

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
EAU & ENVIRONNEMENT

**Modélisations hydraulique et de qualité d'eau d'un réseau
d'alimentation en eau potable par Epanet
Marrakech, (MAROC)**

Réalisé par : ZANZOUNI Yasmine et SOUISSI Ghita

Soutenu: Le 25 Juin 2018

Devant le jury composé de :

EL AMARI Khalid : (FSTG-Marrakech), Encadrant
BENKADDOUR Abdelfattah : (FSTG-Marrakech), Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2017- 2018

Dédicaces

A ceux qui nous aiment

A ceux qu'on aime

A ceux qui croient en nous

Ce mémoire est dédié à vous

Nos Chères Mères, Nos Chers Pères

Ceux qui ont tant sacrifié pour nous

Aucune dédicace ne saurait exprimer notre respect, notre dévouement, notre considération et l'amour éternel pour les sacrifices que vous avez déployés pour notre instruction et notre bien-être

A tous les membres de nos familles, petits et grands. Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de notre affection, notre gratitude et notre profond amour

Remerciements

Commençons d'abord par remercier Dieu, le tout puissant, l'omniprésent, de nous avoir donné la santé et la force d'entamer et d'achever ce travail dans de bonnes conditions.

De façon particulière, nous remercions chaleureusement nos chères familles pour leur encouragement et leur soutien moral.

Avant d'entamer ce rapport de projet de fin d'étude, nous présentons nos remerciements les plus vifs et nos reconnaissances les plus sincères, aux aimables personnes, qui ont de près ou de loin, par leur soutien, contribué à la réalisation de ce mémoire.

A cet égard, nous tenons en particulier à exprimer notre profonde gratitude à nos chers encadrants, **Mr. El AMARI Khalid** Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques et **Mr. ELHOUDAIFI El mohtadi** Ingénieur à la RADEEMA, pour leur aide précieuse, leur conseils et leur patience.

Nous remercions **Mr. BENKADDOUR Abdelfattah** notre cher professeur d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons à remercier le corps administratif et professoral de la Faculté des Sciences et Technique de Marrakech et en particulier le Département des Sciences de la Terre pour leur dévouement à améliorer la qualité de notre formation.

Nous adressons nos vifs remerciements à **Mme BOURGEOINI Yamina** responsable de la Licence Eau et Environnement pour son soutien, son écoute et ses renseignements.

Nous remercions **Mr. BENCHIKHI Rachid** Directeur général de la RADEEMA de nous avoir accordé ce stage.

Nous tenons aussi à témoigner notre reconnaissance à **Mr. LAHBABI Younes** chef du département Exploitation Eau de la RADEEMA pour son accueil et pour la confiance qu'il nous a accordé dès le début de stage.

Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble des cadres et à toute l'équipe de la RADEEMA pour leur esprit d'équipe, aides et conseils pour le suivi de ce travail.

Table des matières

Dédicaces.....	2
Remerciements	3
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux	7
Liste des abréviations.....	8
Résumé	9
Introduction.....	10
Chapitre I : organisation générale de la RADEEMA	11
I. Présentation de la RADEEMA	12
I.1 Historique	12
I.2 Contexte juridique et institutionnel	13
I.3 Organisation de la RADEEMA	13
I.4 Activités de la RADEEMA	14
I.5 Clés chiffres de la RADEEMA	15
II. Département Exploitation Eau	16
Chapitre II : Etude bibliographique.....	17
I. Modélisation des réseaux d'AEP	18
I.1 le modèle hydraulique.....	18
I.2 le modèle qualité	18
II. Logiciel Epanet.....	19
III. Qualité de l'eau potable dans les réseaux de distributions.....	20
III.1 Normes marocaines de qualité d'eau potable	20
III.1.1 Norme marocainen°037001	20
III.1.2 Norme marocainen°037002	20
III.2 Facteurs influençant la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution.....	20
III.3 La désinfection au chlore	21
Chapitre III : Alimentation en eau potable de la ville de Marrakech	22
I. Système d'alimentation d'eau potable de la ville de Marrakech.....	23
I.1 Présentation de la ville de Marrakech.....	23
I.2 Description du système d'AEP.....	23
I.2.1 Les eaux de surfaces	24
I.2.2 Les eaux souterraines	24
I.2.3 Les ressources de secours	24
II. Description du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech	25

II.1 Réservoirs de stockage existant.....	25
II.2 Réseau de distribution	26
II.2.1. Les modes de distribution.....	26
II.2.1.1 Distribution gravitaire	26
II.2.1.2 Refoulement distributif.....	27
II.2.2 Les équipements hydrauliques de réseau de distribution	27
II.2.3 Fonctionnement du réseau	28
Chapitre IV : Modélisations hydraulique et de la qualité de l'eau.....	30
I. Etude de cas	31
II. Construction du modèle hydraulique	32
II.1. Principe.....	32
II.2. Les données nécessaires à saisir pour la modélisation du réseau	33
II.2.1 Diamètre nominal des conduites.....	33
II.2.2 Longueurs des conduites.....	33
II.2.3 Rugosité des conduites	34
II.2.4 Altitudes des nœuds	34
II.2.5 Demande de base des nœuds.....	35
II.2.6 la courbe de modulation	37
II.3 Simulation dynamique du réseau moyennant EPANET	39
II.4 Calage du modèle.....	39
II.4.1 Calage de pression.....	40
II.4.2 Calage de débit	41
III. Modélisation du chlore.....	42
III.1 Campagne d'échantillonnage.....	43
III.2 Calage du chlore	44
IV. Analyse du fonctionnement de réseau	45
Conclusion générale	48
Annexe 1	49
Annexe 2	54
Bibliographie	55

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'historique de la RADEEMA.

Figure 2 : Organigramme de la RADEEMA.

Figure 3 : Organigramme du Département Exploitation Eau.

Figure 4 : Situation de la ville de Marrakech (Google maps).

Figure 5 : Ressources d'eau disponible.

Figure 6 : A : Schéma de réseau ramifié, B : schéma de réseau maillé

Figure 7 : Les équipements du réseau. A : vanne, B : ventouse, C : vidange, D : regard, E : stabilisateur de pression, F: poteaux d'incendies.

Figure 8 : Situation géographique de l'aire d'étude (Google earth 2018).

Figure 9 : Délimitation du réseau hydraulique d'AEP étudiée.

Figure 10 : Modèle hydraulique du réseau étudiée réalisé par le logiciel EPANET.

Figure 11 : Courbe de modulation horaire.

Figure 12 : Modèle hydraulique simulé par Epanet du réseau étudié

Figure 13 : Comparaison des valeurs moyennes des pressions mesurées et simulées.

Figure 14 : Comparaison des valeurs moyennes des débits mesurées et simulées.

Figure 15 : Comparateur colorimétrique du chlore

Figure 16 : Répartition des points de mesure du chlore sur le réseau étudié

Figure 17: Comparaison des valeurs du chlore mesurées et simulées.

Figure 18 : Variations de la pression pour le nœud 72.

Figure 19 : Variations de la pression pour le nœud 102.

Figure 20 : Variations du débit pour le tuyau 9.

Figure 21 : Courbe de distribution du chlore.

Liste des tableaux

Tableau 1: Clés chiffres de l'eau de la RADEEMA

Tableau 2: Clés chiffres de l'électricité de la RADEEMA

Tableau 3: Clés chiffres d'assainissement de la RADEEMA

Tableau 4: Caractéristiques du Réservoir Sidi Moussa

Tableau 5: Caractéristiques du Réservoir Route Ourika

Tableau 6: Diamètres et longueurs des tronçons du réseau étudié

Tableau 7: Rugosité en fonction de la matière et le diamètre des conduites

Tableau 8 : Altitudes en m de chaque nœud du modèle hydraulique

Tableau 9: Consommations d'eau en l/s de la zone étudiée

Tableau 10: Les coefficients de modulation

Tableau 11: Nœuds et tuyaux du réseau choisis pour effectuer les mesures du débit et de pression

Tableau 12: Mesures des pressions réalisés le 21/05/2018

Tableau 13: Mesures des débits réalisés le 21/05/2018

Tableau 14: Mesures des concentrations du chlore au niveau des nœuds sélectionnés

Liste des abréviations

R.A.D.E.E.MA. : Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de la ville de Marrakech.

SEM : Société d'électricité de Marrakech.

SMD : Société marocaine de distribution.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

NGM : Nivellement Général du Maroc.

PVC : Polychlorure de Vinyle.

SYBA: Sidi Youssef Ben Ali.

AC : Amiante Ciment.

DN : Diamètre nominal.

TN : Terrain naturel.

Résumé

L'objectif du travail est la réalisation d'une modélisation hydraulique et de la qualité de l'eau d'un système d'alimentation en eau potable d'une zone prédéfinie au sein de la ville de Marrakech.

Le présent travail consiste d'abord à étudier le système d'alimentation et le réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech. Hydrauliquement, notre réseau a une importance dans l'alimentation de différentes localités appartenant à notre zone sujet d'étude, qui est située à l'étage haut service et alimentée par le réservoir Sidi Moussa.

La modélisation commence d'abord par la création d'une base de données numérique à l'aide de l'outil SIG la plus représentative possible de la réalité par la suite la compléter par la réalisation d'une collecte de données du réseau sujet d'étude: le diamètre, la longueur et la rugosité des conduites, l'altitude et la demande de base des nœuds.

