



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministères De l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT HYDRAULIQUE

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du titre d'ingénieur d'état en hydraulique

Présenté par

GUESMIA Ayoub

**MODELISATION D'UN RESEAU DE
DISTRIBUTION D'EAU POTABLE EN
MODULATION DE PRESSION**

(Application à l'étage Kouba 97-Hussein Dey)

Proposé par :

M. D. DUCCINI

dirigé par :

M. S. BENZIADA

M. D. DUCCINI

M. J.J. MARSALY

Promotion : juin 2008

ENP 10, Avenue Hassen Badi, BP.186 EL HARRACH, ALGER

إهداء

لك الحمد ربي على عظيم فضلك و كثير عطائك

انه لا يسعني في هذه اللحظات التي لعلي لا أملك أعلى منها أن أهدي ثمرة هذا العمل

المتواضع إلى:

❖ فضاء المحبة و بحر الحنان، ريحانة الدنيا و بهجتها: أمي الغالية حفظها الله.

❖ الذي علمني أن الحياة كفاح و نضال: أبي العزيز حفظه الله.

❖ الأعمدة التي أظل ارتكز عليها للصمود، إخوتي: إسماعيل, رضوان, عادل.

❖ الزهرة الفتية و المبتهجة، أختي العزيزة: إيـمان

❖ المعادلة التي ترسم منحنى حياتي: أصدقائي: فريد , عقبة , بوعلام , أكرم ,

ناجي, نزيـم.

❖ من قضى زهرة شبابه في محراب العلم المقدس.

❖ من حمل هذه الرسالة و تصفح أوراقها بعدي.

Remerciements

Je remercie Allah de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur S. BENZIADA, enseignant à l'Ecole National Polytechnique, à Monsieur D. DUCCINI, ancien directeur de la direction de distribution de la SEAAL, et à Monsieur J.J. MARSALY, directeur technique de la SEAAL, de m'avoir confié ce sujet et de l'aide précieuse qu'ils m'ont toujours apporté jusqu'à l'achèvement de ce travail. Leurs insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour son aboutissement. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères reconnaissances.

J'adresse mes vifs remerciements à M^{lle} S. BENMAMAR, Docteur de l'Ecole National Polytechnique, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Monsieur BERKANI, Monsieur NEBACHE et Monsieur MESSAHLI, d'avoir toujours été agréables avec moi et d'avoir bien voulu examiner mon projet de fin d'études.

C'est avec un énorme plaisir que je formule ma gratitude, et mes remerciements à Monsieur le professeur DECHEMI, pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté.

Monsieur Fodil TOUAZI, directeur du centre de distribution d'Alger Centre, mérite mes reconnaissances ainsi que mon respect le plus grand pour tout ce qui a pu me fournir comme information, et qui a toujours fait en sorte que je ne manquais de rien pendant mon stage.

Monsieur BOUNOUH, NAFAA, MAHFOUDI, ainsi que M^{lle} IMANE m'ont été d'un apport et d'une utilité remarquable et que je ne remercierai jamais assez.

Grand merci aussi à Monsieur Lounis LIAZID et ses collègues du bureau d'étude SOGREAH sans lequel je n'aurai jamais pu mener à bien mon projet.

Merci aussi à mes deux collègues Mr Amine LOUNES et Mr Boualem RICHA avec lesquels j'ai effectué mon stage, et que je n'oublierai jamais.

A tous mes professeurs du département hydraulique.

Je remercie mes parents de m'avoir donné la vie, de m'avoir élevé, instruit, pour tout leurs sacrifices, ... Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne suffire pour vous dire MERCI.

ملخص

عانت الجزائر العاصمة من سوء تسيير الموارد المائية الصالحة للشرب. و من أجل تحسين شبكة توزيع المياه، أنشئت مؤسسة سيال لمهام من أهمها تلبية حاجيات العاصمة المائية خلال 24/24 ساعة. للعلم فإن شبكة توزيع المياه للعاصمة قديمة جدا وعملها المستمر يؤدي إلى تسربات كبيرة للماء بسبب ارتفاع ضغطه ليلا. الحل المقترح هو تعديل الضغط. يتمحور عملنا هذا في تنميط أحد طوابق التوزيع (حسين داي- القبة 97) التي أجريت فيها عملية التعديل، وهذا من أجل معرفة سلوك الشبكة بعد إجراء هذه العملية، وكذلك جلب تحاليل تقنية.

كلمات مفاتيح: شبكة, نميط, تعديل, *EPANET*.

Résumé

Alger à souffert d'un mauvais service de l'eau. La société SEAAL a été créée pour en fournir un bon service. Parmi ses missions est l'alimentation continue (*H 24*) de la ville d'Alger. Le réseau d'Alger est très ancien et une alimentation continue rend les fuites très importantes à cause des fortes pressions de nuit. La solution envisagée est la modulation de la pression. Notre travail consiste à faire une modélisation, à l'aide du logiciel *EPANET*, de l'un des étages de distribution dont la modulation est en marche. Et cela pour voir le comportement du réseau après la mise en marche de la modulation et apporter des analyses en terme technique.

Mots clés : Réseau, modélisation, *EPANET*, Modulation.

Abstract

Algiers with suffered from a bad service of water. Company SEAAL was created to provide a good service of it. Among its missions is the food continues (*H 24*) town of Algiers. The network of Algiers is very old and a continuous food makes the escapes very significant because of the strong pressures of night. The solution considered is the modulation of the pressure. Our work consists in making a modeling, using the software *EPANET*, one of the stages of distribution whose modulation is moving. And that to see the behavior of the network after the starting of the modulation and to bring analyses in technical term.

Key words: Network, Modeling, *EPANET*, Modulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre I

LES RESEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

INTRODUCTION	4
1. L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE	4
1.1 Fonctions de l'alimentation en eau potable	5
2. RESEAUX DE DISTRIBUTION	6
2.1 Structure générale d'un réseau de distribution	6
2.2 Méthodes de distribution	9
2.3 Topologie des réseaux de distribution	11
3. GESTION DES RESEAUX D'AEP	12
3.1 Connaissance de l'existant	12
3.2 Informations relatives au fonctionnement du réseau	13
3.3 Entretien du réseau	14
4. SECURITE DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE	19
4.1 Mesures de protection et de sécurisation	19
CONCLUSION	20

Chapitre II

PROBLEMATIQUE DU PASSAGE EN ALIMENTATION CONTINUE

INTRODUCTION	21
1. PRESENTATION GENERALE DU RESEAU DE LA VILLE D'ALGER	21
1.1 Adduction	21
1.2 Distribution	22
2. PROBLEMATIQUE DU PASSAGE EN ALIMENTATION CONTINUE	22
2.1 Les pertes d'eau	23
2.2 Effets des fortes pressions	24
3. RECOURS A LA MODULATION	31
4. POUR QUOI LA MODULATION	33
CONCLUSION	34

Chapitre III

MODULATION DE LA PRESSION

INTRODUCTION	35
1. MODULATION ET PERTES D'EAU	35
2. MODULATION DE LA PRESSION D'ENTREE DU RESEAU SUIVANT LA DEMANDE	36
3. PROCEDURE DE MODULATION D'UN ETAGE DE DISTRIBUTION	47
a. Investigation	47
b. Délimitation de la zone	47
c. Identification des travaux	48
d. L'information	48
CONCLUSION	48

Chapitre IV

MODELISATION DE L'ETAGE KOUBA 97

INTRODUCTION	49
1. LA MODELISATION HYDRAULIQUE D'UN RESEAU D'AEP	49
a. <i>Modèle pour le dimensionnement du réseau</i>	50
b. <i>Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic</i>	50
c. <i>Modèle pour la gestion du réseau</i>	50
d. <i>Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau</i>	50
1.1 <i>Précision du modèle et représentation du réseau d'AEP</i>	51
2. PRESENTATION DU LOGICIEL EPANET	51
2.1 <i>Historique</i>	51
2.2 <i>Capacités pour la modélisation hydraulique</i>	51
2.3 <i>Capacités pour la modélisation de la qualité de l'eau</i>	52
3. PRESENTATION DE L'ETAGE KOUBA 97	52
4. ELABORATION DU MODELE	54
4.1 <i>Rugosité des conduites</i>	55
4.2 <i>Le réservoir</i>	55
4.3 <i>Demandes aux nœuds</i>	56
4.4 <i>Prise en considération des fuites</i>	61
5. UNE PREMIERE SIMULATION (SITUATION AVANT LA MODULATION)	62
6. PASSAGE A LA MODULATION	64
6.1 <i>Investigation (campagne de mesures)</i>	64
6.2 <i>Fermeture de la frontière</i>	70
6.3 <i>Les vannes de régulation</i>	71
7. SITUATION APRES LA MODULATION	73
7.1 <i>Profils de régulation</i>	73
7.2 <i>La régulation dans EPANET</i>	74
8. CALAGE DU MODELE.....	77
8.1 <i>Points de mesures</i>	78
8.2 <i>Situation initiale</i>	78
8.3 <i>Calibrage du modèle</i>	81
9. VALIDATION DU MODELE.....	87
9.1 <i>Validation en débit</i>	88
9.2 <i>Validation en pression</i>	90
CONCLUSION.....	92
CONCLUSION GENERALE	93
ANNEXE 1.....	95
ANNEXE 2.....	107
ANNEXE 3.....	115
ANNEXE 4.....	118

Introduction générale

Une bonne formation d'ingénieur doit toujours être finalisée par un stage de fin d'études qui a pour but la concrétisation des acquis pédagogiques dispensés lors de tout le cursus. Ce stage de plus de deux mois, que nous avons effectué au sein de l'Entreprise de l'Eau et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL), représente une première expérience professionnelle de référence pour un futur ingénieur.

Issue de l'initiative des pouvoirs publics, relayée par les apports constitutifs et exclusifs de l'ADE (Algérienne Des Eaux) et de l'ONA (Office National d'Assainissement), la création de la filiale SEAAL, qui a eu lieu le premier mars 2006, en la forme d'une société par action, est, sans conteste, un événement majeur pour l'assainissement, la production et la distribution de l'eau dans la wilaya d'Alger et indirectement pour toute l'Algérie. En effet, depuis avril 2006, le produit d'un partenariat entre ADE/ONA et Suez Environnement est opérationnel. Ce produit-instrument, en l'occurrence SEAAL, bénéficie d'une contribution significative du trésor algérien par l'allocation d'un budget d'exploitation et d'investissement de l'ordre de 60 milliards de dinars. Il bénéficie également d'une capitalisation projetée en faveur des personnels de l'ONA et de l'ADE mis à disposition, d'un transfert de savoir – faire de Suez Environnement. C'est à dire que SEAAL – SPA est déjà inscrite dans un processus « d'émergence » qui réunit toutes les conditions de succès de la première expérience de la gestion déléguée des services publics de l'eau et de l'assainissement.

Parmi les buts pour les quels la SEAAL a été créée, est d'assurer un bon service d'alimentation en eau potable (le **H 24**). Dès le début de ça mission, SEAAL a été confrontée à plusieurs problèmes qui se posent en plusieurs points : Une démographie galopante, une urbanisation mal contrôlée, un réseau vétuste, qui fuie et pour partie mal connu, une gestion administrative laborieuse et une consommation incontrôlée.

Si nous imaginons un passage direct à une alimentation continue (**H 24**) d'un tel réseau, dans une telle situation, nous serons sur le point d'alimenter les fuites pendant les heures creuses, moments où les pressions deviennent trop importantes. Donc nous gaspillerons de l'eau en grandes quantités. Ce qui contredit les objectifs que s'est fixée la société. Ce type de problèmes est majeur pour toute la chaine côtière d'Alger allant d'Hussein Dey jusqu'à Bologhine.

La solution stratégique, comme nous allons le voir à travers les chapitre qui suivent, et de faire une régulation de la pression en fonction de la demande, donc de moduler la pression, sur les zone à difficultés.

Le travail qui nous a été proposé intitulé « **Modélisation d'un réseau de distribution d'eau potable en modulation de pression** ». Il s'agit de faire la modélisation d'un des étages de distribution (Kouba 97 – Hussein Dey) à pression modulée. Afin de simuler le comportement du réseau après l'établissement du projet de modulation. Et ensuite, pouvoir apporter des analyses en termes techniques.

Dans un premier temps (chapitre I), il est nécessaire d'appréhender le métier de la distribution de l'eau potable, et tout particulièrement les éléments concernant l'infrastructure et la gestion technique de tels réseaux. C'est pourquoi, le premier chapitre s'attachera à présenter les éléments constituant un réseau d'AEP, les enjeux associés à la gestion de tels réseaux.

Au chapitre II, nous présenterons la problématique du passage en alimentation continue, en passant par une brève présentation du réseau d'Alger, et des problèmes de fuites et de pertes sur les réseaux de distribution en général.

Le chapitre III, traite de la technique de modulation de la pression et illustre à travers des exemples, les résultats obtenues par la modulation dans le monde. Et enfin, la méthodologie ou la procédure pour moduler un étage de distribution.

Dans le chapitre IV, la modélisation qui est le fruit du sujet sera abordée. Pour cela il nécessaire de donner quelques généralités sur la modélisation, ensuite nous présentons l'étage concerné par l'étude (Kouba 79). Et au cours de route nous détaillerons toutes les étapes que nous avons suivis pour modélisé l'étage K 79. À la fin de ce chapitre, le calage et la validation du modèle seront présentés. Et nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Les réseaux de distribution d'eau potable

Introduction

Il s'agit à travers ce chapitre de décrire le fonctionnement hydraulique du réseau. L'acheminement de l'eau vers les usagers doit se faire en qualité et quantité satisfaisante. L'alimentation en eau dépend de la nature de l'utilisateur : domestique, commerce, industriel et administratifs. La consommation est variable selon les jours de la semaine et les heures de la journée. Il existe des périodes de pointe dans la journée qui correspondent à une demande maximale en eau. Nous distinguons aussi le jour de pointe dans l'année qui correspond à une consommation maximale. Il est clair que le dimensionnement d'un réseau d'alimentation en eau potable dépend bien de tous ces paramètres.

1. L'alimentation en eau potable

L'Alimentation en Eau Potable comprend l'ensemble des opérations d'approvisionnement de la population en eau potable, depuis le prélèvement du milieu naturel jusqu'à l'utilisateur. Elle cherche à répondre à deux objectifs [Nafi 2006] :

- Production d'une eau de qualité, à partir d'une eau brute qui nécessite généralement un traitement ;
- La distribution de l'eau produite, à travers un ensemble d'installations et de réseaux afin de répondre à la demande des consommateurs de manière satisfaisante (taux de service).

1.1 Fonctions de l'alimentation en eau potable

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

La figure suivante présente les différents éléments constituant une adduction en eau potable :

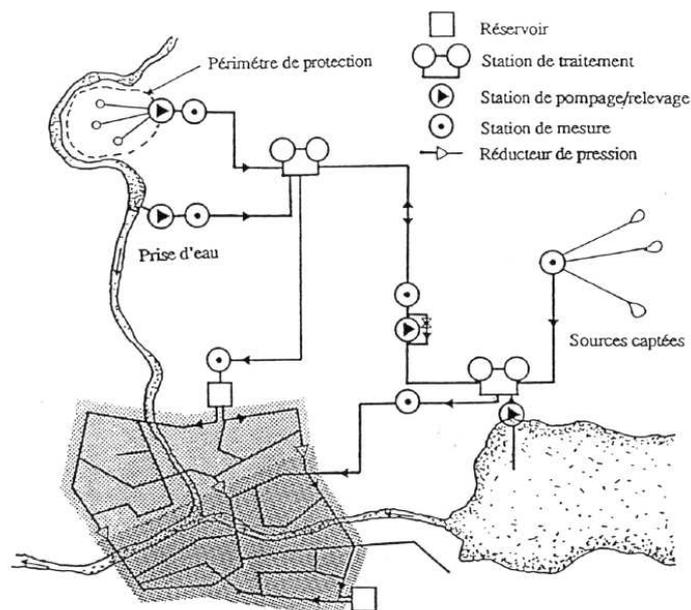


Figure I.1 : *Eléments d'un réseau d'adduction d'eau potable*

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la phase de distribution, c'est pour cela que tout ce qui suit concerne principalement la distribution.

2. Réseaux de distribution

Nous considérons la partie du réseau permettant d'acheminer l'eau des zones de stockage vers les abonnés. Nous distinguons plusieurs types d'abonnés en fonction de la raison sociale : domestiques, commerciaux, industriel, administratifs...

La distribution de l'eau s'effectue à l'aide de réseaux enterrés constitués de conduites et de canalisations sous pression qui comprennent :

- Des conduites et pièces spéciales ;
- Des appareils de robinetterie : vannes, clapets,... ;
- Des appareils de mesure : compteurs, débitmètres,... ;
- Des appareils de fontainerie : bouchent d'incendie,...

Les zones de stockage comprennent généralement des réservoirs à grande capacité, la liaison entre les abonnés est assurée à l'aide des conduites. La jonction entre conduites constitue des nœuds. L'écoulement de l'eau s'accompagne d'une perte d'énergie en raison des frottements avec les parois internes des conduites et des organes hydrauliques que comporte le réseau. Cette dissipation d'énergie est traduite par le phénomène de perte de charge, qui joue un rôle principale dans le critère de pression pour tous les calculs des réseaux.

2.1 Structure générale d'un réseau de distribution

La structure du réseau AEP dépend de la localisation des abonnés, de leur importance et du niveau de demande à assurer. La structure traduit les dimensions des conduites, la capacité des réservoirs, le nombre de pompes et la puissance fournie. Elle tient compte d'éléments géographiques tels que : la dispersion des abonnés, la présence d'obstacles naturels, la présence de routes, chemin de fer, jardins, d'autres réseaux enterrés. Tous ces éléments vont permettre au service de l'eau de définir des caractéristiques propres à chaque composant du réseau afin d'assurer son bon fonctionnement [Nafi 2006].

2.1.1 Conduites

Les conduites permettent l'acheminement de l'eau d'un point du réseau à un autre. En fonction de la situation urbaine et de l'importance du quartier nous distinguons trois types de conduites :

2.1.1.1 Conduites principales (les artères)

Les artères, représentent les conduites qui partent du réservoir soit de la station du pompage (SP) afin de distribuer l'eau dans tous les points du réseau par le plus court chemin. Les artères doivent être posées de telle façon qu'elles puissent alimenter le secteur et disposer, si c'est possible, des diamètres économiques et d'obtenir des pressions uniformément distribuées.

2.1.1.2 Conduites secondaires (conduites de service)

Le diamètre varie entre 250 – 150 mm, sont alimentées par les artères et distribuent l'eau vers les branchements.

2.1.1.3 Conduites de distribution principales (Les branchements)

C'est la partie de l'installation située entre les conduites de service et le compteur ou robinet vanne d'arrêt lorsque le branchement ne comporte pas de compteur (service incendie notamment). Le diamètre du branchement est déterminé en fonction des débits de pointe et des consommations journalières prévisibles.

Une autre distinction peut être effectuée en se basant sur la nature du matériau constituant la conduite dont ils présentent des caractéristiques physiques et mécaniques distinctes. Le Tableau suivant présente certains types de conduite [Nafi 2006] :

<i>Matériau</i>	<i>Résistance mécanique</i>	<i>Résistance à la corrosion</i>
Béton	importante	importante
Fibres ciment	Interdit comporte de l'amiante	
Matières Plastiques (<i>PVC, PEHD, PRV</i>)	faible	importante
Acier	importante	faible
Fonte grise	faible	importante
Fonte ductile	importante	Importante

Tableau I.1 : Matériaux et caractéristiques des conduites

2.1.2 Point de livraison

Le point de livraison est l'emplacement où est délivrée l'eau potable à l'abonné, il est situé au raccord aval du compteur.

2.1.3 Secteur de distribution

Le secteur de distribution est constitué d'un ensemble de canalisations de distribution et de branchements dont le volume mis en distribution est mesuré en permanence.

Pour des raisons de commodités techniques, de gestion, de topographie ou de géographie, un réseau de distribution peut être divisé de façon permanente en zones indépendantes (bien qu'elles puissent dans certains cas se secourir mutuellement) dont chacune est alimentée en un ou plusieurs points et où l'introduction de l'eau (et la sortie vers une autre zone) est maîtrisée (comptée, régulée) de façon constante. Ce sont des zones qui sont dénommées secteurs de distribution. Ils sont déterminés par l'étude de sectorisation du réseau.

Les zones à étage de pression différente ne constituent pas forcément des secteurs de distribution différents.

2.1.4 Sous secteur de distribution

Un sous-secteur de distribution est un sous ensemble de secteur(s) que l'on peut isoler à un instant donné.

Pour des raisons conjoncturelles de diagnostic de l'état d'un réseau ou de recherche de fuites par exemple, un secteur de distribution peut être subdivisé à un instant donné en sous ensembles dont on pourra temporairement maîtriser l'alimentation pendant les opérations de mesures. Un sous secteur peut quelquefois être constitué à partir de plusieurs secteurs.

Dans les chapitres qui suivent, nous voyons l'utilité de ce point.

2.2 Méthodes de distribution

Il existe plusieurs façons de réaliser l'alimentation du réseau, dont voici les principales :

2.2.1 Distribution gravitaire

Nous pouvons concevoir un système de distribution d'eau par gravité lorsque la source d'eau est située à une altitude supérieure à celle de l'agglomération à desservir. Un tel système est bien sûr idéal, puisqu'il n'est dépendant d'aucun poste de surpression pour assurer l'approvisionnement en eau en quantité suffisante et à une pression appropriée : aucune dépense d'énergie n'est donc imputable au pompage, et la qualité du service n'est pas tributaire du bon fonctionnement d'un ou plusieurs postes de surpression.

Cependant, si la dénivellation permet d'assurer une pression suffisante au cours des périodes de consommation habituelles, cela n'est nécessairement pas vrai en cas d'incendie ; nous devons alors utiliser des pompes d'urgence.

Par contre, nous pouvons être confrontés à de fortes pressions au niveau des points bas par rapport au réservoir. Dans ce cas, nous devons prévoir un moyen pour briser la charge qui pourrait, d'une part occasionner des dégâts majeurs au niveau des canalisations (bris), et d'autre part être la cause de fuites dans le réseau. L'installation de vannes de régulation est à prévoir dans ce cas.

2.2.2 Pompage combiné

Nous devons toutefois le plus souvent recourir à des postes de surpression et à des réservoirs répartis dans l'ensemble du réseau pour assurer un service satisfaisant. En périodes de forte consommation les réservoirs servent ainsi à combler la différence entre la demande en eau et la capacité de production de la station de purification. Nous les sollicitons également pour fournir soit, l'eau nécessaire à l'extinction des incendies soit, l'eau de consommation elle-même lors de la mise hors service de la station de purification (réparation, ...) ou lors du bris d'une conduite (principale ou secondaire). Enfin, c'est grâce à l'ensemble des réservoirs et des postes de surpression que nous pouvons maintenir des pressions satisfaisantes en tout temps dans l'ensemble du réseau. Au cours des périodes de faible consommation (le plus

souvent, la nuit), nous procédons au remplissage des réservoirs, et les postes de surpression seuls assurent les pressions souhaitées dans l'ensemble du réseau.

De tels systèmes offrent les nombreux avantages suivants :

- faible variation de la pression, notamment en périodes de forte consommation (puisque l'eau provient de plusieurs sources) ;
- Réserves d'eau en cas d'incendies ;
- Débits de pompage relativement uniforme (ce qui permet de faire fonctionner les pompes à leur régime optimal) ;
- Approvisionnement par gravité d'au moins une partie de l'eau de consommation en cas de pannes à la station de purification.

2.2.3 Pompage direct

Dans ce cas, l'approvisionnement en eau de consommation est entièrement dû à des postes de surpression. Pour satisfaire adéquatement à une demande en eau qui peut être forte variable (par exemple, au cours de la journée), nous concevons les postes de surpression de façon à ce qu'ils fonctionnent avec beaucoup de souplesse : plusieurs pompes de capacités diverses, pompes à vitesses variables, pompes couplées à des moteurs à essence.

De tels systèmes présentent cependant les nombreux inconvénients suivants :

- il faut en générale prévoir plusieurs postes de surpression, dont les coûts de construction et d'utilisation sont élevés ;
- aucune réserve ne permet d'assurer l'approvisionnement en eau, ne serait – ce qu'en cas de panne ;
- de fortes fluctuations de la pression associées aux variations de consommation peuvent survenir si le nombre de postes de surpression est limité ;
- même pour une consommation constante, il existe de grandes variations de pression dans le réseau si le nombre de postes de surpression est limité ;

- les nombreux bris de conduites imputables aux variations importantes et fréquentes de la pression sont responsables de plusieurs fuites d'eau.

2.3 Topologie des réseaux de distribution

La topologie du réseau est la représentation schématique de ses différents éléments constitutifs, et de leurs liaisons. La disposition des nœuds et des conduites dépend de la localisation des abonnés, présence de routes, obstacles naturels, présence d'autres réseaux. En termes de topologie, nous distinguons :

2.3.1 Les réseaux ramifiés

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

2.3.2 Les réseaux maillés

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

2.3.3 Réseaux étagés

Lorsque le secteur à alimenter s'étend sur une dénivellation trop importante, l'alimentation à partir d'un seul réservoir peut être à l'origine de pressions trop élevées en bas du réseau. Des réservoirs intermédiaires doivent alors être intercalés, ce qui permet de diviser le réseau en sous-réseaux d'une dénivellation satisfaisante. Ces réservoirs peuvent être alimentés par la même source, avoir leur propre alimentation, ou même être reliés entre eux. Le réseau étagé peut, en effet, être maillé ou ramifié.

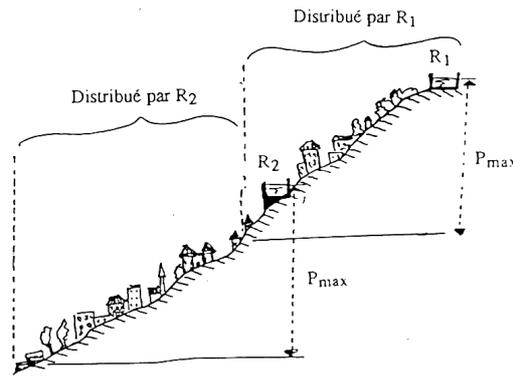


Figure I.2 : Réseau étagé

3. Gestion des réseaux d'AEP

C'est presque une évidence de dire que, pour bien gérer un système, il convient de bien le connaître. Cette évidence, loin d'être toujours respectée en matière de réseau, est cependant un critère impératif pour l'approche du renouvellement.

Cette connaissance doit être basée sur les trois points suivants [TSM n°11 bis, 1993] :

3.1 Connaissance de l'existant

Il est indispensable de bien connaître la position et le linéaire des différentes conduites du réseau, leur matériau, leur diamètre et leur âge, de même que la localisation et le type des différents appareils (mesures, protection du réseau, etc.). Cette connaissance doit être transposée sur des plans de réseau mis à jour régulièrement. Les plans sont habituellement de deux types :

1. Des plans généraux à échelle relativement petite entre 1/2000 et 1/1000 qui permettent d'avoir l'ensemble du réseau et facilitent la compréhension de son fonctionnement notamment lorsqu'il faut isoler un secteur.

C'est l'outil de base du fontainier (employé responsable de la production et de la distribution d'eau potable). De nombreux services possèdent ce type de plans, mais tous ne sont pas remis systématiquement à jour. Trop souvent, chaque agent reporte les modifications dont il a connaissance sur son propre plan sans faire remonter cette information. L'utilisation des « Systèmes d'Information Géographiques » (SIG), lorsqu'ils sont adaptés aux besoins des utilisateurs, faciliteraient cette tâche. Sur ces plans doivent figurer :

- tous les équipements et appareils liés au fonctionnement du réseau (réservoirs, vannes des sectionnements, appareils de régulation,...) ;
 - le diamètre et le matériau des conduites ;
 - quelques côtes altimétriques du terrain ;
2. Des plans précis à grande échelle (au 1/200, 1/500), définis par rue, sur lesquels figureront :
- l'emplacement des branchements et la triangulation des robinets de prise en charge ;
 - le positionnement exact du réseau (en 3D) et de ces appareils annoncés (appelés à vidanges et ventouses) ;
 - la position des réseaux voisins ;
 - le matériau, le diamètre et l'âge de la conduite et des branchements.

Les éléments indiqués ci-dessus ne sont pas exhaustifs. L'utilisation de l'informatique notamment, permet aujourd'hui de prendre en compte de nombreux paramètres supplémentaires et d'utiliser facilement les sémiologies (forme et couleur) numériques.

3.2 Informations relatives au fonctionnement du réseau

Il s'agit là d'un aspect de la connaissance moins habituel que le précédent mais certainement, tout aussi important et en outre très complémentaire.

Dés qu'il atteint une certaine importance soit $100000 m^3$ mis en distribution par an, par exemple, le réseau doit être organisé en secteur de distribution [LAMANDE et al. 2002] et il est impératif de bien connaître les différentes catégories de volumes pour l'ensemble du réseau et pour chacun des secteurs, notamment :

- le volume mis en distribution annuellement ;
- les volumes comptabilisés pendant la même période ;
- les divers volumes non comptabilisés (les pertes d'eau, le volume consommé pour les incendies ...)

- les paramètres hydrauliques de chaque tronçon.

A partir de ces différentes catégories de données et des caractéristiques du réseau, seront calculés les rendements (R) et indices habituels, comme les rendements primaires (R_p) et nets (R_n), les indices linéaires de pertes (ILP) en distribution ou en réparation [TSM n°4bis, 1990] [DEMASSUE, 1996].

Avec :

$$R_p = \frac{\text{Volume comptabilisé } (V_c)}{\text{Volume mis en distribution } (V_d)} \quad (1.1)$$

$$R_n = \frac{V_c + \text{Volume autorisé non compté } (V_{ancp})}{V_d} \quad (1.2)$$

$$ILP = \frac{(V_d - V_c)}{\text{Longueur totale du réseau}} \quad (1.3)$$

Il peut également être intéressant d'avoir une idée des principales lignes piézométriques à différentes périodes, de connaître l'évolution des caractéristiques de l'eau, de même que de réaliser périodiquement des analyses de débit sur les compteurs des différents secteurs de distribution.

3.3 Entretien du réseau

Quels qu'aient pu être les précautions apportées à l'exécution des chantiers et dans la gestion de la distribution, des ruptures et des fuites peuvent se produire. Ces phénomènes sont symptomatiques du vieillissement du réseau. C'est alors que nous déclenchons l'opération classique d'entretien curatif. Celle-ci nécessite d'abord une localisation de la fuite. Nous fouillons dans la zone où l'eau vient en surface, puis nous effectuons la réparation avec les moyens techniques disponibles (montage de joints lorsque cela est possible, mise en place de colliers de réparations des joints, pose de manchons...). Une attention particulière doit être portée sur les risques de pollution au cours de ces opérations de réparation. Lors des fuites sur les vannes, les ventouses et les décharges, le choix est plus limité et nous procédons le plus souvent au remplacement systématique de l'appareil en cause.

D'autres actions peuvent également être entreprises. Elles résultent alors d'une attitude volontariste dans le domaine de la qualité de l'eau et dans le maintien des capacités hydrauliques du réseau. L'entretien préventif conduit à la lutte contre le vieillissement du réseau par des opérations de remplacement, ou par des opérations de réhabilitation des ouvrages.

Les procédures de réhabilitation sont destinées à remettre en état une conduite, dont certaines caractéristiques se sont dégradées, mais dont la qualité permet d'en continuer l'exploitation [HALPERN, 1985].

Le remplacement représente une pose d'une conduite nouvelle destinée à être substituée à un ouvrage ancien à abandonner.

Les procédés de réhabilitation ou de renouvellement sont très développés [JUDET, 1998]. La présence d'un organe de régulation nécessite la justification des travaux et des dépenses de renouvellement.

Mais aujourd'hui, Même s'ils existent de nombreux modernes technologies, ils ne sont jamais utilisables dans le domaine de l'eau potable car les réseaux "temporaires" qu'il faut mettre en place pour permettre la mise hors service des canalisations à réhabiliter coutent beaucoup plus cher que de renouveler directement le réseau. [Davide DUCCINI, 2008].

Pour comprendre l'évolution de l'état d'un réseau il faut pouvoir en analyser les faits marquants, notamment les réparations.

Afin de pouvoir effectuer cette analyse, il est impératif de recueillir sur le terrain les nombreuses indications disponibles lors d'une intervention et créer une fiche des interventions qui reprendra entre autre :

- les caractéristiques des conduites ;
- son « état général » ;
- les caractéristiques du remblai existant et de l'environnement de la conduite ;
- tous les éléments liés à l'intervention (durée, pièces utilisées ...).

Parallèlement, le fichier des appareils permettra de suivre le fonctionnement et l'entretien de ceux-ci.

Ces informations permettent de mettre à jour les différents plans présentés au § 4.1. De plus, le repérage des interventions sur ces mêmes plans conduit à identifier les secteurs à forte fréquence d'incidents [MALANDAIN, 1999] [LAMANDE et al, 2002]. Par une exploitation statistique de ces fichiers et des informations reportées sur les plans (des fiches des conduites pourront faciliter le traitement de ces informations) il deviendra alors possible d'effectuer des prévisions sur les risques de défaillances (désordres) pour chaque secteur.

3.3.1 Données relatives au réseau

La nature et l'origine des données sont différentes selon les services concernés par le réseau. Globalement, l'information relative au réseau conduira à la liste suivante :

- Secteur, nom de la rue et éventuellement le numéro du bâtiment ;
- Le diamètre des tronçons ;
- La longueur des tronçons ;
- Equipements de réseaux (vannes, des organes de régulation, ventouses, etc. ...) ;
- La date de pose ;
- Emplacement de la conduite par rapport à la chaussée (ce facteur caractérise le fait que la conduite se trouve sous la chaussée ou le trottoir) ;
- Emplacement par rapport aux autres réseaux (assainissement, rejets divers, ...) ;
- Conditions de pose et protection (ces données concernent la profondeur de la canalisation et son lit de pose) ;
- Le matériau de canalisation ;
- Ouvrages annexes (éléments des réservoirs, les stations de pompage ou de traitement d'eau dont les caractéristiques interviennent dans les calculs des réseaux) ;
- Dernière intervention (caractéristiques : opérations de recherches de fuites, travaux de nettoyages effectués, ...) ;

- Points des livraisons particuliers :
 - poteaux et bouches d'incendie ;
 - abonnés spéciaux (hôpitaux, installations de lutte contre l'incendie, etc. ...) ;
- Pressions (charge hydraulique)
 - la charge maximale autorisée ;
 - la charge prévue de service (valeur théorique) ;
 - la charge de sécurité ;
- Débits ;
- Nombre d'abonnés par unité de longueur:

Des données de consommation moyenne observée ou relevée sur les compteurs ou sur des points d'observation

- Date de dernier abonné ;
- Nature de l'eau :
- Les analyses contenant notamment le taux d'oxygène dissous, le pH et la conductivité de l'eau.
- Anomalies diverses:

Ceci concerne les informations de diverses origines correspondant à une anomalie de fonctionnement des installations :

- insuffisance ou excès de pression ;
- qualité de l'eau ;
- débit insuffisant soit trop d'eau ;
- vitesse hors limites.

