée ; c'est -à-dire que, en un nœud quelconque, la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortants. (Par exemple au nœud1 : $70.52=210.03+25.15+24.34$).

De la même façon, la loi de la conservation de l'énergie est aussi bien vérifiée c'est-à-dire que la somme algébrique des pertes de charge dans n'importe quelle maille est nulle. (par exemple maille 1 : $-4.03 - 3.26 - 1.61 + 2.39 + 6.51$).

De même, on voit qu'aucune vitesse n'a une valeur qui sort du cadre des normes de l'alimentation en eau potable, toutes les vitesses sont comprises entre 0.5m/s et 1.5m/s.

Quant aux pressions obtenues, elles sont supérieures à 10m et inférieures à 40m, ce qui est encore très satisfaisant.

4.5 Influence de la variation de la rugosité sur les pressions aux nœuds

Pour évaluer l'influence de la rugosité sur les pressions aux nœuds, nous avons fait varier les coefficients de Hazen Williams de 136, 100 à 95 et puis nous avons réalisé un tableau récapitulatif afin de comparer les résultats obtenus.

a) Coefficient de Hazen williams CHW=100

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter =36

Tableau 4-6 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-7.31	0.74
	2	2	1	-0.02103	-21.03	-5.76	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-2.84	0.76
	4	1	15	0.02515	25.15	4.23	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	11.5	1.43
2	1	3	16	0.00585	5.85	7.13	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-13.19	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-6.77	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	12.83	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-12.83	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-13.56	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	10.39	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	13.28	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	2.71	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-10.39	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	5.04	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	9.26	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-3.91	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	3.91	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	2.07	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-13.28	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	7.3	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-7.3	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	3.43	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	12.12	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	4.03	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-8.04	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-4.24	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	4.24	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-2.71	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-11.5	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	9.97	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-9.97	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	8.04	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	4.41	0.95
	4	1	13	0.02434	24.34	1.75	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-4.23	1.05

Tableau 4-7 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	182.24	35.04
3	146.60	179.40	32.80
4	144.60	166.21	21.61
5	144.20	159.44	15.24
6	146.00	145.89	-0.11
7	141.30	150.93	9.63
8	144.00	160.19	16.19
9	144.30	162.27	17.97
10	144.00	165.70	21.70
11	145.00	177.82	32.82
12	145.80	181.85	36.05
13	147.40	186.25	38.85
14	145.90	173.80	27.90
15	146.50	183.77	37.27
16	145.30	162.27	16.97
17	144.80	169.56	24.76
18	144.00	156.28	12.28

b) Coefficient de Hazen williams CHW=95

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter =36

Tableau 4-8 les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-7.84	0.74
	2	2	1	-0.02103	-21.03	-6.33	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-3.13	0.76
	4	1	15	0.02515	25.15	4.65	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	12.65	1.43
2	1	3	16	0.00585	5.85	7.84	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-14.5	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-7.44	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	14.10	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-14.10	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-14.91	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	11.43	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	14.6	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	2.98	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-11.43	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	5.55	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	10.19	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-4.30	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	4.30	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	2.28	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-14.60	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	8.02	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-8.02	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	3.77	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	13.33	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	4.43	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-8.85	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-4.66	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	4.66	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-2.98	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-12.65	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	10.97	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-10.97	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	8.85	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	4.85	0.95
	4	1	13	0.02434	24.34	1.92	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-4.65	1.05

Tableau4-10 : Récapitulation des différentes pressions pour différentes valeurs de rugosité.

N° du Nœud	Cote géométrique Du nœud (m)	HWC=136&P _{CS} =15%P _{CL}		HWC=100&P _{CS} =15%P _{CL}		HWC=95&P _{CS} =15%P _{CL}	
		Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00	188.00	40.00	188.00	40.00
2	147.20	184.74	37.54	182.24	35.04	181.67	34.47
3	146.60	183.13	36.53	179.40	32.80	178.54	31.94
4	144.60	175.67	31.07	166.21	21.61	164.04	19.44
5	144.20	171.84	27.64	159.44	15.24	156.60	12.40
6	146.00	164.17	18.17	145.89	-0.11	141.69	-4.31
7	141.30	167.03	25.73	150.93	9.63	147.24	5.94
8	144.00	172.27	28.27	160.19	16.19	157.42	13.42
9	144.30	173.44	29.14	162.27	17.97	159.70	15.40
10	144.00	175.38	31.38	165.70	21.70	163.48	19.48
11	145.00	182.24	37.24	177.82	32.82	176.80	31.80
12	145.80	184.52	38.72	181.85	36.05	181.23	35.43
13	147.40	187.01	39.61	186.25	38.85	186.08	38.68
14	145.90	179.97	34.07	173.80	27.90	172.39	26.49
15	146.50	185.61	39.11	183.77	37.27	183.35	36.85
16	145.30	179.10	33.80	172.27	26.97	170.70	25.40
17	144.80	177.57	32.77	169.56	24.76	167.72	22.92
18	144.00	170.05	26.05	156.28	12.28	153.12	9.12

c) Discussion des résultats

Ces résultats nous montrent que, plus la rugosité de la conduite augmente, plus la perte de charge augmente ce qui diminue la cote piézométrique et par conséquent, la pression diminue. Ceci signifie que le vieillissement de la conduite entraîne une diminution de la pression.

