

CONCEPTION A MOINDRE COUT DES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

LAHIOUEL Yasmina^a, LAHIOUEL Rachid^b, AZARI Zitouni^c

^a *Laboratoire d'Analyse Industrielle et de Génie des Matériaux (LAIGM), Université de Guelma, B.P. 401, Guelma, Algérie, e-mail : ya_lahiouel@yahoo.fr*

^b *Laboratoire de Physique de Guelma (GPL), Université de Guelma, B.P. 401, Guelma, Algérie, e-mail : lahouel_ra@yahoo.fr*

^c *Laboratoire de Fiabilité Mécanique, Université de Metz, Ile du Saulcy- 57045 Metz cedex 01, e-mail : Azari@sciences.univ-metz.fr*

Résumé :

Dans la plupart des travaux de conception des réseaux, on a pour objectif d'optimiser le coût, la fiabilité et la performance des systèmes. Grâce à la puissance et la performance des ordinateurs actuellement disponibles, l'optimisation peut être traitée de façon très rigoureuse. Il est donc possible d'utiliser des méthodes numériques afin d'obtenir des solutions optimales ou très proches de l'optimum. Cet article vise alors à apporter une contribution aux méthodes existantes en proposant une méthode d'optimisation du coût de conception des réseaux de distribution d'eau. Pour la conception des réseaux de conduites, le processus complet d'optimisation consiste à trouver la meilleure configuration ou disposition des nœuds et sources et le meilleur choix des diamètres des conduites du système entier sujet à un ensemble de contraintes à satisfaire.

Abstract :

Some of the well-known existing methods are the shortest path algorithm, the minimum spanning tree algorithm and a novel method published previously. This paper aims to bring a contribution to the existing methods while proposing a new method of cost minimization in networks design, using the conceptual advantages of available methods. The developed algorithm is implemented into a user-friendly interactive computer program which allows the design of looped systems with minimal length ensuring least coast, reliability of the network and hence the availability of water.

Mots Clés : Optimisation de la conception de réseaux, Réseaux de Distribution d'eau, Optimisation de la configuration de réseaux, Diamètre optimal des conduites

1. INTRODUCTION

La conception des systèmes de distribution de pétrole, d'eau et de gaz, des systèmes d'irrigation, et des grilles de télécommunication et d'électricité, implique l'optimisation du coût et de la fiabilité.

L'importance d'obtenir la meilleure configuration du réseau et les diamètres optimaux pour chaque conduite est appuyée par le fait que les décisions prises durant les étapes de conception influent directement sur l'optimalité des coûts d'opérations finaux. Le problème est donc traité en deux étapes. La première consiste à optimiser la longueur totale du réseau, et de là les longueurs des conduites sont à minimiser. Elles sont alors, considérées comme étant les variables de décision. Dans ce cas, les débits aux jonctions (nœuds) ainsi que leurs positions sont supposés connus. La deuxième consiste à optimiser le choix des diamètres.

La recherche de la disposition maillée des systèmes a été l'objet d'un certain nombre de travaux. Walters et Lohbeck (1993) [1] ont utilisé une méthode basée sur les algorithmes génétiques, dans laquelle la disposition optimale en arbre est choisie à partir d'un graphe prédéfini. La méthode proposée est efficace sur des réseaux de petite taille pour des raisons de stockage. Walters et Smith (1995) [2] ont proposé un modèle pour le choix optimal de disposition pour un réseau avec une structure arborescente basé sur la conception évolutive et les principes de la génétique. Rothfarb et al (1970) [3] ont proposé une procédure heuristique pour construire des structures arborescentes à prix réduit pour les canalisations en mer de gaz. La méthodologie était basée sur deux conditions - les meilleurs arbres ont la plus petite longueur totale des conduites et des débits dans les conduites presque égaux. Davidson et Goulter (1991, a&b) [4, 5] ont développé une heuristique et un modèle expérimentale pour la disposition topologique et la conception des réseaux ramifiés de distribution rurale de gaz utilisant les algorithmes de Dijkstra et de l'arbre minimum de façon itérative en partant d'une disposition topologique prédéterminée. Morgan et Goulter (1985) [6] ont présenté une technique pour l'optimisation du coût de disposition et de conception des systèmes de distribution d'eau maillés. La technique suppose, cependant, une disposition initiale prédéfinie avec ses branches potentielles. Loganathan et al (1990) [7] ont proposé une méthode d'optimisation de la conception à deux étapes pour construire un réseau de distribution d'eau. Afshar [8] a étudié et évalué un nombre d'algorithmes utilisés dans la conception simultanée des réseaux de distribution d'eau, et a ensuite développé un algorithme de conception basé sur les algorithmes génétiques [9].