- Date de passage à un nouveau matériau, ou de remplacement ou de réhabilitation. Cette date peut être importante car elle permettra de comparer les différents matériaux : fonte grise/fonte ductile, joint expresse, revêtement intérieur, revêtement extérieur ;
- La longueur remplacée ;
- Le sol et sa corrosivité ;
- Trafic automobile.

3.3.2 Les données concernant les défaillances et les interventions

La réparation des défaillances est l'occasion de renseigner certaines variables de détérioration (profondeur de pose, nature de sol, humidité du sol) ainsi que l'état de corrosion de la conduite.

Apparemment il n'existe aucune norme concernant la description des différents travaux d'entretien ou de réparation. C'est pourquoi il est parfois impossible de distinguer une réparation effectuée sur un tuyau ou sur un branchement ou de discerner la canalisation affectée, lorsque deux conduites existent sur une même rue, le diamètre n'étant pas toujours indiqué [Igor BLINDU, 2004].

En résumé, les fiches et les formulaires associés aux défaillances et aux observations des dysfonctionnements fournissent les renseignements suivants :

- la rue et le secteur où a eu lieu la défaillance (et éventuellement le numéro de rue ou l'emplacement de la défaillance) ;
- la date et l'heure de la défaillance ;
- le diamètre ;
- le type de réparation ;
- le temps d'intervention et personnel ;
- les outils, pièces et matériaux utilisés, la cause de la défaillance ;
- le coût de la réparation ou du remplacement.

4. Sécurité de l'alimentation en eau potable

Assurer la continuité et la fiabilité de la distribution d'eau potable aux populations, c'est la préoccupation que relèvent au quotidien les distributeurs d'eau. Les réseaux modernes sont en générale redondants, souvent interconnectés et permettent de limiter la porté des incendies, si bien que les défaillances passent généralement inaperçues pour le consommateur. Mais lorsque survient l'accident grave, c'est toute la population qui est directement menacée.

La vulnérabilité (ou sensibilité) d'un réseau d'alimentation en eau potable est fonction des ses composantes.

4.1 Mesures de protection et de sécurisation

a. disposition de protection physique

- Des fermetures de sécurité et des alarmes anti-intrusion doivent équiper tous les accès aux surfaces libres d'eau potable (réservoirs) ;
- Les branchements de distribution doivent être équipés de clapets anti-retour (normalement et obligatoirement pour les branchements industriels), afin d'éviter tout retour d'eau contaminée dans le réseau.

b. Solutions de secours

Un réseau de secours, distinct du réseau principal, peut permettre d'assurer l'alimentation de certains usagers prioritaires, tels que les hôpitaux (*un tel réseau existe à Zurich*), c'est un réseau alimenté gravitairement par des sources, il dessert les hôpitaux et les abris, et des bornes fontaines pouvant être équipées de robinets (1 robinet pour 1000 habitants).

Les dispositifs ou les solutions de secours ne doivent pas être établis pendant la crise, ils doivent exister effectivement en réserve et pouvoir être activés rapidement. [MESNY 1997].

Conclusion

Dans la pratique, et concernant la topologie des réseaux, un réseau de distribution prend, rarement, entièrement l'un des types cités (maillés, ramifiés), mais il est dans la plus part du temps mixte.

Tous ce que nous venons de voir, en termes de gestion et d'entretien du réseau, à travers ce chapitre, doit obligatoirement figurer dans la politique de chaque entreprise de l'eau, et par conséquent l'entreprise (SEAAL) dans la quelles nous effectuons notre stage, ce qui nous permettras l'établissement d'une bonne modélisation, basée sur des données représentant la réalité du réseaux.

Chapitre II

Problématique du passage en alimentation continue

Introduction

En essayant d'identifier les problèmes du passage à une alimentation continue de la ville d'Alger, nous devons, en premier lieu, passer par une brève présentation du réseau alimentant la ville, positionner les différents problèmes, de pression et de fuite, causés par ce passage et enfin justifier le choix de la solution envisagée (modulation de la pression) parmi toutes autres solutions existantes.

1. Présentation générale du réseau de la ville d'Alger

Adduction

La wilaya d'Alger compte quelques 3,5 millions d'habitants répartis sur 53 communes regroupées en 12 centres de gestion. L'alimentation en eau potable de cette population est assurée au moyen de trois sources, dont deux sont les principales : les eaux de surface et les eaux de nappes phréatiques, les eaux de dessalement représentent un pourcentage plus inférieur que les deux autres (25 % dans le futur).

En ce qui concerne les eaux de surface, Alger est actuellement alimentée par 6 barrages à savoir, HAMIZ, KEDDARA et BNI AMRANE qui sont collectés vers la station de traitement BOUDOUAOU, et GRHIB, BOUROUMI et BOUKERDANE, qui sont collectés vers la station de traitement SAA.

Des deux stations de traitement, BOUDOUAOU et SAA, l'eau est refoulée, en alimentant à son passage plusieurs régions (REGHAIA, BORDJ EL-BAHRI, AIN TAYA et BORDJ EL-KIFFAN, ... pour celle de BOUDOUAOU, et ZERALDA, STAOUELI, AIN BENIAN, DOUERA, ... pour celle de la SAA), vers le complexe d'EL-HARRACH à travers des conduites allant de 800 jusqu'à 1500 mm de diamètres.

Pour les eaux souterraines, l'approvisionnement se fait à partir de 215 forages répartis sur plusieurs champs de captage (H. FELIT, H. BEL-ABBES, 03 Caves, BARAKI, MAZAFRAN 1 et 2, ...). Une grande partie de ces eaux est mélangées avec celles des barrages et en suite distribuées.

Le complexe hydraulique d'EL-HARRACH contient plusieurs usines de pompage qui refoulent vers les deux réservoirs de Kouba (K 117 et K 97). Le réservoir Kouba 97 reçoit ces ressources d'une part, des usines 5 et 6 refoulant dans deux conduites de diamètres 1000 et 1500 mm et, d'autre part, de la station de dessalement d'EL-HAMMA.

Distribution

La distribution aux consommateurs est assurée par 200 réservoirs et un réseau maillé de canalisations de différents diamètres et matériaux représentant un linéaire de 4000 km environ sur un territoire de 750 km². cette distribution se fait en grande partie gravitairement, mais il existe quelques régions alimentées par piquage des conduites de refoulement vers les réservoirs.

L'ensemble du réseau d'Alger est divisé en quatre secteurs (centre, ouest, nord et sud) qui reçoivent environ 330.000 m³/j. soit presque la moitié de la ressource disponible (40 %).

2. Problématique du passage en alimentation continue

Pour l'ensemble des quatre secteurs cités, la pression de nuit moyenne, au point de cote moyenne, est de l'ordre de 80m. Ce chiffre est inexact, puisqu'il a été calculé sans tenir compte de l'importance relative des secteurs, ni des éventuelles pertes de charge de nuit. Mais l'excès de pression est évident.

Il semble que les réseaux historiques d'Alger aient été peu rénovés. D'après l'étude de la SEM (Société des Eaux de Marseille), les conduites y sont encore à 90% en fonte grise à joint plomb, et les branchements en plomb. Ces réseaux ont bien sûr été fragilisés par l'intermittence de l'alimentation (il y a trois ou quatre ans, le Centre d'Alger recevait l'eau un jour sur trois).

Des pressions aussi élevées entraînent sur des réseaux fragiles une augmentation importante de la fréquence des casses et du débit des fuites, tant sur le réseau de la ville que dans les installations intérieures.

Les responsables de la distribution d'Alger ont expérimenté l'effet négatif de l'excès de pression quand ils ont tenté d'alimenter en permanence certains quartiers du Centre Ville. Il leur a fallu sept mois pour résorber les fuites créées pendant leurs essais.

2.1 Les pertes d'eau

Nous entendons par pertes d'eau, toute eau distribuée non facturée :

- piquages illicites ;
- eaux sans compteurs ;
- facturations forfaitaires ;
- fuites sur réseaux.

Certaines des pertes sont apparentes : les consommations publiques ne sont pas souvent intégralement mesurées.

Le nettoyage des rues et des camions de voirie représente en général moins de 1 % du volume produit. Mais la consommation des bâtiments municipaux peut être significative, y compris à cause des fuites intérieures. L'arrosage des espaces verts et la consommation des fontaines publiques doivent aussi être contrôlés. La pose de compteurs doit être systématique [GWS].

Le passage en surverse des réservoirs est une source de perte importante. Nous devons installer des capteurs de mesure d'hauteur d'eau ou des compteurs sur les conduites de trop-plein.

Mais l'essentiel des pertes est dû aux fuites souterraines sur les réseaux, qui se répartissent en deux groupes :

- Des fuites en grand nombre, la plupart trop petites pour justifier le coût de leur détection et réparation (points de corrosion, fuites aux joints et aux raccords). Nous pourrions dire qu'elles constituent sur le réseau une sorte de « bruit de fond », ou d' « arrière-plan » des fuites importantes. Ces fuites, presque inexistantes sur les réseaux neufs de bonne qualité, peuvent représenter jusqu'à 6 m³/j/km de conduite sur les réseaux anciens ou fragiles [GWS].
- Un petit nombre de fuites importantes, qu'il faut réparer :

Beaucoup de ces dernières sortent assez rapidement en surface, ou perturbent suffisamment l'alimentation pour faire l'objet d'une détection et d'une réparation assez rapide. Le petit nombre qui reste souterrain représente des volumes perdus élevés, puisqu'elles peuvent couler indéfiniment [GWS].

De nouvelles fuites apparaissent constamment. La réduction des pertes est une activité qui se déploie dans le temps ; il faut pouvoir progresser dans certaines zones sans perdre les résultats déjà acquis ailleurs.

Le passage en alimentation continue augmente considérablement les volumes perdus, non seulement par ce que les fuites seront alimentées en permanence, mais leurs nombres et leurs débits augmentent à cause des fortes pressions. Chose remarquable sur le réseau d'Alger (Voir les résultats de la campagne de mesures avant la modulation au chapitre IV). Dans ce qui suit, nous allons traiter ce que les fortes pressions peuvent induire comme problèmes.

2.2 Effets des fortes pressions

2.2.1 Pression et pertes d'eau

De 1999 à 2003, l'UKWIR (organisme successeur du WRC) a étudié pour l'industrie de l'eau anglaise la relation entre pression et pertes d'eau.

L'étude a d'abord mis en évidence une relation nette entre le débit de nuit, dont les fuites sont la composante essentielle, et la pression de service. Les deux graphiques ci-dessous les comparent pour 125 secteurs de la Bristol Water et 805 de la Yorkshire Water.

Sur le premier graphique, le débit de nuit suit la pression de façon quasi linéaire : il passe de 3 l/h/branchement à 30 m de pression de nuit à 6,5 l/h/branchement à 70 m.

Sur le deuxième, la relation est plutôt à la racine carrée. Pour une augmentation de la pression d'un facteur de 2 (de 27 m à 52 m), le débit de nuit augmente d'un facteur de 1,5 (de 4,5 l/h/branchement à 7 l/h/branchement).

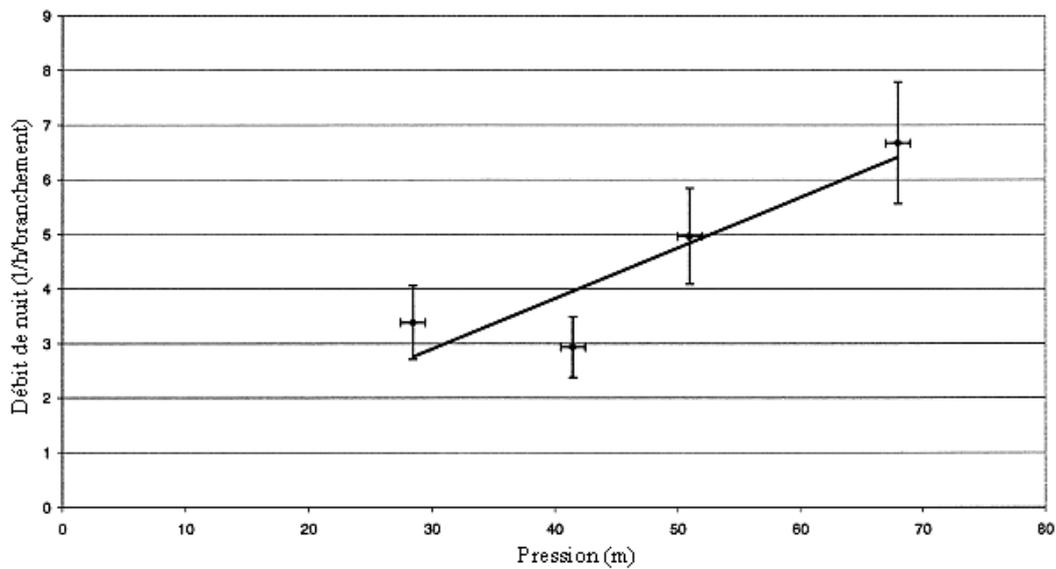


Figure II.1 : Relation entre débit de nuit et pression de service (pour 125 secteurs de la Bristol Water) [GWS].

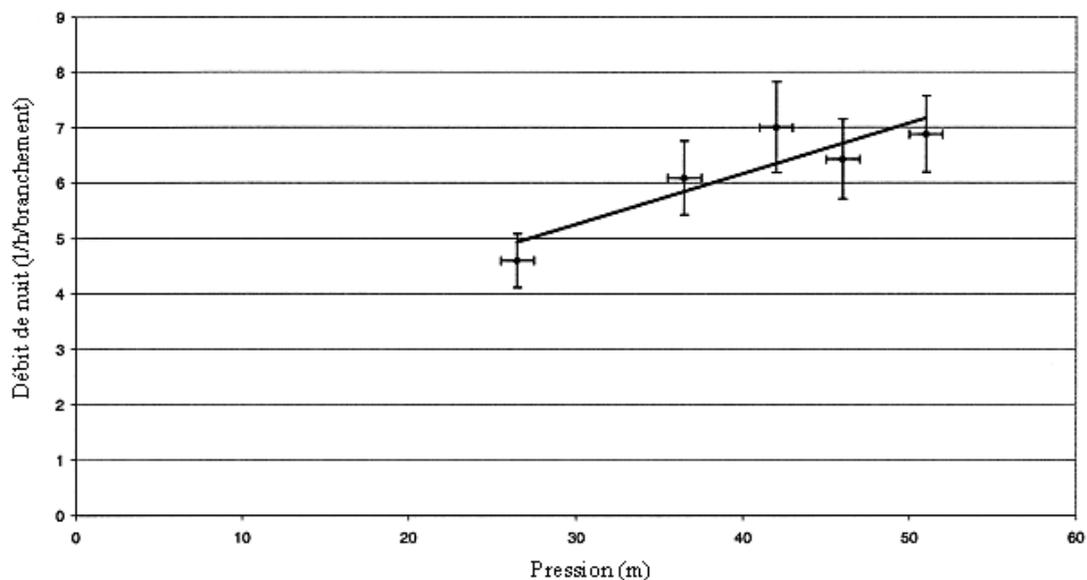


Figure II.2 : Relation entre débit de nuit et pression de service (pour 805 secteurs de la Yorkshire Water) [GWS].

L'UKWIR a aussi étudié le rythme d'augmentation « naturelle » des pertes en l'absence d'une politique active de recherche des fuites (En dehors de la réparation de celles venues en surface et du suivi des réclamations des abonnés pour manque de pression). Sur la base des données relevées sur 129 secteurs, l'étude a conclu que cette augmentation est faible sur les réseaux alimentés à une pression de nuit inférieure à 50 m, mais qu'elle est de 17 $m^3/branchement/an$ sur les réseaux alimentés à une pression supérieure.

La pression a clairement une incidence sur le débit des fuites et sur leur nombre, c'est-à-dire sur leur rythme d'apparition.

2.2.2 Pression et fréquence des casses

D'autres études ont indiqués une forte corrélation entre la pression de service de nuit et la fréquence des fuites réparées [GWS].

Le graphique ci-après indique le nombre de fuites réparées par an en fonction de la pression moyenne de nuit sur 750 secteurs de la Yorkshire Water.

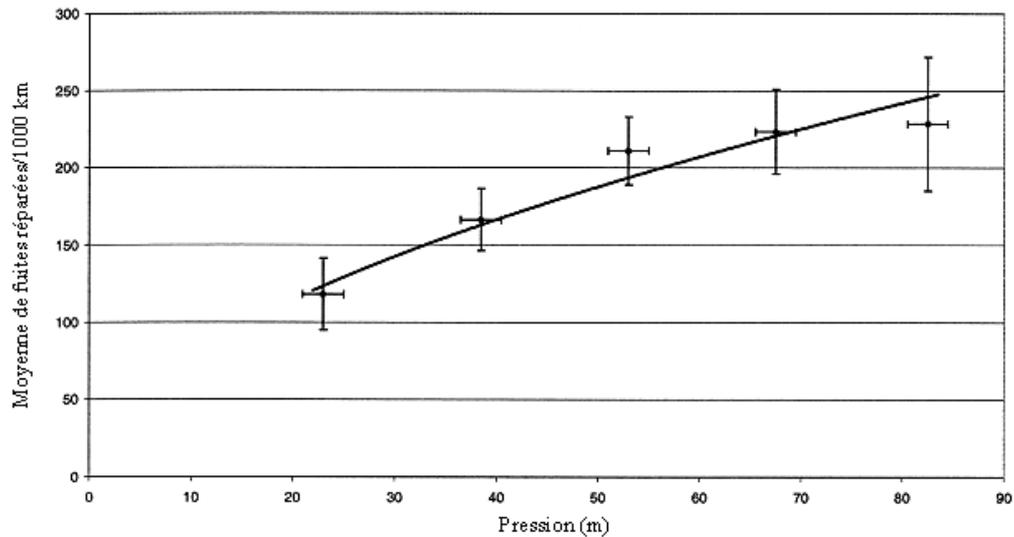


Figure II.3 : Relation entre la pression et le nombre de fuites réparées[GWS].

Pour une augmentation de la pression d'un facteur 3.5 (de 24 à 84 m), le nombre de réparations a augmenté d'un facteur d'environ 2 (de 120 à 230).

Dans l'exemple ci-dessous issu d'une autre source (Alan Lamberts, l'ensemble de la Welsh Water), le nombre de fuites varie au cube du rapport des pressions de nuit.

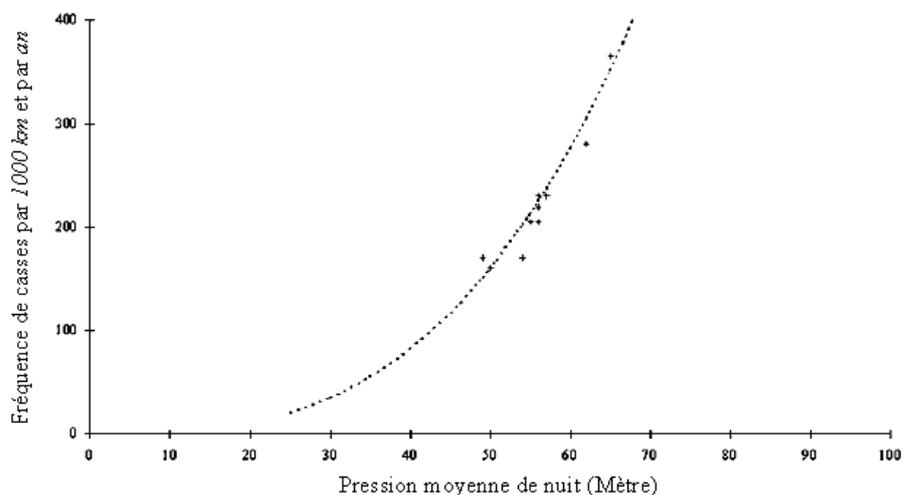


Figure II.4 : Fréquence de cassure en fonction de la pression de nuit [GWS].

Nous venons de voir que les pressions statiques trop élevées créent des fuites. Une variation brusque de pression peut en créer aussi.

La trop grande rapidité de manœuvre d'une vanne en est la cause la plus fréquente. Le graphique ci-dessous montre les variations de pression dues à l'opération d'une vanne électrique à l'entrée du réservoir d'Indicatore, en Toscane (en rouge, la pression à l'entrée du réservoir, en bleu, celle mesurée sur sa conduite d'alimentation de 200 mm, à deux kilomètres à l'amont).

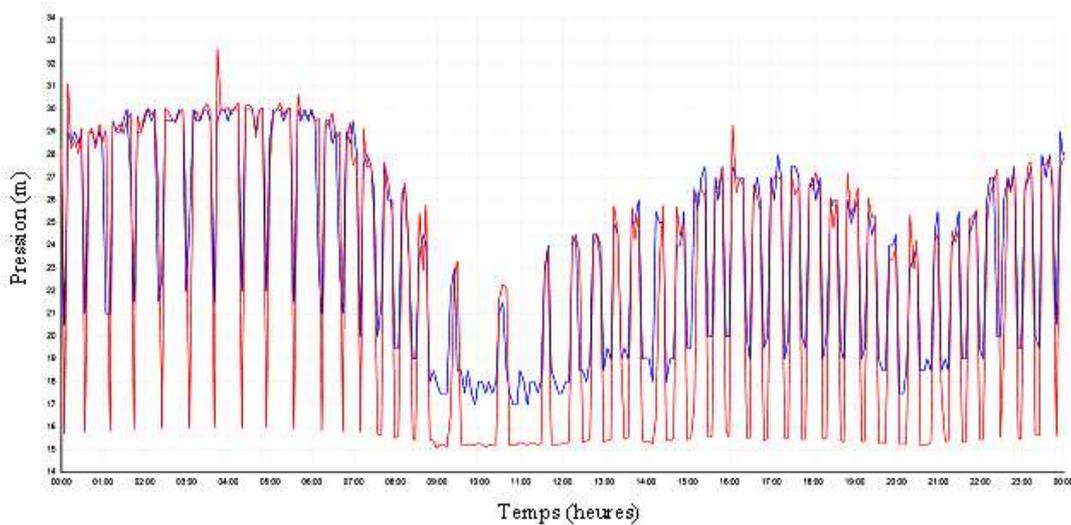


Figure II.5 : *Variation de la pression due à une manœuvre rapide d'une vanne [GWS].*

La perturbation peut aussi être due aux tirages d'un abonné industriel. Le graphique ci-après superpose débit (rouge) et pression (bleu) enregistrés au branchement de 150 mm de la Somadir à Casablanca. La pression varie d'environ 40 m à chaque tirage ; le phénomène se répète plus de vingt fois par jour.

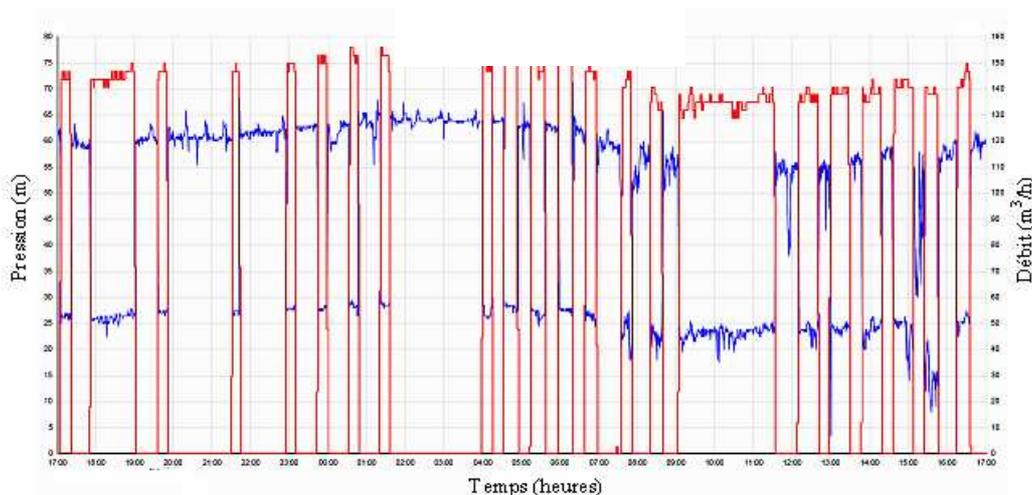


Figure II.6 : *variation de la pression due au tirage d'un consommateur industriel [GWS].*

2.2.3 Pression et débit des fuites

Pour évaluer le rapport entre la pression dans la conduite et le débit déchargé à l'atmosphère par une fuite, un technicien se réfère, en général, à la formule :

$$Q = k.S.\sqrt{2gh} \quad (2.1)$$

Où S représente la section de l'orifice, k un coefficient de décharge, g est égal à $9,81 \text{ m/s}^2$ et h (en mètres) la pression nette à l'orifice.

Suite à une modification de la pression de h_1 à h_2 , le rapport des débits Q_1 et Q_2 est :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (2.2)$$

L'ingénieur G. Gergaut, de CGE-VEOLIA, a modifié, une nuit après l'autre, la pression de sortie d'un réducteur, et a enregistré les débits de nuit sur le réseau aval, en PVC, pour chaque valeur. Le tableau suivant représente les résultats obtenus (la pression est augmentée chaque nuit de 0,5 bar):

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6	1 bis
Pression aval (bars)	1,7	2,2	2,7	3,2	3,7	4,2	1,7
Débit de nuit (m ³ /h)	1,12	1,96	2,04	3,36	3,96	5,7	2

Tableau II.1 : *Effet de variation de la pression sur le débit de nuit (Débit de fuite).*

Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Le retour à la pression d'origine (1 bis) ne permet pas de revenir au débit d'origine : des fuites se sont agrandies, ou de nouvelles se sont créées ;
- L'augmentation de la pression de 1,7 à 4,2 bars a théoriquement pour conséquence une augmentation du débit d'un facteur de 1,6. Dans l'expérience, ce facteur est de 5,1.

Cette simple expérience, réalisée sur un petit réseau, a donné les mêmes résultats que de nombreuses mesures réalisées par l'UKWIR, dont les études ont abouti aux constatations suivantes :

La vitesse de passage de l'eau à travers un orifice de section fixe varie bien suivant la théorie, à la racine carrée du rapport des pressions disponibles à l'orifice. Mais la section de l'orifice et le coefficient de décharge ne sont plus constants pour les fuites de petite dimension, celles qui constituent le « bruit de fond » du réseau.

En général, le débit des fuites à ces points faibles varie suivant :

- La racine carrée du rapport des pressions pour la vitesse de passage de l'eau ;
- Le rapport des pressions pour la section de l'orifice.

Pour une fuite de ce type (petite dimension), une baisse de pression d'un facteur de 2 pourra réduire le débit par 2,9, soit deux fois la réduction de débit d'une fuite à section constante.

D'autre part, si le coefficient de décharge est constant en régime turbulent (0,75), il varie en régime laminaire. Le régime d'écoulement des fuites de petite section comme les points de corrosion est laminaire, et la variation de la pression peut entraîner une variation du coefficient de décharge [GWS].

Un réseau neuf de bonne qualité réagira globalement à la racine carrée du rapport des pressions. Un réseau fragile ou ancien, où le « bruit de fond » est important, sera beaucoup plus sensible à leur variation. Les fuites intérieures, très importantes dans les pays en voie de développement, le sont probablement bien plus aussi [GWS].

En conclusion, les équations générales les plus adaptées à l'analyse et à la prédiction simple du rapport entre la pression (P) et le débit des fuites (Q) sur les réseaux d'eau sont de type :

$$Q_1/Q_0 = \left(P_1/P_0 \right)^{N1}$$

L'exposant NI va de 0,5 jusqu'à 2,5, suivant le type de fuites et leur proportion sur le réseau [GWS] :

- Le débit des petites fuites indétectables aux joints et aux raccords est très sensible à la pression, avec des valeurs typiques de NI proche de 1,5.
- La valeur typique de NI pour les fuites importantes sur les conduites en plastic est de 1,5 ou plus.
- La valeur typique de NI pour les fuites importantes sur les conduites en métal est proche de 0,5.
- La valeur moyenne de NI tirée d'échantillons anglais, japonais et brésiliens est de 1,15.
- Sans connaissance particulière des matériaux des conduites et des niveaux de pertes, nous ferons l'hypothèse d'une relation linéaire entre la pression et le débit des pertes ($NI = 1$).

3. Recours à la modulation

Aujourd'hui, les responsables de la distribution de la ville d'Alger tentent d'éviter les conséquences des pressions élevées de diverses manières :

- Création d'étages intermédiaires par tierçage des vannes ;
- Isolement des conduites les plus fragiles (mise hors service par fermeture des vannes) ;
- Alimentation à pleine pression pendant dix heures par jour, puis interruption pendant les heures creuses, en fermant presque complètement les principales vannes d'alimentation de l'étage. Ainsi, la plus grande partie du réseau reste en eau et la pression est réduite aux heures creuses.

Ces mesures palliatives ne sont que partiellement efficaces. En effet, la *SEM* a, par exemple, mesuré une pression de nuit de 125 m en point bas de l'un des étages d'Alger Centre, bien trop élevée, même si elle est inférieure à la pression maximale théorique de 185 m.

La détection des fuites et la récupération de pression qu'elle va induire, puis le passage à l'alimentation permanente nécessitent un autre mode de protection des réseaux qui consiste à réguler la pression en fonction de la demande.

Sur les réseaux d'Alger, il est nécessaire de créer des étages de pression. Il ya peu de réservoirs situés à cote basse pour le faire. Les seuls existants sont ceux de Ravin (TP 55 m, 1000 m), trop petit et trop éloigné du Centre Ville, et de Telemly (Benzine) (TP 88 m, 12.000 m³), utilisé aussi comme relais pour refouler vers les réservoirs de Bordj Boulila, Bologhine et Sahel.

Nous devons donc installer des vannes de régulation pour créer ces nouveaux étages, dont on fera varier la pression de sortie en fonction de la demande, et de la perte de charge qu'elle induit. Nous aurons donc plusieurs étages suivants :

- TELEMLY : Réseau alimenté par le réservoir TELEMLY (CR 82.94m, CTP 87.97 m 2 x 3500 m³ + 2 x 2500 m³) ;
- KOUBA A 97 : Réseau alimenté par le réservoir de KOUBA (CR 89 m, CTP 97 m, 4 x 20.000 m³) ;
- KOUBA 117 : Réseau alimenté par le réservoir de KOUBA (CR 110.12 m, CTP 117.3 m, 3 x 4803 m³) ;
- BOULOGNE CENTRE : Réseau alimenté par le réservoir BOULOGNE CENTRE (CR 203.96 m, CTP 208.86 m, 2 x 4500 m³) ;
- BOULOGNE ;
- BOUZEREAH ;
- SAHEL ;
- FORT L'EMPIREUR.

Dans notre travail, nous sommes intéressés par l'étude de la modulation de la pression de l'étage KOUBA 97 que nous présenterons dans le chapitre IV.

4. Pour quoi la modulation

La modulation est une stratégie qui a montrée sa fiabilité à travers le monde, dont voici quelques exemples :

Un programme de régulation de pression mené à KHAYELITSHA, une banlieue très pauvre de CAPE TOWN, en Afrique du Sud, avec un réseau collectif et des installations intérieures en très mauvais état, a permis, grâce à une réduction de la pression d'alimentation moyenne de 25% (de 80 à 60 m), une baisse du volume distribué de 40% (de 2500 à 1500 m³/h). Aussi, la régulation de la pression a permis d'obtenir des résultats spectaculaires sur plusieurs réseaux, vieux de plus de 100 ans et fragilisés par les bombardements du Blitz, du Centre de Londres : par exemple, sur le secteur d'OVAL (ELEPHANT and CASTLE, 35.000 m³/j), une baisse de seulement 4 m d'une pression d'alimentation journalière déjà très basse (35 m) a permis une économie du volume distribué par jour de l'ordre de 7%. [GWS].

Le graphique suivant présente le résultat d'une campagne de réduction de pression sur le réseau d'amiante – ciment de Palmira (Colombie). Des résultats similaires ont été obtenus sur celui de Bologne (Italie).

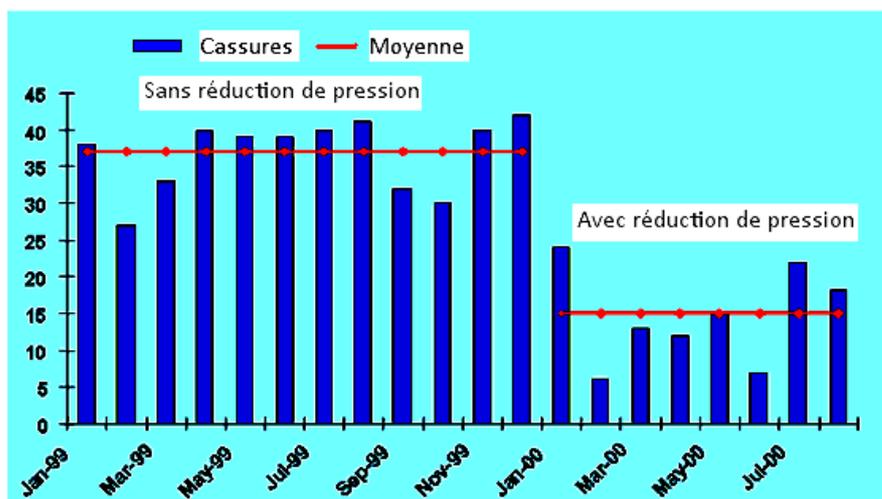


Figure II.7 : Nombre de cassures avant et après la réduction de pression [GWS].

Voici les résultats de quatre opérations importantes de réduction de pression [GWS] :

- MANCHESTER : installation de 118 réducteurs de pression - économie de 58.000 m³/j ;
- JOHANNESBURG : installation de 14 réducteurs de pression - économie de 22.000 m³/j ;
- LONDRES : installation de 31 réducteurs de pression – économie de 29.000 m³/j ;
- SAO PAOLO : installation de 66 réducteurs de pression – économie de 65.000 m³/j ;

Conclusion

Il s'agit, pour le réseau d'Alger, d'une situation extrême, qui représente la limite supérieur du risque couru si nous faisons passer le réseau d'Alger en alimentation continue sans y réguler la pression d'alimentation.

Chapitre III

Modulation de la pression

Introduction

La modulation permet d'adapter la pression d'entrée d'un réseau aux variations de la demande : nous évitons ainsi de le « surpresser » en permanence de la valeur de la charge perdue par friction pour alimenter le point critique à la pointe de la demande. Cela n'entraîne pas que la perte de charge ne soit plus nuisible pour le réseau ; elle contraint toujours à le « surcharger » en totalité, sauf sa partie la plus extrême ou la moins bien servie. La base de la modulation de pression est donc de la réduire au minimum admissible. En plus, les pertes d'eau occasionnés par la forte pression sont, par conséquent, réduites [GWS].

1. Modulation et pertes d'eau

Associer régulation de la pression et mesure du débit de nuit est très efficace: la régulation de la pression réduit le débit des fuites existantes et en ralentit l'apparition de nouvelles. La mesure du débit de nuit oriente la recherche des fuites importantes.

Le contrôle de la pression permet d'atteindre un niveau de pertes plus bas, et de réduire le rythme des interventions (step – test, détection acoustique) nécessaires pour s'y maintenir. Ce résultat est présenté ci-après sous forme graphique.