4.6 Influence des pertes de charge singulières sur les pressions aux nœuds

Afin de mettre en évidence l'influence des pertes de charge singulières sur les pressions aux nœuds, nous avons varié de 15 ; 12.5 et 10% tout en gardant le même coefficient de Hazen Williams HWC=136.

a) Perte de charge singulière est égale à 12.5% de celle linéaire

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter= 36

Tableau 4-11 : les débits, les pertes de charges et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-3.95	0.74
	2	2	1	-0.02103	-21.03	-3.19	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-1.57	0.76
	4	1	15	0.02515	25.15	2.34	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	6.37	1.43
2	1	3	16	0.00585	5.85	3.95	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-7.30	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-3.75	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	7.10	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-7.10	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-7.50	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	5.75	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	7.35	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	1.50	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-5.75	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	2.79	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	5.13	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-2.17	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	2.17	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	1.15	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-7.35	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	4.04	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-4.04	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	1.90	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	6.71	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	2.23	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-4.45	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-2.35	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	2.35	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-1.5	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-6.37	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	5.52	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-5.52	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	4.45	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	2.44	0.95
	4	1	13	0.02434	24.34	0.97	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-2.34	1.05

Tableau 4-12 : les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	184.81	37.61
3	146.60	183.24	36.64
4	144.60	175.94	31.34
5	144.20	172.19	27.99
6	146.00	164.69	18.69
7	141.30	167.48	26.18
8	144.00	172.61	28.61
9	144.30	173.76	29.46
10	144.00	175.66	31.66
11	145.00	182.36	37.36
12	145.80	184.59	38.79
13	147.40	187.03	39.63
14	145.90	180.14	34.24
15	146.50	185.66	39.16
16	145.30	179.29	33.99
17	144.80	177.79	32.99
18	144.00	170.44	26.44

b) Perte de charge singulière est égale à 10% de celle linéaire

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter =36

Tableau 4-13 : les débits, les pertes de charges et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-3.86	0.74
	2	2	1	-0.02103	-21.03	-3.11	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-1.54	0.76
	4	1	15	0.02515	25.15	2.29	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	6.23	1.43
2	1	3	16	0.00585	5.85	3.86	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-7.14	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-3.66	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	6.94	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-6.94	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-7.34	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	5.62	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	7.19	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	1.47	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-5.62	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	2.73	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	5.01	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-2.12	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	2.12	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	1.12	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-7.19	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	3.95	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-3.95	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	1.86	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	6.56	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	2.18	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-4.35	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-2.29	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	2.29	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-1.47	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-6.23	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	5.40	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-5.40	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	4.35	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	2.39	0.95
	4	1	13	0.02434	24.34	0.95	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-2.29	1.05

Tableau 4-13 : les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	184.89	37.69
3	146.60	183.35	36.75
4	144.60	176.21	31.61
5	144.20	172.55	28.35
6	146.00	165.21	19.21
7	141.30	167.94	26.64
8	144.00	172.95	28.95
9	144.30	174.07	29.77
10	144.00	175.93	31.93
11	145.00	182.49	37.49
12	145.80	184.67	38.87
13	147.40	187.05	39.65
14	145.90	180.31	34.41
15	146.50	185.71	39.21
16	145.30	179.49	34.19
17	144.80	178.02	33.22
18	144.00	170.83	26.83

c) Perte de charge singulière négligeable

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter =36

Tableau 4-14 : les débits, les pertes de charges et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau $P_{dc} = 0$

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00585	-5.85	-3.51	0.74
	2	2	1	-0.02103	-21.03	-2.83	0.87
	3	3	2	-0.01824	-18.24	-1.40	0.76
	4	1	15	0.02515	25.15	2.08	1.05
	5	15	16	0.01123	11.23	5.66	1.43
2	1	3	16	0.00585	5.85	3.51	0.74
	2	3	4	-0.00844	-8.44	-6.49	1.07
	3	4	5	-0.0055	-5.5	-3.33	0.7
	4	16	5	0.00752	7.52	6.31	0.96
3	1	16	5	-0.00752	-7.52	-6.31	0.96
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-6.67	1.06
	3	18	6	0.00938	9.38	5.11	1.19
	4	17	18	0.01015	10.15	6.53	1.29
	5	16	17	0.00494	4.94	1.33	0.63
4	1	18	6	-0.00938	-9.38	-5.11	1.19
	2	7	6	0.00572	5.72	2.48	0.73
	3	8	7	0.0079	7.9	4.56	1.01
	4	8	18	-0.00446	-4.46	-1.93	0.57
5	1	18	8	0.00446	4.46	1.93	0.57
	2	9	8	0.01532	15.32	1.02	0.87
	3	17	18	-0.01015	-10.15	-6.53	1.29
	4	17	9	0.01074	10.74	3.59	0.87
6	1	17	9	-0.01074	-10.74	-3.59	0.87
	2	10	9	0.00681	6.81	1.69	0.87
	3	11	10	0.00944	9.44	5.96	1.2
	4	12	11	0.01166	11.66	1.98	0.95
	5	12	14	-0.00842	-8.42	-3.96	1.07
	6	14	17	-0.01795	-17.95	-2.09	1.02
7	1	14	17	0.01795	17.95	2.09	1.02
	2	16	17	-0.00494	-4.94	-1.33	0.63
	3	15	16	-0.01123	-11.23	-5.66	1.43
	4	15	14	0.01173	11.73	4.91	1.49
8	1	15	14	-0.01173	-11.73	-4.91	1.49
	2	12	14	0.00842	8.42	3.96	1.07
	3	13	12	0.02274	22.74	2.17	0.95
	4	1	13	0.02434	24.34	0.86	1.01
	5	1	15	-0.02515	-25.15	-2.08	1.05