Après avoir complété la saisie des données nécessaires pour la construction du modèle hydraulique, l'étape suivante est de construire la courbe de modulation qui permettra la simulation du modèle pour de décrire le fonctionnement du réseau tout en tenant compte de la variation de la consommation des abonnés au cours du temps.

La représentativité du modèle dépend de la qualité des informations qui lui sont fournies. La phase préalable de collecte des données est donc essentielle. La réalisation d'une campagne complète de mesures de débit et de pression sur le terrain permet ensuite le calage du modèle et donc sa validation. L'approche qualité vient compléter ce qu'on avait déjà développé par les mesures des concentrations du chlore effectuées sur le terrain et qui seront introduits dans le modèle à fin de vérifier la superposition des données simulées et des données mesurées.

Introduction

L'eau est la condition de la vie, elle est indispensable à la survie de tout être vivant, animal ou végétal, Elle occupe 71% de la surface notre planète, dont 97% d'eau salée et seulement 3% d'eau douce.

Le Maroc appartient au domaine aride ou semi-aride, son potentiel hydraulique est estimé à 21 milliards de m³ dont 16 milliards de m³ d'eaux de surface et 5 d'eaux souterraines. Il est classé selon les prévisions de Water Resources Institute (WRI) parmi les 33 pays qui seront en extrême stress hydrique en 2040, Sachant que les ressources hydriques au Maroc sont limitées, et face à la raréfaction, les pouvoirs publics ont accordé au secteur de l'eau potable au Maroc un intérêt particulier en vue d'une bonne gestion de l'eau. Ainsi, Dans ce contexte des difficultés rencontrées par, Les responsables font de la modélisation un outil qui facilite l'analyse du fonctionnement hydraulique des réseaux d'alimentation en eau potable ainsi que la qualité d'eau au sein des réseaux de distribution par la construction d'un modèle qui reflètera le plus possible la réalité.

Le moyen utilisé pour cette modélisation est Epanet; c'est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau. Largement utilisé dans le monde; il permet d'aboutir enfin à une gestion hydraulique et de qualité de réseau. Au sein du réseau, l'un des indicateurs de la qualité est le taux du désinfectant et principalement le chlore qui renseigne sur les risques de contamination de l'eau par les bactéries.

Dans ce cadre et dans le but de statuer sur la qualité de l'eau potable nous proposons de tester et de développer au sein de notre stage effectué au département d'exploitation d'eau de la régie de distribution d'eau et d'électricité(RADEEMA), l'approche de modélisation sur un cas réel qui sera l'étude du modèle hydraulique et de qualité d'eau d'un réseau d'alimentation en eau potable au sein de la ville de Marrakech.

Le présent travail consiste à :

- Etudier le système d'alimentation et le réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech.
- La création d'une base de données numérique à l'aide de l'outil SIG la plus représentative possible de la réalité.
- Faire une collecte de données nécessaire à la réalisation du modèle qui correspond au réseau d'étude afin de reproduire les données du réseau réel sur le modèle construit.
- L'analyse du fonctionnement du système d'alimentation en eau potable de la zone étudiée par la réalisation d'une modélisation hydraulique et de qualité qui permettra la superposition entre les données simulées par le logiciel Epanet et celles mesurées sur terrain par le calcul de la pression, du débit et de la concentration du chlore.

Chapitre 1

Organisation Générale de la RADEEMA

Introduction:

Ce chapitre consiste à donner une vision générale sur la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech (R.A.D.E.E.M.A), notamment le département Exploitation Eau, son organisation générale et ses missions.

I. Présentation de la RADEEMA :

I.1. Historique :

Jusqu'en 1970 la distribution d'Eau et d'Electricité était gérée séparément. La Société d'Electricité de Marrakech (SEM) crée en 27 juin 1922 assurait la distribution de l'électricité. Le 17 juillet 1964, la ville de Marrakech a signé un protocole pour le rachat de la concession, laquelle fut confiée à la Société Marocaine de Distribution (SMD) le 26 Décembre 1970 et suite aux délibérations du conseil communal de la ville de Marrakech, il a été décidé de créer à partir du premier janvier 1971, la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Marrakech, dénommée RADEEMA et ce en vertu du Décret n° 2-64-394 du 29 Septembre 1964 relatif aux Régies communales.

Le premier janvier 1998, la RADEEMA a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide suite aux délibérations de la communauté urbaine de Marrakech.

Le 09 Juillet 2010, la RADEEMA est passée au contrôle d'accompagnement en substitution du contrôle préalable conformément aux dispositions de l'article 18 de la loi 69.00 (1).

L'historique de la RADEEMA se présente comme suit (figure 1) :

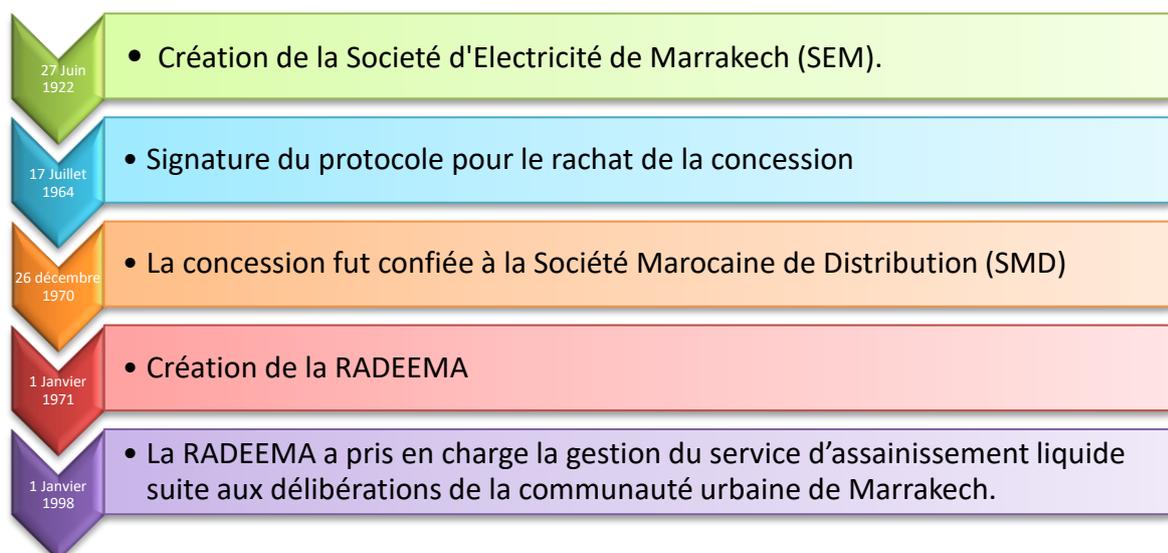


Fig.1 : Schéma de l'historique de la RADEEMA

I.2. Contexte juridique et institutionnel :

La R.A.D.E.E.M.A. est une société publique à caractère commercial, dotée de la personnalité civile et de l'autonomie financière. Son assise juridique repose principalement sur :

Le Dahir n° 1-59-315 du 23 juin 1960 concernant les collectivités locales.

Le décret n° 2-64-394 du 29 septembre 1964 relatif aux régies communales dotées de la personnalité civile et de l'autonomie financière.

Le règlement intérieur en date du 31 décembre 1970.

Le Dahir n° 1-03-195 du 11 novembre 2003 portant promulgation de la loi n° 69- 00 relative au contrôle financier de l'Etat sur les entreprises publiques et autre organismes.

Le Dahir n° 1-02-124 du 13 juin 2002 portant promulgation de la loi n° 62-99 formant code des juridictions financière (1).

I.3. Organisation de la RADEEMA :

L'organisation générale de la Régie est articulée autour de 4 directions et 4 départements rattachés directement à la direction générale (figure 2).