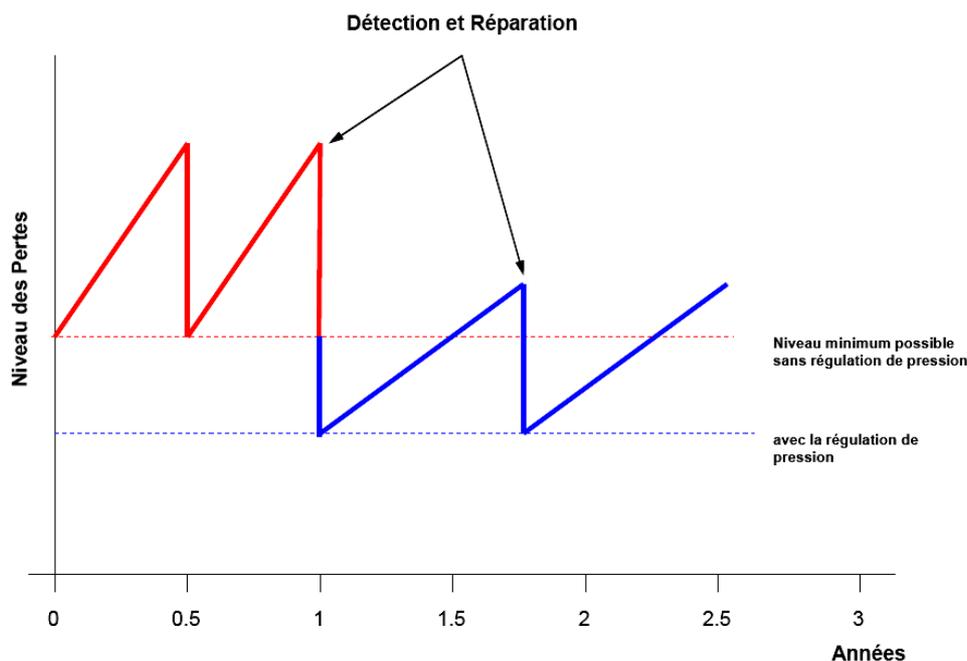


Figure III.1 : Niveau de pertes sans et avec modulation.

Ralentir l'apparition des fuites réduit les frais de réparation, et permet souvent de différer le remplacement de conduites. Dans ce cas, l'économie de capital peut être considérable.

2. Modulation de la pression d'entrée du réseau suivant la demande

La pression disponible à l'entrée d'un réseau à l'heure de pointe doit être égale à la somme de la pression nécessaire au point critique (Point du haut du réseau ou le plus éloigné hydrauliquement) et de la perte de charge créée pour l'alimenter à ce moment de forte demande.

La pointe est un phénomène très aigu, mais presque transitoire, et la période de forte demande dure peu. Comme la perte de charge varie au carré de la vitesse de l'eau, la pression au point critique, souvent à peine suffisante à la pointe, est excessive dès après la pointe, et le réseau est surchargé la plupart du temps.

Les graphiques et histogrammes suivants présentent une illustration.

Le premier montre les débits d'alimentation du secteur « Westminster » dans la banlieue de Manchester.

L'histogramme qui suit en analyse les données : il indique le temps passé dans chaque tranche de débit. Nous voyons que la durée des tirages aux débits de pointe ne représente que 4,5 % du temps, soit une heure par jour.

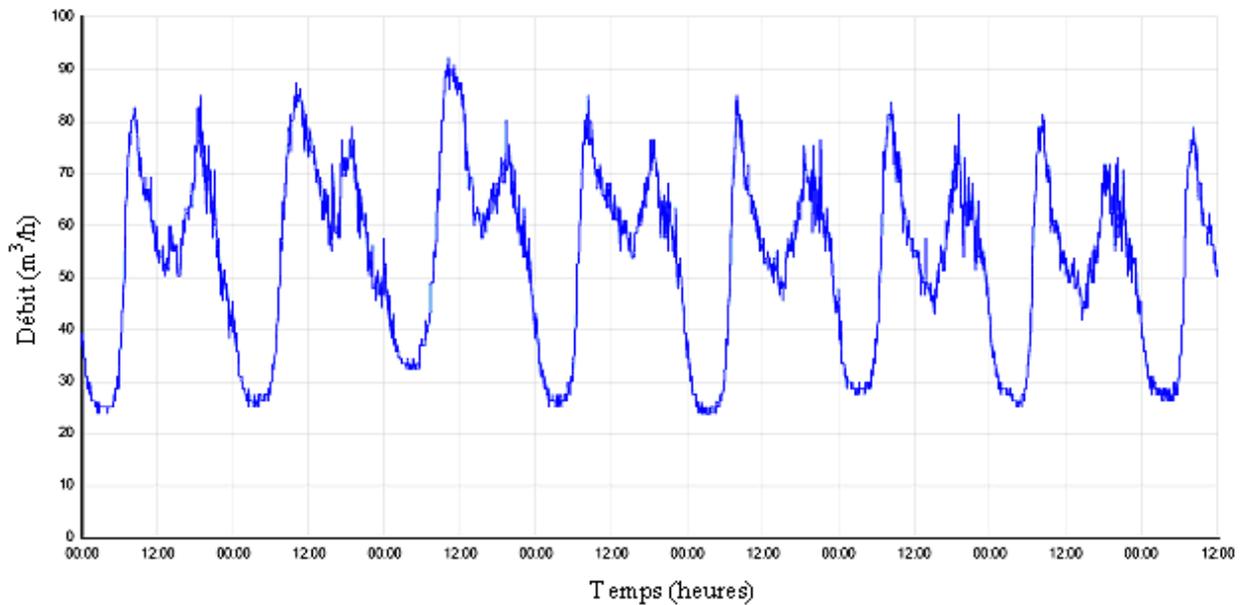


Figure III.2 : demande de *Westminster* dans temps (GWS)

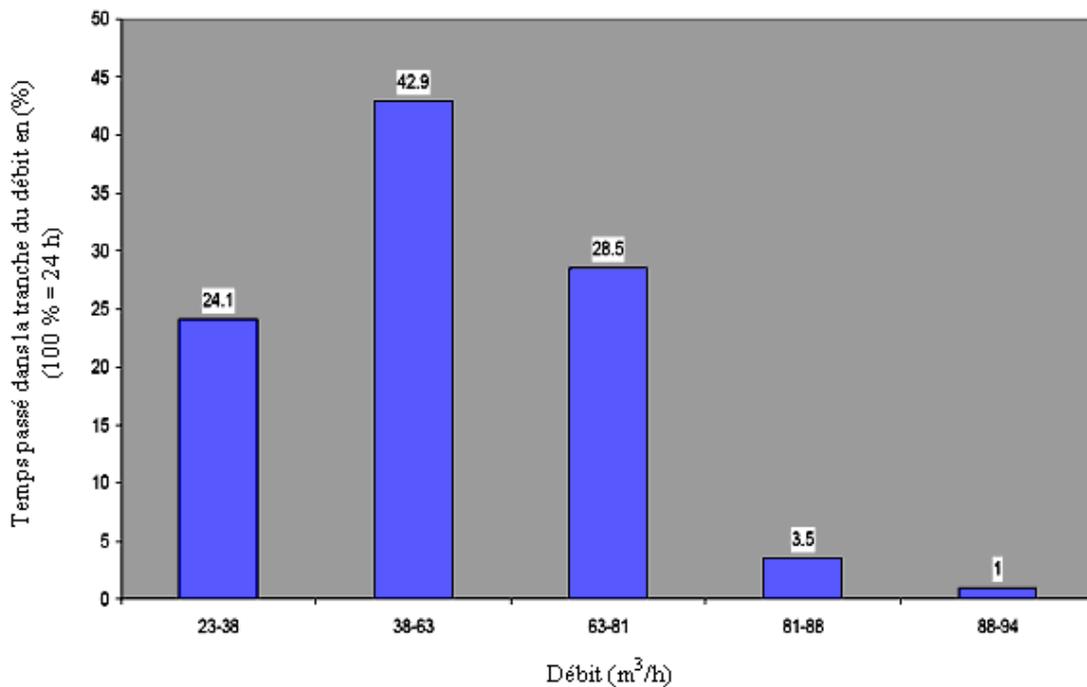


Figure III.3 : Tranches horaires du débit (GWS)

Le graphique ci-après présente les pressions au point critique pour la même semaine. L'histogramme qui suit en analyse les données, en reprenant les durées indiquées dans l'histogramme des débits ci-dessus. Nous voyons l'importance de la récupération de pression dès que la pointe passe.

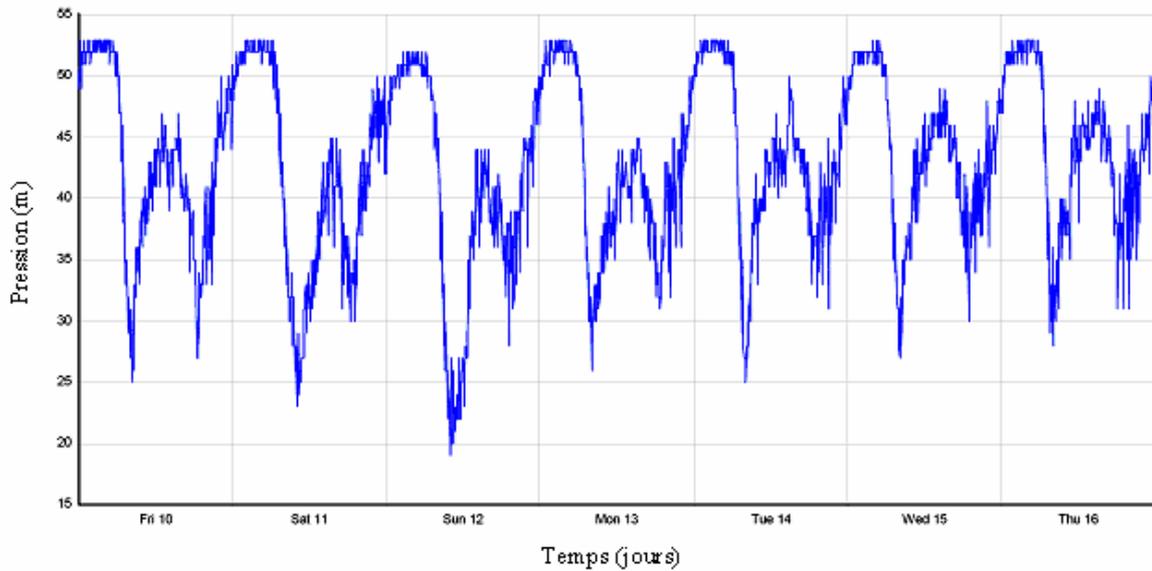


Figure III.4 : Point critique de *Westminster* (pression en fonction du temps) (GWS)

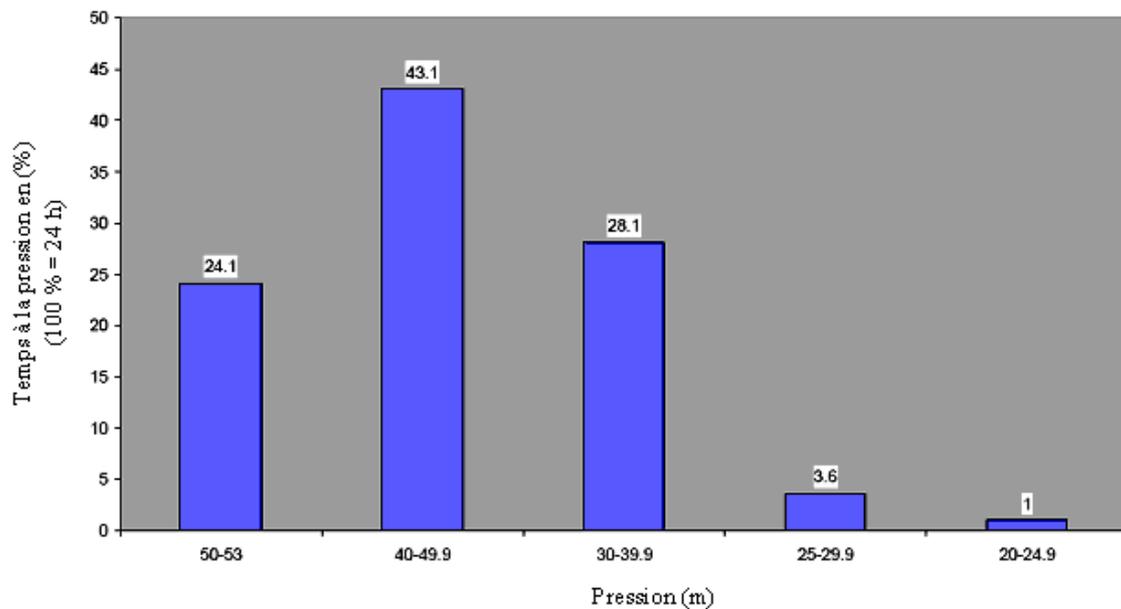


Figure III.5 : Tranches horaires de pression (GWS)

Avec une pression nécessaire et suffisante au point critique de 20 m, il est possible de réduire la pression sur le réseau de 10 m dès après la pointe. La plus grande réduction est évidemment possible la nuit (30 m pendant 6 h) ; mais elle est très importante pendant encore 10h/j (25 m).

Il faut donc moduler la pression à l'entrée d'un réseau en fonction de la demande. Nous pouvons pour cela utiliser des vannes de régulation hydrauliques à pilote (annexe 2), équipées d'un modulateur électronique (annexe 3).

Il n'est pas nécessaire de faire communiquer le modulateur et le point critique : il suffit d'entrer dans sa mémoire une courbe de régulation (en fonction du temps ou de la demande). Le modulateur mesure en permanence la pression à réguler, et la compare avec la pression de consigne mémorisée pour le débit ou la période concernés.

Tracer cette courbe de régulation nécessite une série de mesures simultanées du débit et de pression à l'entrée et aux différents points du réseau. Une fois le point critique identifié, nous comparons la pression à ce point et à l'entrée du réseau à différents débits, et nous en tirons la pression de consigne nécessaire pour chacun d'eux.

Exemple :

Débit	Pression d'entrée	Au point critique
150 m ³ /h	60 m	30 m
40 m ³ /h	60 m	60 m

Tableau III.2 : *Exemple de modulation*

Si nous voulons 30 m constantes au point critique, nous mémoriserons dans le modulateur une pression de consigne de 60 m à 150 m³/h et de 30 m à 40 m³/h.

Les trois graphiques suivants présentent pour le même quartier de Westminster, et pour deux semaines consécutives, la pression à la sortie du réducteur de pression alimentant le réseau, celle au point critique, et le débit d'alimentation du secteur.

Chaque graphique présente la situation en alimentation à pression constante et à pression modulée. Du 10 au 17 mai, le secteur est alimenté à une pression constante de 52 m ; les données sont présentées en rouge. La semaine suivante, la pression de sortie du réducteur est modulée suivant la demande ; les données sont présentées en bleu. Le graphique ci-dessous présente la pression de sortie du réducteur.

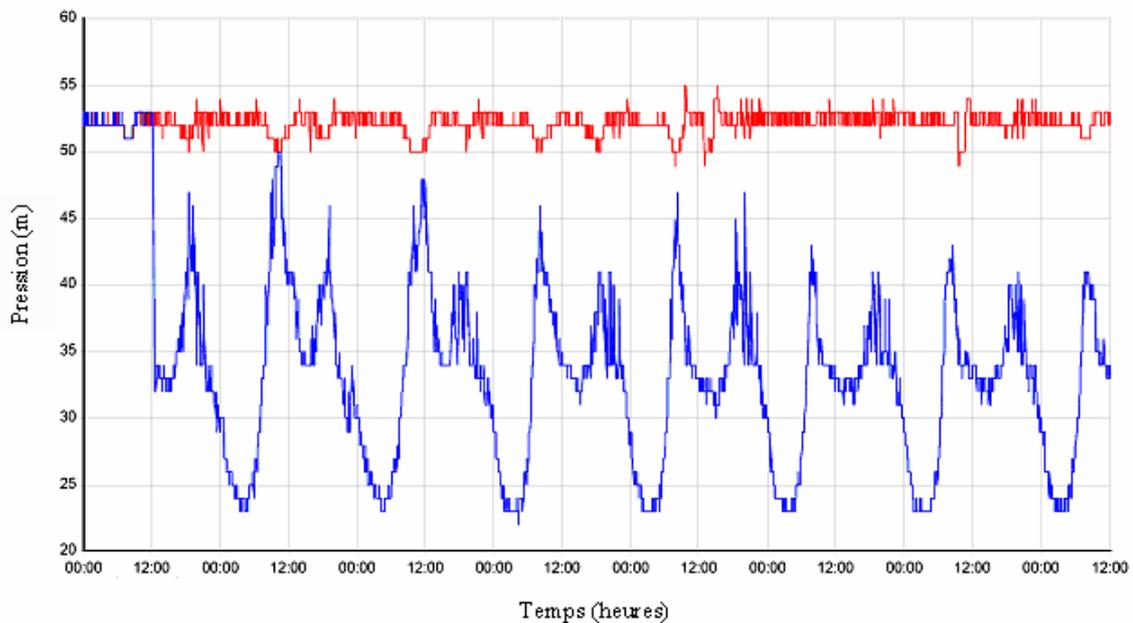


Figure III.6 : *Pression de sortie du réducteur, avant et après la modulation [GWS].*

Le graphique suivant présente la pression au point critique. En modulation, elle est presque constante. Les pressions sur le réseau varient beaucoup moins qu'en alimentation à pression fixe.

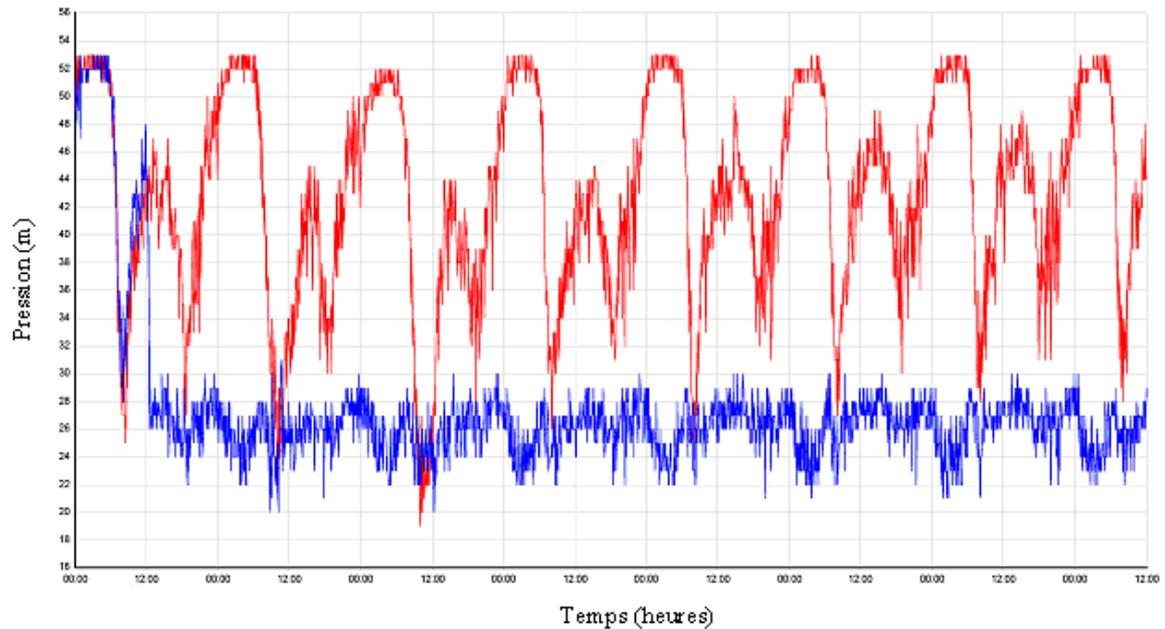


Figure III.7 : *Pression au point critique, avant et après la modulation [GWS].*

Le dernier graphique présente les débits d'alimentation du secteur, l'eau et économisée de jour comme de nuit.

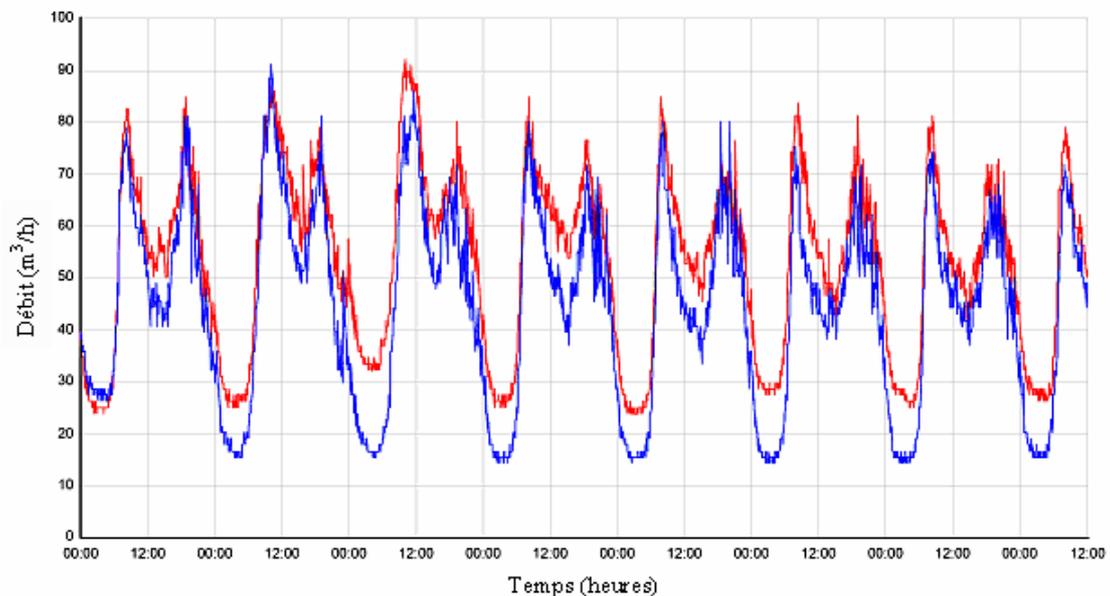


Figure III.8 : *Débit d'alimentation du secteur [GWS].*

La modulation de la pression permis de réduire la pression moyenne à l'entrée du réseau de Westminster de 18 m, ou 35%, et de 17% la consommation journalière du secteur.

Voici un autre exemple de modulation de pression en fonction de la demande (Secteur de Bickley Oak, Londres). Les graphiques montrent le débit d'alimentation (en bleu), la pression à l'aval de la vanne de régulation (en rouge), et la pression au point critique (en vert) pour deux jours consécutifs (pression en sortie de vanne constante le premier jour, modulée en fonction du débit le second) [GWS].

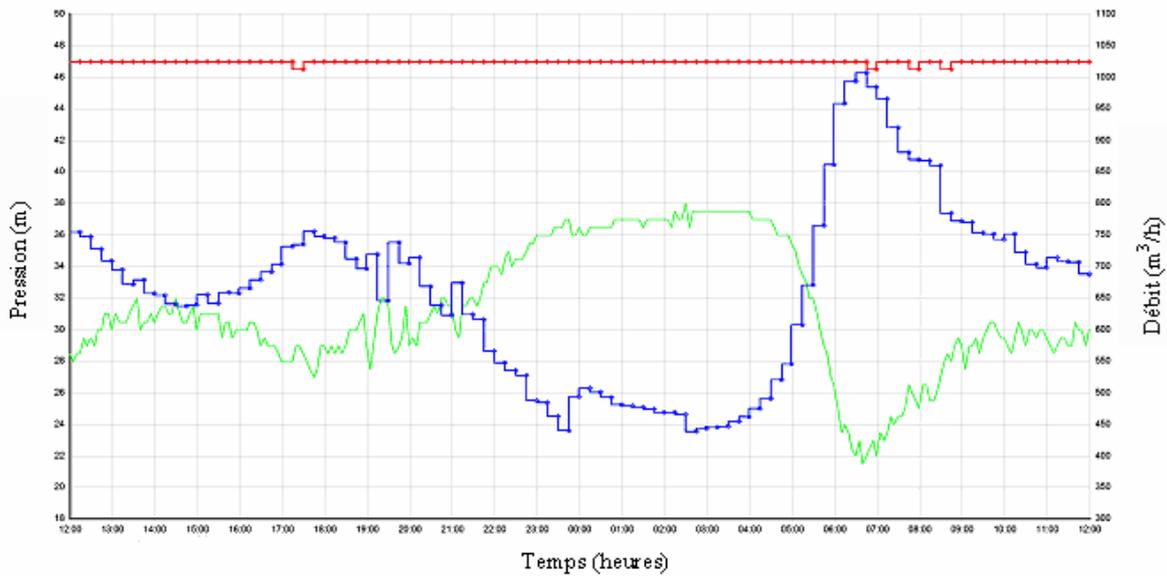


Figure III.9 : Secteur de Bickley Oak, Londres (sans modulation) [GWS].

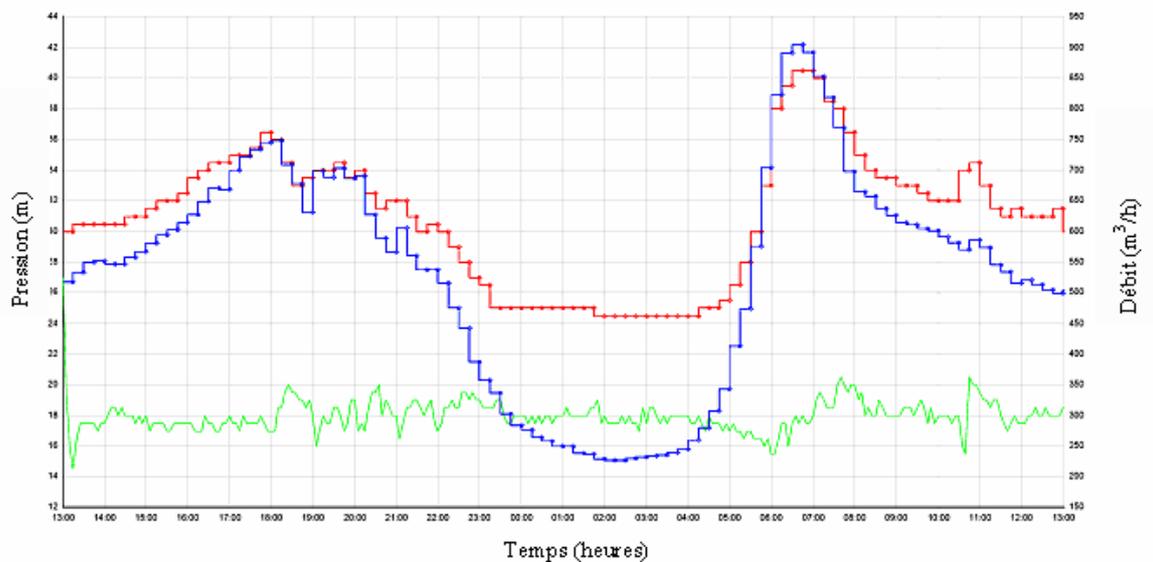


Figure III.10 : Secteur de Bickley Oak, Londres (avec modulation) [GWS].

La pression en sortie de vanne a été réduite de 16 m en moyenne sur 24h (de 45 m à 29 m, soit 36 %). La consommation du secteur a baissé de 3.100 m³/j (de 15.900 à 12.800 m³/j, soit 19,5 %).

La régulation a pour objectif de satisfaire l'abonné, tout en gardant la pression du réseau la plus stable tout en étant admissible. Si nous ajoutons la différence entre les pressions nécessaires au confort de l'abonné de jour et de nuit à la charge perdue sur les réseaux pendant la pointe, il est presque toujours justifié de réguler la pression d'alimentation en fonction de la demande.

Il est recommandé de le faire sur les zones les plus grandes possible, avec le dénivelé pour seule limite de taille lors du dessein de leurs frontières (sur de grandes zones de distribution, il ne devrait pas excéder 15 m). Nous plaçons les vannes de régulation le plus en amont possible, par exemple au raccordement des conduites de distribution principales avec le réseau primaire [GWS].

Ces zones peuvent comporter plusieurs entrées. Nous modulons la pression de consigne des vannes suivant un profil horaire. Les pressions de consigne des « vannes esclaves » sont plus basses que celle de la vanne maîtresse, pour éviter un « conflit » entre les vannes lorsque la perte de charge sur le réseau est faible [GWS].

Des systèmes de ce type ont été installés à Sao Paulo, à Casablanca et à Londres. Nous présentons ci-après celui d'Hampton 30", dans le sud de Londres, avec les caractéristiques suivantes [GWS].

- Population servie: 190.000 hab. ; Longueur du réseau: 470 km ;
- Volume distribué avant régulation: 57.000 m³/j (dont 4.000 m³/j pour un industriel) ;
- Alimentation: 6 entrées, dont les trois principales, en 800 et 750 mm, équipées d'une vanne de régulation de diamètre 600 ou 700 mm ;
- Réduction de la pression moyenne sur le réseau: 30 % (de 46 m à 32 m) ;
- Economie réalisée: 5.000 m³/j (9,5% du volume net distribué).

La zone est présentée sur les deux figures suivantes :

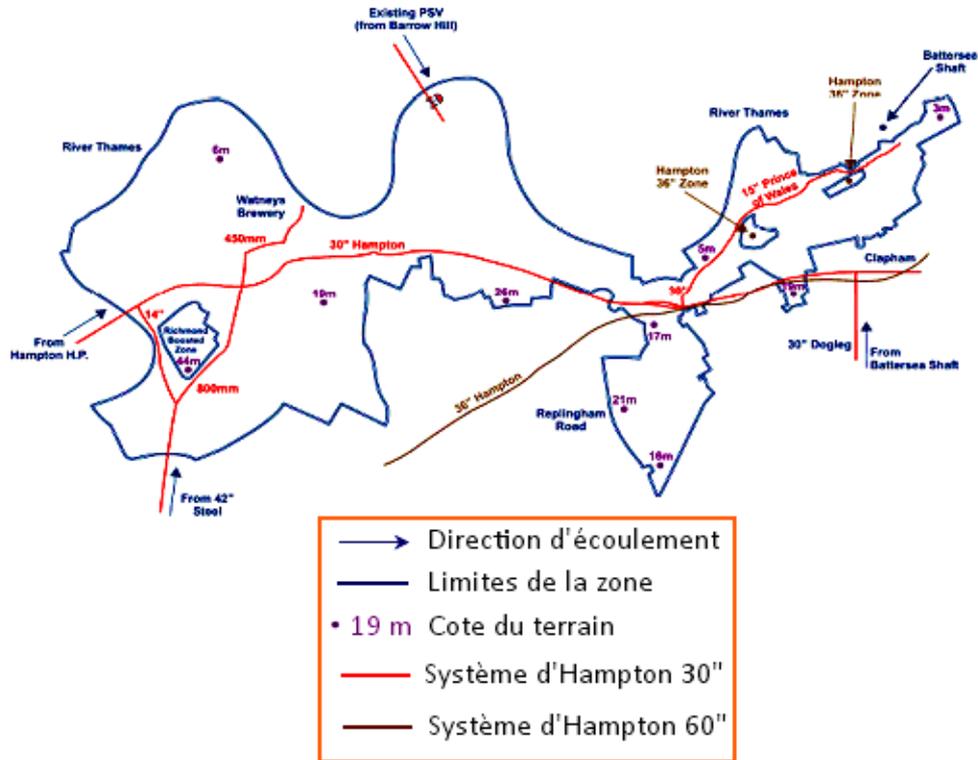


Figure III.11 : Système du Sud de Londres [GWS].

L'emplacement des vannes de régulation principales est représenté ci-dessous :

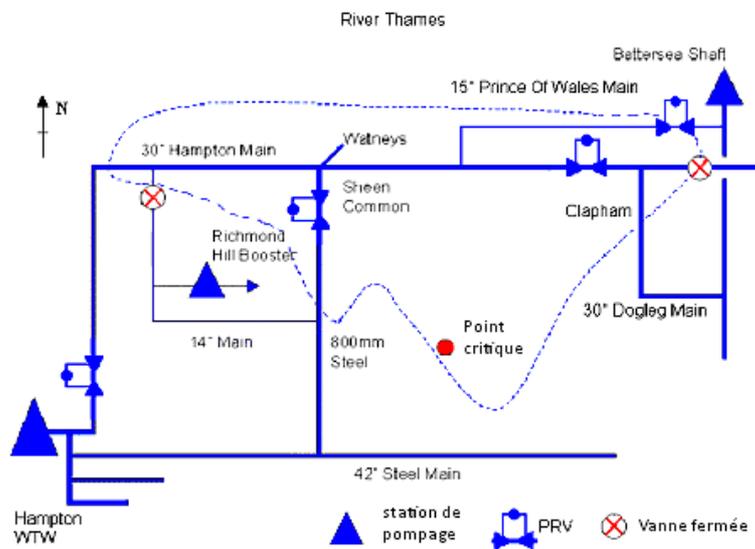


Figure III.12 : Emplacement des vannes de régulation [GWS].

Les graphiques suivants montrent les pressions amont (en rouge) et aval (en bleu), et le débit (en vert) aux vannes de contrôle. La vanne « esclave » de Clapham est fermée la plupart du temps, mais s'ouvre complètement à la pointe, comme l'indique la faible différence entre les pressions amont et aval à 08.00 h du matin.

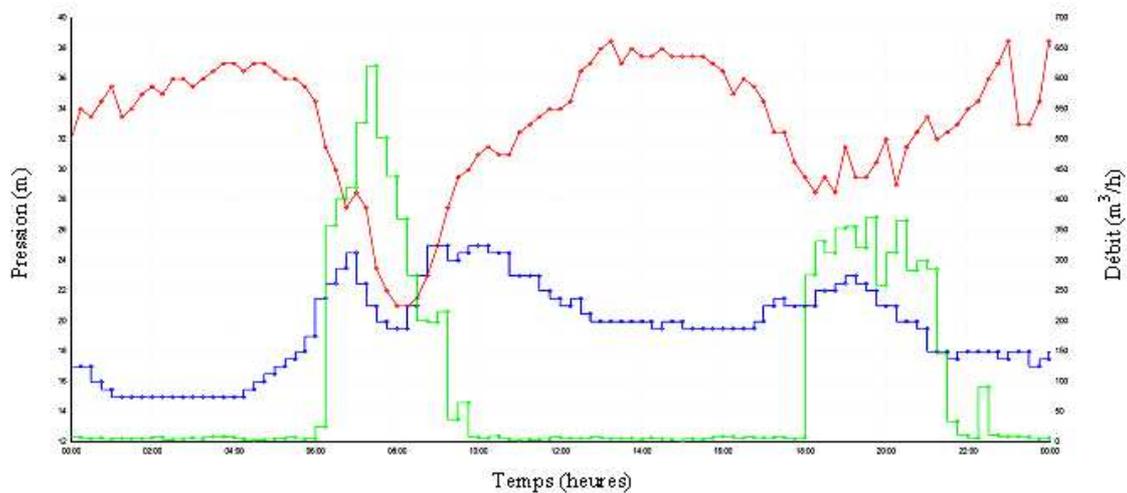


Figure III.13 : *Pression amont, aval et débit à la vanne esclave [GWS].*

La vanne « maîtresse » de Sheen Common s'ouvre elle aussi complètement à la pointe, puis régule le reste du temps.