Tableau 4-15 : les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	185.17	37.97
3	146.60	183.77	37.17
4	144.60	177.28	32.68
5	144.20	173.95	29.75
6	146.00	167.28	21.28
7	141.30	169.76	28.46
8	144.00	174.32	30.32
9	144.30	175.34	31.04
10	144.00	177.03	33.03
11	145.00	182.99	37.99
12	145.80	184.97	39.17
13	147.40	187.14	39.74
14	145.90	181.01	35.11
15	146.50	185.92	39.42
16	145.30	180.26	34.96
17	144.80	178.93	34.13
18	144.00	172.39	28.39

Tableau 4-16 : Récapitulation des différentes pressions pour différents pourcentages des pertes de charge singulières.

N° du Nœud	Cote géométrique Du nœud (m)	HWC=136 & P _{CS} =15%P _{CL}		HWC=100 & P _{CS} =15%P _{CL}		HWC=95 & P _{CS} =15%P _{CL}	
		Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00	188.00	40	188.00	40.00
2	147.20	184.74	37.54	184.81	37.61	184.89	37.69
3	146.60	183.13	36.53	183.24	36.64	183.35	36.75
4	144.60	175.67	31.07	175.94	31.34	176.21	31.61
5	144.20	171.84	27.64	172.19	27.99	172.55	28.35
6	146.00	164.17	18.17	164.69	18.69	165.21	19.21
7	141.30	167.03	25.73	167.48	26.18	167.94	26.64
8	144.00	172.27	28.27	172.61	28.61	172.95	28.95
9	144.30	173.44	29.14	173.76	29.46	174.07	29.77
10	144.00	175.38	31.38	175.66	31.66	175.93	31.93
11	145.00	182.24	37.24	182.36	37.36	182.49	37.49
12	145.80	184.52	38.72	184.59	38.79	184.67	38.87
13	147.40	187.01	39.61	187.03	39.63	187.05	39.65
14	145.90	179.97	34.07	180.14	34.24	180.31	34.41
15	146.50	185.61	39.11	185.66	39.16	185.71	39.21
16	145.30	179.10	33.80	179.29	33.99	179.49	34.19
17	144.80	177.57	32.77	177.79	32.99	178.02	33.22
18	144.00	170.05	26.05	170.44	26.44	170.83	26.83

d) Interprétation des résultats

La diminution des pertes de charge singulières entraîne l'augmentation des cotes piézométriques et par conséquent les pressions aux nœuds.

4.7 Cas où les pertes de charge linéaires sont calculées par la formule quadratique de Darcy Weisbakh

4.7.1 Influence de la rugosité de la conduite

Cette fois encore dans le but de mesurer l'influence de la rugosité sur la conduite, nous la faisons varier de 0.1, 0.2 ,0.5et 1mm. On prend la perte de charge singulière, comme constante, est égale à 15% des pertes de charge linéaires. Mais cette fois-ci en utilisant la formule de Colebrook White pour calculer les coefficients de pertes de charge.

a) Cas où ($\epsilon=0.1\text{mm}$)

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération $itcr = 36$

Dans le tableau 4-17, nous représentons les paramètres hydrauliques de notre réseau.

Tableau 4-17 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau $\Sigma = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00609	-6.09	-3.74	0.78
	2	2	1	-0.02132	-21.32	-2.82	0.89
	3	3	2	-0.01853	-18.53	-1.37	0.77
	4	1	15	0.02478	24.78	2.01	1.03
	5	15	16	0.01104	11.04	5.92	1.41
2	1	3	16	0.00609	6.09	3.74	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-6.81	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-3.30	0.71
	4	16	5	0.00748	7.48	6.37	0.95
3	1	16	5	-0.00748	-7.48	-6.37	0.95
	2	5	6	-0.00835	-8.53	-6.92	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	5.30	1.19
	4	17	18	0.00993	9.93	6.66	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	1.32	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-5.30	1.19
	2	7	6	0.00578	5.78	2.48	0.74
	3	8	7	0.00796	7.96	4.76	1.01
	4	8	18	-0.00461	-4.61	-1.94	0.59
5	1	18	8	0.00461	4.61	1.94	0.59
	2	9	8	0.01553	15.53	1.02	0.88
	3	17	18	-0.00993	-9.39	-6.66	1.26
	4	17	9	0.01096	10.96	3.70	0.89
6	1	17	9	-0.01096	-10.96	-3.70	0.89
	2	10	9	0.0068	6.80	1.69	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	6.28	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	1.98	0.95
	5	12	14	-0.00851	-8.51	-4.19	1.08
	6	14	17	-0.01785	-17.85	-2.06	1.01
7	1	14	17	0.01785	17.85	2.06	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-1.32	0.64
	3	15	16	-0.01104	-11.04	-5.92	1.41
	4	15	14	0.01155	11.55	5.18	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-5.018	1.47
	2	12	14	0.00851	8.51	4.19	1.08
	3	13	12	0.02282	22.82	2.14	0.95
	4	1	13	0.02442	24.42	0.86	1.02
	5	1	15	-0.02478	-24.78	-2.01	1.03