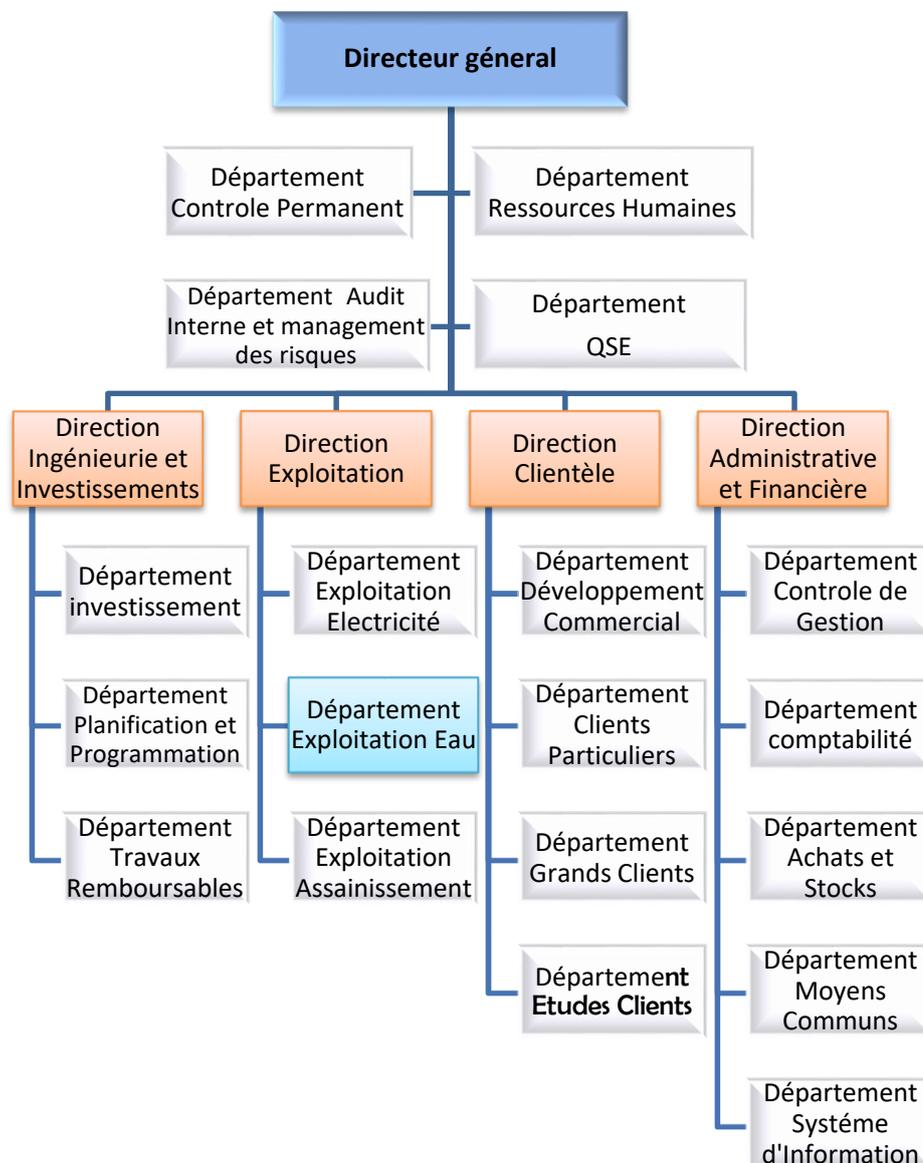


Fig.2 :Organigramme de la RADEEMA

I.4 Activités de la RADEEMA :

Depuis son arrivée, plus d'efforts ont été fournis afin d'assurer à l'intérieur de son périmètre d'action les services publics de **distribution d'eau et d'électricité** ainsi que **la gestion du service d'assainissement liquide**. Ces trois missions couvrent une zone d'action de 24.000 ha. Les agents de la RADEEMA sont mobilisés pour la desserte d'environ 1 198 688 habitants sur un total de 1 229 284 sur leur zone d'action, avec un taux de branchement de 98%.

Ses objectifs principaux sont :

- Sauvegarder les ressources en eau potable.
- Améliorer le système de distribution d'eau et d'électricité au sein de la ville de Marrakech.
- Assurer la sécurité de l'approvisionnement et la bonne gestion des services assainissement.

I.5 Clés chiffres de la RADEEMA :

L'année 2017 a été marquée par la forte dynamique des investissements qui ont atteint 1266 MDH pour répondre attentes de la collectivité et accompagner le développement de la ville de Marrakech.

Le nombre global des clients de l'eau est de 301 776 à fin octobre 2017, il a évolué de 3.5% par rapport à fin 2016, de même pour les clients de l'électricité qui ont évolué de 3.4% par rapport à fin 2016 pour s'établir à un nombre de 313 925. Le rendement du réseau eau potable a atteint à fin d'octobre 2017 un taux de 77,13% d'une amélioration de 0.1 point par rapport à fin octobre 2016. Les clés chiffres de l'eau, l'électricité et l'assainissement sont représentés par les tableaux 1,2 et 3.

Tableau1: Clés chiffres de l'eau

Rendement eau (%)	77,13%
Capacité de stockage en m3	135500
Nombre de réservoirs	3
Linéaire du réseau en km	2743
Nombre de clients	301766
Taux de branchement (%)	98%

Tableau 2 : Clés chiffres d'électricité

Rendement de l'électricité (%)	94,5%
Nombre de postes sources	4
Linéaire du réseau en km	3788
Nombre de clients	313925
Taux de branchement (%)	98,4%

Tableau3 : Clés chiffres d'assainissement

Longueur du réseau en km	2830
Taux de branchement (%)	93,4 %
Longueur du réseau curé km	298
Total de boue évacuée (tonne)	90549
Total de regards visités	49705
Nombre de clients	290313

II. Département Exploitation Eau:

Les objectifs du Département Exploitation Eau portent à la fois sur la maintenance du patrimoine de distribution, le transport de l'eau des réservoirs aux abonnés en assurant son arrivée dans les meilleures conditions et la gestion des problèmes de perte au sein du réseau. Il est constitué de deux divisions et de plusieurs services (figure 3).

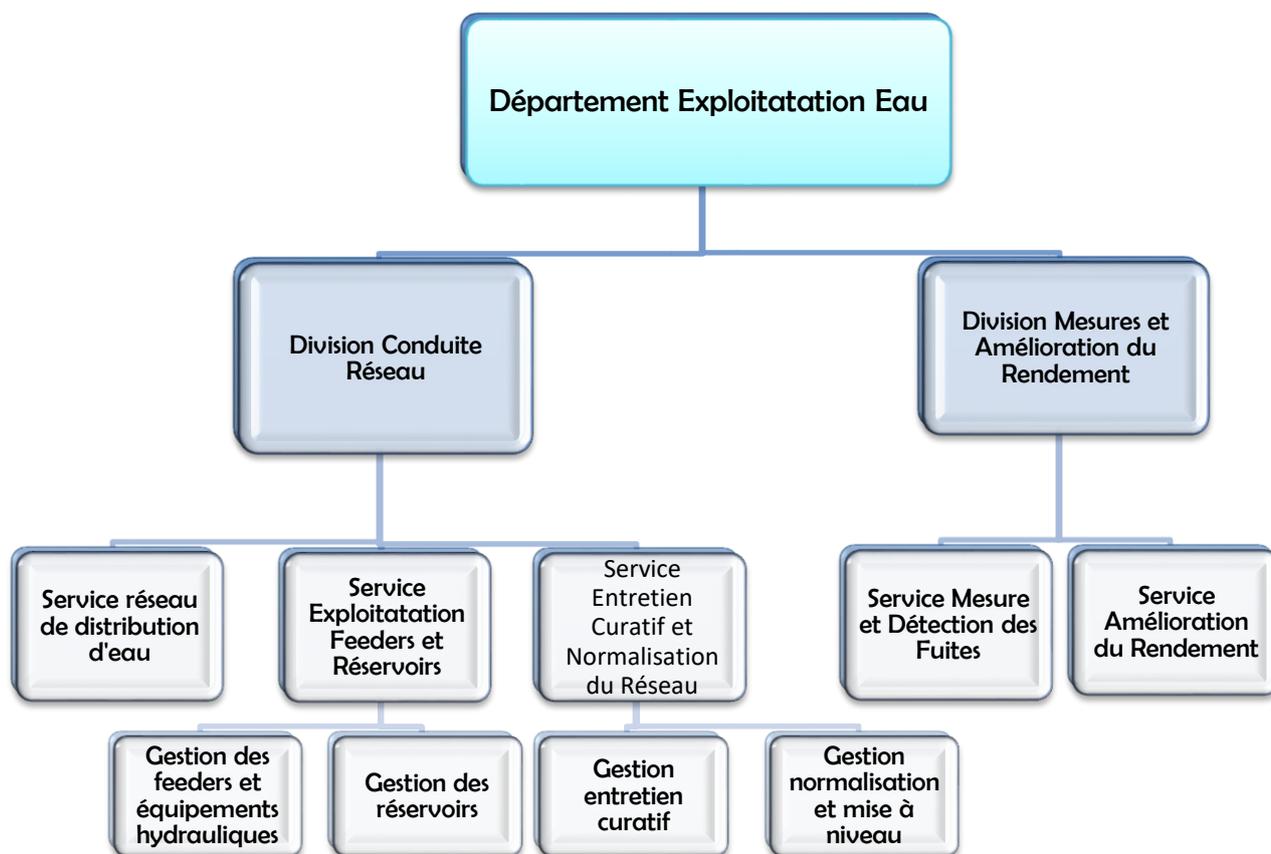


Fig.3 : Organigramme du Département Exploitation Eau

Conclusion :

Les différentes missions de la RADEEMA font d'elle le distributeur exclusif de l'eau potable au sein de la ville de Marrakech. Les responsables tiennent à développer son périmètre d'action et son linéaire du réseau au fil des années afin d'assurer la desserte de l'eau au plus grand nombre d'abonnés et dans les meilleures conditions.

Chapitre 2

Etude bibliographique

Introduction :

Ce chapitre représente une étude bibliographique sur la modélisation qui est effectuée par le logiciel Epanet, et sur la qualité de l'eau au sein du réseau de distribution ou l'un des indicateurs est principalement le taux du désinfectant qui est le chlore.

I. Modélisation des réseaux d'AEP :

La modélisation est la conception d'un modèle qui permet la représentation d'une situation du monde réel d'une façon plus simple et facile à appréhender. L'utilisation des logiciels de modélisation facilite grandement l'analyse du fonctionnement du réseau.

La modélisation du réseau d'AEP peut être utilisée à plusieurs fins :

- Description de la réalité complexe de l'hydraulique,
- La gestion des réseaux d'alimentation en eau potable,
- Modéliser les concentrations résiduelles de chlore en réseau,
- Déterminer le degré de mélange d'eau provenant de différentes sources d'approvisionnement dans un réseau,
- Evaluer les effets sur la qualité d'eau provenant d'une perturbation du réseau et prédire l'évolution des sous-produits de désinfection et la propagation du contaminant en réseau (2).