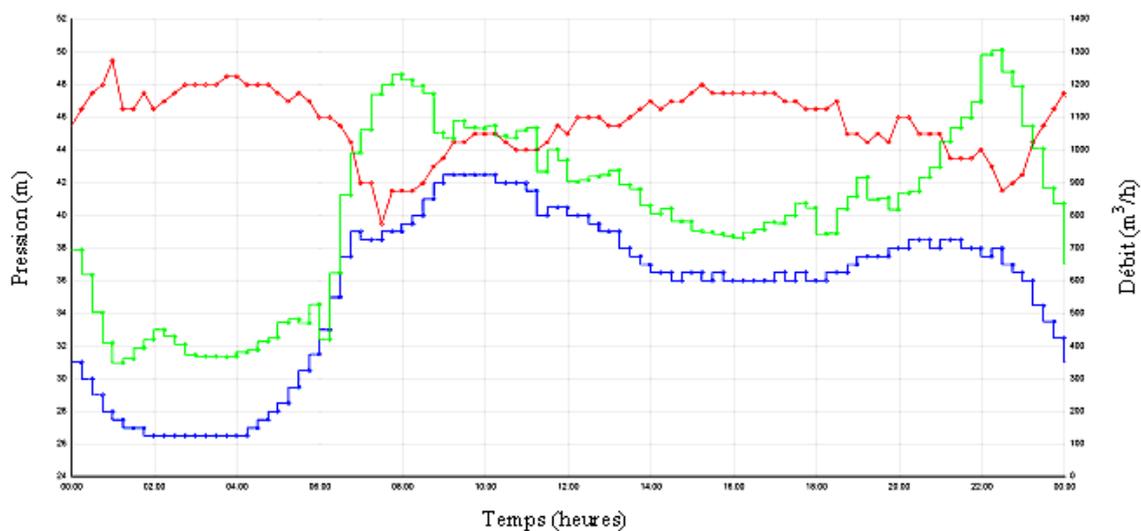


Figure III.14 : *Pression amont, aval et débit à la vanne maîtresse [GWS].*

Le graphique suivant superpose pressions au point critique avant (en rouge) et après (en bleu) la mise en service de la régulation.

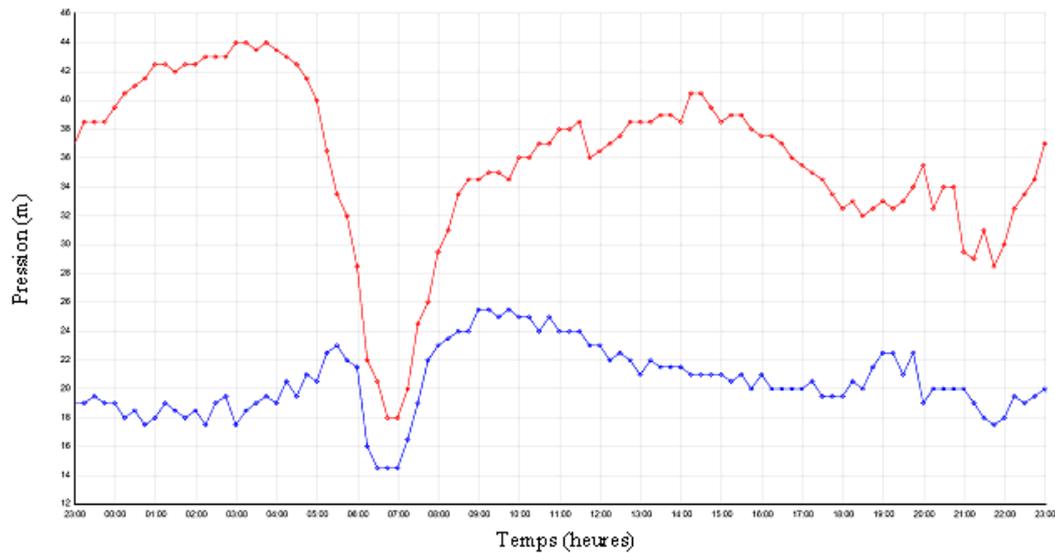


Figure III.15 : *pression au point critique [GWS].*

A la pointe, la pression avant régulation était à peine supérieure au minimum contractuel de 15 m ; mais nous avons pu la réduire de 25 m la nuit, et de 15 m en moyenne sur 24 h, soit 30 % de la pression moyenne sur le réseau avant régulation.

Une superposition de la somme des débits d'alimentation avant (en rouge) et après (en bleu) la mise en service de la régulation est présentée au graphique suivant :

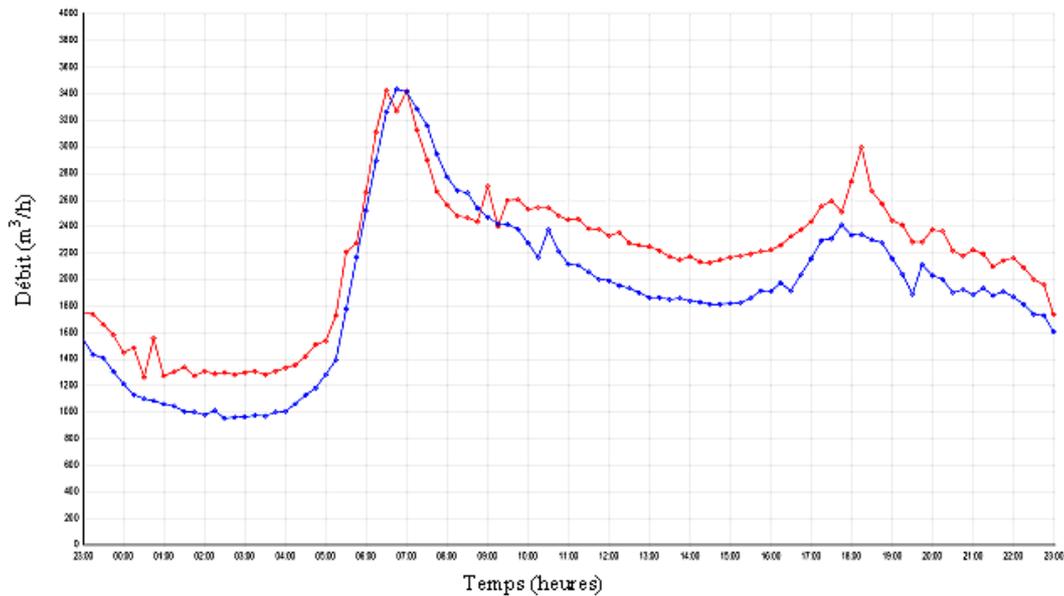


Figure III.14 : *Débit d'alimentation [GWS].*

L'économie est de $5.000 \text{ m}^3/\text{j}$ (9,5% du volume net distribué). Nous économisons de l'eau en permanence, sauf en pointe, de 07 h à 08 h du matin.

3. procédure de modulation d'un étage de distribution

Afin de mener à bien un projet de modulation de la pression dans une région donnée, nous devons suivre les étapes suivantes :

a. Investigation

Cette étape consiste à se munir des plans du réseau et la vérification du bon fonctionnement hydraulique de celui-ci, cette vérification est faite par l'installation d'enregistreurs de pression (logger) aux différents points du réseau. Nous devons aussi visiter tous les points défavorables (points hauts, immeubles > 10 étages, ...).

b. Délimitation de la zone

Ceci repose sur le positionnement des vannes régulatrices, et qui se fait en fonction des côtes des différents points du réseau, c'est-à-dire à partir du point où le problème d'augmentation de la pression, pendant les heures creuses, commence à apparaître. Après positionnement de la vanne, le réseau est divisé en deux zones ; réduite, située en aval de la vanne et non – réduite, en amont de la vanne.

La délimitation de la zone se fait de façon à pouvoir alimenter, d'une part, les points hauts et loin avec une pression suffisante, et d'autre part, à ne pas avoir de fortes pressions aux points bas. Sur le plan pratique, cette délimitation se fait par l'installation de vannes de frontières (fermées) qui permettent d'isoler la zone en question.

c. Identification des travaux

Afin d'assurer l'étanchéité de la zone réduite, plusieurs travaux sont prévus, par exemple :

- Remplacement des vannes défectueuses ;
- Pose de nouvelles vannes ;
- Réalisation de maillage et/ou de plaquage.

d. L'information

Faire circuler l'information aux différents services de l'eau de ne pas toucher aux vannes de frontières lors de leurs interventions. En général, nous faisons en sorte que ces vannes soient signalées à l'aide d'une marque.

Conclusion

La modulation d'un étage de distribution nécessite une très bonne connaissance de celui-ci pour que, d'une part, la délimitation de la frontière soit efficace et, d'autre part, pour qu'il n'y est pas de sources d'alimentation du secteur non contrôlée (non régulée) qui vient perturber les vannes de régulation.

Des campagnes de recherches de fuites sont à prévoir après la mise en service d'un projet de modulation, car, déjà un secteur modulé est bien contrôlé en termes de volumes entrants, ce qui facilite la compréhension des mesures de débits de nuit, et, une sectorisation est moins laborieuse dans un tel réseau (secteur).

Chapitre IV

Modélisation de l'étage Kouba 97

Introduction

Le modèle hydraulique est un outil très puissant pour l'ingénieur chargé de la gestion du réseau de distribution, en effet, nous pouvons simuler et prévoir des comportements futurs du réseau, mais cela dépend principalement de la représentativité du modèle de la réalité du terrain. Cette représentativité dépend, de ça part, de la finesse ou de la précision de calage du modèle, parce qu'un modèle non calé ou non calibré est purement théorique, donc nous ne pouvons faire confiance aux résultats obtenus par un tel modèle. C'est pour cela que dans ce chapitre, après une brève présentation de l'étage K 97 et l'élaboration du modèle, nous devons procéder à un calage.

1. La modélisation hydraulique d'un réseau d'AEP

La modélisation du fonctionnement du réseau cherche à décrire le comportement hydraulique des différents dispositifs du réseau. L'intérêt est de reproduire ce qui se déroule en réalité dans le réseau à l'aide d'un modèle hydraulique.

La représentation et la précision du modèle sont tributaire des objectifs du service de l'eau et des analyses escomptées, le niveau de détail conditionne donc les résultats de la modélisation. Nous pouvons distinguer plusieurs types de modèles [Harrouz, 1996] :

a. Modèle pour le dimensionnement du réseau

Le modèle permet de vérifier pour une configuration donnée du réseau, la satisfaction des exigences des abonnés en termes de pression et de débit. L'intérêt est de dimensionner les conduites et dispositifs hydrauliques. L'état des conduites et la demande sont supposés connus. Le niveau de détail est important, toutes les conduites sont représentées.

b. Modèle pour l'analyse du fonctionnement hydraulique et diagnostic

Dans ce cas, le modèle cherche à décrire le fonctionnement d'un réseau existant, par la détermination de l'état des conduites à travers la mesure de la rugosité des conduites et la demande des abonnés. Pour un réseau, des données liées à la topologie du réseau, les types des conduites, la typologie des consommateurs ainsi que des mesures de pression et débits en des points du réseau sont supposés connus. Un calage du modèle permet de déterminer certains paramètres inconnus : rugosité, consommation afin de s'approcher le plus possible du fonctionnement réel du réseau.

c. Modèle pour la gestion du réseau

Dans ce cas le modèle servira à décrire le comportement des sources d'approvisionnement, des zones de stockage et des stations de pompage. L'intérêt de ce type de modèle est d'optimiser l'exploitation des sources d'eau et de minimiser les coûts d'exploitation du réseau en régulant le pompage et le stockage de l'eau dans la journée. Ce modèle ne retient que les conduites de grand diamètre servant au transport et à la distribution de l'eau.

d. Modèle pour la mesure de la qualité de l'eau

Dans ce cas le modèle cherche à décrire les temps de séjour (stagnation) de l'eau dans le réseau. En effet des temps de séjour important altèrent la qualité de l'eau dans le réseau. L'objet du modèle est de mesurer l'évolution d'un produit, à titre d'exemple le chlore, dans le réseau et d'en mesurer les concentrations à des points précis du réseau.

Précision du modèle et représentation du réseau d'AEP

La modélisation du fonctionnement du réseau doit décrire le comportement réel du réseau. En fonction de l'utilisation du modèle, un niveau de détail doit être défini. Le modèle ne considérera que certaines conduites du réseau et certains abonnés seront rassemblés sur des nœuds afin de simplifier la modélisation. Il n'existe pas de règles précises pour la simplification de réseau, mais certaines sont fréquemment utilisées :

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

2. Présentation du logiciel *EPANET*

Historique

Le logiciel *EPANET* est né suite à une initiative du Congrès des Etats-Unis qui visait à protéger les ressources naturelles du pays. Dès lors, l'EPA (US Environmental Protection Agency) a été chargée de développer des techniques permettant de mieux appréhender les écoulements et les transformations de l'eau dans un réseau d'adduction d'eau potable. Depuis 1993, le logiciel est disponible gratuitement pour tous les bureaux d'études et les sociétés d'affermage qui souhaitent l'utiliser.

Afin d'augmenter la convivialité du logiciel pour les sociétés francophones, la Compagnie Générale des Eaux a financé la version française sur laquelle nous avons travaillé durant le stage. Enfin, le logiciel a connu des améliorations depuis sa création. La dernière version date de l'année 2001.

Capacités pour la modélisation hydraulique

Le logiciel *EPANET* est un outil de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau dans les réseaux d'eau potable. Un réseau d'eau potable sur un logiciel se définit par des tuyaux (tronçons sur le logiciel), des nœuds (intersection des tuyaux et

extrémité d'une antenne) mais également d'autres organes (réservoirs, pompes, clapets, différents types de vannes,...).

Il permet de calculer le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, mais également le niveau de l'eau à n'importe quel moment de la journée (ou de simulation). Le moteur de calcul hydraulique intégré permet de traiter des réseaux de taille illimitée. Il dispose de trois formules de calcul de pertes de charges (Hazen – Williams, Darcy – Weisbach et Chezy – Manning), il inclut les différentes pertes de charge singulières et il modélise les pompes à vitesse fixe et variable. En résumé, le logiciel présente tous les outils pour remplir les objectifs de notre travail (Régulation des pressions dans les réseaux), car il dispose d'un environnement de commandes d'un certain nombre d'élément du réseau, en fonction de l'état d'autres (voir les détails dans ce qui suit). Il remplit, également, d'autres objectifs :

- Détection des zones de fonctionnement déficitaire ;
- Dimensionnement de réseaux ;
- Amélioration de la gestion des équipements d'eau.

Capacités pour la modélisation de la qualité de l'eau

En plus de la simulation hydraulique le logiciel présente un module de modélisation de qualité qui permet de calculer les concentrations en substances chimiques, les temps de séjour de l'eau dans différentes parties du réseau, le suivi de l'origine de l'eau,... L'utilisation de ce module qualité nécessite un calage hydraulique préalable.

3. Présentation de l'étage Kouba 97

L'Etage Kouba 97 est situé entre le réservoir de Kouba (CTP : 97,75, CR : 89) qui l'alimente et la mer. Ses limites correspondent approximativement à celles du quartier d'Hussein Dey plus une partie d'EL MAGHARIA.

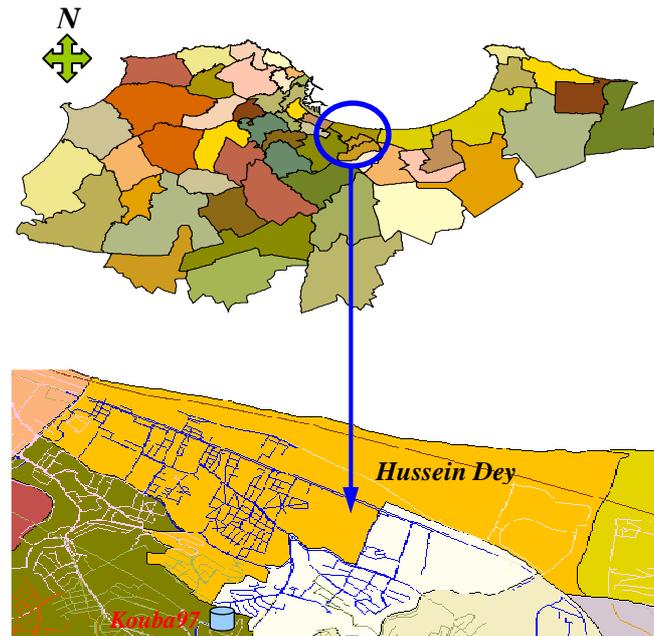


Figure IV.1 : la commune d'Hussein Dey (Extrait du SIG d'AEP d'Alger).

L'Etage dessert une population d'environ 50.000 habitants et plusieurs abonnés industriels, dont une importante gare de triage. A l'ouest, sa frontière haute suit approximativement l'Avenue Moghni et la Rue Rahim, avec un point haut à la cote 25 m ; à l'est, on suit à peu près une ligne située à la cote 30 m ; en point bas, on est à la cote 4 m. Il est alimenté par la conduite de 500 mm provenant du Réservoir de Kouba 97 (80.000 m³).

Au carrefour de la Rue Moghni et de la Route de Badjarah, à la cote 35 m environ, cette conduite alimente une dérivation en 300 mm qui suit la rue vers l'est, dans la direction de Gué de Constantine. La conduite de 500 mm descend la Rue Moghni dans la direction opposée jusqu'à la Rue Bensenoussi, où elle alimente deux conduites : la conduite de 250 – 200 mm Hassan Bey, et la conduite de 300 mm Bensenoussi, qui va alimenter les deux conduites de 200 – 150 mm Tripoli, qui suivent toute la partie basse de la zone, raccordées entre elles quatre fois sur ce parcours. A l'extrémité de la Rue Tripoli, une des deux est maillée à la conduite de 150 mm Rue Capitaine Mouzari, alimentée plus haut, côté sud, par la conduite de 300 mm Moghni citée plus haut.

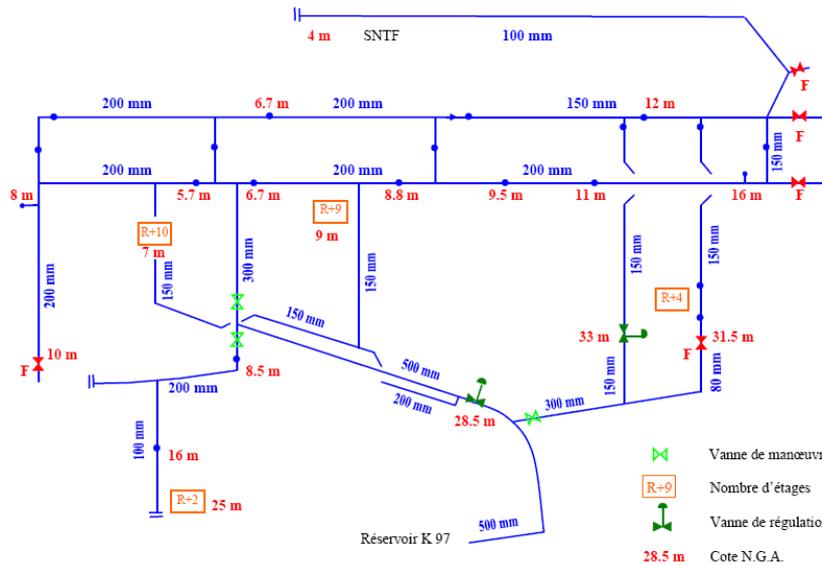


Figure IV.2 : Schématisation du réseau d'Hussein Dey (Document technique de SEAAL).

4. Elaboration du modèle

Dans les premiers temps du stage, nous avons pensé à élaborer un nouveau modèle du réseau sur *EPANET*, donc de passer par l'étape de la saisie de toutes les données nécessaires à la modélisation (longueurs, diamètre et rugosités des conduites, les côtes, les consommations aux nœuds...), ce qui pouvait nous prendre beaucoup du temps, alors qu'un modèle de tout le réseau d'Alger, élaboré par le bureau d'étude SOGREAH (bureau d'étude travaillant en sous-traitance avec la SEAAL), était disponible sous le logiciel *Piccolo*. L'idée était d'extraire la base de données (de l'étage K 97) de *Piccolo* vers *EPANET*, parce que ce dernier a la possibilité d'avoir un fichier d'entrées sous format texte avec séparateurs espaces ; ce format peut être obtenu par un enregistrement à partir d'un fichier Excel.

Dans le fichier d'entrée, une logique, ou une organisation, bien spécifique doit être respectée pour que le logiciel puisse traiter la base de données correctement. Cette organisation est représentée en annexes III.

Après l'élaboration du fichier, nous avons réussi avec difficultés à faire le passage *Piccolo* – *EPANET* et nous avons obtenu le réseau correspondant à l'étage K 97, si nous le comparons à celui de la figure -1-. La figure suivante illustre le réseau obtenu :

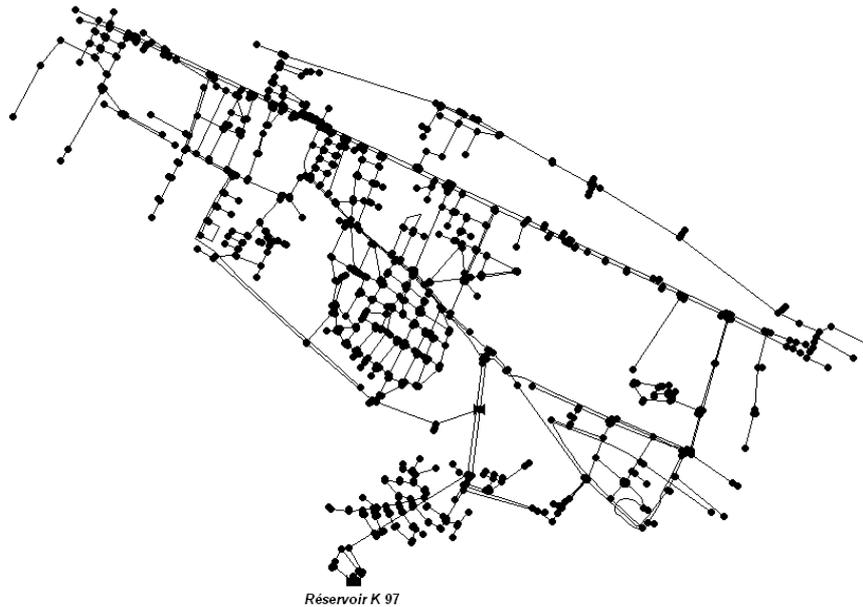


Figure IV.3 : *Le modèle de l'étage K 97 (Hussein Dey).*

4.1 Rugosité des conduites

Dans un premier temps, nous attribuons une rugosité arbitraire de 0,1 mm. La rugosité permet de refléter l'état intérieur de la conduite. Ce paramètre variant suivant l'âge, la nature de la canalisation et les sollicitations subies par les conduites, fait partie des paramètres de calage auxquels nous ne pouvons attribuer une valeur définitive en début de projet.

4.2 Le réservoir

Dans notre travail il n'est pas nécessaire de représenter un réservoir avec des entrées (adduction) et des sorties (distribution), car, le but n'est pas la gestion de la ressource, ni l'analyse en terme de volume du réseau. Il sera donc suffisant d'opter pour une référence de pression au lieu du réservoir pour éviter des éventuelles vidanges de ce dernier qui causent des problèmes pendant la simulation; cette référence de pression peut être obtenue dans *EPANET* par l'installation d'une bache infinie et de lui attribuer une charge totale égale à la cote du trop plein du réservoir (97 m). Cela se justifie par le but de notre modélisation, qui est l'analyse en termes de pressions sur le réseau.

4.3 Demandes aux nœuds

Une des données inhérentes à un nœud est la demande ou le débit sortant à ce nœud. Cette donnée est influente dans le calcul hydraulique. La difficulté réside dans le fait que d'une part, il faut identifier et situer les abonnés géographiquement dans la commune puis leur attribuer une consommation et d'autre part, il s'agit de les répartir de façon adéquate au niveau de ces nœuds.

Pour répartir les consommations aux nœuds, plusieurs logiques, ou méthodes, peuvent être utilisées, tous dépend du niveau d'information et de données disponibles sur le réseau.

Nous pouvons procéder à un repérage globale (pour les consommateurs domestiques) mais relativement précis ou ponctuel (pour les consommateurs industriels) des abonnés sur le réseau. Pour cela, il faut disposer de divers plans de la commune en question ainsi qu'un listing client spécifiant à la fois la position de l'abonné ainsi que sa consommation annuelle en eau. Dès lors, il s'agit de regrouper les abonnés autour des nœuds et d'inscrire une demande à ces nœuds égale à la moyenne des consommations de ces consommateurs. Ce procédé est relativement fastidieux mais nécessaire en vue de l'obtention d'une bonne précision pour le modèle. Les abonnés sont généralement répartis le long des tronçons. Or, il n'existe pas de caractéristique de ces tronçons qui permette de tenir compte de ces abonnés. Il faut donc les répartir judicieusement sur les deux nœuds constituant les extrémités du tronçon. La théorie du service en route adaptée dans ces situations est résumée à travers le schéma de la figure suivante :



Figure IV.4 : *principe de la théorie du service en route.*

Cette approche n'est valable que si les deux conditions, répartition uniforme des abonnés et sens unique d'écoulement, sont remplies. Si non, nous pouvons simplifier la répartition en raisonnant par rapport au nombre d'habitations situées à proximité des nœuds comme l'indique le schéma de la figure suivante :

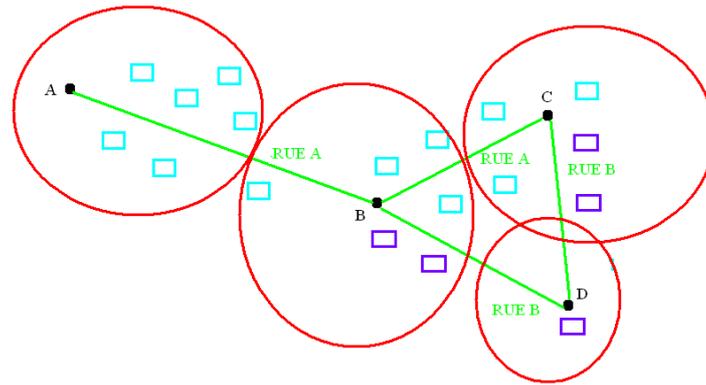


Figure IV.5 : Répartition de la consommation des abonnés sur les différents nœuds.

Pour encore plus de précision du modèle, il est préférable, si possible, de bien localiser les nœuds à partir desquels les gros consommateurs sont alimentés, car leurs consommations sont très variables et elles provoquent d'importantes perturbations de la pression dans le réseau.

Dans notre cas, la répartition de la consommation a été établie par SOGREAH en utilisant le logiciel *Piccolo* qui possède un moteur de calcul pour la répartition de celles-ci. Cette répartition est effectuée en choix dans *Piccolo*, soit par nœud, soit par arcs ; celle choisie par SOGREAH est une répartition par arcs. L'ensemble des communes d'Alger sont divisées en districts, chaque district lui-même est attribuée une ou les différentes catégories de consommations.

4.3.1 Variation journalière de la consommation

Le logiciel *EPANET* nous permet de simuler le comportement du réseau sur une journée entière et qui variera selon les variations de consommation de la population. Dès lors, il est nécessaire de différencier les consommateurs qui ont un comportement différent.

a. Catégories de consommations

Quatre catégories de consommation ont été définies suite à des études faites par SOGREAH pour l'établissement du modèle de consommations :

- consommation domestique (DOM) ;
- consommation administrative (ADM);
- consommation commerciale (COM);
- consommation industrielle (gros consommateurs GC).

Les deux catégories, consommation administrative et commerciale, sont englobées dans une seule catégorie appelée : consommations diffuses (DIF).

➤ **consommation domestique**

La consommation domestique est évaluée à partir des dotations individuelles, fonction de la typo morphologie de la l'habitat. Ces dotations (Tableau IV.1) ont été proposées dans l'étude de la demande en eau réalisée par, le groupement *SEM/BRLi*.

Cette étude s'est basée :

- d'une part sur une analyse urbaine fine à l'échelle des districts (au sens de l'ONS) composant la zone d'étude ;
- d'autre part sur une étude bibliographique de la demande en eau d'une des grandes villes métropoles méditerranéennes (Marrakech), qui ressemble beaucoup à la ville d'Alger en termes de culture, climat, situation géographique, habitudes...

<i>Typo morphologie</i>	<i>Dotation (l/j/hab)</i>
<i>Très haut standing (TH)</i>	200
<i>Haut standing (H)</i>	160
<i>Moyen standing supérieur (MS)</i>	100
<i>Moyen standing inférieur (MI)</i>	90
<i>Faible standing (F)</i>	60

Tableau IV.1 : Dotations domestiques fonction de la Typo morphologie de l'habitat.

b. Courbes de modulation

Les courbes de modulation sont les outils qui permettent au logiciel *EPANET* de calculer les variations journalières de pression et de débit sur l'ensemble du réseau. Associées à chaque catégorie de consommateurs, elles représentent l'évolution de la consommation de la catégorie considérée sur une journée.

Elles se présentent sous la forme de courbes possédant une valeur différente à chaque pas de temps choisit (une heure en générale). Le produit de ces valeurs saisies ou coefficients avec la valeur moyenne de consommation au nœud considéré nous renseigne sur la consommation à cette heure pour ce nœud.

Les figures (6) et (7) représentent respectivement les courbes affectées aux catégories GC, DIF et DOM.

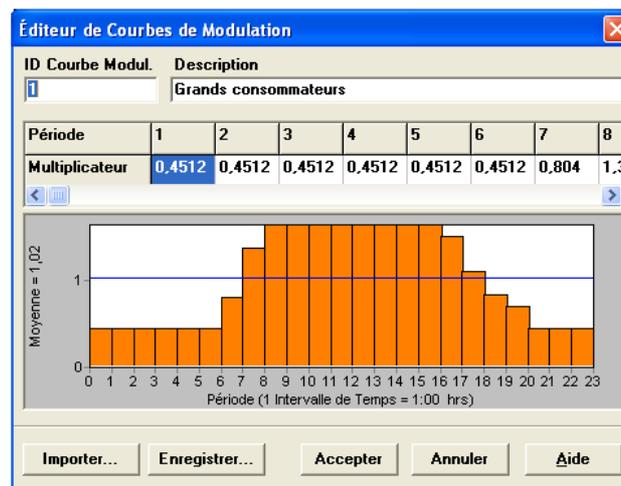


Figure IV.6 : Profil GC, DIF.

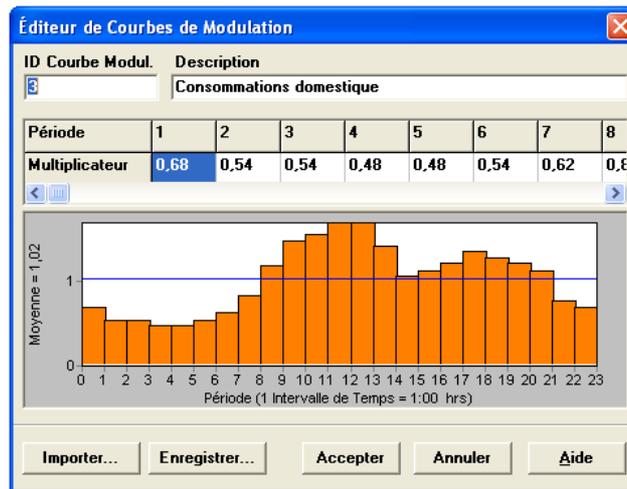


Figure IV.7 : Profil DOM.

Un suivi débitmétrique chez un abonné ou sur les compteurs principaux de distribution aurait du être effectué de façon à déterminer avec précision ces courbes de modulation, et concernant les consommateurs industriels dont la variation journalière et même saisonnière de la consommation est différente de l'un à l'autre. Il est possible de définir plusieurs catégories. Cependant, il est impossible de suivre l'évolution journalière des débits de production vu que cette dernière n'est pas de notre ressort. De plus, le suivi d'un compteur domestique présente le désavantage d'être peu révélateur d'une population de plusieurs centaines d'abonnés. Dès lors, l'établissement de ces courbes s'est fait (par SOGREAH) de façon empirique mais en tenant compte des tendances connues.

En plus des variations journalières de la consommation, il aurait été très intéressant d'introduire des variations saisonnières, car d'après le servis clientèle de la SEAAL et les données de facturation fournies pour étudier l'impact de la modulation sur les ressource en eau, la consommation est fortement variable d'un trimestre à un autre (figure -8-). Mais cela peut prendre considérablement du temps.

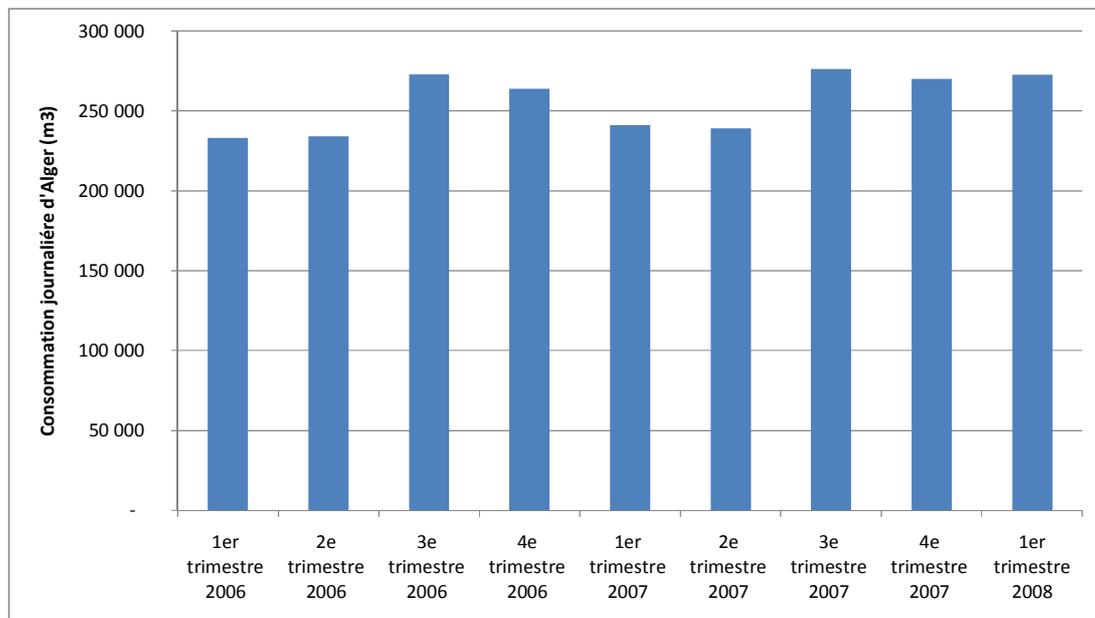


Figure IV.8 : Variabilité trimestrielle de la consommation journalière.

4.4 Prise en considération des fuites

Dans un réseau de distribution d'eau potable, le débit sortant de la conduite de distribution principale alimentant le réseau n'est jamais égal, mais toujours supérieur à celui consommé par les abonnés, car il existe toujours des pertes physiques et commerciales dans le réseau. Et là, encore nous nous retrouvons face à un paramètre influençant fortement le comportement du réseau, c'est les débits de fuites, leurs positions dans les conduites, leurs caractéristiques dimensionnelles.... Nous pouvons introduire ce facteur en utilisant deux approches différentes, l'une en utilisant le rendement du réseau, et l'autre en utilisant l'indice linéaire des pertes :

a. En utilisant le rendement du réseau

Le rendement du réseau a été estimé à 60 %. Le logiciel *EPANET*, contrairement à *Piccolo* qui peut revoir une demande à la baisse à cause des fuites par exemple, n'introduit pas la notion du rendement dans les calculs, donc pour simplifier l'introduction de fuites dans notre modèle, nous avons supposé que tout ce qui est distribué à partir du réservoir arrive complètement aux nœuds de demandes, c'est-à-dire que nous avons introduit le débit de fuites qui a fait que le réseau ait le rendement ci-dessus. Nous avons par conséquent divisé tous les consommations par le coefficient du rendement (0,6).