Tableau 4-18 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	185.18	37.98
3	146.60	183.81	37.21
4	144.60	177.01	32.41
5	144.20	173.71	29.51
6	146.00	166.79	20.79
7	141.30	169.27	27.97
8	144.00	174.03	30.03
9	144.30	175.05	30.75
10	144.00	176.75	32.75
11	145.00	183.02	38.02
12	145.80	185.01	39.21
13	147.40	187.14	39.74
14	145.90	180.82	34.92
15	146.50	185.99	39.49
16	145.30	180.08	34.78
17	144.80	178.75	33.95
18	144.00	172.09	28.09

b) Cas ou ($\epsilon=0.2\text{mm}$)

Dans le tableau 4-19, nous avons représenté les paramètres hydraulique obtenus après exécution du programme élaboré pour une $\epsilon=0.2\text{mm}$.

Ce programme est basé sur la méthode de Hardy Cross, en utilisant les coefficients de Colebrook White pour calculer les pertes de charge sachant que les pertes de charge singulières sont égales à 15% de celles linéaires ($\epsilon=0.2\text{mm}$).

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter = 36

Tableau 4-19 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.0061	-6.10	-4.47	0.78
	2	2	1	-0.02133	-21.33	-3.32	0.89
	3	3	2	-0.01854	-18.54	-1.61	0.77
	4	1	15	0.02476	24.76	2.36	1.03
	5	15	16	0.01103	11.03	7.04	1.40
2	1	3	16	0.0061	6.10	4.47	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-8.12	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-3.94	0.71
	4	16	5	0.00748	7.48	7.59	0.95
3	1	16	5	-0.00748	-7.48	-7.59	0.95
	2	5	6	-0.00835	-8.35	-8.25	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	6.32	1.19
	4	17	18	0.00992	9.92	7.93	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	1.58	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-6.32	1.19
	2	7	6	0.00579	5.79	2.97	0.74
	3	8	7	0.00797	7.97	5.68	1.01
	4	8	18	-0.00461	-4.61	-2.32	0.59
5	1	18	8	0.00461	4.61	2.32	0.59
	2	9	8	0.01554	15.54	1.21	0.88
	3	17	18	-0.00992	-9.92	-7.93	1.26
	4	17	9	0.01097	10.97	4.40	0.89
6	1	17	9	-0.01097	-10.97	-4.40	0.89
	2	10	9	0.0068	6.80	2.02	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	7.48	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	2.35	0.95
	5	12	14	-0.00852	-8.52	-5.01	1.08
	6	14	17	-0.01786	-17.86	-2.44	1.01
7	1	14	17	0.01786	17.86	2.44	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-1.58	0.64
	3	15	16	-0.01103	-11.03	-7.04	1.40
	4	15	14	0.01155	11.55	6.18	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-6.18	1.47
	2	12	14	0.00852	8.52	5.01	1.08
	3	13	12	0.02283	22.83	2.52	0.95
	4	1	13	0.02443	24.43	1.01	1.02
	5	1	15	-0.02476	-24.76	-2.36	1.03

Tableau 4-20 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	184.68	37.48
3	146.60	183.06	36.46
4	144.60	174.94	30.34
5	144.20	171.01	26.81
6	146.00	162.76	16.76
7	141.30	165.73	24.43
8	144.00	171.41	27.41
9	144.30	172.62	28.32
10	144.00	174.63	30.63
11	145.00	182.12	37.12
12	145.80	184.47	38.67
13	147.40	186.99	39.59
14	145.90	179.46	33.56
15	146.50	185.64	39.14
16	145.30	178.60	33.30
17	144.80	177.02	32.22
18	144.00	169.09	25.09

c) Cas ou ($\varepsilon=0.5\text{mm}$)

Résultats de calcul par la méthode de Hardy Cross par la coefficient de Colebrook White et perte de charge singulière égale à 15% de cette linéaire ($\varepsilon=0.5\text{mm}$).