Le processus de modélisation des réseaux d'AEP permet l'élaboration de deux types de modèles :

I.1. Le modèle hydraulique :

Le modèle hydraulique se base sur les paramètres de fonctionnement d'un réseau, en particulier le débit, le sens de circulation, et la perte de charge dans les canalisations ainsi que la pression en chaque point. Les logiciels ont la possibilité de modéliser tous les appareils rencontrés sur un réseau : réservoirs, régulateurs, pompes, ... La représentativité d'un modèle dépend de la qualité des informations qui lui sont fournies. La phase préalable de collecte des données est donc essentielle. La réalisation d'une campagne complète de mesures sur le terrain permet ensuite le calage du modèle et donc sa validation (3).

I.2. Le modèle qualité :

En plus de la modélisation purement hydraulique du réseau, plusieurs logiciels proposent actuellement des modules qualité qui permettent de simuler l'évolution de certains paramètres liés à la qualité de l'eau.

Il est important de noter que la validité des résultats obtenus à l'aide de ces modèles dépendra en partie de la fiabilité du modèle hydraulique et donc de la finesse de son calage.

Ces modèles qualité permettent de calculer en tous points du réseau des grandeurs significatives de la qualité de l'eau distribuée :

Le temps de séjour, la répartition des origines de l'eau et l'évolution de la concentration dans le temps de substances réactives (chlore par exemple) ou conservatives (nitrates par exemple). (3).

Plusieurs logiciels peuvent être utilisés pour la modélisation : Piccolo, Aquis, Aquadapt et Epanet qu'on a utilisé pour notre projet.

II. Logiciel Epanet :

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau sur des longues durées dans les réseaux sous pression. Un réseau est un ensemble de tuyaux, nœuds (jonctions de tuyau), pompes, vannes, bâches et réservoirs. Ce logiciel permet de calculer :

- Le débit dans chaque tuyau,
- La pression à chaque nœud,
- Le niveau de l'eau dans les réservoirs (2).
- La concentration en substances chimiques, le temps de séjour dans les différentes parties du réseau et suivre l'origine de l'eau (4).

Il a été développé par le National Risk Management Research Laboratory (NRMRL) de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (U.S.E.P.A.) et distribué gratuitement par l'E.P.A. depuis le mois de septembre 1993 (2).

Il est largement utilisé dans le monde entier grâce à :

- Ses algorithmes de calcul les plus avancés,
- Son interface graphique conviviale et intuitive et aux possibilités de relations avec d'autres logiciels d'application et à l'existence d'une liste d'utilisateurs, lieu de communications et d'échanges.

EPANET a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau au sein du réseau. Il peut être utilisé pour différents types d'applications dans l'analyse des systèmes de distribution. En voici quelques exemples: définition d'un programme de prélèvement d'échantillons, simulation du chlore résiduel, et estimation de l'exposition de la population d'une substance. EPANET offre donc une aide sur la recherche de stratégies alternatives pour gérer le réseau.

Cet outil permet de :

- S'approcher de la réalité du terrain,
- Simuler les modifications ou les évolutions de sa structure propre ou de ses fonctions,
- Dimensionner les extensions du réseau,

Donner une réponse aux situations de crises et améliorer la gestion des équipements d'eau.

III. Qualité de l'eau potable dans les réseaux de distribution :

Une eau potable ne doit contenir en quantités dangereuses ni micro-organismes ni substances chimiques nocives pour la santé humaine. L'eau du robinet qui arrive au consommateur passe en premier temps par la station de traitement ONEP au sein de laquelle elle subit une série de traitements physico chimiques pour la rendre conforme aux normes de potabilité. Elle est par la suite livrée aux usagers à travers un réseau de distribution étroitement surveillée par la RADEEMA afin d'éviter les pollutions et les contaminations bactériennes.

Le contrôle de la qualité de l'eau potable est assuré à trois niveaux :

Système de production (ONEP), système de distribution (RADEEMA), et* ministère de santé (service d'hygiène).

III.1. Normes marocaines de qualité d'eau potable :

La qualité des eaux distribuées est définie par des normes.

III.1.1 Norme marocaine n°037001(juillet 2006) :

Relative à la qualité des eaux d'alimentation humaine.

Toute eau destinée à la boisson quel que soit le mode de sa production et de sa distribution.

Les eaux utilisées pour la préparation, le conditionnement ou la conservation des denrées alimentaires destinées au public (5).

III.1.2 Norme marocaine n°037002(mars 2011) :

Relative au contrôle et à la surveillance d'approvisionnement elle :

Regroupe les différentes analyses courantes effectuées sur l'eau dans : le réseau de distribution, l'entrée du système de distribution et le contrôle sanitaire (6).

III.2. Facteurs influençant la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution :

Le réseau de distribution de l'eau potable est souvent décrit comme un véritable réacteur où l'eau et son contenant (conduite) sont le siège d'interactions physicochimiques et biologiques qui font que l'eau du robinet peut avoir une qualité très éloignée de celle issue de l'usine de production. Les conditions qui contrôlent l'évolution de la qualité de l'eau dans le réseau sont complexes et ont fait l'objet ces dernières années d'une recherche approfondie.

Une bonne connaissance des facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau dans les réseaux est indispensable pour les services d'exploitation (en usine de production ou sur réseau) afin d'anticiper et d'éviter des problèmes potentiels (7) .

Il y a plusieurs facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau potable dont l'on peut citer :

Les facteurs organoleptiques, les facteurs physicochimiques, les facteurs bactériologiques, les facteurs hydrauliques, les facteurs indésirables et toxiques et les facteurs liés à la structure des conduites. Ces facteurs doivent respecter les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine.

III.3. La désinfection au chlore :

Notre étude portera sur le suivi de la concentration du désinfectant résiduel (chlore libre) aux différents points du réseau.

La désinfection par le chlore libre résiduel est une étape primordiale du traitement d'eau car elle permet l'inactivation d'organismes pathogènes. À la sortie de l'usine, une désinfection secondaire est habituellement réalisée afin de pouvoir maintenir un résiduel de désinfectant dans l'ensemble du réseau de distribution. Si une baisse du désinfectant résiduel peut entraîner une croissance bactérienne dans le réseau, l'expérience montre que le maintien du désinfectant résiduel n'assure pas totalement la prévention d'une telle reviviscence (8).

Selon les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine la concentration du chlore varie entre 0,1 et 1 mg/l.

Conclusion :

Le logiciel Epanet permet la réalisation de la modélisation hydraulique du système d'AEP ainsi que la réalisation de modèle qualité dont la fiabilité de résultats dépendra de la finesse du calage du modèle hydraulique et donc sa fiabilité.

Chapitre 3

Alimentation en eau potable de la ville de Marrakech

Introduction :

Ce chapitre représente l'étude du système d'alimentation et du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech.

I. Système d'alimentation en eau potable (AEP) de la ville de Marrakech :

I.1. Présentation de la ville de Marrakech :

Marrakech est une ville qui se trouve au centre du Maroc (figure 4), elle englobe géographiquement une partie du haut atlas. Sa superficie est de 230km², pour une population de 1 330 468 (9).



Fig.4 : Présentation de la ville de Marrakech (Google Maps)

I.2. Description du système d'AEP :

L'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech est assurée par l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), entant que producteur exclusif, et par la RADEEMA, en tant qu'organisme distributeur. Les ressources en eau potable (figure5) sont constituées de 98% d'eaux superficielles et 2% d'eaux souterraines du volume mobilisé.



Fig. 5 : Ressources d'eau disponibles

I.2.1. Les eaux de surfaces :

Les eaux de surface sont mobilisées à partir du barrage Sidi Driss qui est lui-même alimenté par le barrage Hassan Premier. Elles sont acheminées à partir du canal Rocade (118 km de longueur et 12 m³/s de capacité de transit) et sont traitées au niveau de la station de traitement de l'ONEP.

La prise en eau brute de la station de traitement est située dans la partie aval du canal, au kilomètre 112 à une distance de 1,7 km de la station de traitement de l'O.N.E.P dont la capacité de production est de 3300 l/s (10).

I.2.2. Les eaux souterraines :

Elles proviennent de 35 captages, forages et drains dispersés géographiquement de l'Est à l'Ouest de la ville, sur un rayon maximal de 35 km.

Les captages d'eau souterraine se situent à Agdal, Issil, Ourika, Ménara I et Ménara II. Le débit total équipé s'élève à 1 734 l/s, alors que le débit exploitable atteint à peine 114 l/s.

Les eaux souterraines sont acheminées à partir de 3 champs captants : Issil, Agdal et Ourika Et 3 injections directes sur le réseau actuel (Issil et Ménara 1 et 2) (10).

I.2.3. Les ressources de secours :

Les eaux de l'Oued N'Fis sont mobilisées à partir du barrage Lalla Takerkoust.

La prise d'eau pour l'alimentation de la station de traitement est réalisée sur le bassin du puits de chute situé à la sortie de la Galerie de transfert des eaux du barrage vers les périmètres irrigués de Marrakech.

Elle est utilisée en cas de problème au niveau du canal de rocade (canal en chômage, baisse du niveau d'eau dans le canal ou pollution accidentelle, fortes charges en suspension) (10).