L'optimisation du choix des diamètres dans les réseaux maillés de distribution d'eau a, elle aussi attiré l'attention des chercheurs pour plus de deux décennies. Cependant les paramètres impliqués dans les réseaux de distribution réels sont trop complexes pour permettre l'obtention d'une solution optimale entièrement satisfaisante.

Le présent travail fournit un algorithme complet de conception optimal de réseaux maillés pour la distribution d'eau. Il repose sur une méthode heuristique de conception de la configuration maillée optimale du réseau et ensuite l'optimisation du choix des diamètres des conduites en utilisant la programmation linéaire.

L'application à un cas de réseau publié dans la littérature est présentée. La disposition topologique obtenue se compare bien aux résultats publiés.

2 Modélisation du problème

2.1 Optimisation de la configuration par minimisation de la longueur

Un réseau de distribution d'eau peut être modélisé par un ensemble de nœuds de demande ou de sommets $\{N_i\}$ et de une ou plusieurs sources et un ensemble de conduites $\{L_{ij}\}$ qui forment un graphe G. On suppose que les nœuds sont représentés en bidimensionnel. Ils sont numérotés et chacun a des coordonnées x et y. On suppose que les lignes représentant les conduites sont toutes droites.

L'interconnexion d'un réseau peut donc être décrite par la matrice incidente nœud-nœud. Cette matrice est rectangulaire dont les éléments sont définis comme :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Si le nœud } i \text{ est relié au nœud } j \\ 0, & \text{Si le nœud } i \text{ n'est pas relié au nœud } j \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^E C_i L_i \quad (2)$$

C_i est le coût par unité de longueur pour la conduite i, L_i sa longueur et N le nombre de conduites constituant le réseau.

Puisque les coûts sont des quantités immuables, une importante simplification peut être faite dans l'adoption de l'optimisation de la longueur au lieu de l'optimisation du coût. Les variables de décision deviennent les longueurs des conduites. La fonction objective est ainsi simplifiée :

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^E L_i \quad (3)$$

La fonction objective (3) est soumise aux contraintes :

➤ pour chaque source, la contrainte de la disponibilité est comme suit :

$$\sum Q_{\text{out}} \leq Q_{\text{cap}} \quad (4)$$

Q_{out} est la capacité de la source ou la quantité de fluide disponible au nœud source.

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

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

NC_i est le nombre de branches connectées au nœud i . Cette contrainte garantit qu'il y ait, à la fin, deux chemins différents reliant chaque nœud de demande à la source qui l'alimente. Elle assure ainsi la fiabilité du système.

2.2 Principe de la méthode proposée

Dans ce travail, on propose une nouvelle méthode de conception de réseaux de distribution d'eau, qui vise à trouver la disposition topologique de réseaux maillés et ayant une longueur totale minimale [10]. La méthode est heuristique et évolue en deux étapes : à la première étape, commençant avec la source ayant la plus petite capacité et en considérant les distances séparant les sources aux nœuds et les nœuds entre eux dans un ordre croissant, les nœuds sont reliés à la source constituant un groupe dans une configuration ramifiée. Ce processus est répété avec toutes les sources en passant à celle avec la capacité juste supérieure et ainsi de suite. Dans la deuxième étape, le réseau obtenu est maillé de sorte que tous les nœuds puissent avoir un degré de connectivité au moins supérieur à 2.

2.3 Optimisation du choix des diamètres des conduites

Pour le réseau maillé la distribution du débit n'est pas connue au début de la conception. Elle dépend du choix du diamètre. Elle est donc supposée dans un premier temps. Le modèle de conception du réseau maillé est fort identique à celui du réseau ramifié. Les données suivantes sont fournies au modèle de base : le débit de conception Q pour chaque assemblage ; la longueur l de chaque assemblage ; le coût c pour tout diamètre en chaque assemblage par mètre linéaire ; les surélévations de tous les nœuds.

L'objectif du modèle de conception est de minimiser le coût total du système en trouvant la meilleure combinaison possible des diamètres. Le modèle de conception des systèmes de distribution d'eau consiste en :

La fonction objet à minimiser est :

$$C_T = \sum_i \sum_j c_j L_{ij} \quad (6)$$

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

$$H \min_n \leq H_s \pm \sum_i \sum_j S_{ij} L_{ij} \leq H \max_n \quad (7)$$

L'équation (7) est établie pour tous les nœuds critiques. De plus la condition de longueur est établie pour tout assemblage i .

$$\sum_j L_{ij} = l_i \quad (8)$$

La contrainte de la charge dans la maille qui doit être nulle

$$\sum_{i \in \text{maille}} \sum_j S_{ij} L_{ij} = 0 \quad (9)$$

Le modèle est un modèle d'optimisation non linéaire, dont les variables sont les longueurs des sections L_{ij} . Afin de le transformer en un modèle linéaire résoluble par la programmation linéaire, une estimation du débit dans les conduites du réseau est faite. Le problème d'optimisation des diamètres est alors résolu par la méthode universellement connue du Simplex [12].