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter = 37

Tableau 4-21 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00611	-6.11	-5.81	0.78
	2	2	1	-0.02134	-21.34	-4.23	0.89
	3	3	2	-0.01855	-18.55	-2.06	0.77
	4	1	15	0.02474	24.74	3.00	1.03
	5	15	16	0.01101	11.01	9.10	1.40
2	1	3	16	0.00611	6.11	5.81	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-10.53	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-5.10	0.71
	4	16	5	0.00747	7.47	9.82	0.95
3	1	16	5	-0.00747	-7.47	-9.82	0.95
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-10.68	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	8.20	1.19
	4	17	18	0.00991	9.91	10.26	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	2.04	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-8.20	1.19
	2	7	6	0.00579	5.79	3.85	0.74
	3	8	7	0.00797	7.97	7.37	1.01
	4	8	18	-0.00463	-4.63	-3.02	0.59
5	1	18	8	0.00463	4.63	3.02	0.59
	2	9	8	0.01556	15.56	1.55	0.88
	3	17	18	-0.00991	-9.91	-10.26	1.26
	4	17	9	0.01099	10.99	5.69	0.9
6	1	17	9	-0.01099	-10.99	-5.69	0.9
	2	10	9	0.0068	6.80	2.61	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	9.69	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	3.02	0.95
	5	12	14	-0.00853	-8.53	-6.51	1.09
	6	14	17	-0.01788	-17.88	-3.13	1.01
7	1	14	17	0.01788	17.88	3.13	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-2.04	0.64
	3	15	16	-0.01101	-11.01	-9.10	1.40
	4	15	14	0.01155	11.55	8.01	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-8.01	1.47
	2	12	14	0.00853	8.53	6.51	1.08
	3	13	12	0.02284	22.84	3.21	0.95
	4	1	13	0.02444	24.44	1.29	1.02
	5	1	15	-0.02474	-24.74	-3.00	1.03

Tableau 4-23 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00611	-6.11	-7.27	0.78
	2	2	1	-0.02135	-21.35	-5.19	0.89
	3	3	2	-0.01856	-18.56	-2.52	0.77
	4	1	15	0.02472	24.72	3.67	1.03
	5	15	16	0.01099	10.99	11.31	1.40
2	1	3	16	0.00611	6.11	7.27	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-13.14	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-6.37	0.71
	4	16	5	0.00746	7.46	12.24	0.95
3	1	16	5	-0.00746	-7.46	-12.24	0.95
	2	5	6	-0.00834	-8.34	-13.31	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	10.23	1.19
	4	17	18	0.00990	9.90	12.78	1.26
	5	16	17	0.00502	5.02	2.54	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-10.23	1.19
	2	7	6	0.00580	5.80	4.82	0.74
	3	8	7	0.00798	7.98	9.21	1.01
	4	8	18	-0.00464	-4.64	-3.79	0.59
5	1	18	8	0.00464	4.64	3.79	0.59
	2	9	8	0.01557	15.57	1.91	0.88
	3	17	18	-0.00990	-9.90	-12.78	1.26
	4	17	9	0.01101	11.01	7.07	0.9
6	1	17	9	-0.01101	-11.01	-7.07	0.9
	2	10	9	0.00679	6.79	3.26	0.86
	3	11	10	0.00942	9.42	12.08	1.20
	4	12	11	0.01164	11.64	3.74	0.95
	5	12	14	-0.00855	-8.55	-8.16	1.09
	6	14	17	-0.01789	-17.89	-3.16	1.01
7	1	14	17	0.01789	17.89	3.16	1.01
	2	16	17	-0.00502	-5.02	-2.54	0.64
	3	15	16	-0.01099	-10.99	-11.31	1.40
	4	15	14	0.01155	11.55	10.00	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-10.00	1.47
	2	12	14	0.00855	8.55	8.16	1.09
	3	13	12	0.02285	22.85	3.94	0.95
	4	1	13	0.02445	24.45	1.58	1.02
	5	1	15	-0.02472	-24.72	-3.67	1.03

Tableau 4-24 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	182.81	35.61
3	146.60	180.29	33.69
4	144.60	167.15	22.55
5	144.20	160.77	16.57
6	146.00	147.46	1.46
7	141.30	152.28	10.98
8	144.00	161.49	17.49
9	144.30	163.40	19.10
10	144.00	166.66	22.66
11	145.00	178.74	33.74
12	145.80	182.48	36.68
13	147.40	186.42	39.02
14	145.90	174.33	28.43
15	146.50	184.33	37.83
16	145.30	173.02	27.72
17	144.80	170.47	25.67
18	144.00	157.69	13.69

Tableau 4-25 : Récapitulation des différentes pressions pour différentes valeurs de rugosité.

 $\varepsilon = 1 \text{ mm} ?$

N° du Nœud	Cote géométrique Du nœud (m)	$\varepsilon = 0.1 \text{ mm} \& P_{CS} = 15\% P_{CL}$		$\varepsilon = 0.2 \text{ mm} \& P_{CS} = 15\% P_{CL}$		$\varepsilon = 0.5 \text{ mm} \& P_{CS} = 15\% P_{CL}$	
		Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00	188.00	40.00	188.00	40.00
2	147.20	185.18	37.98	184.68	37.48	183.77	36.57
3	146.60	183.81	37.21	183.06	36.46	181.71	35.11
4	144.60	177.01	32.41	174.94	30.34	171.19	26.59
5	144.20	173.71	29.51	171.01	26.81	166.08	21.88
6	146.00	166.79	20.79	162.76	16.76	155.40	9.40
7	141.30	169.27	27.97	165.73	24.43	159.25	17.95
8	144.00	174.03	30.03	171.41	27.41	166.63	22.63
9	144.30	175.05	30.75	172.62	28.32	168.18	23.88
10	144.00	176.75	32.75	174.63	30.63	170.79	26.79
11	145.00	183.02	38.02	182.12	37.12	180.48	35.48
12	145.80	185.01	39.21	184.47	38.67	183.50	37.70
13	147.40	187.14	39.74	186.99	39.59	186.71	39.31
14	145.90	180.82	34.92	179.46	33.56	176.99	31.09
15	146.50	185.99	39.49	185.64	39.14	185	38.50
16	145.30	180.08	34.78	178.60	33.30	175.90	30.60
17	144.80	178.75	33.95	177.02	32.22	173.86	29.06
18	144.00	172.09	28.09	169.09	25.09	163.60	19.60

e) Interprétation des résultats

La comparaison de ces résultats nous montrent une fois de plus que l'augmentation de la rugosité diminue les pressions aux nœuds.