II. Description du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech :

II. 1. Réservoirs de stockage existants :

Une fois rendue potable, l'eau est acheminée à travers un réseau de conduites fermées vers des réservoirs enterrés ou semi-enterrés destinés à stocker l'eau. Ces réservoirs permettent d'assurer la continuité de l'alimentation des réseaux d'eau potable tout en maintenant la qualité de l'eau.

Actuellement la RADEEMA dispose de deux réservoirs de stockage localisés au sud de la ville : Réservoir de Sidi Moussa et Réservoir Route Ourika.

Le réservoir de Sidi Moussa est Situé sur la route d'Ourika à 3 km du canal Rcade. Ses côtes sont représentées par le tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques du Réservoir Sidi Moussa

	Réservoir de sidi moussa	
	Réservoir semi enterré	Réservoir surélevé
Capacité en m3	50 000	500
Côte moyenne de TN (NGM)	552,5	552
Côte du radier (NGM)	549	580
Côte de trop-plein (NGM)	553,94	585
Etage alimenté	L'étage haut service	L'étage très haut service

Le réservoir surélevé est alimenté par le réservoir 50 000 via une station de surpression (Station de pompage).

Le réservoir Route Ourika est situé sur l'avenue Mohammed VI, dans la nouvelle zone touristique de Marrakech. Ses côtes sont représentées par le tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques Réservoir Route Ourika

	Réservoir Route Ourika	
	Réservoir semi enterré	Réservoir semi enterré
Capacité en m3	55 000	30 000
Côte moyenne de TN (NGM)	492,45	492,45
Côte du radier (NGM)	490,06	490,06
Côte de trop-plein (NGM)	494,92	494,92
Etage alimenté	L'étage bas service	L'étage bas service

II.2. Réseau de distribution

Un réseau de distribution est une structure permettant de garantir l'approvisionnement en eau potable d'une zone. Un réseau peut être :

Un réseau ramifié (figure 6A) :

Un réseau ramifié est un réseau construit sous forme d'arbre allant des conduites primaires aux conduites tertiaires. L'écoulement s'effectue de l'amont vers l'aval dans les conditions normales de fonctionnement. Il est adapté aux réseaux de faible densité des points de livraison et une continuité de service peu exigée (11).

Un réseau maillé (figure 6B) :

Un réseau maillé est un réseau de conduites dont la plupart des extrémités des tronçons sont connectées pour former des mailles. Les points de rencontre des conduites sont des nœuds. Le sens de l'écoulement de l'eau à l'intérieur des mailles dépend fortement de la demande. Il n'y a pas de zones mortes tant qu'il y a un minimum de consommation; ce qui contribue à préserver la qualité de l'eau. Chaque point du réseau maillé peut être alimenté par deux nœuds. En raison de ces deux degrés de liberté, la sécurité dans la distribution et la qualité du service sont plus grandes (11).

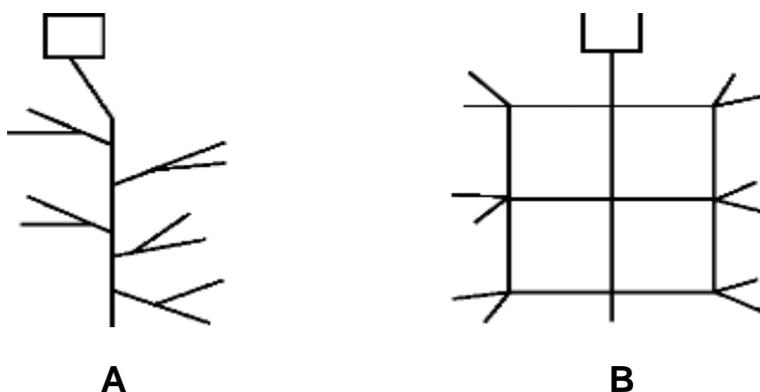


Fig.6 : A : schéma de réseau ramifié (11)/ B : schéma de réseau maillé (11)

II.2.1. Les modes de distribution :

II.2.1.1. Distribution gravitaire :

La distribution est entièrement gravitaire lorsqu'elle se fait à partir d'un stockage qui domine hydrauliquement tout le réseau, La pression de service est atteinte ou dépassée sur l'ensemble des zones sans l'intervention d'une machine élévatoire (12).

II.2.1.2. Refoulement distributif :

Le refoulement distributif est adopté dans le cas où le stockage serait inexistant ou qu'il se situe à l'opposé de la source d'eau potable, obligeant à traverser toute la localité pour joindre les deux installations. Ce sont les pompes qui assurent les pressions de service (13).

II.2.2. Les équipements hydrauliques du réseau de distribution :

Le réseau de distribution de la RADEEMA totalise un linéaire de 2743 km en 2018 de conduites de différentes natures : béton, acier, fonte grise, fonte ductile, PVC, AC, polyéthylène, de diamètre allant jusqu'à 1200 mm.

Les principaux composants du réseau de distribution sont :

Conduite : Assemblage de tuyaux, de leurs pièces de raccord et des ouvrages annexes qui permettent le transport de l'eau entre deux points. Il en existe deux types :

- Conduite d'adduction (de transport, de transfert) : est une conduite (eau brute ou eau potable) qui relie les ressources aux usines de traitement, réservoirs et/ou les zones de consommation, normalement sans desserte aux abonnés.
- Conduite de distribution : est une conduite assurant la desserte de l'eau potable aux abonnés.

Branchement : Conduite et accessoires mis en œuvre pour amener l'eau du réseau de desserte jusqu'au point de livraison de l'eau à l'utilisateur abonné, à l'exception des conduites et accessoires privés des immeubles collectifs.

Les équipements du réseau : Ce sont les accessoires du système de distribution (figure 7), on peut citer :

Vannes : Sont des dispositifs destinées à contrôler, à stopper ou à modifier le débit de l'eau. La vanne est équivalente au robinet. Il existe plusieurs types de vannes : à opercule, à clapet, à boisseau...

Ventouses : Equipements placées sur les points hauts du réseau, ont une triple fonction :

- Evacuation d'air à haut débit lors de la mise en eau des canalisations.
- Admission d'air à grand débit lors de la vidange des canalisations.
- Dégazage à faible débit en exploitation.

Vidanges : Dispositifs réalisés sur les points bas du réseau, permettent de vidanger les conduites pour la réparation des fuites ou bien pour le nettoyage.

Regards : Sont des ouvrages maçonnés rond ou rectangulaires qui se situent au-dessus d'une canalisation et dont le but est de permettre la visite et l'entretien d'une conduite

souterraine ainsi le démontage de divers appareils (débit mètre, stabilisateur de pression, compteur...)

Stabilisateurs de pression : Ou régulateurs de pression, appareils a deux fonctions :

-Réducteurs de pression en période de forte consommation (jour)

-Modulateur pour compenser les pertes de charge en période de faible consommation (nuit).

Poteaux d'incendies : Ou bouches d'incendies sont des dispositifs de lutte contre les incendies. Il s'agit d'un réseau souterrain permettant d'alimenter les fourgons d'incendies par les sapeurs-pompiers.



A



B



C



D



E



F

Figure.7: Les équipements du réseau. A : vanne, B : ventouse, C : vidange, D : regard, E : stabilisateur de pression, F: poteaux d'incendies

II.2.3. Fonctionnement du réseau :

Le réseau est organisé en trois étages de pression alimentés à partir des deux complexes hydrauliques existants :

L'étage bas service : comprend les secteurs de : Medina nord, Guéliz, Massira, Targa, Azli, Daouadiate...Il est alimenté à partir du réservoir Route Ourika.

L'étage haut service : comprend les secteurs de Medina Sud, Mhamid, SYBA ...Il est alimenté à partir du réservoir Sidi Moussa 50000 m3.

L'étage très haut service : alimente les zones hors influence de deux complexes hydrauliques Route Ourika et Sidi Moussa notamment les douars situés dans la commune Tassaltant et les projets touristiques Chrifia et Argan à partir d'un réservoir surélevé de 30 m d'une capacité de stockage de 500 m3.

Conclusion :

l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech dont s'occupe la RADEEMA nécessite une gestion du réseau de distribution dont le moyen le plus convenable est l'utilisation de logiciels permettant de représenter la réalité du réseau et de gérer ses paramètres hydrauliques.

Chapitre 4

Modélisation hydraulique et de la qualité de l'eau

Introduction :

Ce chapitre représente l'étude de la modélisation hydraulique et de la modélisation du chlore du réseau d'alimentation en eau potable d'une zone définie par le logiciel Epanet.

I. Zone d'étude :

La zone d'étude dans le cadre de notre projet (figure 8) correspond à celle desservie par le réseau d'alimentation en eau potable de la RADEEMA, alimentée par le réservoir Sidi moussa (haut service). Elle est située au Sud-est de Marrakech, délimitée au Nord par la route de Fès, à l'Est par la route d'Ouarzazate, à l'Ouest par la route d'Ourika et par laquelle passe l'Oued Issil. Elle couvre une superficie d'environ 3400 ha (34 km²).



Fig.8 : Situation géographique de la zone d'étude (Google Earth 2018)

La zone étudiée (figure8) correspond à plusieurs secteurs de distribution de l'étage haut service de la ville de Marrakech soit : Golf Trab Elmaaden, Golf Club Amelkis, Atlas Golf Resort, Royal Golf Club, Tallaght, Garden city, Lot Atlas Annakhil, Douar lekhili, Douar el garne, Douar sefiani, Douar koukou, Borj Annakhil, Golf Amanjena, Lot Belqadi, Lot Atlas Annakhil et Douar Slitin.