2.4 Détermination de la distribution du débit

Le résultat de l'optimisation dépend de la distribution du débit. Pour des raisons économiques, la distribution du débit se base sur le principe de concentrer le débit dans des conduites principales, et attribuer un plus faible débit au reste des conduites. Ceci mène à dire que le débit sera concentré sur le système en arbre. La distribution est alors divisée en deux sous problèmes : détermination du système de branches en arbre en utilisant le principe du chemin le plus court ou de l'arbre minimal. Dans ce travail l'algorithme de l'arbre minimal de Prim [13] a été choisi pour sa simplicité ; détermination du débit dans les assemblages fermés en supposant soit un débit minimal, soit un pourcentage du débit aux nœuds ou une pente de la ligne de pente hydraulique.

A partir du débit dans les assemblages fermés et la condition de continuité en tous les nœuds, le débit dans les assemblages de l'arbre suit.

3 Applications et résultats du programme

L'algorithme proposé est mis en pratique dans un programme facile à utiliser et se prête bien aux éventuelles exigences de l'utilisateur en utilisant un processus interactif d'introduction des données. Le programme principal est organisé en deux grandes parties : (1) optimisation de la longueur totale, (2) optimisation du choix des diamètres. L'utilisateur peut avoir accès à chacune indépendamment de l'autre. Comme il est aussi possible de les solliciter successivement. Les données diffèrent donc et portent pour la première partie sur les positions des nœuds ainsi que leurs demandes ou disponibilités nécessaires pour relier les nœuds et les sources en réseau maillé de longueur totale minimale. Les résultats des calculs sont alors donnés sous forme de tables de connectivité. Pour ce qui est de la deuxième partie, les données nécessaires, en plus des résultats de la première, c'est-à-dire les longueurs des conduites et les débits aux nœuds, sont les pressions minimales permises aux nœuds.

Afin de valider l'algorithme proposé dans cette étude, le programme établi a été testé sur un réseau avec une seule source et 7 nœuds de connexion, le réseau à deux mailles repris comme référence dans beaucoup de travaux [2, 6, 8, 9, 10, 11]. Les données sont résumées dans le tableau 1. Les valeurs des diamètres de conduites disponibles en inches avec leurs coûts unitaires en unités monétaires arbitraires [8, 9, 11] entre parenthèses sont 2(5), 3(8), 4(11), 6(16), 8(23), 10(32), 12(50), 14(60), 16(90), 18(130), 20(170), 22(300) et 24(550). L'utilisation de l'unité de mesure Anglaise Inch est justifiée par le besoin d'avoir une comparaison assez fiable puisque les autres études ont utilisé cette unité. Les résultats obtenus par le programme sont résumés dans le tableau 2 et représentés graphiquement dans la Figure. L'arbre étant représenté en trait continu et la branche de connexion en maille est en trait discontinu.

Tableau 1 : Données du réseau à deux mailles

Nœud	Abscisse (m)	Ordonnée (m)	Capacité/ Demande (m ³ /s)	Élévation (m)	Pression minimale
1	3100	100	1120	210	00
2	2100	100	100	150	30
3	1100	100	100	160	30

4	2100	1100	120	155	30
5	1100	1100	270	150	30
6	2100	2100	330	165	30
7	1100	2100	200	160	30

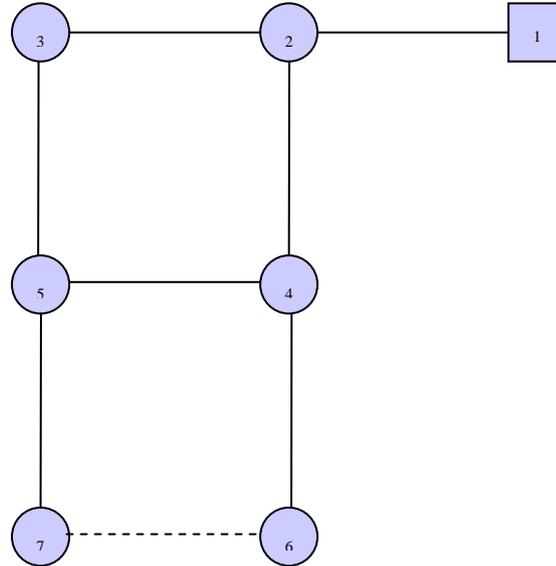


Figure : Représentation graphique du réseau à deux mailles

Tableau 2 : Résultats de l'optimisation Complète

Conduite	Nœud de début	Nœud de Fin	Longueur Totale de l'assemblage (m)	Débit (m ³ /h)	Diamètre (in.)	Longueur (m)
1	1	2	1000,00	1120,00	20	256,00
					18	744,00
2	2	3	1000,00	177,00	10	1000,00
3	2	4	1000,00	843,00	18	1000,00
4	4	5	1000,00	121,39	8	319,38
					6	680,62
5	4	6	1000,00	601,60	16	1000,00
6	6	7	1000,00	271,60	12	784,94
					10	215,06
7	3	5	1000,00	77,00	6	1000,00
8	5	7	1000,00	71,61	6	990,93
					4	9,07

Le coût total de la solution optimale obtenu est de 488559 unités monétaires.