4.3.2.2 Influence des pertes de charge singulières

a) Pertes de charge singulières négligeables

Résultats de calcul par la méthode de Hardy Cross par le coefficient de Colebrook White et perte de charge singulière négligeable ($\varepsilon = 0.1 \text{ mm}$).

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter=36

Tableau 4-26 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00609	-6.09	-3.25	0.78
	2	2	1	-0.02132	-21.32	-2.45	0.89
	3	3	2	-0.01853	-18.53	-1.19	0.77
	4	1	15	0.02478	24.78	1.74	1.03
	5	15	16	0.01104	11.09	5.14	1.41
2	1	3	16	0.00609	6.09	3.25	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-5.92	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-2.87	0.71
	4	16	5	0.00748	7.48	5.54	0.95
3	1	16	5	-0.00748	-7.48	-5.54	0.95
	2	5	6	-0.00835	-8.35	-6.02	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	4.61	1.19
	4	17	18	0.00993	9.93	5.79	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	1.15	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-4.61	1.19
	2	7	6	0.00578	5.78	2.16	0.74
	3	8	7	0.00796	7.96	4.14	1.01
	4	8	18	-0.00461	-4.61	-1.69	0.59
5	1	18	8	0.00461	4.61	1.69	0.59
	2	9	8	0.01553	15.53	0.89	0.88
	3	17	18	-0.00993	-9.93	-5.79	1.26
	4	17	9	0.01096	10.96	3.22	0.89
6	1	17	9	-0.01096	-10.96	-3.22	0.89
	2	10	9	0.00680	6.80	1.47	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	5.46	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	1.72	0.95
	5	12	14	-0.00851	-8.51	-3.64	1.08
	6	14	17	-0.01785	-17.85	-1.79	1.01
7	1	14	17	0.01785	17.85	1.79	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-1.15	0.64
	3	15	16	-0.01104	-11.04	-5.14	1.41
	4	15	14	0.01155	11.55	4.5	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-4.5	1.47
	2	12	14	0.00851	8.51	3.64	1.08
	3	13	12	0.02282	22.82	1.86	0.95
	4	1	13	0.02442	24.42	0.74	1.02
	5	1	15	-0.02478	-24.78	-1.74	1.03

Tableau 4-27 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	185.55	38.35
3	146.60	184.36	37.76
4	144.60	178.44	33.84
5	144.20	175.57	31.37
6	146.00	169.56	23.56
7	141.30	171.72	30.42
8	144.00	175.85	31.85
9	144.30	176.74	32.44
10	144.00	178.21	34.21
11	145.00	183.67	38.67
12	145.80	185.40	39.60
13	147.40	187.26	39.86
14	145.90	181.75	35.85
15	146.50	186.26	39.76
16	145.30	181.11	35.81
17	144.80	179.96	35.16
18	144.00	174.17	30.17

b) Pertes de charge singulières égales à 10%

Résultats de calcul par la méthode de Hardy Cross par le coefficient de Colebrook white et perte de charge singulière égale à 10% de celle linéaire ($\epsilon=0.1\text{mm}$).

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter=36

Tableau 4-28 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00609	-6.09	-3.57	0.78
	2	2	1	-0.02132	-21.32	-2.69	0.89
	3	3	2	-0.01853	-18.53	-1.31	0.77
	4	1	15	0.02478	24.78	1.92	1.03
	5	15	16	0.01104	11.04	5.66	1.41
2	1	3	16	0.00609	6.09	3.57	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-6.51	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-3.16	0.71
	4	16	5	0.00748	7.48	6.09	0.95
3	1	16	5	-0.00748	-7.48	-6.09	0.95
	2	5	6	-0.00835	8.35	6.62	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	5.07	1.19
	4	17	18	0.00993	9.93	6.37	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	1.27	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-5.07	1.19
	2	7	6	0.00578	5.78	2.38	0.74
	3	8	7	0.00796	7.96	4.55	1.01
	4	8	18	-0.00461	-4.61	-1.85	0.59
5	1	18	8	0.00461	4.61	1.85	0.59
	2	9	8	0.01553	15.53	0.98	0.88
	3	17	18	-0.00993	-9.93	-6.37	1.26
	4	17	9	0.01096	10.96	3.54	0.89
6	1	17	9	-0.01096	-10.96	-3.54	0.89
	2	10	9	0.00680	6.80	1.62	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	6.00	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	1.90	0.95
	5	12	14	-0.00851	-8.51	-4.01	1.08
	6	14	17	-0.01785	-17.85	-1.97	1.01
7	1	14	17	0.01785	17.85	1.97	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-1.27	0.64
	3	15	16	-0.01104	-11.04	-5.66	1.41
	4	15	14	0.01155	11.55	4.95	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-4.95	1.47
	2	12	14	0.00851	8.51	4.01	1.08
	3	13	12	0.02282	22.82	2.05	0.95
	4	1	13	0.02442	24.42	0.82	1.02
	5	1	15	-0.02478	-24.78	-1.92	1.03