Notre zone d'étude est constituée de zones touristiques (Golf, villa.) qui sont marquées par des consommations en eau élevées (jusqu'à 6 l/s) par rapport aux autres zones (douars).

II. Construction du modèle hydraulique :

II.1.Principe :

La construction du modèle est effectuée par l'intermédiaire d'un traçage d'objets interactifs représentant chacun un élément de réseau. Le modèle est dit mathématique car il s'effectue par un logiciel ou les objets mathématiques (outils du logiciel) jouent le rôle des objets réels (réservoir, conduites...).

La réalisation du modèle débute d'abord par la caractérisation physique du réseau. Les paramètres à prendre en considération pour cette construction sont: la rugosité, le diamètre et la longueur de chaque conduite; l'élévation de chaque nœud et la consommation en eau. Il est nécessaire d'établir un plan du réseau géo référencé (support matériel : carte ou SIG) à une échelle adéquate qui résume tous les composants du système de distribution : nœuds, conduites, équipements particuliers et secteurs d'alimentation.

La figure 9 représente une cartographie du réseau d'alimentation en eau potable de la zone d'étude réalisé à l'aide d'un SIG :

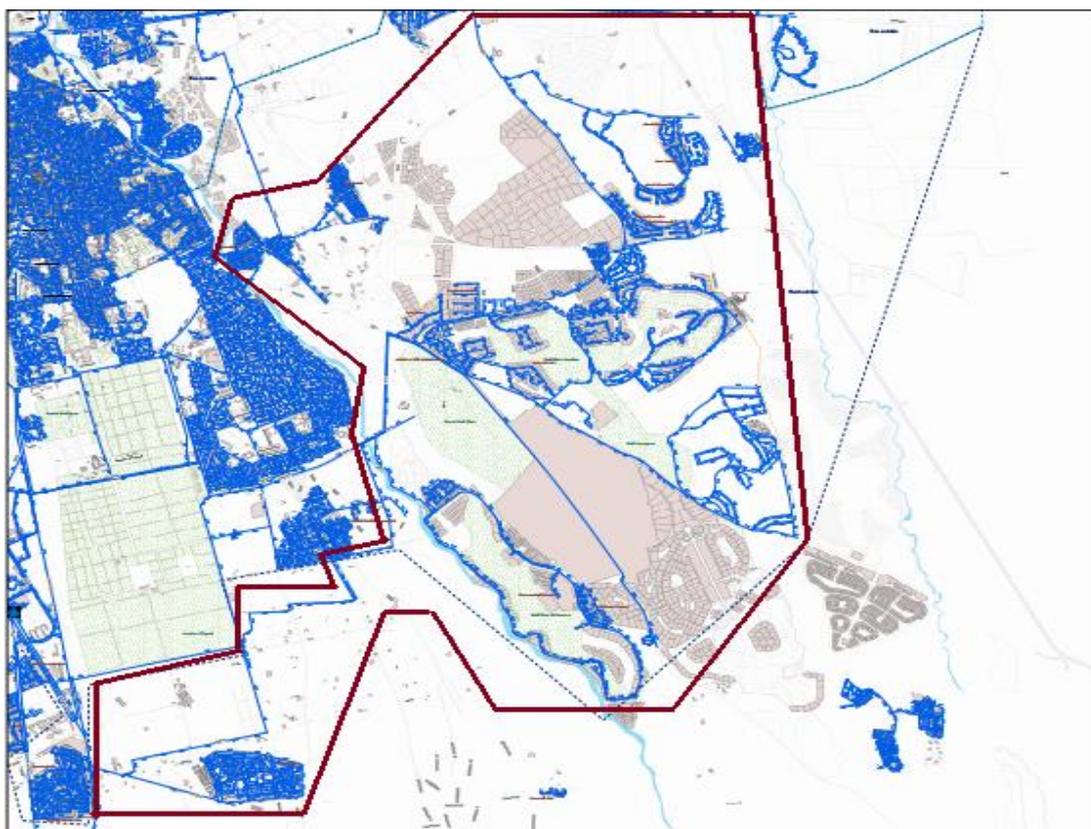


Fig.9 : Délimitation du réseau hydraulique d'AEP étudiée (service cartographie et SIG 2018) échelle : 1/3125 (annexe 2)

Détermination de l'ossature du réseau à modéliser : les conduites intégrées au modèle sont celles de diamètre nominal supérieur à 150mm, Entre chaque deux conduites s'insère une

jonction appelée nœud de demande désignant un changement de direction ou une consommation. L'eau desservie à la zone depuis le réservoir sidi moussa est désignée par un réservoir fictif inséré au début du modèle (côte radier : 549NGM)

II.2. Les données nécessaires à saisir pour la modélisation du réseau :

La réalisation du modèle nécessite la collecte d'un nombre important de données permettant de construire la base du modèle :

II.2.1. Diamètre nominal des conduites :

Le diamètre nominal désigne le diamètre intérieur d'un tube. Selon la norme EN ISO 6708, le diamètre nominal est indiqué par les lettres DN suivies d'un nombre sans unité correspondant approximativement au diamètre intérieur en millimètres. C'est le diamètre utilisé pour les calculs, exprimé en mm.

II.2.2. Longueurs des conduites :

Le second paramètre à introduire est la longueur des conduites. L'unité de longueur utilisée pour les tuyaux est le mètre.

Le tableau 6 récapitule les diamètres et longueurs des tronçons de notre réseau.

Tableau 6 : Diamètres et longueurs des tuyaux du réseau étudié

N° du tuyau	DN (mm)	Longueur (m)	N° du tuyau	DN (mm)	Longueur (m)	N° du tuyau	DN (mm)	Longueur (m)	N° du tuyau	DN (mm)	Longueur (m)
1	600	1228,5	35	300	73,5	69	200	399	103	200	63
2	600	126	36	300	325,5	70	200	262,5	104	160	514,5
3	200	420	37	160	420	71	200	157,5	105	160	147
4	600	105	38	300	2520	72	200	84	106	200	210
5	300	892,5	39	160	273	73	200	94,5	107	160	420
6	200	420	40	160	525	74	200	105	108	160	472
7	200	315	41	300	178,5	75	200	94,5	109	200	441
8	600	283,5	42	300	168	76	200	147	110	200	367
9	600	609	43	300	262,5	77	200	273	111	200	168
10	200	157,5	44	300	42	78	200	231	112	200	525
11	200	357	45	300	73,5	79	200	231	113	300	147
12	200	147	46	300	1155	80	200	199,5	114	300	525
13	200	105	47	200	800	81	200	210	115	300	525
14	200	336	48	200	1470	82	200	399	116	200	315
15	200	756	49	300	262,5	83	200	199,5	117	200	420
16	600	913,5	50	200	283,5	84	300	231	118	200	788
17	600	126	51	200	378	85	300	157,5	119	200	157
18	600	94,5	52	300	189	86	300	210	120	200	682
19	600	178,5	53	300	367,5	87	300	409,5	121	200	252

20	600	357	54	200	178,5	88	160	336	122	200	231
21	600	63	55	200	94,5	89	300	252	123	160	325,5
22	600	588	56	300	787,5	90	200	241	124	160	472,5
23	600	472,5	57	160	546	91	300	1029	125	300	525
24	600	567	58	200	231	92	300	735	126	160	210
25	600	493	59	200	178,5	93	200	178,5	127	300	31
26	200	651	60	200	178,5	94	300	210	128	300	231
27	300	84	61	200	325,5	95	300	147	129	300	525
28	200	294	62	200	262,5	96	300	210	130	200	168
29	300	157,5	63	200	210	97	300	577	131	200	294
30	300	1008	64	200	168	98	160	231	132	200	126
31	300	1039,5	65	200	105	99	200	100	133	200	262
32	160	147	66	200	210	100	160	882	134	200	252
33	160	84	67	200	315	101	160	388,5			
34	300	63	68	200	178,5	102	200	1312			

II.2.3 Rugosité des conduites :

Facteur déterminant le choix des matières de tuyaux lors de l'étude d'un réseau hydraulique, elle donne un renseignement sur l'état des parois en contact avec le fluide et agit sur les frottements de surface, elle dépend du diamètre des conduites.

Tableau 7 : Rugosité saisie en fonction de la matière et le diamètre des conduites

Matière du tuyau	Rugosité	Diamètre des conduites
PVC	0,5	315- 225- 160
Béton	1	600
AC	1,5	300-200-150

II.2.4 Altitude des nœuds :

Son unité est le mètre, c'est la première caractéristique à saisir pour un nœud. C'est l'élévation verticale d'un lieu par rapport un niveau de base, elle est déterminée sur Google Earth. Le tableau suivant donne les altitudes en m de chaque nœud du modèle hydraulique (tableau 8).

Tableau 8 : Altitudes en m de chaque nœud du modèle hydraulique.