Cette considération n'est en fait pas représentative de la réalité des fuites, car en théorie le débit de fuite varie avec la pression du réseau (Chapitre II). Plus la pression de service dans le réseau est importante, plus le débit de fuites va augmenter. Si la variation du débit de fuites varie proportionnellement avec la racine carrée de la pression, un débit de 1 unité, par exemple, pour une pression de 5 bars, sera de 1,4 unité pour une pression de 10 bars.

Avec cette considération (utilisation du rendement) le débit de fuites est considéré constant dans le temps, ce qui est un point faible du modèle.

b. En utilisant l'indice linéaire des pertes (ILP)

L'indice linéaire des pertes est défini au chapitre I. L'introduction des fuites en utilisant cet indice consiste à faire une répartition du débit de fuites proportionnellement au linéaire des conduites et ensuite, d'affecter la moitié du débit obtenu aux nœuds amont et aval du tronçon considéré (figure -9-).

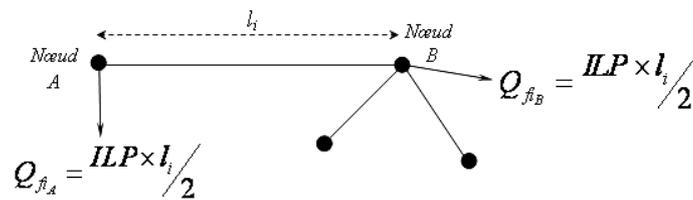


Figure IV.9 : Répartition des fuites sur un tronçon

5. Une première simulation (Situation avant la modulation)

Une première simulation a été faite, juste pour faire tourner le modèle correctement et pour comparer les résultats avec ceux obtenus par *Piccolo*. La comparaison a été faite et nous avons eu approximativement les mêmes résultats, et nous avons pu faire les remarques suivantes :

- La zone concernée par la modulation de la pression correspond bien à une zone à forte pression (supérieure à 60m) sur le modèle, et cela sur presque toute la journée. Les figures (10) et (11) présentent une simulation pour deux périodes de consommation (heure creuse, heure de pointe).

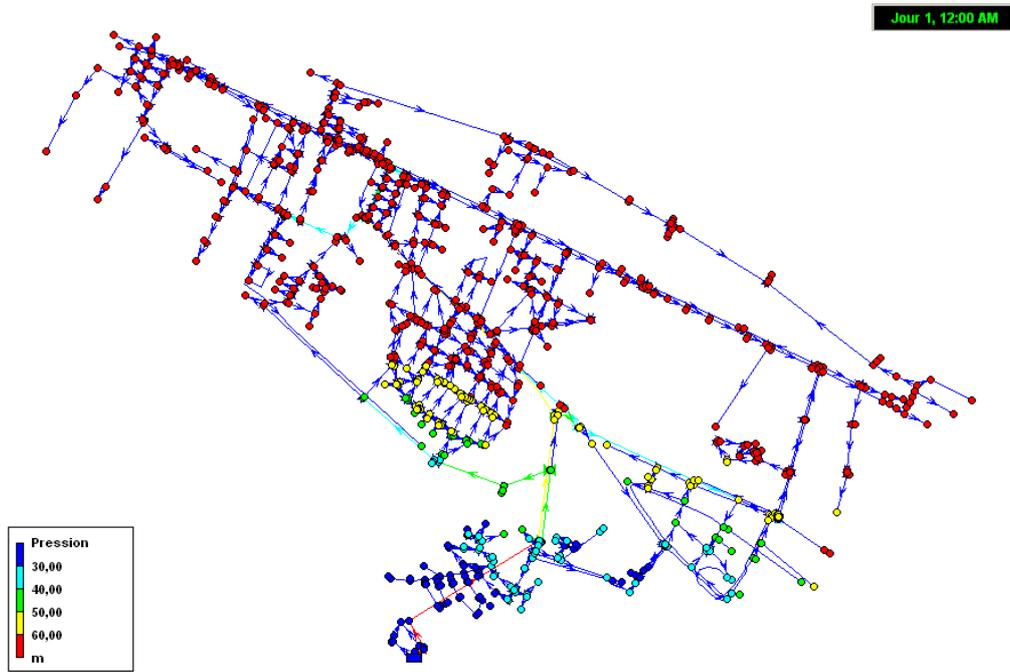


Figure IV.10 : Simulation avant modulation (heure creuse (00 :00)).

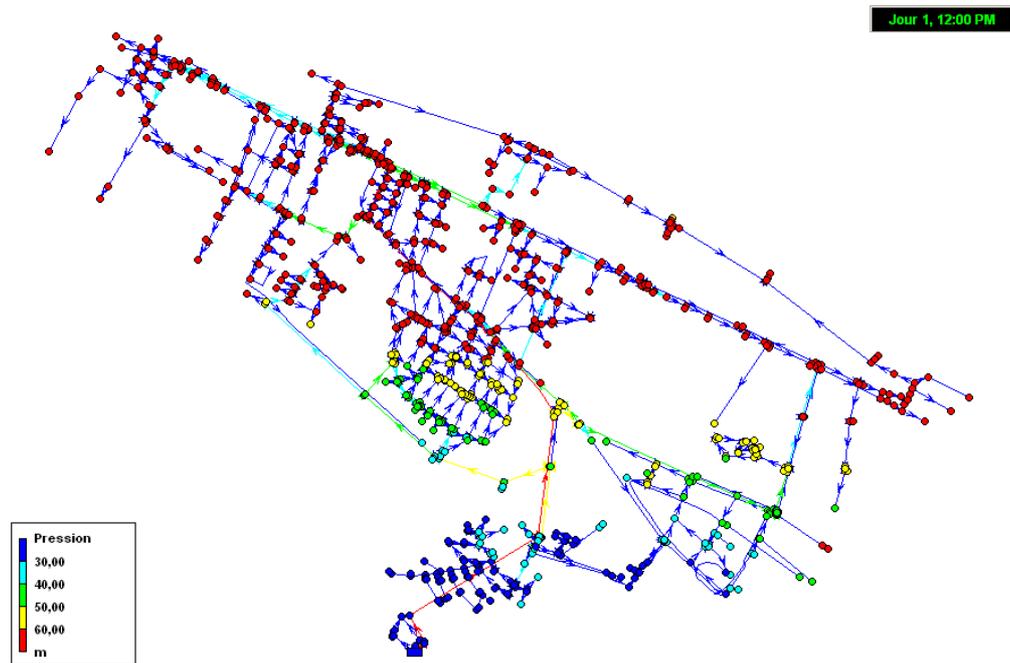


Figure IV.11 : Simulation avant modulation (heure de pointe (12 :00)).

- Les vitesses obtenues sont en grande partie très faibles, et même inférieures aux normes, ce qui a probablement une incidence sur la qualité de l'eau distribuée. La figure (9) présente une requête faite par *EPANET* à midi (heure de pointe) sur les vitesses inférieures à 0,33 m/s. nous pouvons ainsi dire que l'un des origines de fortes pressions dans le réseau est due peut-être à ces faibles vitesses.

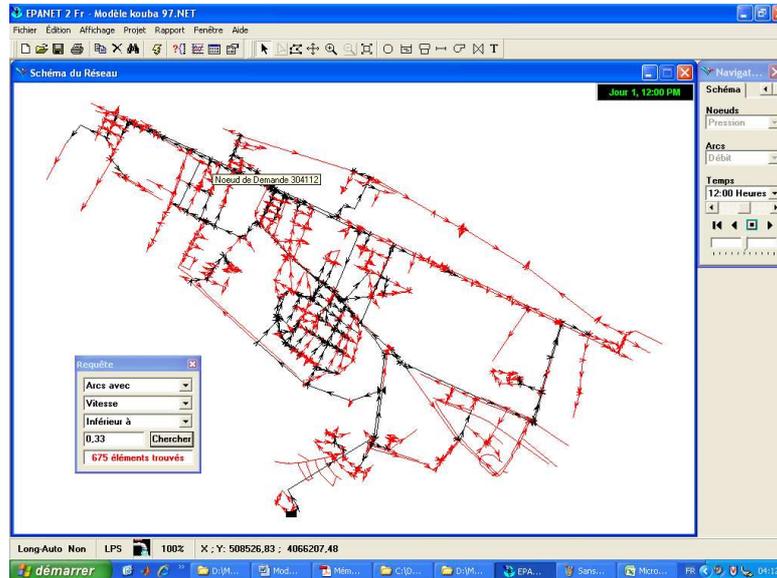


Figure IV.12 : Vitesses inférieures à 0,33 m/s (en rouge).

6. Passage à la modulation

Investigation (campagne de mesures)

Afin de bien comprendre le fonctionnement du réseau et de contrôler la bonne communication entre les différents tronçons et maillages, des mesures de pressions et de débits aux différents points du réseau étaient nécessaires.

Pour éviter des cassures de conduites pendant les essais, les vannes stabilisatrices prévues qui ont été installées sur les conduites d'alimentation du réseau, une (de 400 mm) sur la 500 mm de la rue Moghni, et l'autre (de 100 mm) sur la 150 mm de la rue Mouzari, ont été mises en marche (figure -13-, -14-). Pour que ces vannes stabilisatrices fonctionnent correctement et sans perturbation, il est nécessaire que toutes les alimentations du réseau doivent passer par ces vannes, donc il faut maîtriser toutes les entrées du réseau. Pour cela, des modifications (maillages, raccordement, installation de vannes, fermeture de quelques vannes, ...) ont eu lieu dont voici quelques détails :

- Stabilisateur Moghni

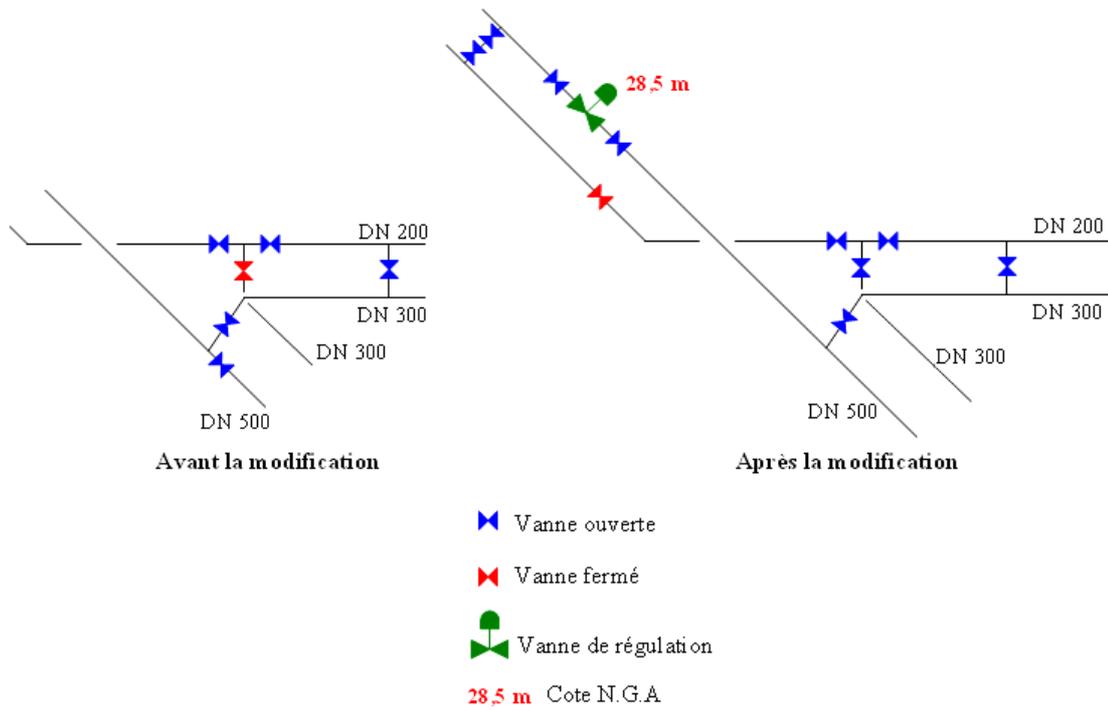


Figure IV.13 : Modification dans la rue Moghni.

- Stabilisateur Mouzari

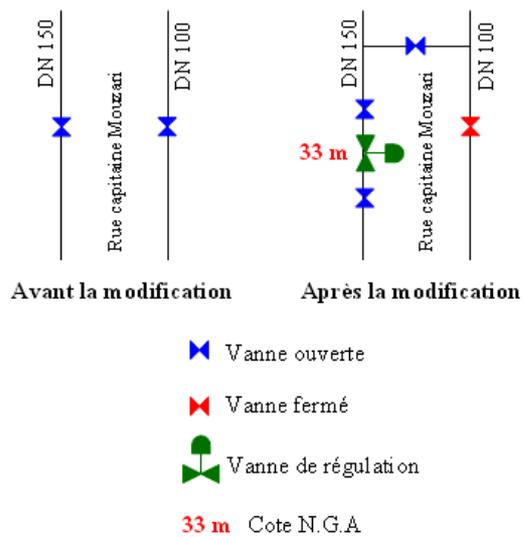


Figure IV.14 : Modification dans la rue Capitaine Mouzari.

- **Fermeture d'une vanne mettant en contact une conduite avec l'ave de la vanne de régulation**

Si la vanne (en rouge) indiquée dans la figure ci-dessous reste ouverte, elle va perturber le stabilisateur Moghni, donc elle doit être fermée.

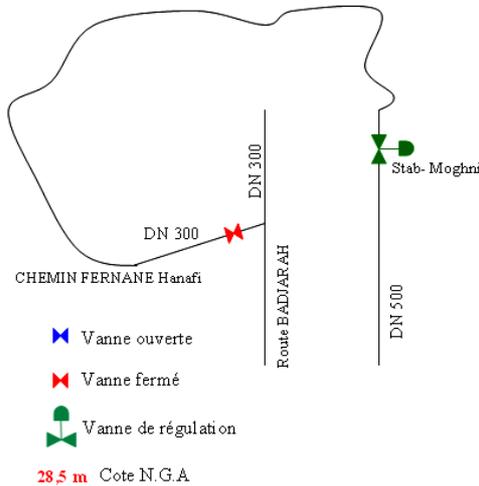


Figure IV.15 : *Modification dans le carrefour Chemin Fernane Hanafi – Route Bachdjarah.*

- **Fermeture de la frontière Hussein Dey – Bachdjarah**

L'avenue de l'A.L.N était alimenté par le réservoir de Bachdjarah 67. Il est basculé vers le Kouba 97, donc il faut fermer la communication entre ces deux réservoirs (figure -16-) pour s'assurer que l'eau ne vient qu'à partir de celui de Kouba en passant par le stabilisateur Mouzari.

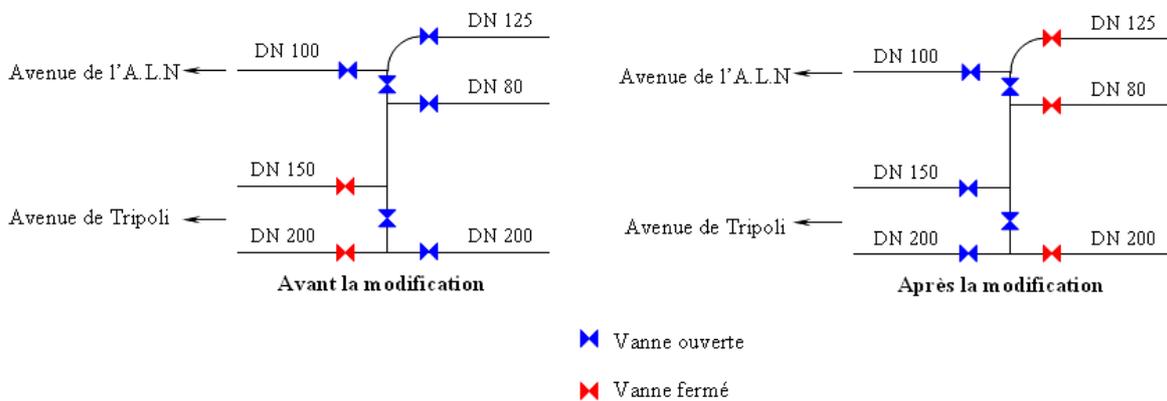


Figure IV.16 : *Fermeture de la frontière Bachdjarah 67 – Kouba 97.*

Les deux conduites descendant le long de la rue Mouzari (100 – 150 mm) ont été permutées au niveau de leurs raccordements avec celles de Tripoli (200 – 150 mm), (figure -17-).

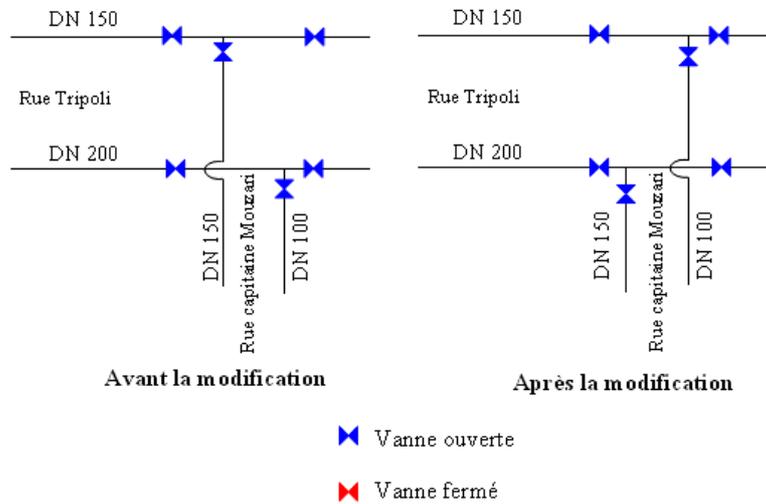


Figure IV.17 : Changeement Tripoli – Mouzari.

L'emplacement des enregistreurs installés sur le secteur est représenté dans la figure suivante :

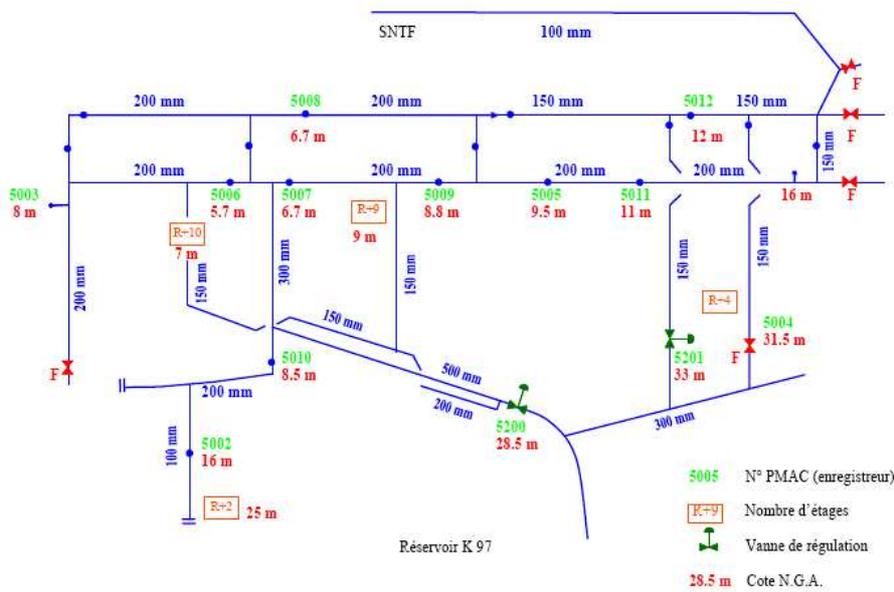


Figure IV.18 : Localisation des enregistreurs de pression (Document technique de SEAAL).

Le matériel utilisé (figure -19-) permet d'effectuer des enregistrements de pression toutes les 5 minutes. Les deux stabilisateurs Moghni et Mouzari étaient successivement à des consignes de pression de 44 et 27 m. Les résultats de la campagne (du 09/12/2007) sont représentés dans la figure -20-. Les brusques variations de la pression figurants dans les graphes sont dues aux quelques manœuvres de vannes pendant les mesures (d'après l'équipes chargé des opérations de mesures) et ne sont plus des anomalies ou bien des tirages de consommateurs industriels.



Figure IV.19 : *Enregistreur de pression (type Metrolog).*

Nous voyons à travers ces mesures la situation critique dont la quelle se trouve le réseau. Avec une réduction de pression jusqu'à 44 m à un point de cote 28,5 m (stabilisateur Moghni) dont la pression amont est d'environ 68 m (sans tenir compte des pertes de charge), les pressions dans le réseau ne sont plus inférieures à 40 m même pendant les heures de pointe.

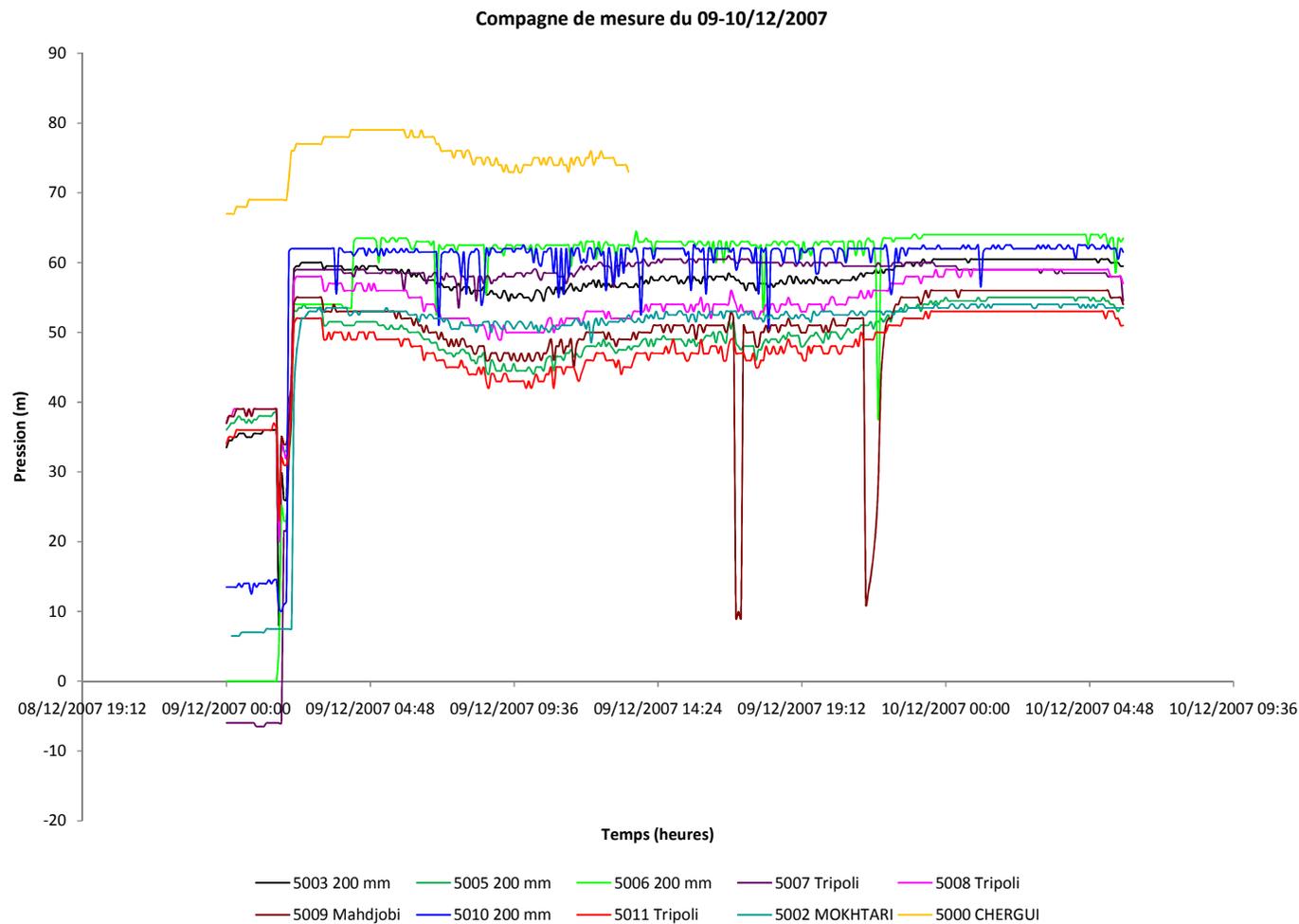


Figure IV.20 : résultats de la campagne du 09/12/2007.

Dans cette situation (avant modulation), nous n'allons pas procéder au calage du modèle vue que seules les mesures de pressions ont eus lieu, et pas de mesures de débits, alors que pour caler un modèle hydraulique, il est nécessaire de prendre des mesures de débits et de pressions en même temps. D'ailleurs, la mesure de débits, et surtout sur la conduite principale alimentant le réseau, constitue la condition aux limites du modèle. Parce qu'un faux débit d'entrée dans le modèle ne donnera jamais des pressions correspondent aux mesures. Donc le calage sera reporter à la phase : après modulation.

Fermeture de la frontière

Après la vérification du bon fonctionnement du réseau à travers les mesures de pression, nous pouvons fermer les vannes de frontières pour isoler la zone concernée par la modulation. La frontière de l'étage K 97 est représentée dans la figure suivante (les distances ne sont pas respectées) :

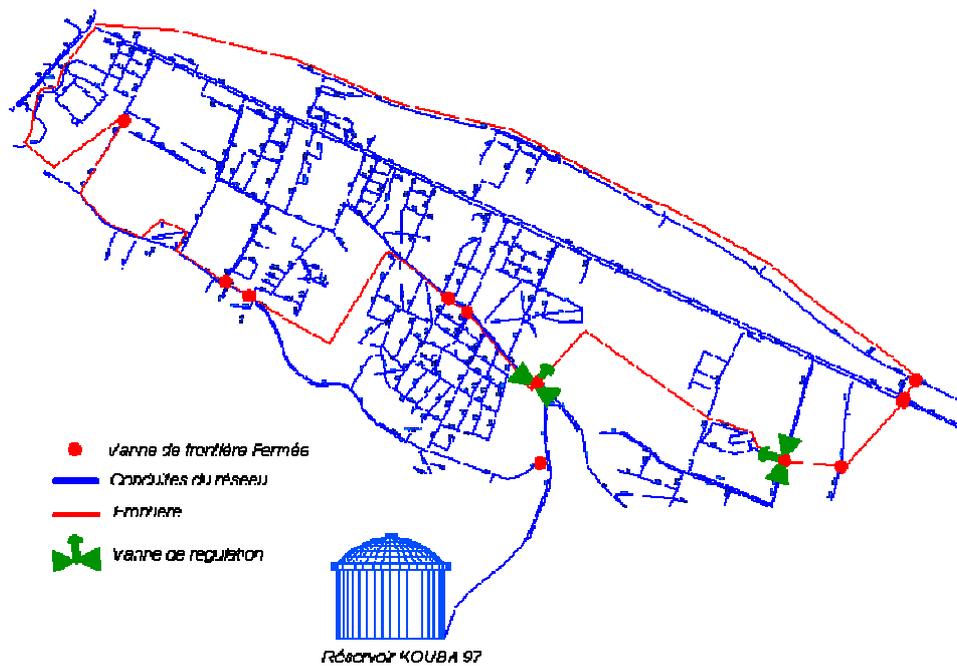


Figure IV.21 : *Positionnement Des vannes de frontières*

Sur le modèle, la zone à moduler a été isolée au moyen des vannes fermées. Pour ne pas avoir des messages d'avertissement après la simulation, nous avons enlevé tous ce qui se trouve en aval de ces vannes (non concerné par la modulation). Le modèle de la zone modulée est représenté dans la figure suivante :

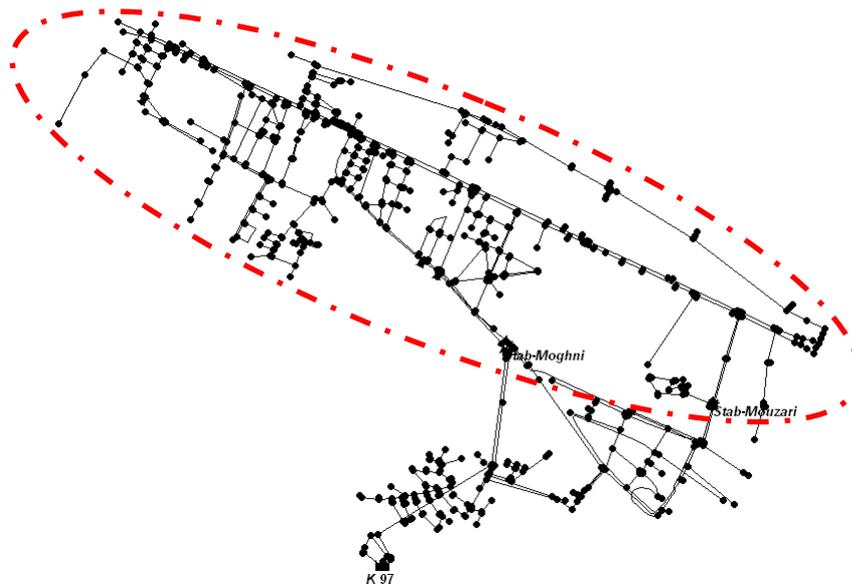


Figure IV.22 : *Modèle de la zone modulée*

Les vannes de régulation

Les vannes de régulation sont des stabilisateurs de pression aval de type hydraulique à pilote (annexe 2). Ce type de vannes garantit une pression aval constante quelque soient les conditions de pression en amont ou de demande. Leur pilote de régulation est équipé d'un contrôleur électronique (annexe 3) alimenté par batterie permettent la modification de ça consigne en fonction du débit instantané ou suivant un profil horaire.

Dans notre modèle et avec le logiciel *EPANET*, le type de vannes qui répond à celles utilisées sur le terrain est la vanne stabilisatrice aval (figure -23-).

Vanne 19	
Propriété	Valeur
*ID Vanne	19
*Noeud Amont	14
*Noeud Aval	17
Description	
Genre	
*Diamètre	400
*Type de Vanne	Stab. Aval
*Consigne	Stab. Aval
Coeff. Perte Charge	Stab. Amont Réd. Pression Régul. Débit Diaphragme Usage Général
État Préréglé	
Débit	
Vitesse	0,23
Perte de Charge	24,44
Qualité	0,00
État	Actif

Figure IV.23 : *Les vannes stabilisatrices aval dans EPANET*

Une vanne stabilisatrice aval limite la pression au nœud en aval. *EPANET* calcule à chaque instant de la simulation dans quel état se trouve la vanne. Il y a trois états possibles:

- Partiellement ouvert (c'est-à-dire, en régulation) pour maintenir une pression aval correspondant à la consigne donnée, quand la pression en amont est plus élevée que la pression de la consigne ;
- Entièrement ouvert si la pression en amont est au-dessous de la consigne souhaitée ;
- Fermé, si la pression en aval dépasse celle du côté amont (autrement dit, la vanne ne permet pas l'inversion d'écoulement).

Le stabilisateur maître, posé sur la conduite de 500 mm Moghni – Parnet à l'aval du branchement de l'Hôpital, est ouvert en permanence ; nous pouvons le faire fonctionner suivant un profil horaire, ou suivant l'indication de débit instantané reçue du débitmètre à insertion électromagnétique (ABB) installé à l'amont dans un même regard. Le contrôleur a régulé suivant un profil horaire jusqu'au Mercredi 19 Décembre à 11h15, jour de l'Aïd, puis suivant le débit instantané.

L'esclave, posé sur la conduite de 150 mm Mouzari à l'extrémité de l'Etage ne s'ouvre qu'en secours ou en période de pointe, pour garantir le service du secteur critique (point critique 5004) ; il régule suivant un profil horaire.

7. Situation après la modulation

Profils de régulation

Après la phase de vérification de la bonne communication du réseau et à travers les mesures faites, nous pouvons établir des profils de régulation, horaires et en fonction du débit, de façon à avoir la pression contractuelle, en générale de 20 à 30 m pendant les heures de pointes et de 10 à 15 m pendant les heures creuses, aux points critiques (les plus hauts ou les plus éloignés hydrauliquement) de la zone. Pour vérifier l'efficacité des profils, il a été nécessaire de garder l'enregistreur de pression situé au point critique 5004 de cote 31,5 m (figure -18-). Plusieurs essais étaient nécessaires pour établir des profils définitifs.

Les profils de régulation en fonction du débit sont en général utilisés pour des scénarii de consommations exceptionnelles (l'Aïd par exemple).

7.1.1 Profil de régulation horaire

Les consignes données aux vannes de régulation à l'aide du Modulo sont représentées dans les tableaux suivants :

- **stabilisateur Moghni Parnet (400 mm)**

<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>
0:00	17	8 :00	32	16 :00	29
1 :00	15	9 :00	33	17 :00	29
2 :00	15	10 :00	37	18 :00	28
3 :00	15	11 :00	38	19 :00	26
4 :00	15	12 :00	38	20 :00	26
5 :00	17	13 :00	35	21 :00	26
6 :00	25	14 :00	30	22 :00	23
7 :00	30	15 :00	29	23 :00	20

Tableau IV.2 : Profil horaire de régulation du stabilisateur Moghni.

- **stabilisateur Mouzari (100 mm)**

<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Heure</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>
0:00	8	8 :00	21	16 :00	16
1 :00	6	9 :00	24	17 :00	16
2 :00	6	10 :00	26	18 :00	15
3 :00	6	11 :00	26	19 :00	14
4 :00	6	12 :00	26	20 :00	14
5 :00	8	13 :00	24	21 :00	14
6 :00	16	14 :00	20	22 :00	12
7 :00	20	15 :00	16	23 :00	10

Tableau IV. 3 : *Profil horaire de régulation du stabilisateur Mouzari.***7.1.2 Profil de régulation en fonction du débit**

Les modules installés avec les vannes de régulation permettent de définir un profil de régulation en fonction du débit. Si le débit est maximal (heures de pointe), nous devons donner une consigne plus importante que s'il est minimal (heures creuse).

<i>Débit maximal (m³/h)</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Débit minimal (m³/h)</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>	<i>Panne Débitmètre</i>	<i>Pression de consigne (m)</i>
625	45	235	15	0	32

Tableau IV. 4 : *Profil de régulation en fonction du débit du stabilisateur Moghni.***7.2 La régulation dans EPANET**

Avec l'environnement de commandes d'EPANET, nous pouvons programmer une vanne de régulation de type stabilisatrice aval en lui attribuant une consigne dépendant du débit passant dans la vanne elle-même (ou dans un autre arc du réseau), ou même de l'état d'un autre élément quelque soit sont type (Pression dans un nœud, niveau d'eau dans un réservoir...).

Il existe deux types de commandes : simples et élaborées.

7.2.1 Commandes simples

Les Commandes Simples changent l'état ou la consigne de fonctionnement d'un arc (vanne, tuyau, Pompe,...) en fonction :

- Du niveau d'eau dans un réservoir ;
- De la pression à un nœud ;
- De l'instant de la simulation ;
- De l'heure de la journée.