Tableau4-29 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	185.31	38.11
3	146.60	184.00	37.40
4	144.60	177.49	32.89
5	144.20	174.33	30.13
6	146.00	167.71	21.71
7	141.30	170.09	28.79
8	144.00	174.64	30.64
9	144.30	175.62	31.32
10	144.00	177.24	33.24
11	145.00	183.24	38.24
12	145.80	185.14	39.34
13	147.40	187.18	39.78
14	145.90	181.13	35.23
15	146.50	186.08	39.58
16	145.30	180.42	35.12
17	144.80	179.16	34.36
18	144.00	172.78	28.78

c) Pertes de charge singulières égales à 12.5%

Résultats de calcul par la méthode de Hardy Cross par le coefficient de Colebrook white et perte de charge singulière égale à 12.5% de celle linéaire ($\epsilon=0.1\text{mm}$).

La précision demandée 10^{-5}

Nombre d'itération iter=36

Tableau 4-30 : Les débits, les pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau

N° : Maille	N° : de Conduite	Du Nœud	Au Nœud	Débit (m ³ /s)	Débit (l/s)	Perte de charge (m)	Vitesse (m/s)
1	1	3	16	-0.00609	-6.09	-3.66	0.78
	2	2	1	-0.02132	-21.32	-2.76	0.89
	3	3	2	-0.01853	-18.53	-1.34	0.77
	4	1	15	0.02478	24.78	1.96	1.03
	5	15	16	0.01104	11.04	5.79	1.41
2	1	3	16	0.00609	6.09	3.66	0.78
	2	3	4	-0.00849	-8.49	-6.66	1.08
	3	4	5	-0.00555	-5.55	-3.23	0.71
	4	16	5	0.00748	7.48	6.23	0.95
3	1	16	5	-0.00748	-7.48	-6.23	0.95
	2	5	6	-0.00835	-8.35	-6.77	1.06
	3	18	6	0.00931	9.31	5.19	1.19
	4	17	18	0.00993	9.93	6.52	1.26
	5	16	17	0.00503	5.03	1.30	0.64
4	1	18	6	-0.00931	-9.31	-5.19	1.19
	2	7	6	0.00578	5.78	2.43	0.74
	3	8	7	0.00796	7.96	4.65	1.01
	4	8	18	-0.00461	-4.61	-1.90	0.59
5	1	18	8	0.00461	4.61	1.90	0.59
	2	9	8	0.01553	15.53	1.00	0.88
	3	17	18	-0.00993	-9.93	-6.52	1.26
	4	17	9	0.01096	10.96	3.62	0.89
6	1	17	9	-0.01096	-10.96	-3.62	0.89
	2	10	9	0.00680	6.80	1.66	0.87
	3	11	10	0.00943	9.43	6.14	1.20
	4	12	11	0.01165	11.65	1.94	0.95
	5	12	14	-0.00851	-8.51	-4.10	1.08
	6	14	17	-0.01785	-17.85	-2.02	1.01
7	1	14	17	0.01785	17.85	2.02	1.01
	2	16	17	-0.00503	-5.03	-1.30	0.64
	3	15	16	-0.01104	-11.04	-5.79	1.41
	4	15	14	0.01155	11.55	5.07	1.47
8	1	15	14	-0.01155	-11.55	-5.07	1.47
	2	12	14	0.00851	8.51	4.10	1.08
	3	13	12	0.02282	22.82	2.09	0.95
	4	1	13	0.02442	24.42	0.84	1.02
	5	1	15	-0.02478	-24.78	-1.96	1.03

Tableau4-31 : Les pressions aux nœuds

N° Du nœud	Cote géométrique (m)	Cote piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00
2	147.20	185.24	38.04
3	146.60	183.91	37.31
4	144.60	177.25	32.65
5	144.20	174.02	29.82
6	146.00	167.25	21.25
7	141.30	169.68	28.38
8	144.00	174.33	30.33
9	144.30	175.33	31.03
10	144.00	176.99	32.99
11	145.00	183.13	38.13
12	145.80	185.07	39.27
13	147.40	187.16	39.73
14	145.90	180.97	35.07
15	146.50	186.04	39.54
16	145.30	180.25	34.95
17	144.80	178.95	34.15
18	144.00	172.44	28.44

Tableau 4-32 : Récapitulation des différentes pressions pour différentes valeurs des pertes de charges singulières.