N°du nœud	Altitude (m)						
1	511	34	469	67	499	100	488
2	515	35	469	68	500	101	493
3	484	36	495	69	502	102	474
4	512	37	471	70	502	103	464
5	512	38	494	71	504	104	469
6	513	39	491	72	506	105	469
7	515	40	500	73	506	106	473
8	520	41	483	74	509	107	470
9	513	42	485	75	511	108	470
10	511	43	486	76	510	109	472
11	549	44	487	77	509	110	480
12	485	45	481	78	508	111	476
13	512	46	479	79	490	112	479
14	501	47	477	80	506	113	480
15	500	48	478	81	505	114	471
16	500	49	467	82	507	115	461
17	483	50	467	83	504	116	483
18	497	51	469	84	502	117	478
19	496	52	469	85	499	118	484
20	496	53	480	86	498	119	486
21	491	54	469	87	497	120	481
22	491	55	470	88	494	121	481
23	489	56	488	89	492	122	478
24	498	57	485	90	490	123	480
25	516	58	490	91	483	124	480
26	482	59	489	92	508	125	466
27	485	60	489	93	499	126	505
28	470	61	488	94	492	127	480
29	482	62	489	95	497	128	477
30	478	63	491	96	499	129	476
31	498	64	494	97	498	130	476
32	478	65	497	98	499	131	472
33	482	66	498	99	481	132	471

II.2.5 Demande de base des nœuds :

Les nœuds sont les points du réseau ou les arcs se rejoignent. La détermination de la demande de base des nœuds nécessite la réalisation d'une sectorisation et délimitation commerciale des consommations. Les consommations moyennes annuelles du réseau étudié relevées en 2017, sont par ailleurs réparties en chacun des nœuds du modèle en fonction de la répartition géographique des abonnés au sein de la tournée. Les consommations sont exprimées en l/s (tableau 9).

Tableau 9 : Consommations d'eau en l/s de la zone étudiée

Consommateurs de la zone étudiée	Consommations d'eau en l/s
Golf Trab El Maaden	2,82
Royal Golf Club	0,95
Amelkis 1	6,16
Amelkis 2	3,31
Amelkis 3	0,96
Golf Amanjena	3,08
Atlas Golf Resort	0,10
Dr sefiani	0,41
Borj Annakhil	0,74
Dr Oulad El Guarne	0,08
Tallaght	1,13
Garden City	0,25
Lot Atlas Annakhil	0,78
Dr koukou	0,068
Lot Belqadi	0,098
Dr Slitin	1,11
Arst Boumenkar	1,85
Dr lekhili	2,89
Villa Alexandra Route Ouarzazate	0,38

Les informations archivées et les données saisies dans la base de données spatiale élaborée pour le réseau en question nous permis la réalisation du modèle suivant (figure 10) :

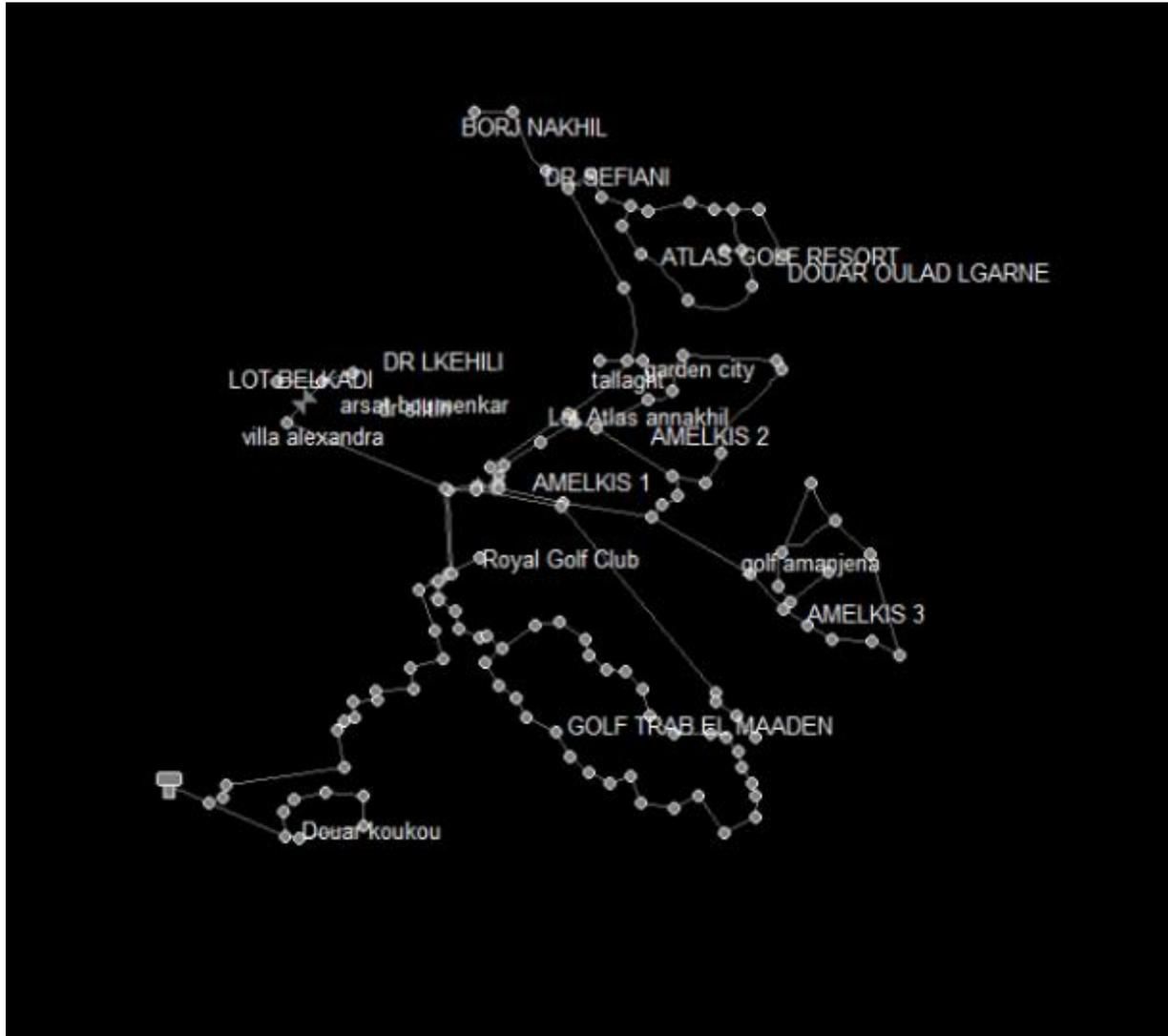


Fig. 10: Modèle hydraulique du réseau étudiée réalisé par le logiciel EPANET

II.2.6. la courbe de modulation :

Pour lancer la simulation du comportement du système, il faut créer une courbe de modulation. A chaque intervalle de temps (variation d'une heure pendant 24h) nous avons attribué une valeur multiplicative ou coefficient de modulation qui se calcule par la relation suivante :

$$\text{coefficient de modulation} = \frac{\text{débit horaire}}{\text{la moyenne de tout les débits horaire}}$$

La journée 21/05/2018 a été retenue pour construire la courbe de modulation :

La moyenne des débits horaires de cette journée est de 39.90 l/s.

Elle représente la variation de la consommation des abonnés au cours du temps.

Le tableau 10 représente les coefficients de modulation calculés pour chaque heure et les débits horaires qui les correspondent en l/s.

Tableau 10 : Les coefficients de modulation

Heure	Débit horaire en l/s	Coefficient de modulation
00 :00	26,11	0,65
01 :00	24,08	0,60
02 :00	23,05	0,57
03 :00	23,55	0,59
04 :00	22,44	0,56
05 :00	20,44	0,51
06 :00	27,75	0,69
07 :00	35,66	0,89
08 :00	46,19	1,15
09 :00	58,61	1,46
10 :00	60,86	1,52
11 :00	63,58	1,59
12 :00	65,75	1,64
13 :00	58,86	1,47
14 :00	51,02	1,27
15 :00	46,80	1,17
16 :00	40,77	1,02
17 :00	45,19	1,13
18 :00	44,22	1,10
19 :00	39,91	1
20 :00	38,02	0,95
21 :00	35,77	0,89
22 :00	30,22	0,75
23 :00	28,72	0,71

Ces coefficients doivent être introduits au niveau de la boîte de dialogue (figure 11) pour obtenir la courbe de modulation :

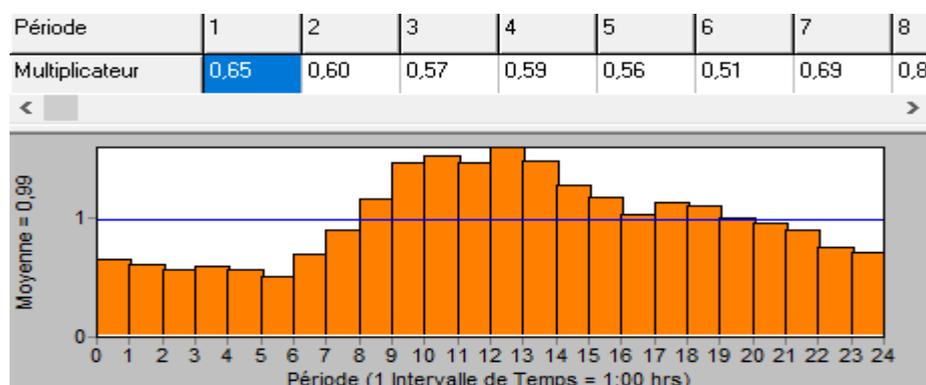


Fig.11 : Courbe de modulation horaire

La courbe de modulation construit sera appliquée à tous les nœuds de demande.