Les commandes doivent être rédigées en suivant l'un de ces trois modèles:

LINK *IDArc état* **IF NODE** *IDNœud* **ABOVE/BELOW** *valeur*
LINK *IDArc état* **AT TIME** *temps*
LINK *IDArc état* **AT CLOCKTIME** *heure AM/PM*

Dans lesquels :

- *IDArc* : étiquette d'identification d'un arc ;
- *Etat* : OPEN ou CLOSED, la vitesse de rotation d'une pompe, la consigne de fonctionnement d'une vanne ;
- *IDNœud* : étiquette d'identification d'un nœud ;
- *Valeur* : la pression d'un nœud ou le niveau d'un réservoir ;
- *Temps* : le temps depuis le début du calcul, en heures ou en notation heures : minutes ;
- *Heure* : l'heure de la journée en format américain (AM : jusqu'à midi, PM : de midi à minuit ; midi et demi = 12 : 30PM, minuit et demi = 12 : 30 AM).

Nous avons opté pour ce type de commande, et précisément le deuxième modèle, afin d'introduire le profil de régulation horaire.

La figure suivante présente l'éditeur de commandes avec les consignes appliquées au modèle.



Figure IV.24 : Éditeur de commandes d'EPANET

7.2.2 Commandes élaborées

Quand un état hydraulique particulier du système est atteint, les commandes élaborées permettent de déterminer l'état ou la consigne d'un arc basé sur une combinaison de conditions pour l'intervalle actuel. Les suivantes entrées informent sur la construction de ces commandes.

Chaque commande élaborée est une série de déclarations de la forme suivante :

```

RULE IDCommande
IF condition_1
AND condition_2
OR condition_3
AND condition_4
etc.
THEN action_1
AND action_2
etc.
ELSE action_3
AND action_4
etc.
PRIORITY Priorité
  
```

Où:

- *IDCommande* : l'étiquette d'identification de la commande ;
- *condition_n* : une clause conditionnelle ;
- *action_n* : une clause d'action ;
- *Priorité* : une valeur de priorité (par exemple, un nombre de 1 à 5).

Remarques

- Seulement les déclarations **RULE**, **IF** et **THEN** sont obligatoires; les autres sont optionnelles ;
- La valeur qui suit **PRIORITY** s'utilise pour déterminer quelle commande s'applique s'il y a deux commandes qui donnent des instructions contradictoires ;
- Une commande sans valeur de priorité a toujours la priorité la plus basse. Si deux commandes ont la même valeur de priorités, la priorité est donnée à la commande qui figure la première dans la section ;
- Il n'y a aucune limite au nombre de commandes pouvant être utilisées.

Ce type de commande peut être utilisé pour l'établissement du profil de régulation en fonction du débit.

8. Calage du modèle

Le calage a pour objectif de rapprocher le comportement du modèle de celui du système réel. Il s'agit de rendre le modèle représentatif de la réalité. Pour cela, des mesures de pressions et de débits ont été réalisées sur l'ensemble du réseau. À partir de ces mesures réalisées dans des situations données (profils de régulation), des changements de quelques paramètres ont eu lieu.

Notre calage n'est en fait pas très performant. En effet, nous n'avons des mesures de débit que sur la conduite de 500 mm alimentant le réseau, et des mesures de pression que dans quatre points (figure -25-).

8.1 Points de mesures

La figure suivante présente la localisation des points de mesures de pression et du débit. Les distances n'étant pas respectées :

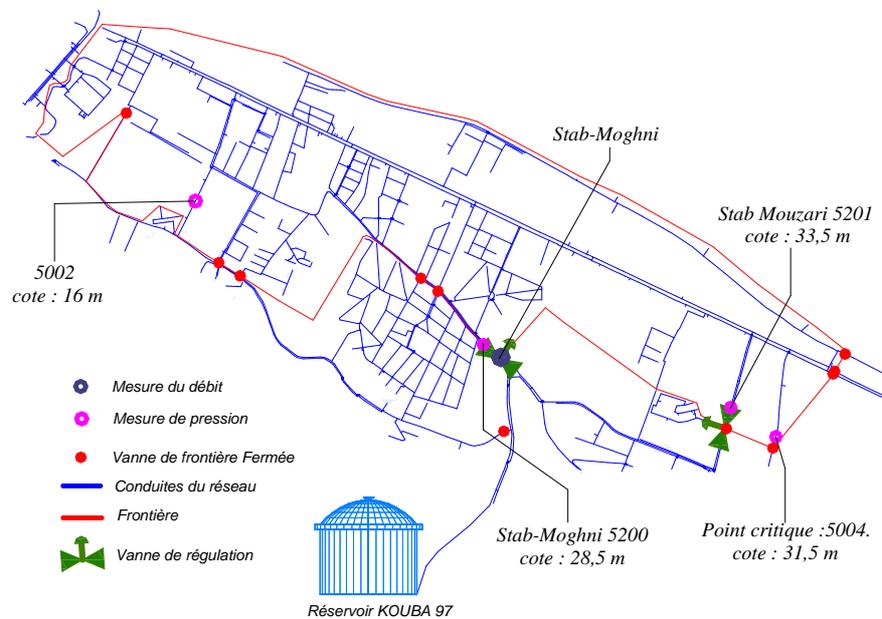


Figure IV.25 : Positionnement des points de mesure

8.2 Situation initiale

Le graphique de la figure 26 représente la variation du débit mis en réseau. La courbe bleue représente l'évolution du débit calculé par *EPANET*. Les marques rouges correspondent aux variations moyennes obtenues à partir des mesures de la cane à insertion installée avec la vanne et le modulo dans le même regard. La journée de référence est celle du 01 Janvier 2008.

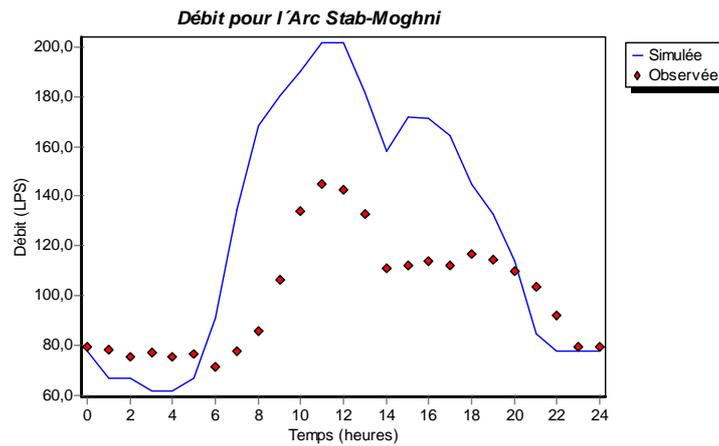


Figure IV.26 : Comparaison des débits mis en réseau calculés et mesurés.

Malgré avoir eu des allures qui se ressemblent. Les résultats obtenus par le modèle ne sont pas représentatifs de la réalité. Cette non représentativité peut être prouvée par *EPANET* qui fournit un rapport statistique sur le calage du modèle. La figure et tableau suivants en présentes une illustration :

K 97					
Statistiques de Calage pour Débit					
Point-Mesure	Nombre Obs	Moyen Obs (LPS)	Moyen Sim (LPS)	Erreur Moy	Dév Stand
Stab-Moghni	24	100,94	126,97	34,021	42,046
Réseau	24	100,94	126,97	34,021	42,046
Corrélation entre Valeurs Moyennes: 0,000					

Tableau IV. 5 : Statistiques de calage pour le débit.

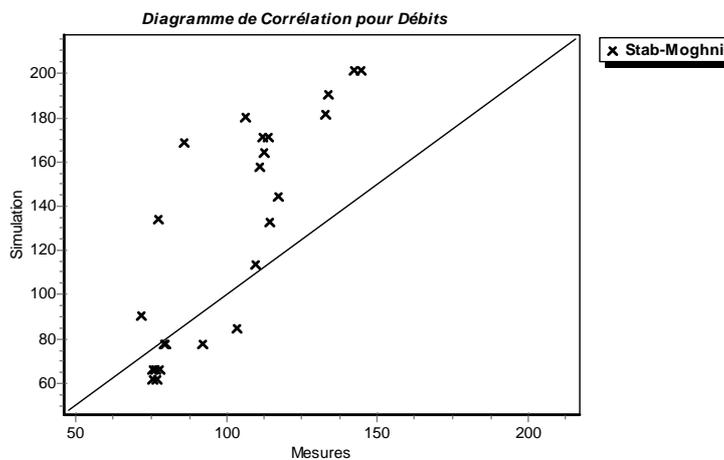


Figure IV.27 : Diagramme de corrélation pour le débit.

En ce qui concerne la pression, nous ne pouvons malgré la bonne corrélation (figure -28- (E)), apporter des commentaires. Et cela, tant que le débit d'alimentation du réseau n'est pas bien callé.

Les graphiques ((A), (B), (C) et (D)) de la figure 28 présentent les variations des pressions (mesurées : points rouges, et calculées : courbe bleu) aux différents points de mesure.

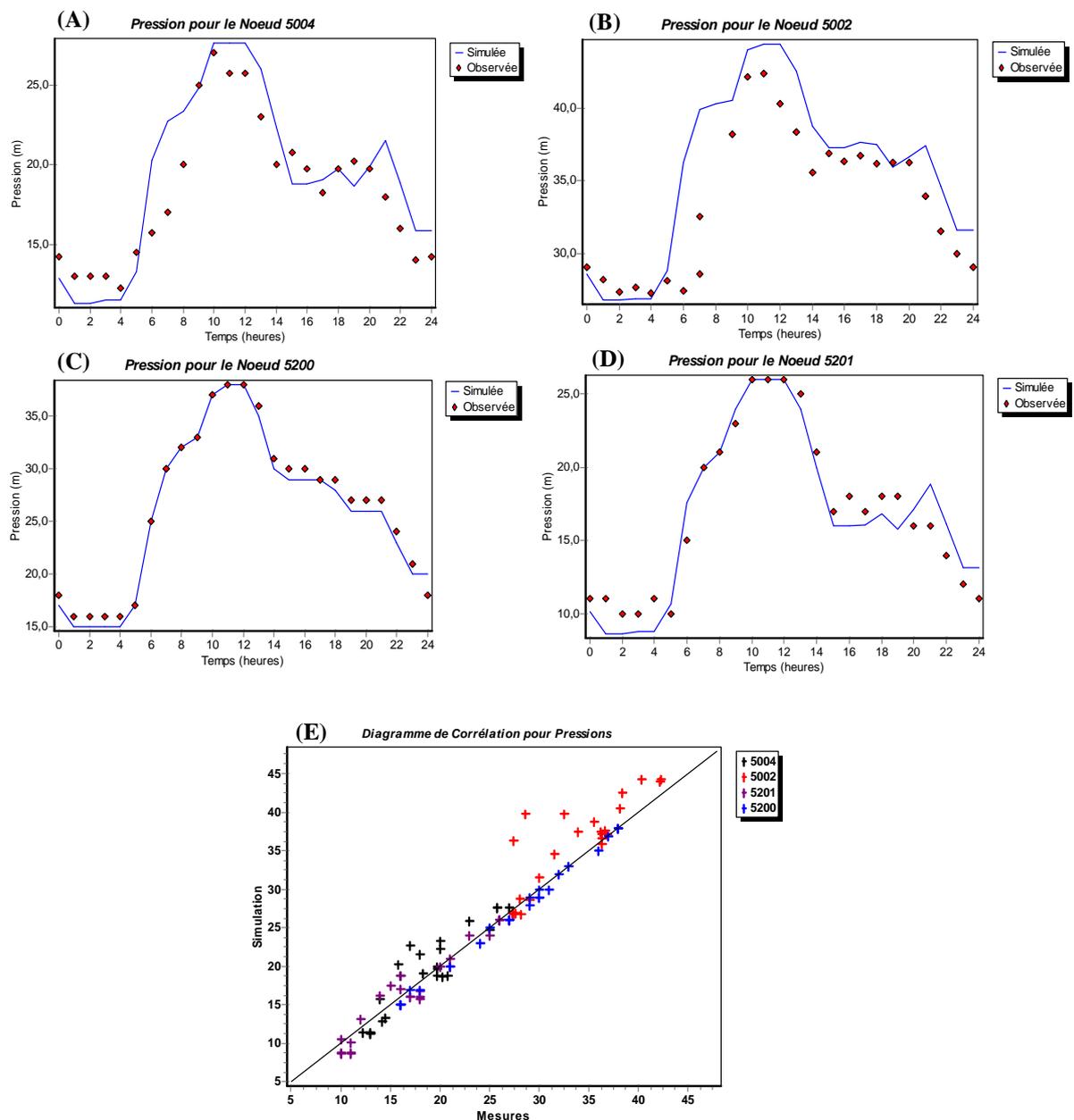


Figure IV.28 : Comparaison des pressions calculés et mesurés.

Vu les imprécisions obtenues sur le débit, nous devons procéder au calibrage du modèle.

8.3 Calibrage du modèle

Plusieurs solutions sont possibles pour caler ou calibrer un modèle. Nous devons tout d'abord procéder au calibrage du débit. Parce qu'il constitue la condition aux limites pour le modèle. Et par la suite, intervenir sur les autres paramètres (comme la rugosité par exemple) qui influenceront sur la répartition des débits et des pressions dans l'ensemble du réseau.

8.3.1 Calage en débit

Pour modifier un débit il faut, soit réaffecter les consommations aux nœuds, soit jouer sur les profils de consommations. Cette dernière est la plus intuitive dans notre cas. En effet le débit simulé est décalé de celui mesuré en partie et non entièrement. C'est -à-dire que le problème se pose probablement au niveau de la répartition du volume distribué dans la journée.

8.3.1.1 Modification des profils de consommation

La modification ne doit pas être sur un ou deux profils seulement, mais nous devons modifier tous les profils en même temps pour qu'il n'y est pas de perturbation de l'allure du débit. Aussi, cette modification ne doit pas être aléatoire, une méthodologie doit être établie.

A l'aide du logiciel Excel, nous avons essayé d'adapter les profils (DOM, DIF et GC) pour avoir un débit simulé égale au débit mesuré, toute en essayant de grader la somme des coefficients égale à 2400, et les mêmes tendances qu'auparavant.

Le graphique suivant superpose les différents profils originaux et calculés pour chaque catégorie de consommateurs.

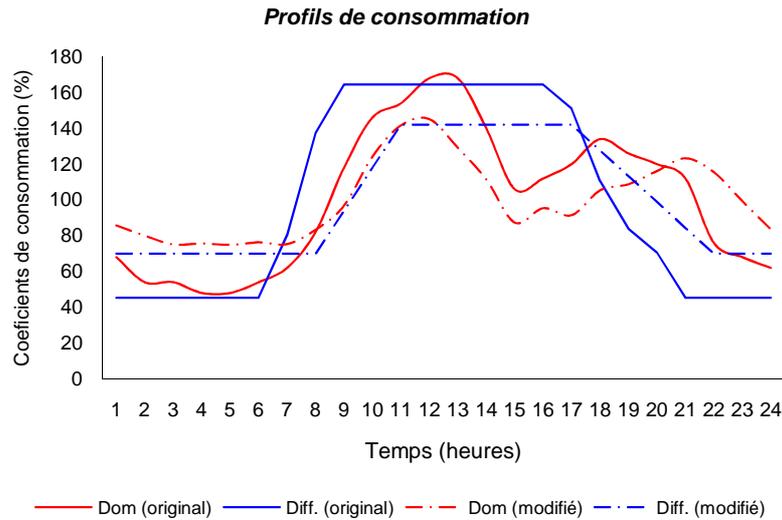


Figure IV.29 : Profils de consommation, originaux et modifiés.

Le tableau suivant présente les valeurs des coefficients de consommation obtenues :

Heure	Dom (%)	Autres (Diff, GC) (%)
1	84	70
2	80	70
3	73	70
4	74	70
5	73	70
6	75	70
7	74	70
8	82	70
9	95	94
10	121	118
11	138	142
12	145	142
13	127	142
14	120	142
15	109	142
16	97	142
17	89	142
18	103	128
19	107	113
20	114	99
21	121	84
22	114	70
23	98	70
24	82	70
Somme	2395=2400	2400

Tableau IV. 6 : Nouveaux coefficients de consommation.

En appliquant ces profils au modèle, nous avons eu le résultat suivant sur le débit :

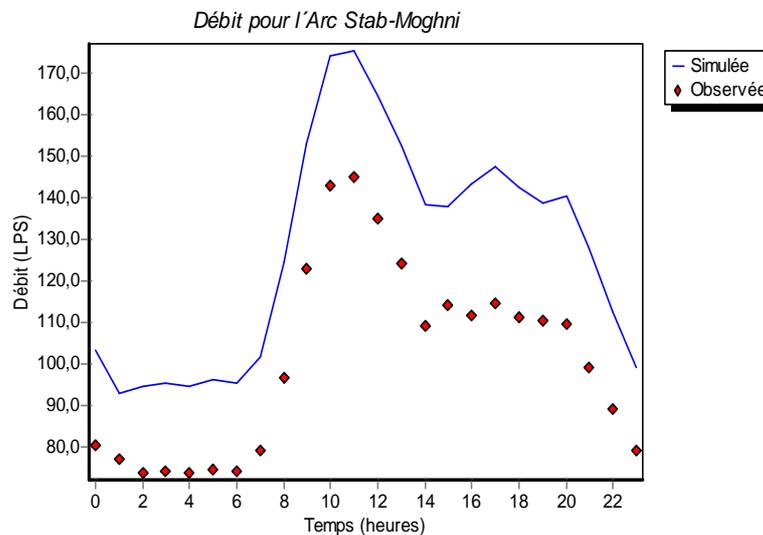


Figure IV.30 : Comparaison des débits, avec les nouveaux profils.

Cette fois ci, le débit simulé contrairement à celui de la figure -26-, est entièrement décalé vers le haut. Ce décalage peut être dû, soit à une sous-estimation du rendement du réseau (il est de 60 %). Soit à une surestimation des consommations aux nœuds, donc du volume distribué.

8.3.1.2 Réaffectation des consommations aux nœuds de demande

Si nous calculons le rapport des volumes, simulé et mesuré (allure sous les deux courbes de la figure -30-). Nous obtenons un coefficient de 0,78. Pour nous rapprocher du volume réellement distribué, nous devons multiplier toutes les consommations aux nœuds par ce coefficient.

Le résultat obtenu après cet ajustement est représenté dans la figure suivante :

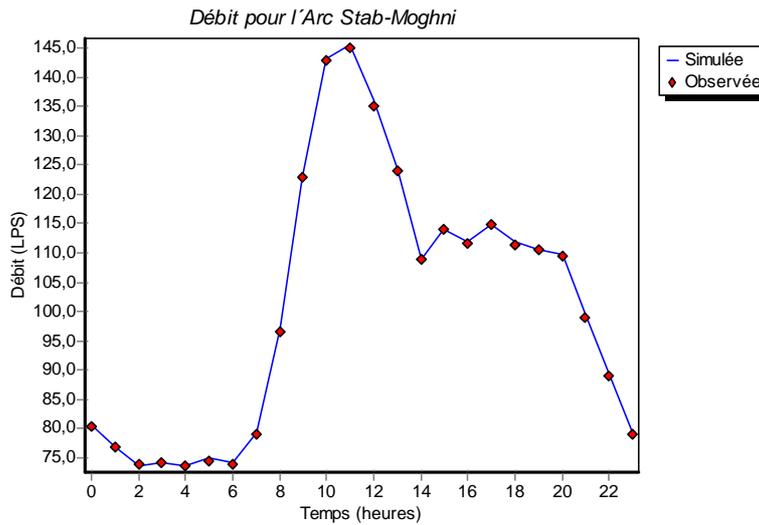


Figure IV.31 : Comparaison des débits, avec les nouvelles consommations aux nœuds.

Le rapport de ce calage, fourni par EPANET, est représenté dans ce qui suit :

K 97					
Statistiques de Calage pour Débit					
Point-Mesure	Nombre Obs	Moyen Obs (LPS)	Moyen Sim (LPS)	Erreur Moy	Dév Stand
Stab-Moghni	24	100,87	101,13	0,29	0,372
Réseau	24	100,87	101,13	0,29	0,372
Corrélation entre Valeurs Moyennes: -2,211					

Tableau IV. 7 : Statistiques de calage pour le débit calé.

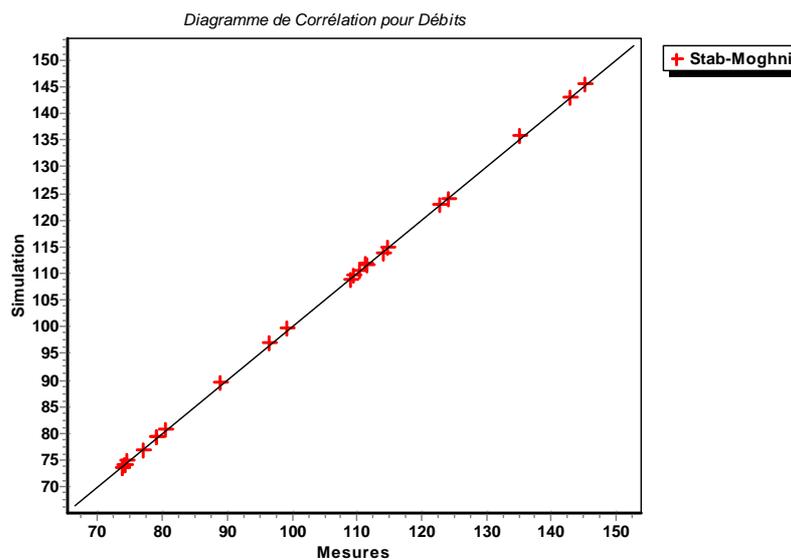


Figure IV.32 : Diagramme de corrélation pour le débit calé.

Jusqu'à ce point, nous avons établi la condition aux limites du modèle (un bon calage du débit), donc nous pouvons apporter des commentaires sur les pressions :

8.3.2 Calage en pression

Il est à noter que la rugosité moyenne que nous avons utilisé est de 1 mm, car celle initiale, de 0,1 mm, n'est jamais représentative de l'état intérieur des conduites d'un réseau ancien comme celui de la ville d'Alger. En réalité, la rugosité n'influence pas d'une façon intéressante les pressions dans le réseau. Par contre, si nous voulons faire une représentation avec un degré de précision plus important, Il est nécessaire d'effectuer des mesures de rugosités sur terrain en prenant des échantillons de conduites de différents matériaux et diamètres.

Les résultats obtenus sont suivants :

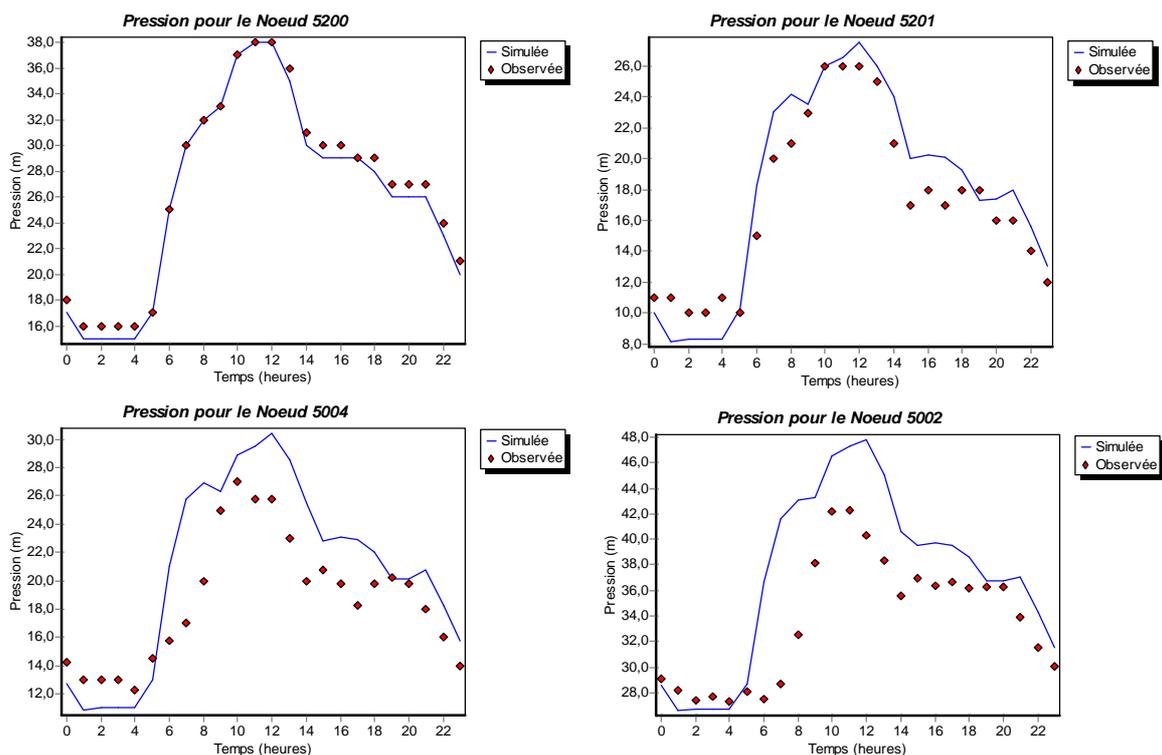


Figure IV.33 : Comparaison des pressions après calage du débit (*Rugosité = 1mm*).

- Statistiques du calage :

<i>K 97</i>					
<i>Statistiques de Calage pour Pression</i>					
<i>Point-Mesure</i>	<i>Nombre Obs</i>	<i>Moyen Obs (m)</i>	<i>Moyen Sim (m)</i>	<i>Erreur Moy</i>	<i>Dév Stand</i>
<i>5004</i>	24	18,57	20,77	3,075	3,722
<i>5002</i>	24	33,65	37,07	3,799	5,083
<i>5200</i>	24	26,79	26,17	0,625	0,791
<i>5201</i>	24	17,17	18,07	1,782	2,05
<i>Corrélation entre Valeurs Moyennes: 0,981</i>					

Tableau IV. 8 : *Statistiques de calage pour la pression après calage.*

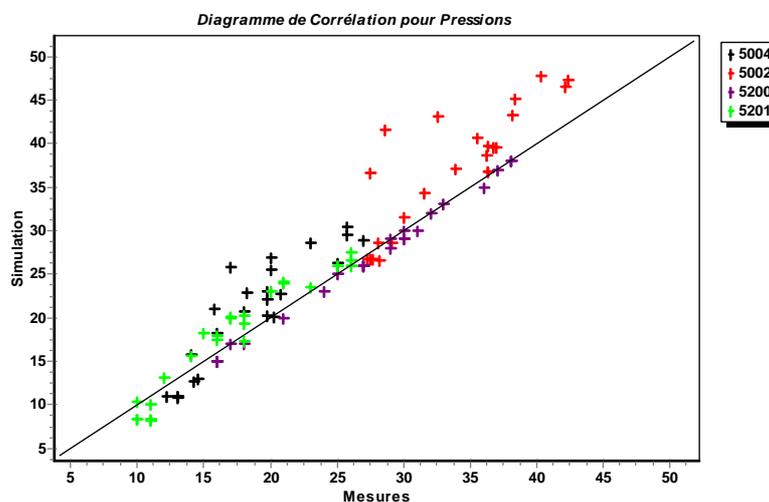


Figure IV.34 : *Diagramme de corrélation pour la pression après calage.*

La qualité du calage en pression a eu une diminution plus au moins considérable, mais le résultat reste toujours acceptable vu le niveau d'information que nous avons sur le réseau.

En réalité, il est très difficile sinon impossible, d'avoir un bon calage de pression pour un réseau ci-petit avec un niveau d'information minimal. Et une connaissance minimal de son état (plus de 30 % des vannes de circulation sont fermées ou cassées). Mais il reste toujours possible d'y avoir une amélioration en procédant à des investigations sur terrain, pour s'informer de l'état de toutes les vanne de circulation et faire d'éventuelles corrections (ouverture des vannes fermées, changement de celles défectueuses,...).

Les imprécisions sur les pressions peuvent être due aussi à la tolérance des appareils de mesure. Et que ces appareils ne sont pas installés directement sur les conduites principales sur les quelles nous avons considéré les nœuds de calage dans le modèle, mais sur des branchements qui peuvent être en dessous ou au dessus de ces conduites principales.

Sinon, en forçant le modèle à donné des résultats exacts. Et cela, en effectuant des changements excessifs sur les niveaux de rugosités par exemple, Le modèle risque d'être inutile.

9. Validation du modèle

Pour voir le comportement du modèle dans une autre journée de référence autre que celle du 01/01/2008. Mais à une date plus récente qui le 08/06/2008, nous avons installé trois enregistreurs de pression en plus de ceux installés dans le point critique 5004 et en aval des deux stabilisateur. Les nouveaux points de mesure sont représentés dans la figure suivante :

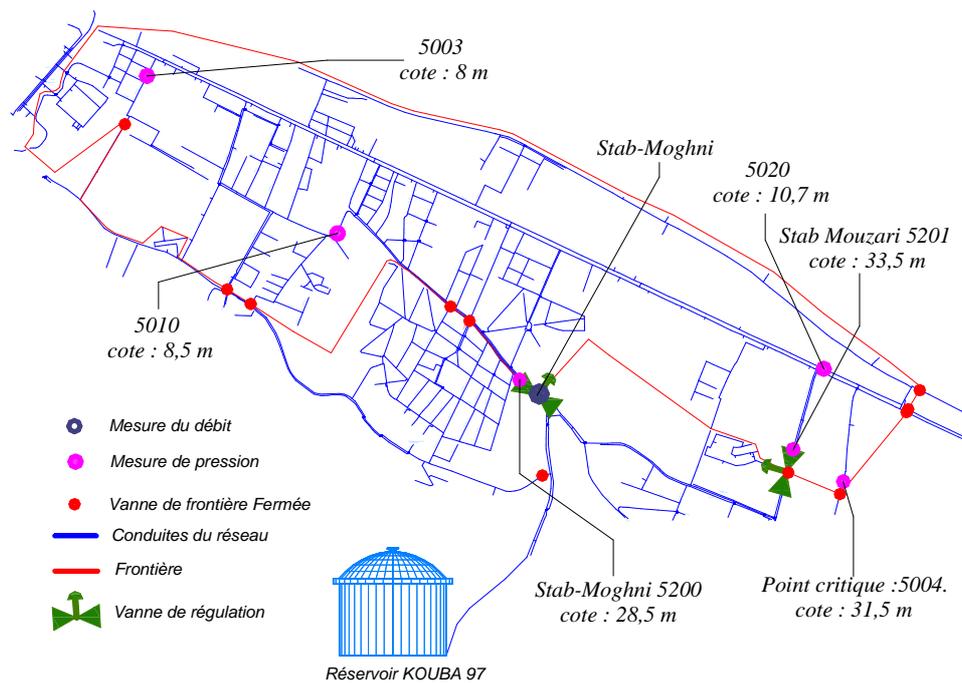


Figure IV.35 : Points de mesure pour la validation.

9.1 Validation en débit

En introduisant les nouvelles mesures de débit dans un fichier de calage pour *EPANET*, nous avons eu le résultat représenté dans la figure -35- .

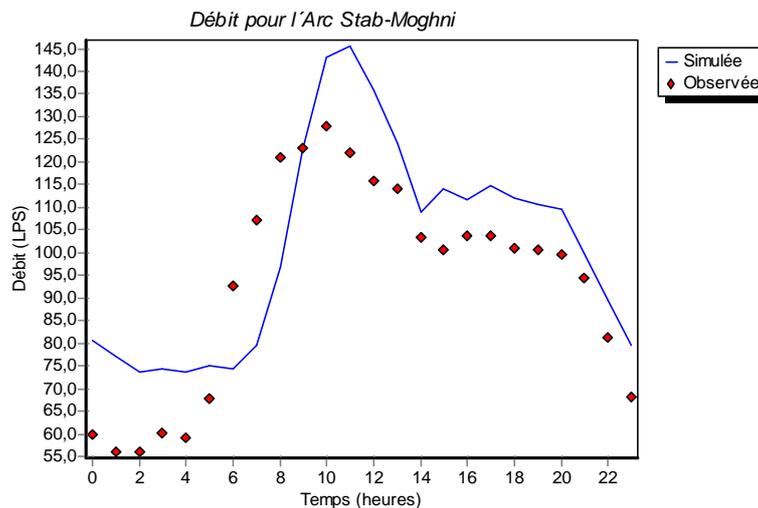


Figure IV.36 : Débit d'alimentation.

Nous remarquons ainsi que le débit mesuré a encore diminué et s'y décalé vers la Gauche. Cela peut s'expliquer par le fait que, d'une part, le réseau d'Hussein Dey est dans un état d'évolution ou de changement à cause des campagnes de recherches et de réparation des fuites. Ce qui augmente le rendement et donc le débit de distribution diminue. Chose remarquable sur les premières heures de la journée de simulation (de 00:00 jusqu'au 05:00). Ce qui justifie le décalage vertical. D'autre part, en passant à une alimentation continue, les habitudes des consommateurs (domestiques) changent car la consommation s'étale dans la journée, contrairement à ce qu'elle était avant. Les profils de consommation peuvent donc changer jusqu'à se stabiliser à des profils finaux caractérisant la zone.

Cette diminution du débit peut être due aussi à un problème d'étanchéité de la frontière.

Pour éliminer le décalage vertical, nous avons effectué la même opération que dans le calage en débit (§ 8.3.1.2). Mais cette fois ci, nous avons multiplié les consommations par un coefficient de 0,9 (rapport entre les volumes distribués : simulé et mesuré). Le résultat obtenu est le suivant :

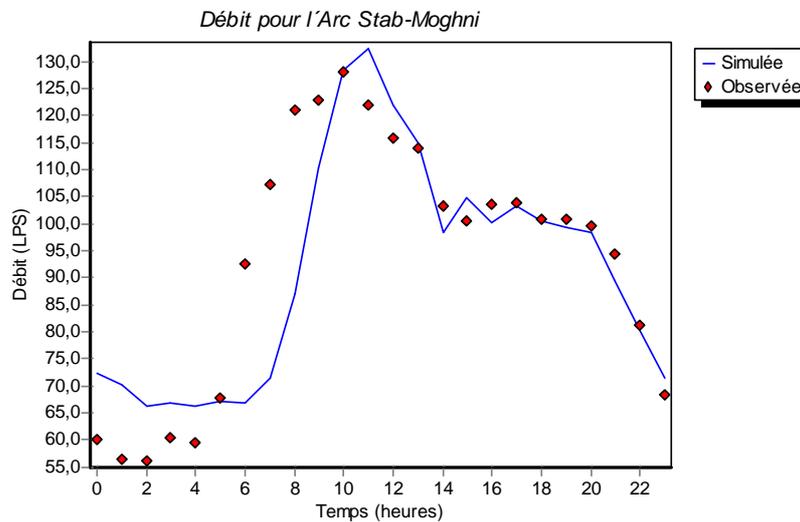


Figure IV.37 : Débits d'alimentation après ajustement.