On constate que le résultat de la première partie est conforme à la norme et aux résultats obtenus précédemment. Le résultat de la deuxième partie est aussi satisfaisant en comparaison avec ceux des études faites auparavant [11]. Surtout si l'on sait que la procédure développée dans cette étude est complète et permet l'optimisation du coût total de la conception à partir de la simple connaissance des données topologiques des nœuds (sources et de demande). Le réseau obtenu est alors apte à être utilisé. Le concepteur pourrait alors apprécier les valeurs obtenues. Il peut ainsi, les retenir ou bien

encore les modifier, mais dans ce cas là l'analyse du réseau est de rigueur afin de vérifier la conformité des résultats par rapport aux normes. L'attention est attirée sur les petites longueurs dans les assemblages qui correspondent généralement à de faibles diamètres passibles de n'avoir aucune signification pratique, et qui peuvent, par conséquent être éliminées.

4 Conclusion

L'objectif principal du présent travail était de concevoir des réseaux maillés et de moindre coût, dans un souci à la fois d'économie sur le coût total, et de fiabilité du réseau et disponibilité du produit desservi. On a proposé une méthode heuristique conçue d'une manière simple et qui répond aux exigences imposées. Elle est faite en deux étapes principales, la minimisation de la longueur totale du réseau et l'optimisation du choix du diamètre.

La conception de réseaux de distribution est, en général, une tâche très difficile. Une méthode d'optimisation est donc préférée à l'utilisation de procédure basée sur le tâtonnement.

Les résultats obtenus par le programme développé dans ce travail, comparés à ceux déjà publiés, sont très satisfaisants. Le réseau obtenu est complètement maillé, et le coût obtenu est optimal et ayant un sens hydraulique satisfaisant.

Sachant que la condition nécessaire pour qu'un réseau soit maillé, est que tous les nœuds aient au moins deux connexions aux branches, le programme développé réalise cette condition et laisse libre choix à l'utilisateur du nombre de connexions pour les nœuds de demande afin de rendre possible la construction de chemins multiples.

5 Références

- [1] Walters, G. A. & Lohbeck, T. "Optimal Layout of Tree Networks Using Genetic Algorithms", *Eng. Opt.*, 22, 27-48, 1993
- [2] Walters, G. A. & Smith, D. K. "Evolutionary Design Algorithm for Optimal Layout of Tree Networks", *Eng. Opt.* 24, 261-281, 1995
- [3] Rothfarb et al "Optimal Design of Offshore Natural-Gas Pipeline Systems", 18, 992-1020, 1970
- [4] Davidson, J. & Goulter, I. "Heuristic For Layout Design of Rural Gas Systems", *J. of Computing in Civil Engineering*, 5, 3, 315-332, 1991
- [5] Davidson, J. & Goulter, I. "Rule-Based Design of layout of Rural Natural Gas Networks", *J. of Computing in Civil Engineering*, 5, 3, 300-314, 1991
- [6] Morgan, D. R. & Goulter, I. C. "Least Cost Design of Looped Water Distribution Systems", 1982 International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Univ. of Kentucky, 2729 July, 1982
- [7] Loganathan, G. V., Sherali, H. D. & Shah, M. P. "A Two-phase Network Design Heuristic For Minimum Cost Water Distribution Systems Under a Reliability Constraint", *Eng. Opt.*, 15, 311-336, 1990
- [8] M. H. Afshar et E. Jabbari, "simultaneous layout and pipe size optimization of pipe networks using genetic algorithm", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33, 2B **409**, 2008
- [9] M. H. Afshar, "Evaluation of Selection Algorithms for Simultaneous Layout and Pipe Size Optimization of Water Distribution Networks", *Scientia Iranica*, 14, 1, pp 23-32, 2007
- [10] Lahiouel, Y., Chaoui K., Khezzar L., Haddad A. & Azari Z., "Optimization of water distribution networks design by minimizing the total length", *Eng. Trans.*, 53, 2, 165-183, 2005-10-29
- [11] Savic D. A. & Walters G. A., "Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks", *J. of water Resour. Planning and Management*, 123, 2, 67-77, 1997
- [12] Faure R., "Précis de recherche opérationnelle, Edition Dunod
- [13] Prim R. C., "Shortest connection networks and some generalizations, *Bell system technical Journal*, 36, 1389-1401, 1957