N° du Nœud	Cote géométrique Du nœud (m)	$\varepsilon = 0.1\text{mm}$ & $P_{CS} = 0\%P_{CL}$		$\varepsilon = 0.1\text{mm}$ & $P_{CS} = 10\%P_{CL}$		$\varepsilon = 0.1\text{mm}$ & $P_{CS} = 12.5\%P_{CL}$	
		Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)	Cote Piézométrique (m)	Pression (m)
1	148.00	188.00	40.00	188.00	40.00	188.00	40.00
2	147.20	185.55	38.35	185.31	38.11	185.24	38.04
3	146.60	184.36	37.76	184.00	37.40	183.91	37.31
4	144.60	178.44	33.84	177.49	32.89	177.25	32.65
5	144.20	175.57	31.37	174.33	30.13	174.02	29.82
6	146.00	169.56	23.56	167.71	21.71	167.25	21.25
7	141.30	171.72	30.42	170.09	28.79	169.68	28.38
8	144.00	175.85	31.85	174.64	30.64	174.33	30.33
9	144.30	176.74	32.44	175.62	31.32	175.33	31.03
10	144.00	178.21	34.21	177.24	33.24	176.99	32.99
11	145.00	183.67	38.67	183.24	38.24	183.13	38.13
12	145.80	185.40	39.60	185.14	39.34	185.07	39.27
13	147.40	187.26	39.86	187.18	39.78	187.16	39.73
14	145.90	181.75	35.85	181.13	35.23	180.97	35.07
15	146.50	186.26	39.76	186.08	39.58	186.04	39.54
16	145.30	181.11	35.81	180.42	35.12	180.25	34.95
17	144.80	179.96	35.16	179.16	34.36	178.95	34.15
18	144.00	174.17	30.17	172.78	28.78	172.44	28.44

d) Interprétation de résultats

Ces derniers résultats confirment bien ce qu'on a affirmé en haut, c'est-à-dire que l'augmentation des pertes de charge singulières diminue les pressions aux nœuds.

4.8 Conclusion

La vérification des résultats obtenus preuve que ces derniers sont indiscutablement satisfaisants. Aussi, ces résultats nous permettent de confirmer que lorsque la perte de charge diminue, la pression augmente, que l'augmentation de la perte de charge diminue la pression et que tout ceci n'influe ni sur le débit ni sur la vitesse.

Par contre, la moindre variation du débit dans le réseau sera ressentie au niveau de la vitesse, de la perte de charge, donc la pression.

On remarque aussi qu'en générale, les pressions obtenues en calculant les pertes de charge linéaires par la formule de Hazen Williams sont inférieures à celles obtenues en calculant les pertes de charge linéaires par la formule de Darcy Weisback d'où les pressions aux niveaux des nœuds et par conséquent dans le réseau.

Conclusion générale

A cause de la complexité du calcul des réseaux maillés, nous avons réalisé un programme de calcul numérique pour la méthode la plus fréquemment utilisée qui est celle de Hardy Cross, afin de résoudre les problèmes posés plus rapidement et plus efficacement. En effet, notre programme a l'avantage de résoudre, avec une précision satisfaisante, tout type de réseau, c'est-à-dire avec un nombre de mailles et de tronçon par mailles variable.

Notre mémoire de fin d'études nous a permis d'approfondir nos connaissances, en général, en alimentation en eau potable et en particulier la maîtrise des méthodes de calcul des réseaux de distribution d'eau et surtout d'améliorer notre niveau en programme en langage fortran et l'usage du logiciel Lahey Fortran95.

Dans ce travail, nous avons pu montrer l'existence de plusieurs méthodes de calcul de l'équilibrage des réseaux maillés de distribution d'eau ; parmi les quelles, nous avons développé en détail les trois principales (méthodes analytiques).

Les résultats obtenus par le programme, nous permettent de conclure que la méthode de Hardy Cross converge très lentement vers la solution finale. La preuve en est que, pour un réseau de huit mailles, les résultats finaux sont obtenus après trente six itérations. Aussi après avoir appliqué le programme à plusieurs cas de réseau, nous sommes rendu compte que, plus le nombre de mailles est grand plus la convergence de la méthode de Hardy Cross est lente.

Les résultats obtenus sont incontestablement satisfaisants. Nous suggérons alors d'utiliser la méthode de Hardy Cross pour le calcul d'équilibrage des réseaux maillés, mais seulement il faut bien penser de créer une base de données qui contient tous les diamètres commerciaux et que le programme qui sera réalisé utilisera ces données pour le choix des diamètres optimaux des réseaux maillés, de plus nous ambitionnerons de développer ce programme pour le cas des heures creuses et de créer un environnement de travail sous Windows afin de faciliter son utilisation et obtenir des résultats beaucoup plus fiables.

et d'

Références bibliographiques

- [1] François Valiron ; Gestion des eaux : Alimentation en eau et assainissement
- [2] Alkama M'hand Ramdan ; Etude des méthodes de dimensionnement des réseaux de distribution d'eau potable, M.F.E ; E.N.S.H ; 2000
- [3] François V ; Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et Assainissement :Tome I
- [4] BOUMHRAT M. et GOURDIN A ; Méthodes numériques appliquées, O.P.U ; 1993
- [5] TUIBI et TUIBI S ; pratique du fortran 77, Edition Berti 1991
- [6] Carlier M ; Hydraulique générale et appliquée, édition Eyrolles, 1986
- [7] Hamidou Amadou et Mokhnache Abd ennacer ; Mémoire de fin d'étude : calcul d'équilibrage des réseaux d'alimentation en eau potable. Université de Guelma.