Le digramme de corrélation est le suivant :

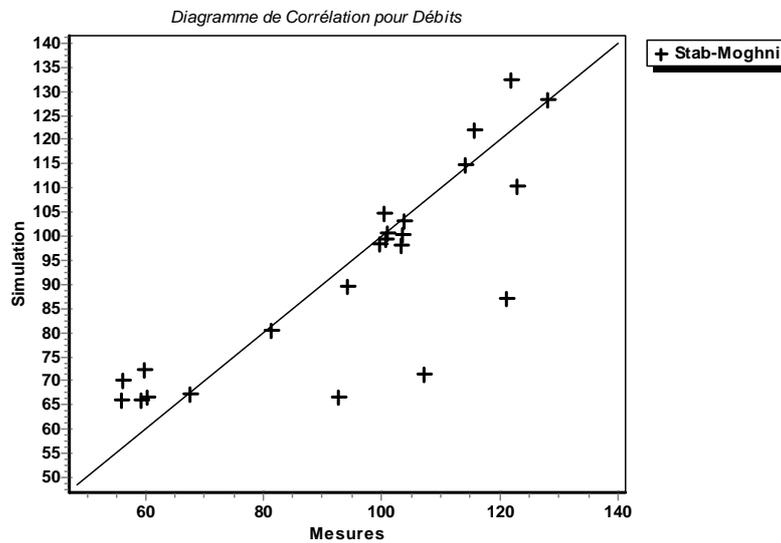


Figure IV.38 : Diagramme de corrélation du débit.

9.1 Validation en pression

Les résultats de pression sont plus satisfaisants, sauf pour le point 5020. Concernant le point 5010, nous avons installé un enregistreur, mais le robinet de branchement sur lequel nous l'avons installé était fermé pendant toute la période de mesure.

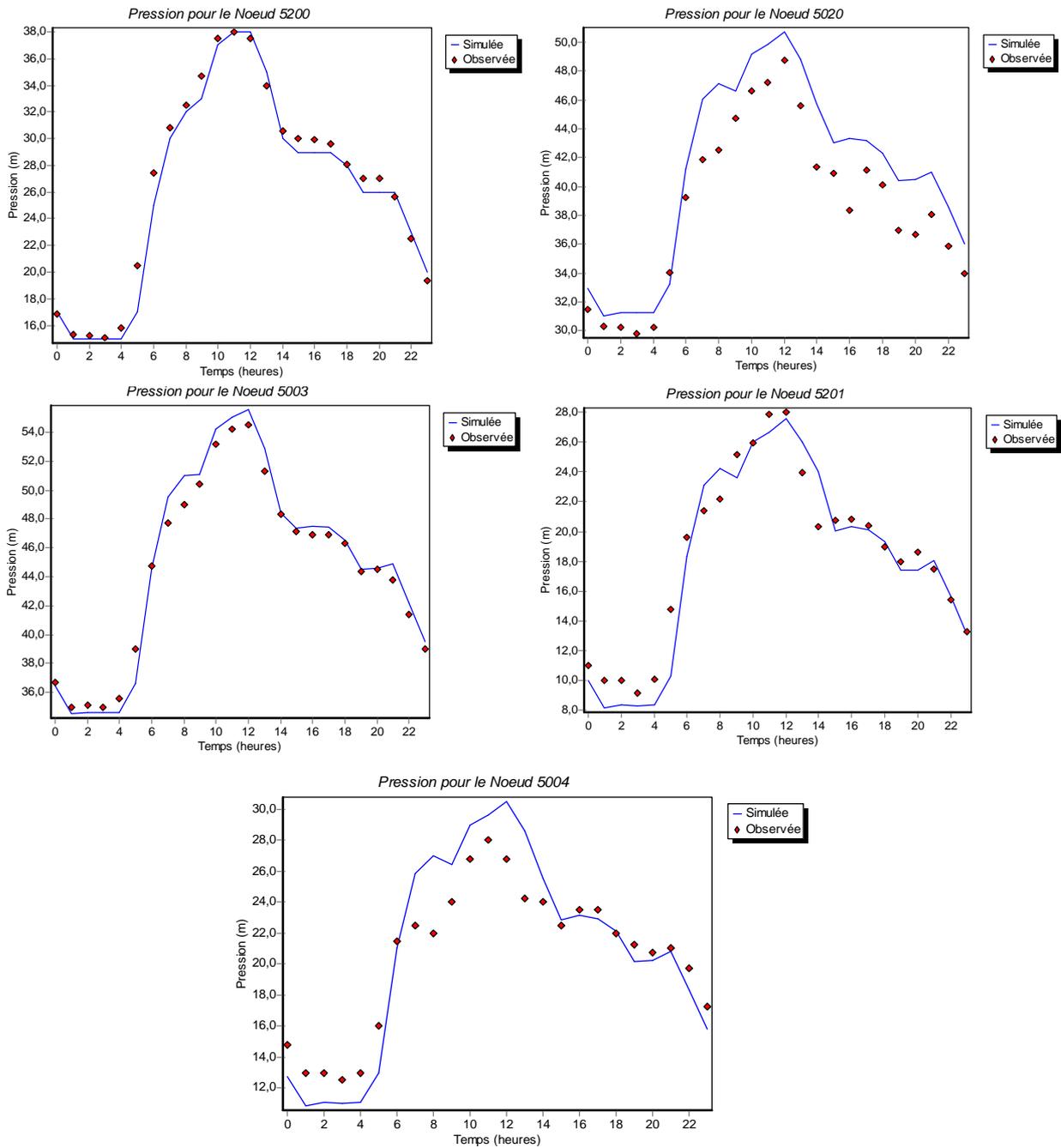


Figure IV.39 : Comparaison des pressions.

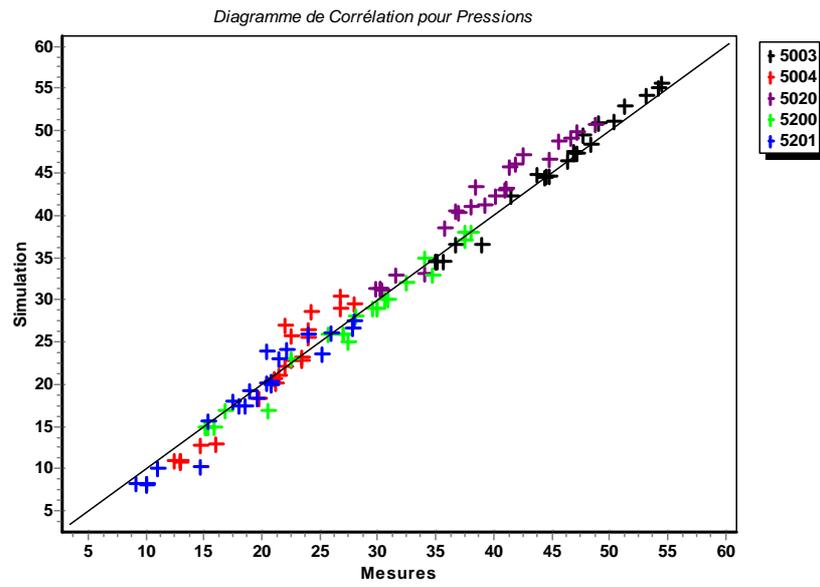


Figure IV.40 : *Diagramme de corrélation des pressions.*

Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous pouvons dire que nous avons construit un modèle, plus au moins représentatif du réseau d'Hussein Dey. Il peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision dans le proche futur.

La modélisation n'étant pas faite d'une façon précise, vue l'indisponibilité d'un nombre considérable de données, et surtout en termes de consommation qui est un facteur jouant un rôle prépondérant dans la sensibilité du modèle.

Les objectifs du calage ont été atteints. En effet, nous avons constaté la nécessité du changement des profils de consommation, du rendement du réseau ou de la réaffectation des consommations aux nœuds. Et enfin de la nécessité des campagnes d'investigations plus fines pour mieux identifier le réseau.

Des résultats comparatifs de la simulation pour les deux états du réseau (avant et après la modulation), sont représentés dans l'annexe I en but d'évaluer l'intérêt (en termes de pression) apportés par la modulation.

Conclusion Générale

Durant le stage que nous avons effectué au sein de la société SEAAL d'une durée de trois mois. Nous avons acquis de nouvelles connaissances intéressantes et utiles pour un futur ingénieur. En effet, nous avons travaillé et discuté avec plusieurs experts Algériens et étrangers. Nous avons aussi découvert quelles sont les missions d'un ingénieur dans une entreprise opérationnelle comme la SEAAL.

Pour mener à bien notre travail et bien modéliser un réseau en modulation, il a été nécessaire de bien comprendre les principes de base de la modulation (les vannes de régulation, les modulateurs, les problèmes d'isolement et d'étanchéité des frontières,...). Il fallait aussi passer par la collecte des données nécessaires pour la modélisation qui étaient disponibles sous le logiciel *Piccolo*. Mais la conversion *Piccolo* – *EPANET* était ardue et non évidente. La maîtrise et la manipulation de tous ces outils et leurs difficulté de mise en œuvre nous a retardé dans notre programme de travail. Mais ce sont des étapes obligatoires pour suite de notre travail.

Le modèle que nous avons élaboré peut constituer sous certaines contraintes, un outil d'aide au diagnostic, à la prévision du comportement du réseau. En cas de pannes sur les vannes de régulation par exemple. Et cela à condition qu'il soit amélioré dans le futur proche. Cette amélioration doit être envisagée en prévoyant des campagnes d'investigation plus poussées et plus fines.

Aussi, les résultats que nous avons obtenus après calage, le modèle de consommation doit être revu en adoptant des profils de consommations adéquats et plus détaillés.

Les limites de notre modèle résident dans le fait que le calage effectué n'était pas performant, car un vrai calage plus fin nécessite un nombre de données très important et un temps plus long.

Le logiciel *EPANET* est un outil très puissant pour la modélisation, sauf qu'il possède quelques inconvénients par rapport à *Piccolo* qui possède plusieurs fonctions supplémentaires. Comme la répartition automatique des consommations aux nœuds de demandes, la modélisation du rendement du réseau et le graphisme,...

Le problème des faibles vitesses que nous avons identifié constitue - si le modèle est bien représentatif - un point noir pour le réseau que nous avons modélisé et pour tout le réseau d'Alger. Pour évaluer l'impact de ces vitesses, une modélisation ou une simulation accompagnée par des suivis expérimentaux de la qualité de l'eau est à prévoir. Ce problème peut être partiellement éliminé en élargissant les zones de modulation. Mais cela reste toujours limité par les contraintes de fourniture des pressions minimales contractuelles aux points les plus éloignés.

Enfin, la modulation de la pression est une stratégie efficace, mais elle nécessite une continuité dans les travaux d'entretien et de recherches des fuites. Et cela ne se fait qu'avec une bonne gestion du service de l'eau.

ANNEXE 1

Résultats de la simulation

1. Situation avant la modulation

Les figures suivantes présentent des simulations faites sans réduction de la pression :

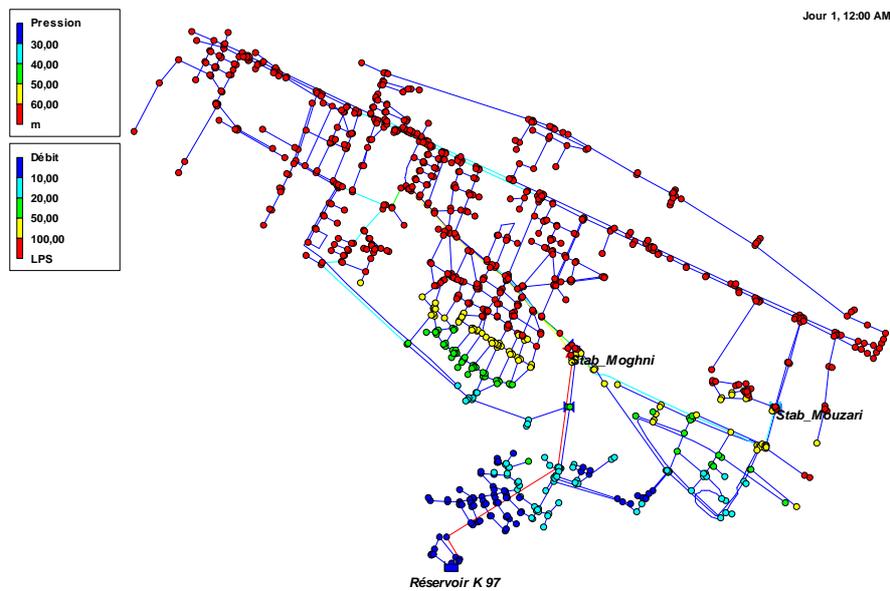


Figure 1.1 : *Nœuds et arcs du réseau à 00 :00 sans réduction de pression.*

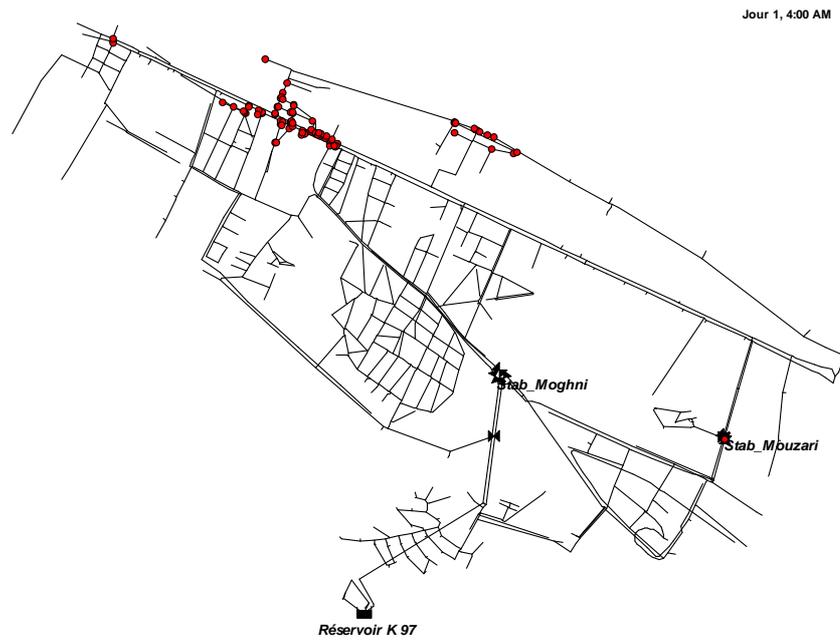


Figure 1.2 : Pressions supérieurs à 90 m dans le réseau (à 04 :00).

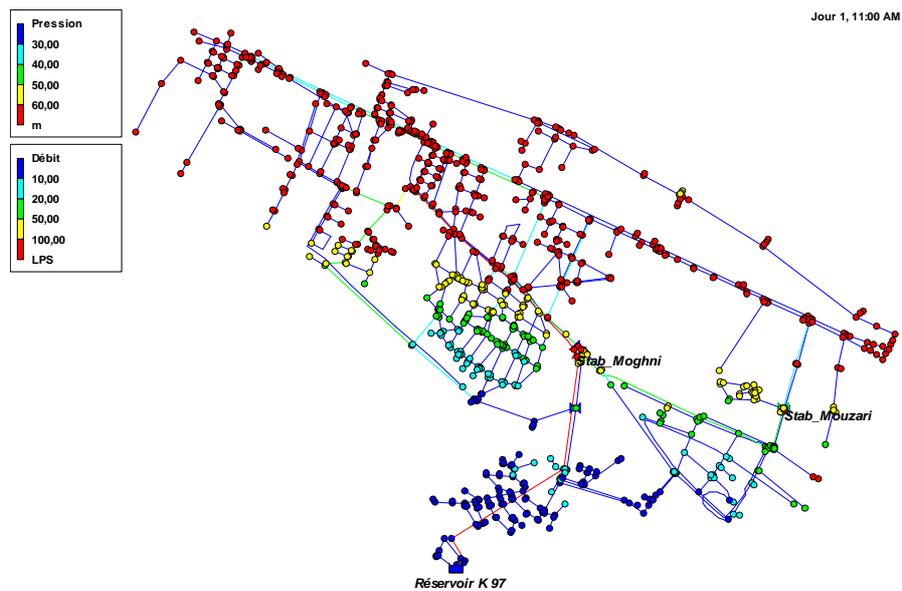


Figure 1.3 : Nœuds et arcs du réseau à 11 :00 sans réduction de pression.

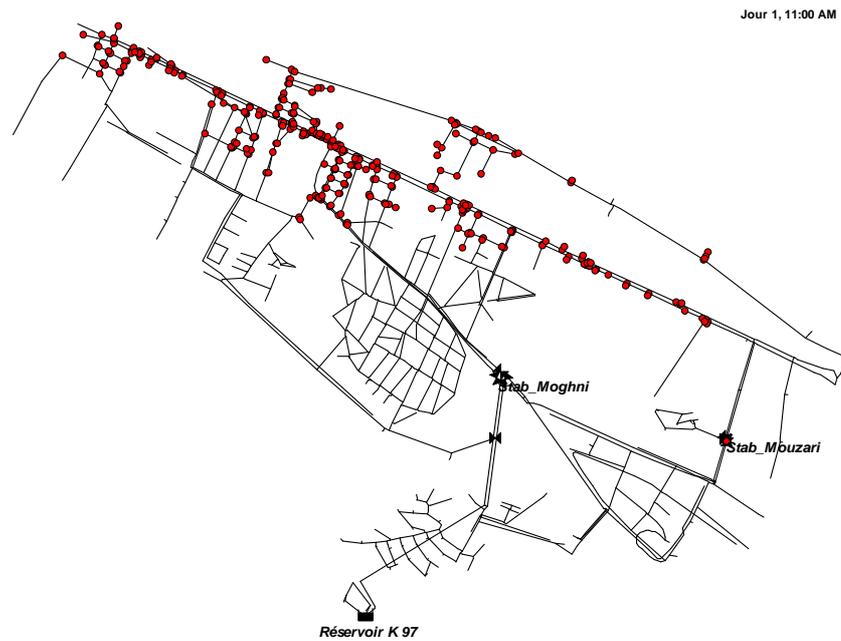


Figure 1.4 : Pressions supérieures à 80 m dans le réseau (à 11 :00).

Les pressions sont trop importantes même pendant les heures de pointes (il ya des pressions supérieures à 80 m).

La figure suivante donne les variations de la pression à la sortie du stabilisateur Moghni (non mis en marche) et au point critique, et la variation du débit d'injection dans le réseau.

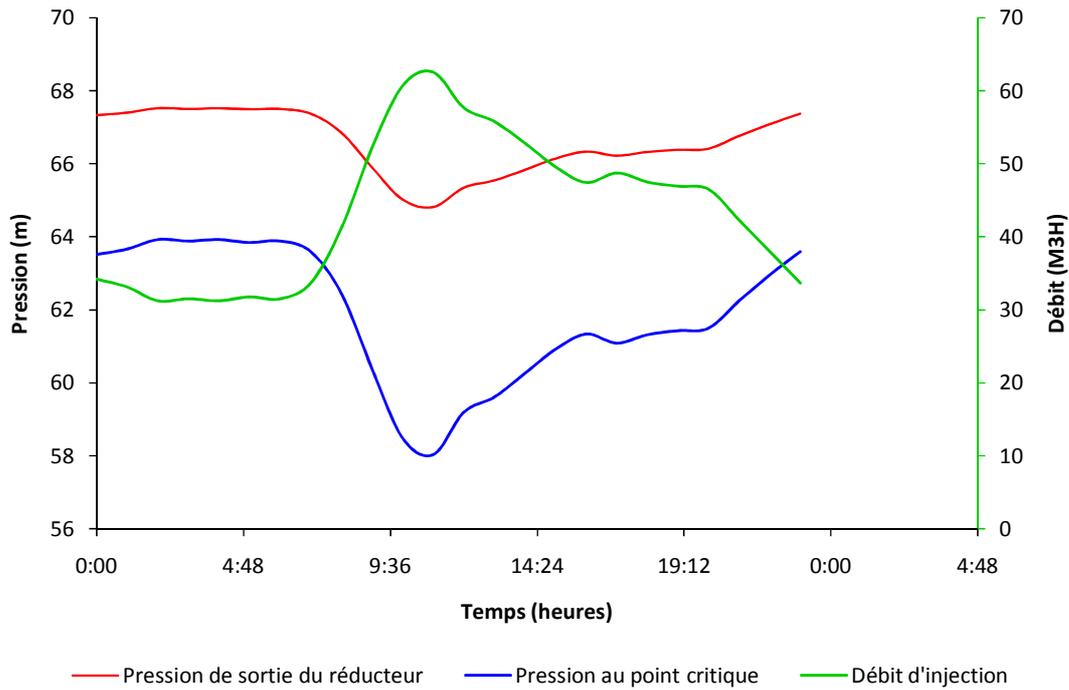


Figure 1.5 : *Variation des pressions en point critique et au stabilisateur Moghni, et le débit d'injection.*

Nous présentons ci-après une simulation en maintenant la pression de sortie du stabilisateur Moghni constante et égale à 44 m, et celle du stabilisateur Mouzari égale à 27 m comme pour la journée de mesure du 09/12/2007.

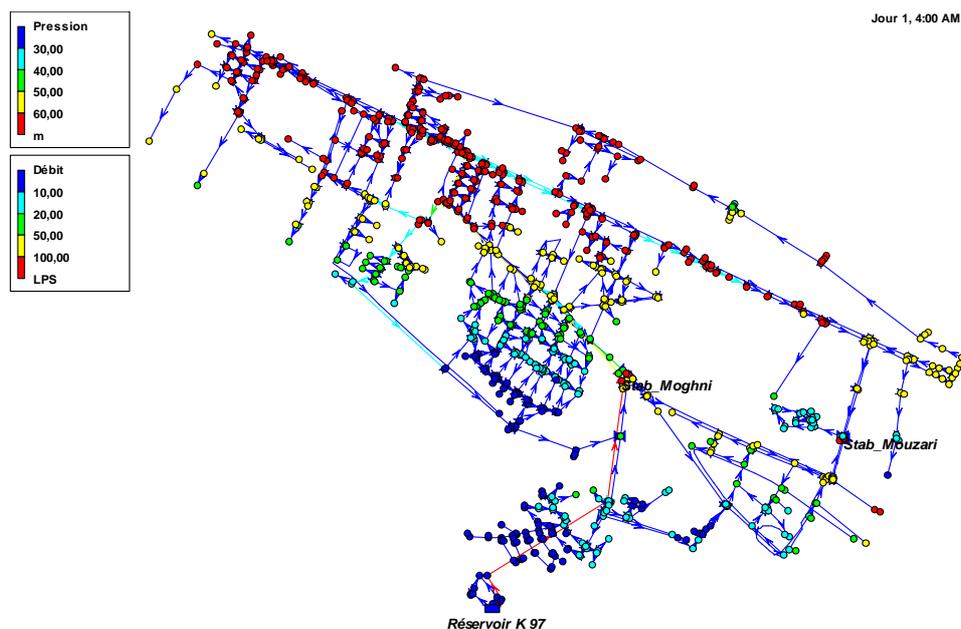


Figure 1.6 : *Nœuds et arcs du réseau à 04 :00 Avec réduction de pression.*

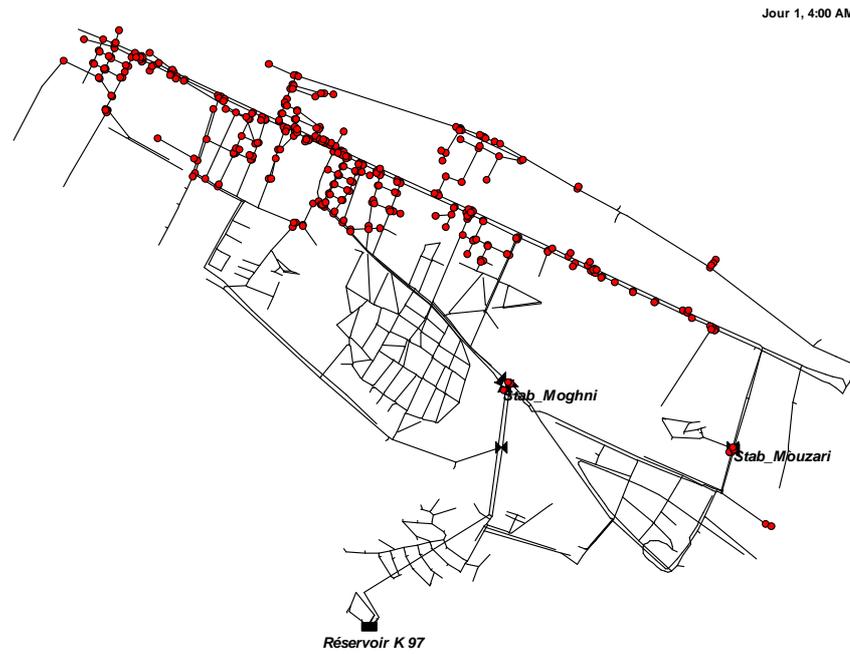


Figure 1.7 : Pressions supérieures à 60 m dans le réseau (à 04 :00) avec réduction de pression.

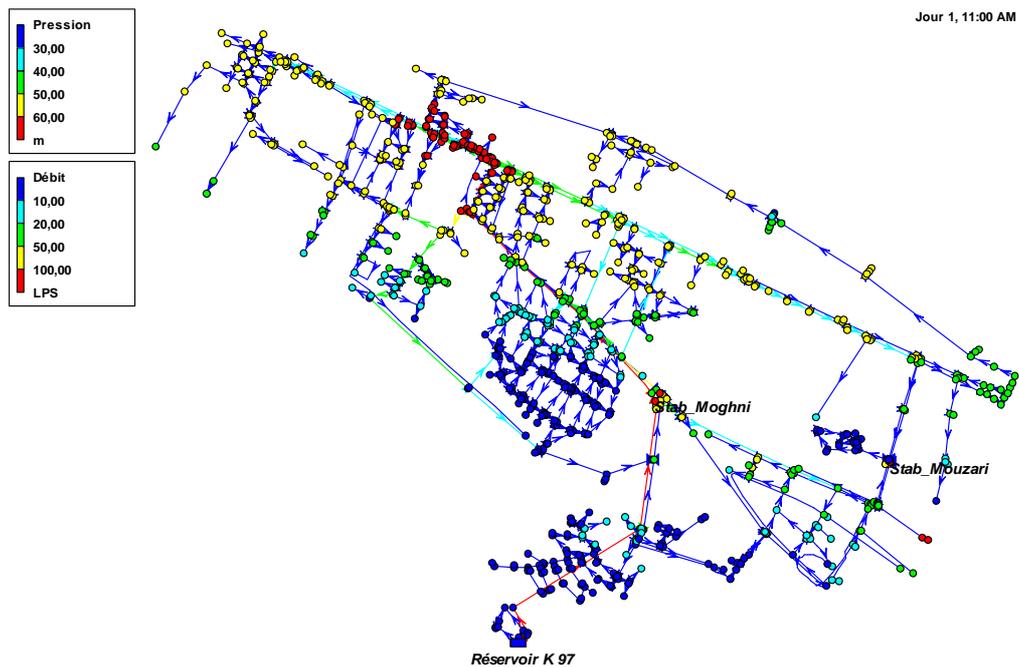


Figure 1.8 : Nœuds et arcs du réseau à 11 :00 avec réduction de pression.



Figure 1.9 : Pressions supérieures à 60 m dans le réseau (à 11 :00) avec réduction de pression.

Même avec la réduction de pression le réseau reste toujours surchargé sur sa partie basse. Dans ce qui suit nous allons essayer de réduire la pression de façon à ne pas avoir de fortes pressions aux points bas et d'assurer le minimum aux points haut du réseau.

Nous avons essayé de baisser la pression progressivement jusqu'à une consigne de 38 m au stabilisateur Moghni. Les résultats de la simulation sont les suivants :

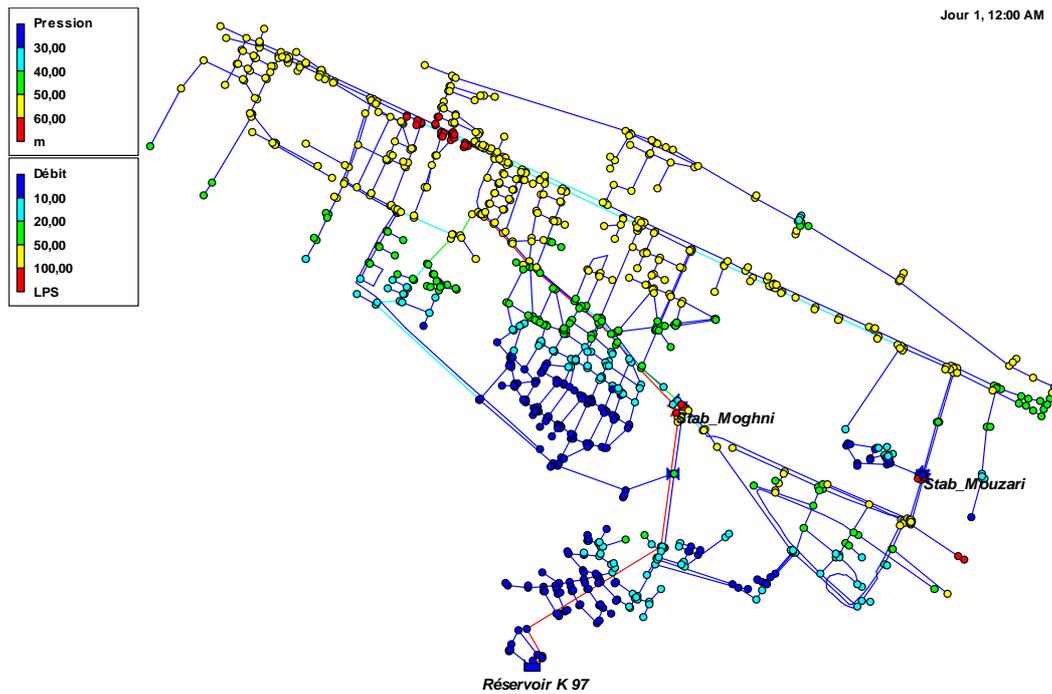


Figure 1.10 : *Nœuds et arcs du réseau à 00 :00 avec réduction de pression (38 m au stabilisateur Moghni).*

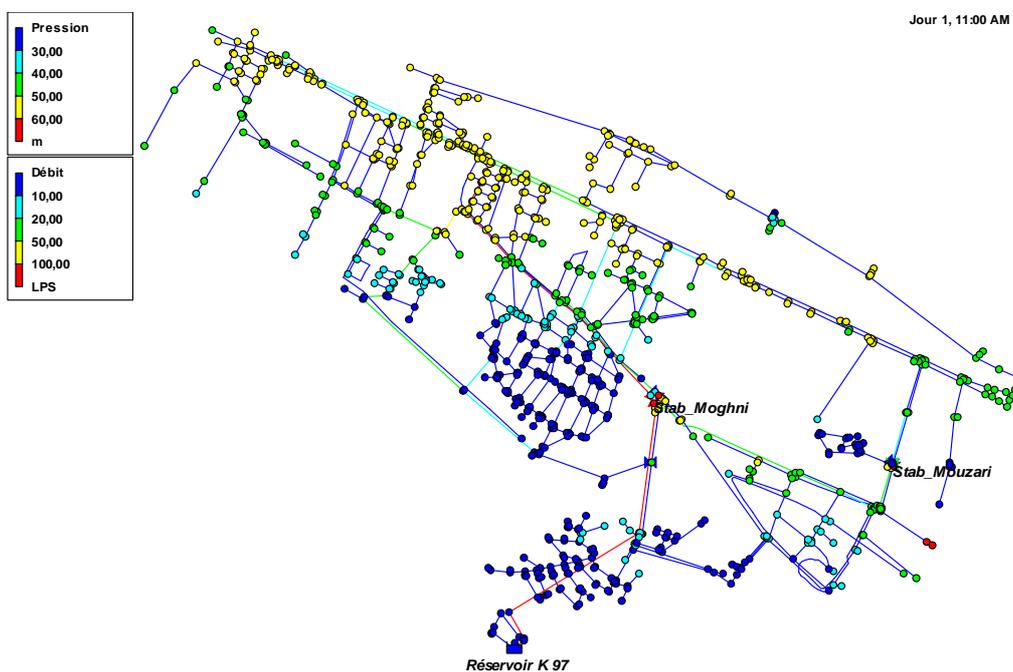


Figure 1.11 : *Nœuds et arcs du réseau à 11 :00 avec réduction de pression (38 m au stabilisateur Moghni).*

Si nous essayons de trop baisser la pression pour protéger les point bas, nous aurons automatiquement des points haut qui ne seront pas alimentés à une pression suffisante pendant la pointe (figure -12-) et vis versa, si nous augmentons la pression pour alimenter ces point haut, nous aurons de fortes pression aux points bas pendant les heures creuses (figure -13-). Cela traduit la nécessité de réguler la pression suivant un profil horaire tenant compte de la variation de la consommation dans la journée, et de délimiter une zone spécifique pour pouvoir effectuer la régulation.

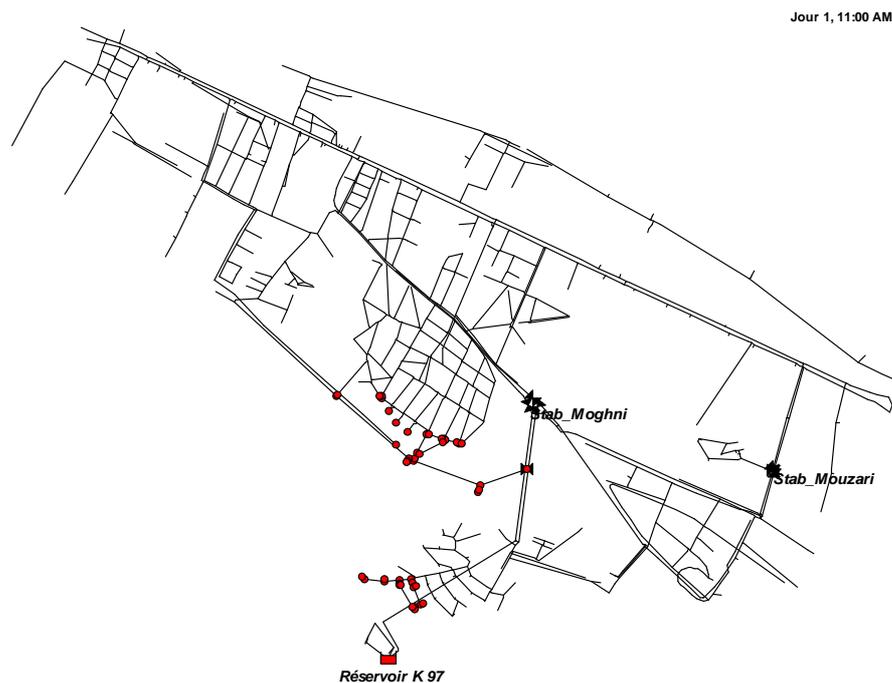


Figure 1.12 : Pressions inférieures à 10 m dans le réseau (à 11 :00) avec réduction de pression (38 m au stabilisateur Moghni).

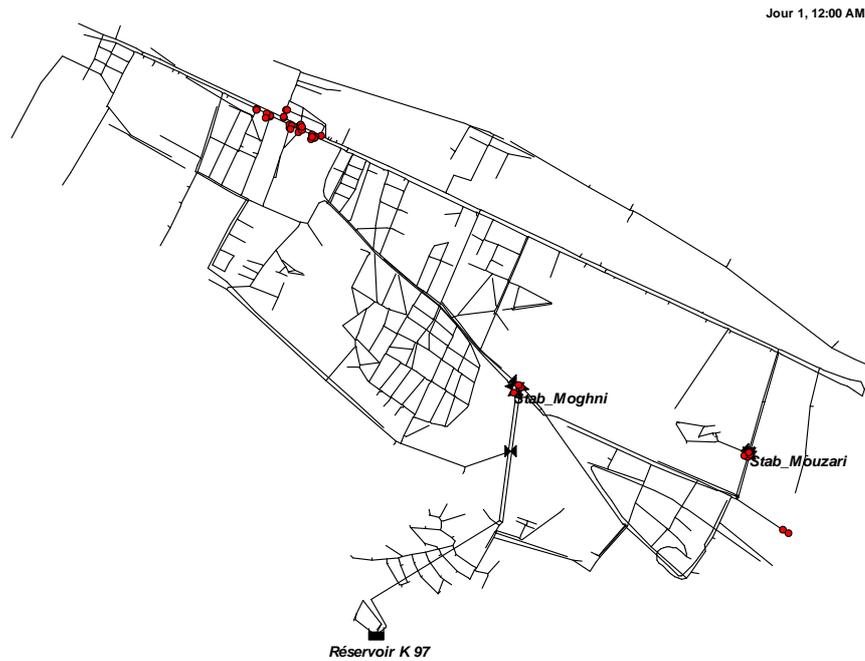


Figure 1.13 : Pressions supérieures à 60 m dans le réseau (à 00 :00) avec réduction de pression (38 m au stabilisateur Moghni).

2. Situation après la modulation

En établissant des profils de régulation horaires et en isolant la zone spécifique, nous obtenons les résultats suivants :

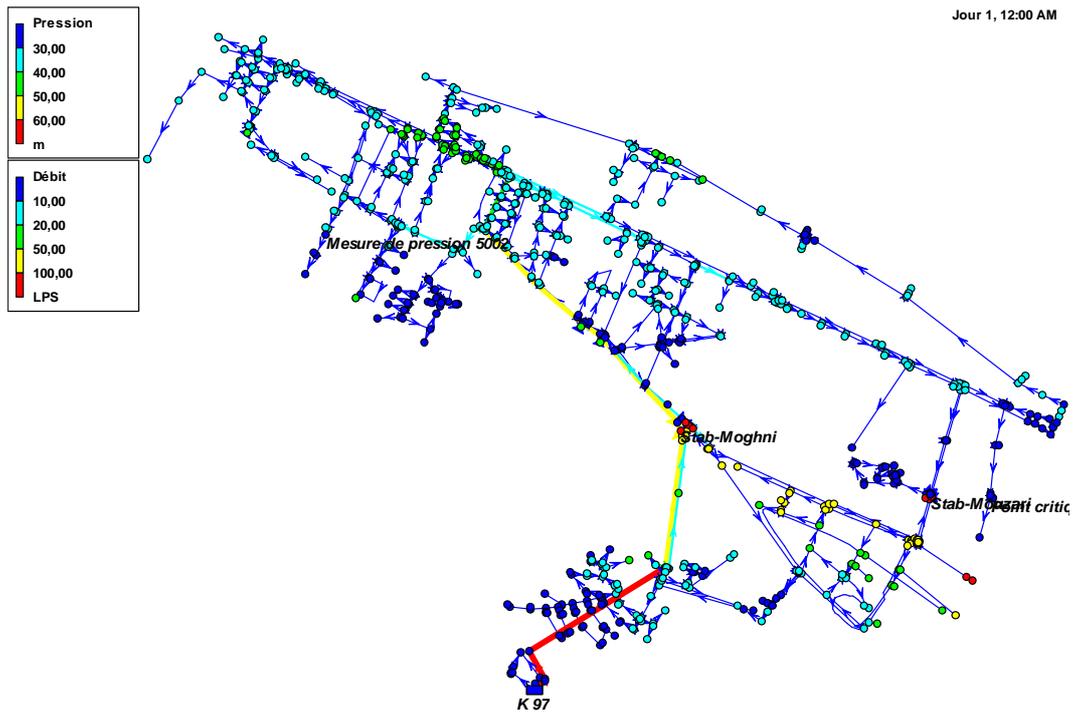


Figure 1.14 : *Nœuds et arcs du réseau à 00 :00, pression Modulée (Voir profils de régulation horaires aux tableaux IV.2, IV.3 du chapitre IV).*

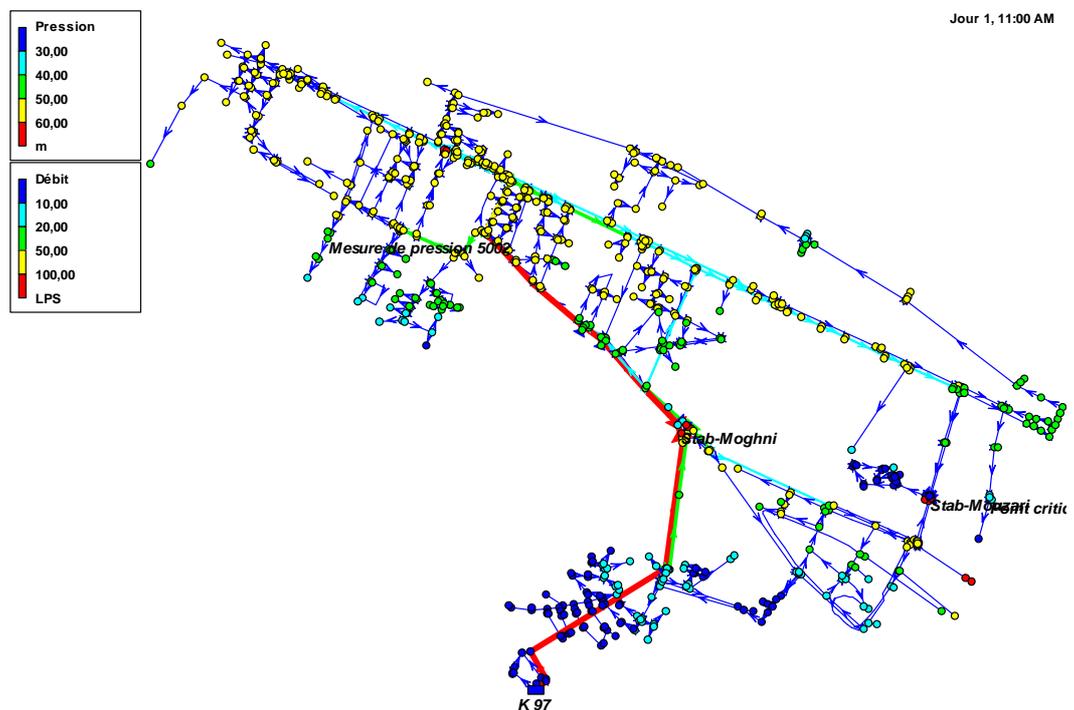


Figure 1.15 : *Nœuds et arcs du réseau à 11 :00, pression Modulée (Voir profils de régulation horaires aux tableaux IV.2, IV.3 du chapitre IV).*

Les graphiques de la figure suivante présente, en comparaison avec ceux de la figure 5, l'évolution de la pression de sortie du stabilisateur Moghni et au point critique, et le débit d'injection dans le réseau.

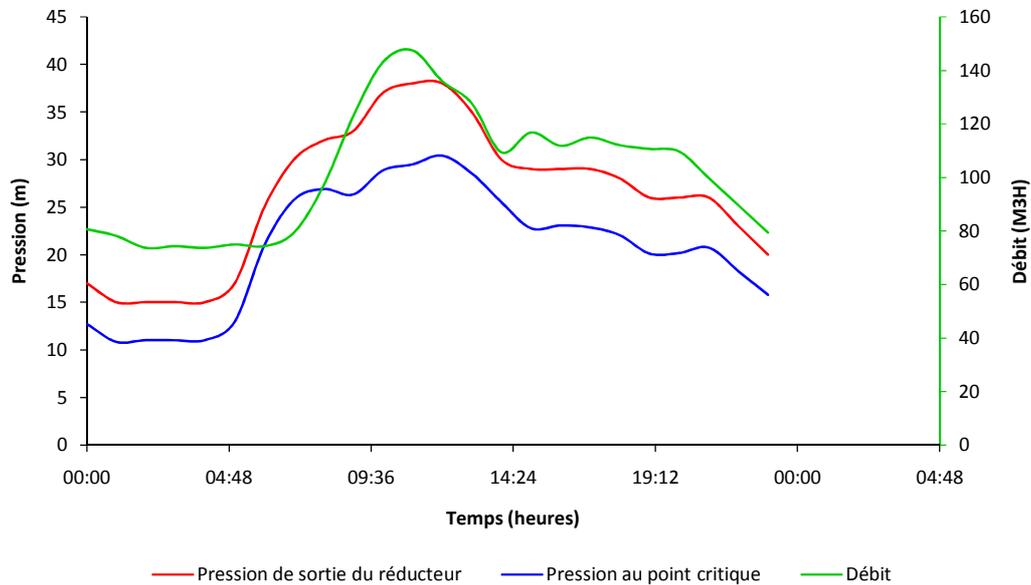


Figure 1.16 : *Variation des pressions au point critique et au stabilisateur Moghni, et le débit d'injection (Avec modulation de la pression).*

Si nous comparons les pressions avant et après la modulation au point critique nous aurons les résultats suivant.

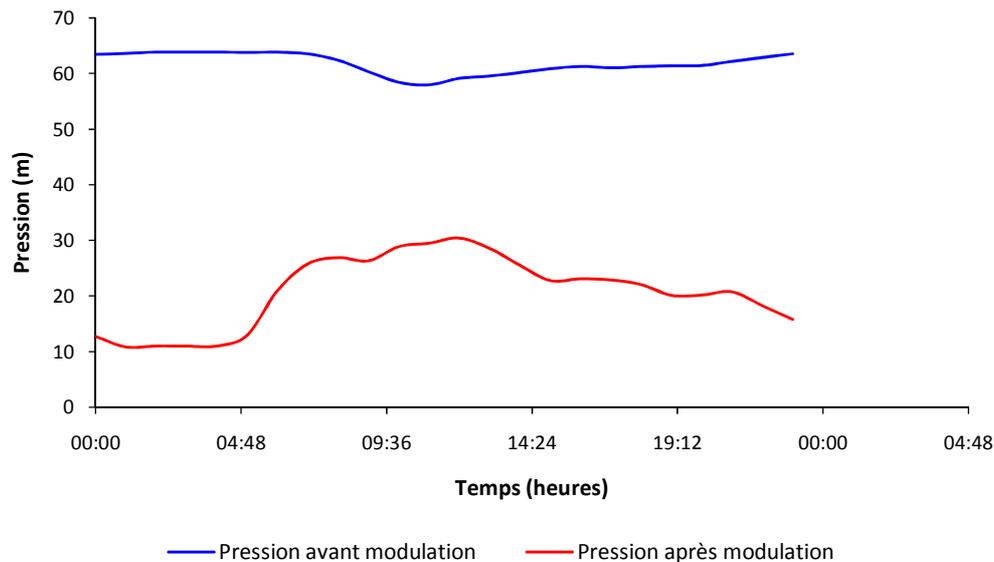


Figure 1.17 : *Pression au point critique avant et après la modulation*

La pression est réduite en moyenne de 41 m au point critique tout en satisfaisant les abonnés à ce point (10 m au minimum durant la nuit et 30 m en maximum pendant la pointe).

La réduction de la pression moyenne pour tout le réseau est d'environ 33 m pendant la nuit et de 12 m pendant les heures de pointe.

ANNEXE 2

Fonctionnement des vannes de régulation hydraulique à pilote

1. Composition et fonctionnement

Les vannes de ce type se composent de :

a. La vanne de base comprenant :

- ☞ un corps, séparé en deux parties (A et B de la figure III.6 ci-dessous) par une cloison médiane, qui comporte une ouverture (siège) ;
- ☞ un chapeau ;
- ☞ un ensemble mobile de fermeture avec une membrane de commande : pièce de liaison, clapet, axe de guidage, contre-siège.

Le chapeau et la membrane constituent et délimitent la chambre de contrôle de la vanne (C).

b. le circuit hydraulique de commande de la vanne, ou circuit pilote, qui comporte :

- ☞ Sur sa tubulure amont, une restriction (D) ;
- ☞ Sur sa tubulure aval, un pilote, qui agit comme un orifice variable, en fonction de la grandeur à réguler (dans le cas présent, la pression aval) ;
- ☞ Une liaison avec la chambre de contrôle.

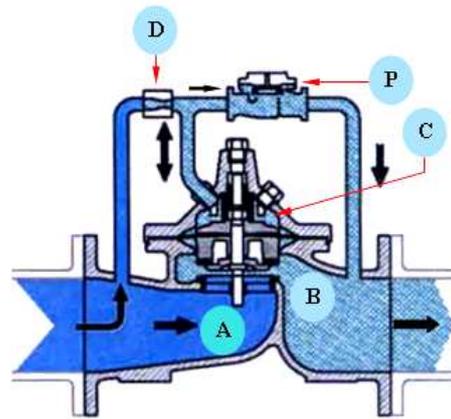


Figure 2.1 : Schéma descriptif de la vanne de modulation.

Le déplacement vertical de l'équipage mobile, permis par la souplesse de la membrane qui en est solidaire, régule le passe de l'eau à travers la vanne. Il est fonction du rapport des forces exercées par l'eau, d'une part sur la membrane dans la chambre de contrôle, et sous l'équipage mobile de fermeture d'autre part.

La surface de la membrane est plus grande que la section de passage de l'eau à l'intérieur de la vanne : à pression de l'eau égale de part et d'autre, la force exercée de haut en bas sur la membrane est donc supérieure à celle exercée par l'eau pour soulever l'équipage mobile ; cette force pousse donc la membrane vers le bas et ferme la vanne. La vanne est dite « naturellement » fermée.

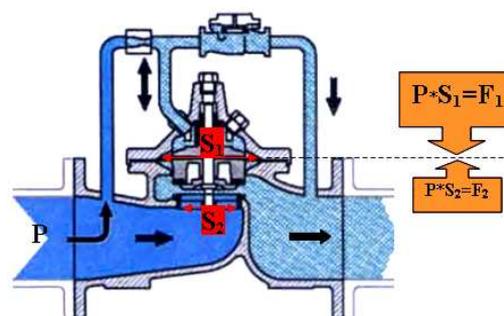


Figure 2.2 : Principe de fermeture naturelle d'une vanne de régulation.

Les deux schémas ci-dessous (figure -3-) en illustrent le fonctionnement.

A gauche, le robinet de dérivation relie l'amont de la vanne à la chambre de contrôle ; la vanne est fermée.

A droite, le robinet met à l'atmosphère la chambre de contrôle ; le rapport des forces est inversé, la pression amont a repoussé vers le haut l'équipage mobile, la vanne est toute ouverte.

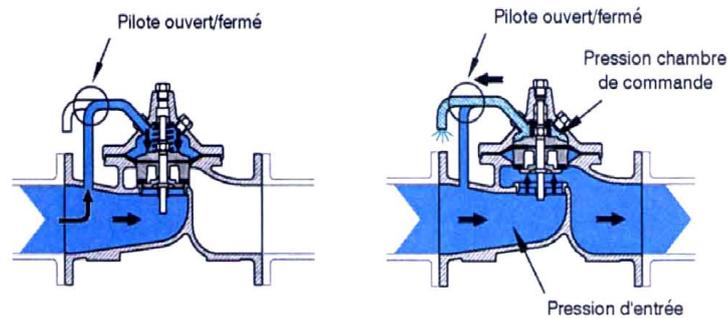


Figure 2.3 : Fermeture et ouverture de la vanne de régulation.

L'installation d'un pilote sur le circuit de dérivation permet d'utiliser la vanne comme instrument de régulation. Nous présentons ici le fonctionnement d'une vanne équipée d'un pilote de régulation de la pression aval, mais le principe est le même quelque soit le pilote.

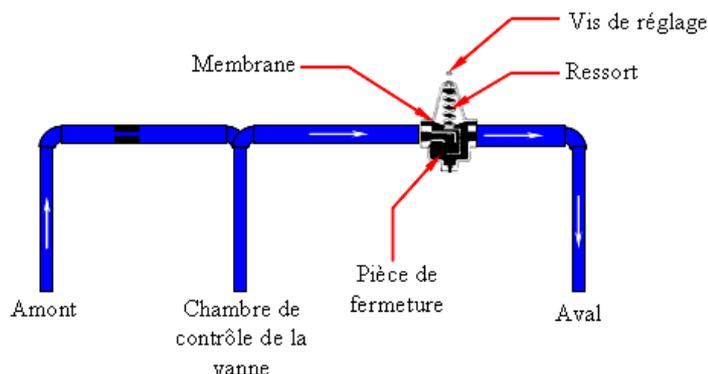


Figure 2.4 : Circuit et pilote de contrôle de pression aval.

Le pilote joue le rôle d'un robinet, à ouverture variable sans intervention manuelle. Comme la vanne principale, il comporte deux parties, séparées par une membrane étanche. Dans la partie sèche se trouve un ressort. La membrane est soumise à la tension du ressort, que nous réglons par enfoncement de la vis accessible à l'extrémité supérieure du pilote.

La pièce de fermeture du pilote est solidaire de la membrane. Cette pièce comporte un opercule, situé en face de la tubulure d'alimentation du pilote. Le mouvement de bas en haut de la membrane déplace la pièce de fermeture et règle le passage de l'eau de l'amont à l'aval du pilote.

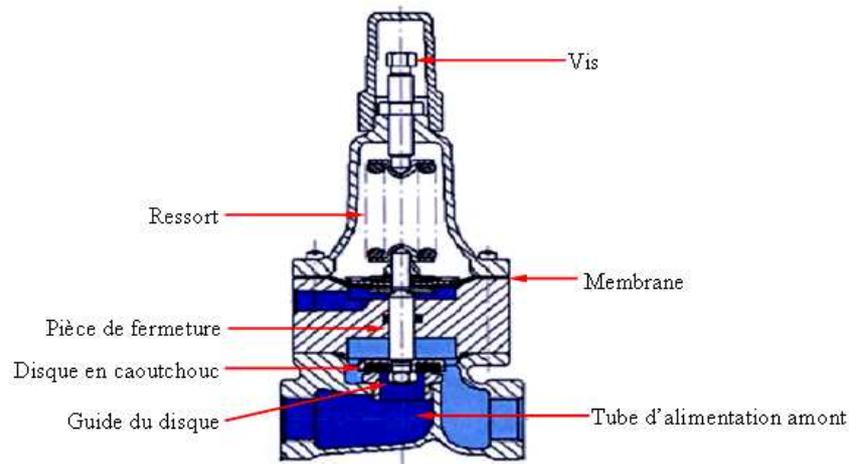


Figure 2.5 : *Vue en coupe d'un pilote de contrôle de pression aval.*

C'est le rapport des forces entre la poussée du ressort et la pression de l'eau, exercée de part et d'autre de la membrane, qui va déterminer le degré d'ouverture du pilote.

Si le pilote est fermé, c'est que la pression aval est supérieure à la pression de consigne fixée par la poussée du ressort. Au contraire, si la pression aval baisse et devient inférieure à cette poussée, par exemple à la suite d'une augmentation de la demande, le ressort se détend, repousse la membrane et le pilote s'ouvre.

Si le pilote est fermé, l'eau du circuit de commande, provenant de l'amont de la vanne, est envoyée dans la chambre de contrôle, et la vanne se ferme (figure -6-).

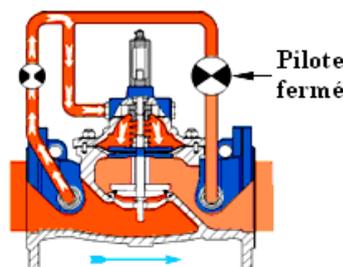


Figure 2.6 : *Vanne en position fermée.*

S'il ya demande en aval, la pression aval baisse, et le pilote s'ouvre. La restriction située sur la tubulure amont du circuit hydraulique crée une perte de charge, et donc une différence entre la pression résultante présente dans la chambre de contrôle et la pression amont, qui s'exerce sous l'équipage mobile.

Le rapport des forces s'inverse, repousse la membrane vers le haut, l'eau présente dans la chambre de contrôle est appelée par la demande et s'échappe vers l'aval ; la vanne commence à s'ouvrir (figure -7-).

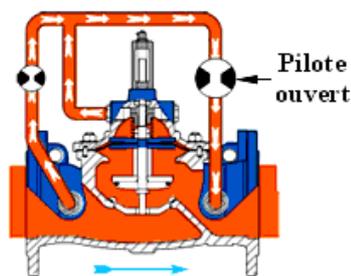


Figure 2.7 : *Vanne en position ouverte.*

Une baisse de la demande aval entraîne le mouvement inverse ; la pression aval augmente, le pilote se referme, la chambre de contrôle de la vanne se remplit, et la vanne se ferme jusqu'à ce que l'équilibre entre les forces qui s'exercent sur la membrane du pilote s'établisse.

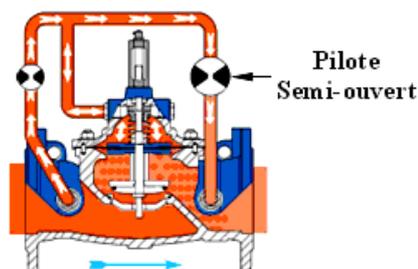


Figure 2.8 : *Vanne en position partiellement – ouverte.*

La vanne principale reproduit les mouvements de son pilote.

La pression aval reste constante, quelles que soient la pression amont et la demande aval. La vanne agit comme un « stabilisateur » de pression aval.

2. Modulation de la pression de consigne d'un stabilisateur aval à pilote

Pour modifier la pression de consigne du pilote, nous devons modifier la force exercée sur sa membrane par le ressort. Nous pouvons remplacer celui-ci par un axe vertical, actionné par un moteur électrique pas à pas. Mais la mécanique requise est relativement compliquée et fragile, et le courant doit être disponible dans le regard, par définition inondable.

Nous pouvons aussi exercer une force sur le ressort, par l'intermédiaire d'une chambre de régulation vissée au pilote.

Cette chambre comporte elle aussi une membrane, qui la partage en deux parties. Dans l'une d'elle se trouve un pointeau métallique, solidaire de la membrane, et qui lui est perpendiculaire. L'autre partie est ouverte à l'atmosphère ; sa pressurisation déforme la membrane, et pousse le pointeau qui en est solidaire. Nous verrons plus loin les différentes méthodes utilisées pour pressuriser la chambre.

La chambre de régulation est vissée sous le pilote, à la place du bouchon de fermeture. Le pointeau vient porter sous l'opercule de fermeture du pilote, et son déplacement de bas en haut exerce une force opposée à celle exercée par le ressort sur la membrane du pilote ; la pression de consigne de la vanne est la résultante de la soustraction des deux. Nous parlons de chambre de compensation.

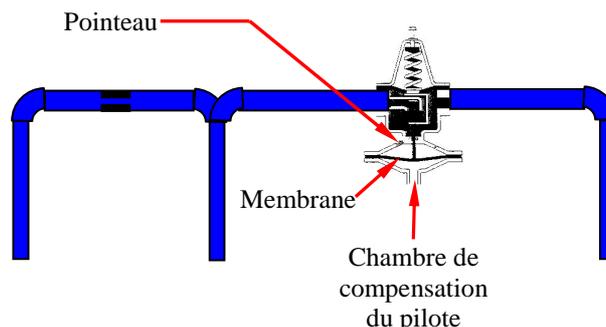


Figure 2.9 : *Pilote et chambre de compensation.*

Le tarage manuel du pilote correspond à la pression maximale requise à l'heure de pointe, et nous pressurisons la chambre de compensation pour ajuster la pression de consigne à la baisse de la perte de charge sur le réseau.

La figure ci-après, montre un pilote nu, puis équipé de la chambre de compensation vissée dessous :

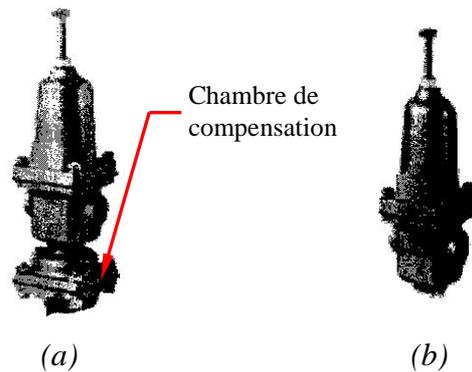


Figure 2.10 : Pilote nu (b), et avec chambre de compensation (a).

3. La vanne dans le réseau

Pour assurer son bon fonctionnement, la vanne de régulation ne s'installe pas toute seule sur une conduite, mais plusieurs accessoires doivent l'accompagner. La figure ci-dessous présente les différents organes installés avec une vanne de régulation.

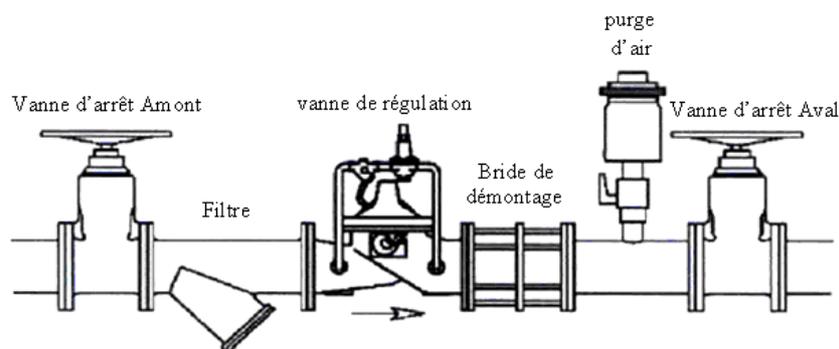


Figure 2.11 : Accessoires d'une vanne de régulation.

- Les deux vannes d'arrêt, amont et aval, sert en cas de réparation ;
- Le filtre protège la vanne de tous corps étranger pouvant obturer le circuit de control de pression ;

Nous pouvons, éventuellement, en avoir un tranquillisateur d'écoulement installé juste avant la vanne pour assurer un écoulement stable au circuit de commande.

La figure suivante présente une photo de la vanne de régulation maitresse de 400 mm placée sur la conduite de 500 mm de la rue Moghni.



Figure 2.12 : la vanne maitresse de l'étage K 97 - d'Hussein Dey (stabilisateur Moghni).

La vanne d'arrêt amont ne figure pas dans la photo parce que nous n'avons pas pu l'introduire à cause de l'encombrement dans le regard.

ANNEXE 3

Modulateurs de pression

Dans la première génération de modulateurs électronique, la pressurisation (la mise sous pression) de la chambre de contrôle était assurée par la pression de l'eau disponible à l'amont de la vanne principale (modulateur « hydraulique »). Nous utilisons aussi aujourd'hui l'air comprimé (modulateur « pneumatique »), mais le principe de fonctionnement est le même. Il est expliqué dans la figure -1- ci-après.

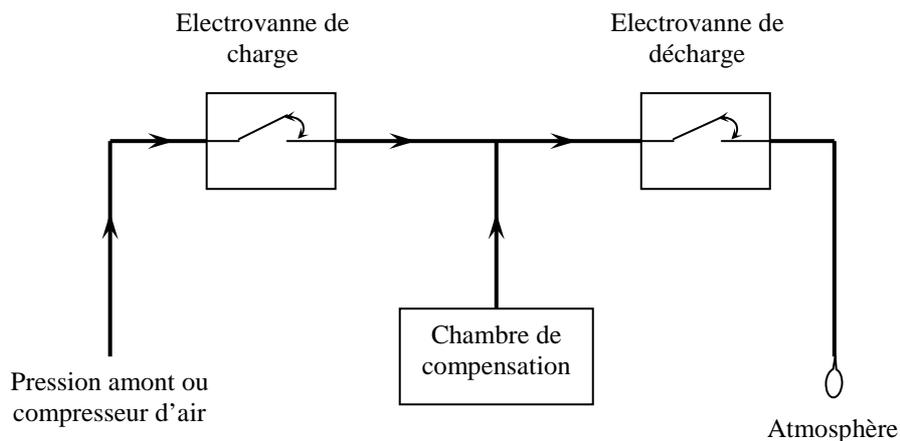


Figure 3.1 : *Principe de fonctionnement d'un modulateur pneumatique.*

Le modulateur comporte un circuit à trois entrées, dont deux sont équipées d'une électrovanne. L'entrée non équipée est raccordée par un tube à la partie de la chambre de compensation à pressuriser. Une des entrées équipées est raccordée à la pression amont de la vanne principale ou directement au compresseur d'air du modulateur, l'autre va à l'atmosphère. La pressurisation du circuit entraîne celle de la chambre de compensation.

Pour augmenter la pression dans le circuit, le modulateur ouvre l'électrovanne raccordée à la pression amont ou à la pompe, et laisse fermée celle qui donne à l'atmosphère ; pour y baisser la pression, c'est l'inverse. La régulation est progressive, réalisée par une série d'ouvertures des électrovannes de très courtes durée (50 ms en moyenne).

Pour économiser l'énergie de ses piles, la pompe et les électrovannes montées dans le modulateur sont petites. Le diamètre de celles utilisées dans un modulateur « hydraulique » est de l'ordre du millimètre. Il peut arriver que des particules en suspension dans l'eau s'y coincent et en empêchent la fermeture étanche, ce qui interdit la régulation.

Dans la dernière génération de modulateurs, la pressurisation à l'air comprimé du circuit de contrôle pallie cet inconvénient. La fiabilité de ces appareils est supérieure.

La surface de la membrane de la chambre de compensation utilisée avec un modulateur « hydraulique » est à peu près égale à celle de la membrane du pilote.

La pression disponible pour la régulation avec un modulateur « pneumatique » est assez faible, à cause de la taille du compresseur, réduite pour économiser l'énergie. La surface de la membrane de la chambre de compensation doit donc être plus grande que celle du pilote. La pose de la chambre, plus volumineuse, peut nécessiter des modifications mineures à la tubulure du circuit pilote de certaines vannes.

Enfin, la rigidité des ressorts pour pression élevée (200 m) limite l'amplitude de la modulation possible avec les appareils « pneumatiques » ; nous choisirons le ressort le plus souple possible compatible avec la pression de consigne souhaitée.

Les modulateurs utilisés pour la modulation de la pression actuellement, et pour la ville d'Alger, sont de type électronique.

L'installation d'un modulateur de pression avec la vanne de régulation est représentée dans la figure suivante :

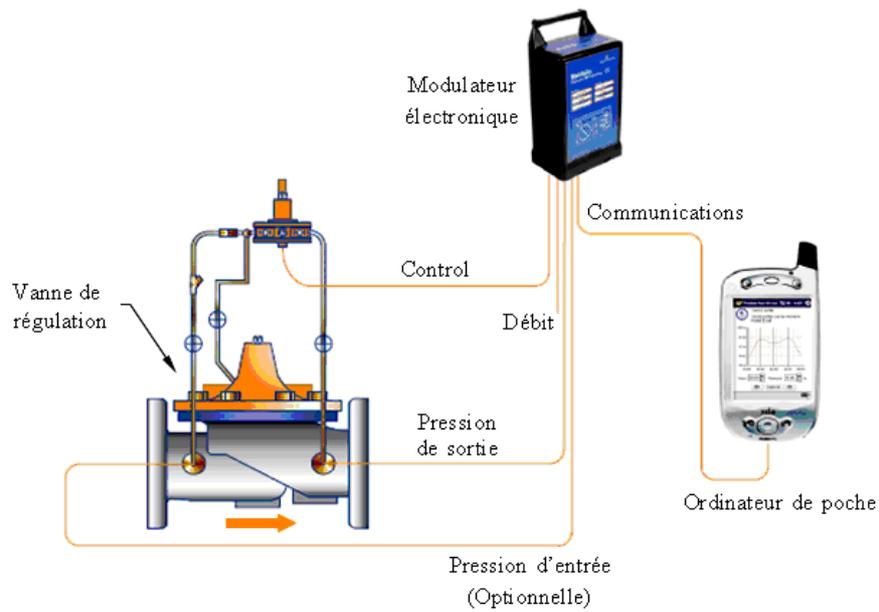


Figure 3.2 : *Installation d'un modulateur de pression.*

Le modulateur utilisé pour la modulation de l'étage K 97 est représenté dans la figure suivante :



Figure 3.3 : *Modulateur de la vanne maitresse de l'étage K 97 - d'Hussein Dey (stabilisateur Moghni).*

ANNEXE 4

Organisation du fichier d'entrée du logiciel *EPANET*

```

[TITLE]
...

[JUNCTIONS]
;ID Noeud      Altitude      Demande Base      Courbe Modulation
.
.
.

[RESERVOIRS]
;ID Noeud      Charge Tot      Courbe Modulation
.
.
.

[TANKS]
;ID Noeud      Altitude      NivInit      NivMin      NivMax      Diamètre      VolMin      CourbeVol
.
.
.

[PIPES]
;ID Arc      Noeud1      Noeud2      Longueur      Diamètre      Rugosité      PerSing      État
.
.
.

[PUMPS]
;ID Arc      NoeudAsp      NoeudDéch      Paramètres
.
.
.

[VALVES]
;ID Arc      NoeudAmont      NodeAval      Diamètre      Type      Consigne      PertSing
.
.
.

[TAGS]

[DEMANDS]
;ID Noeud      Demande Base      Courbe Modulation      Catégorie
.
.
.

[STATUS]
;ID Arc      État/Consigne

```

```

.
.
.

[PATTERNS]
;ID Modulation      Multiplicateurs
.
.
.

[CURVES]
;ID Courbe          Valeur X      Valeur Y
;PUMP:
.
.
.

[CONTROLS]
.
.
.

[RULES]
.
.
.

[ENERGY]
Global Efficiency  ...
Global Price      ...
Demand Charge     ...

[EMITTERS]
;ID Noeud          Coefficient
.
.
.

[QUALITY]
;ID Noeud          Qualité Initiale
.
.
.

[SOURCES]
;ID Noeud          Type           Qualité      Courbe Modul
.
.
.

[REACTIONS]
;Type             Tuyau/Réservoir      Coefficient
.
.
.

[REACTIONS]
Order Bulk
Order Tank
Order Wall
Global Bulk
Global Wall
Limiting Potential
Roughness Correlation

[MIXING]
;ID Réservoir      Modèle           Fraction Mélange
.

```

```

.
.

[TIMES]
Duration
Hydraulic Timestep
Quality Timestep
Pattern Timestep
Pattern Start
Report Timestep
Report Start
Start ClockTime
Statistic

[REPORT]
Status
Summary
Page

[OPTIONS]
Units           CMH
Headloss        D-W
Specific Gravity 1
Viscosity       1
Trials          40
Accuracy        0.001
Unbalanced      Continue 10
Pattern         1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 0.5
Quality         None mg/l
Diffusivity     1
Tolerance       0.01

[COORDINATES]
;ID Noeud           Coord X           Coord Y
.
.
.

[VERTICES]
;ID Arc           Coord X           Coord Y
.
.
.

[LABELS]
;Coord X           Coord Y           Texte et Noeud d'Ancrage
.
.
.

[BACKDROP]
DIMENSIONS
UNITS
FILE
OFFSET

[END]

```

Références bibliographiques

A. NAFI, « la programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable », Mémoire de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2006.

I. BLINDU, « outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques », Mémoire de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet, 2004.

Général Water Saving, « Réduire l'eau non contrôlée », Document technique de la SEAAL.

S. GUILSOU, « modélisation sur le logiciel *EPANET* du réseau d'eau potable de la commune d'urrugne (064) », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2007.

A. BOISSEAU, « Renforcement et optimisation du réseau d'eau potable de Flandre Nord », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2007.

G. BERNHARD, « optimisation de la gestion d'un réseau de distribution d'eau potable (modélisation piccolo® du centre ville de bayonne) », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2007.

Manuel de l'utilisateur d'*EPANET*, 2003.

Manuel de maintenance CLAVAL 92-01.