II.3. Simulation dynamique du réseau à l'aide d'EPANET :

La simulation dynamique permet de décrire le fonctionnement du réseau durant une période déterminée, tout en tenant compte de la variation de la consommation des abonnés au cours du temps.

Après avoir introduit toutes les données appropriées aux nœuds et aux tronçons, l'étape suivante est la validation du modèle hydraulique, la simulation est révélée réussie comme la figure 12 le montre.

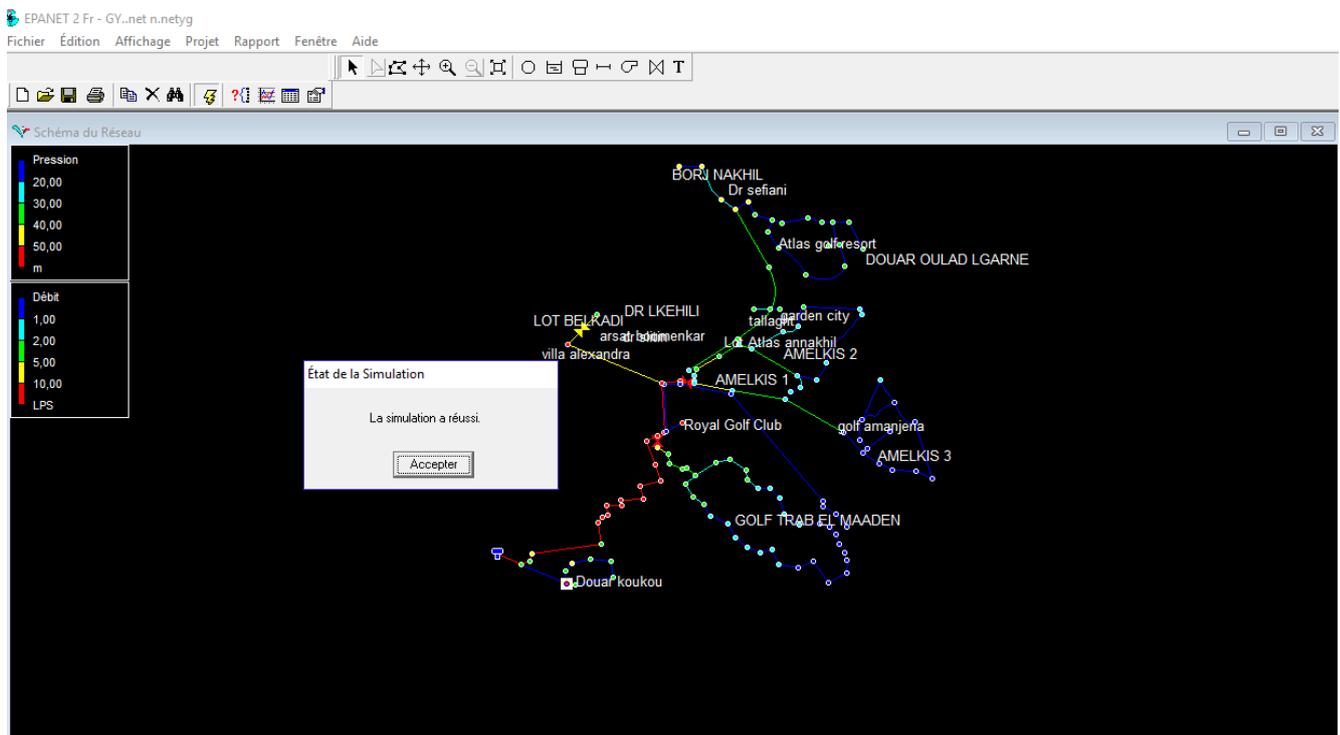


Fig.12 : Modèle hydraulique simulé par Epanet du réseau étudié

II.4 Le calage du modèle :

Le calage consiste à ajuster le modèle afin de corriger les erreurs causant des différences entre les observations et les simulations. Les différents ajustements peuvent être effectués à l'aide d'algorithmes d'optimisation ou par des techniques d'essais et erreurs afin de s'assurer que le comportement du modèle soit le plus fidèle possible au comportement réel du réseau selon les informations disponibles.

L'erreur relative qu'il ne faut pas dépasser :

2 à 5mCe pour La pression

5 à 10% pour le débit

Si les résultats du calage sont proches de la réalité le réseau est considéré fiable. Si non le réseau construit ne reflète pas la réalité. Pour effectuer le calage du modèle du réseau d'eau potable sujet de notre étude, nous sommes basées sur les mesures de pression et de débit réalisées le 21 mai 2018 au niveau d'un ensemble de nœuds et tuyaux éparpillés sur toute l'étendue dudit réseau (tableau 11).

Tableau 11: Nœuds et tuyaux choisis pour effectuer les mesures de pression et de débit

		Points de mesure	
Mesure de pression	Noeuds	47	
		49	
		95	
Mesure du débit	Tuyaux	8	
		41	
		86	
		102	

II.4.1 calage des pressions :

Pour effectuer le calage des pressions, nous nous sommes basées sur les mesures des pressions que nous avons réalisées le 21/05/2018 (tableau 12) au niveau des nœuds cités dans le tableau 11.

Tableau 12 : Mesures de pressions réalisées le 21/05/2018

Heure	Pressions pour le nœud 47	Pressions pour le nœud 49	Pressions pour le nœud 95
13 :00	29,75	35,25	25
14 :00	30	35,5	25
15 :00	30	32	24
16 :00	31,5	36,75	25
17 :00	31,5	35	25
18 :00	31	35	25
19 :00	31	36,25	25
20 :00	30,5	37	25
21 :00	31	38,75	25
22 :00	30,5	40	25
23 :00	30,5	39	25
00 :00	31	39,5	20
01 :00	25,5	36	20
02 :00	25,5	36,5	20
03 :00	25,5	36,25	20
04 :00	25,5	35,5	20
05 :00	25,5	36,5	20
06 :00	25,5	35	26
07 :00	25,5	40	25

08 :00	31	38,5	25
09 :00	30	36,12	24,5
10 :00	31,8	36	24,5
11 :00	29,5	40	24,5
12 :00	29,5	41	24

La figure 13 représente la comparaison des valeurs des pressions mesurées et simulées qui vont permettre le calage de pression.

Les résultats de calcul de pression (figure 13) sont donc proches pour l'ensemble des points de mesure (tolérance de 2 à 5 m d'écart entre la pression mesurée et la pression calculée acceptable).

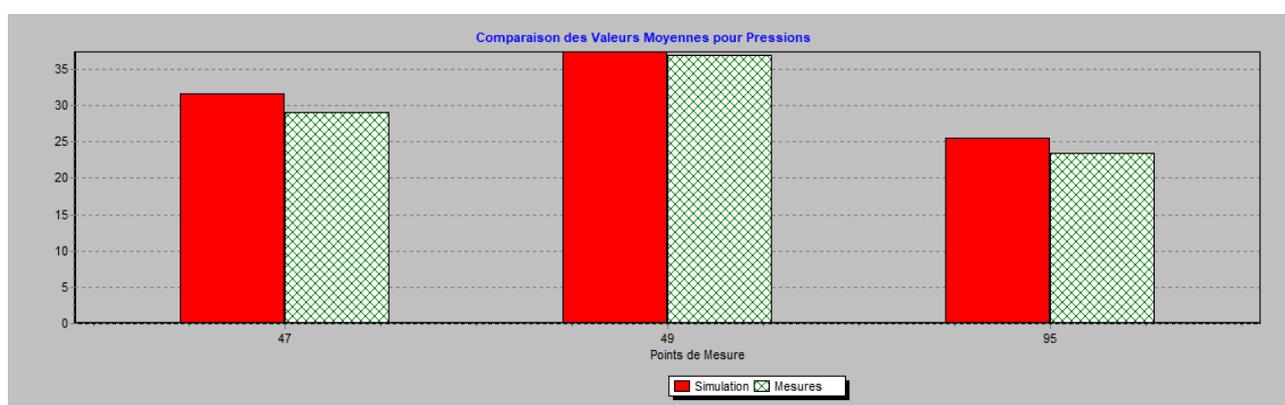


Fig.13 : Comparaison des valeurs moyennes des pressions mesurées et simulées.

II.4.2 calage des débits :

Pour effectuer le calage des débits nous nous sommes basées sur les mesures des débits que nous avons réalisées le 21/05/2018 représentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Mesures des débits réalisées le 21/05/2018

heure	Débit pour le tuyau 8 en l/s	Débit pour le tuyau 41 en l/s	Débit pour le tuyau 86 en l/s	Débit pour le tuyau 102 en l/s
00 :00	26,11	3,33	16,66	6,11
01 :00	24,08	3,61	15,83	4,63
02 :00	23,05	3,61	15,83	3,61
03 :00	23,55	3,88	14,72	4,94
04 :00	22,44	3,33	14,16	4,94
05 :00	20,44	3,61	14,16	2,66
06 :00	27,75	4,16	20,27	3,30
07 :00	35,66	5,83	24,16	5,66
08 :00	46,19	8,88	29,16	8,13
09 :00	58,61	11,38	37,77	9,44

10 :00	60,86	12,22	36,66	11,97
11 :00	65,75	13,05	39,16	13,52
12 :00	63,58	10,83	38,33	14,41
13 :00	58,86	7,22	38,33	13,30
14 :00	51,02	5,83	33,33	11,86
15 :00	46,80	5,55	30,55	10,69
16 :00	40,77	3,88	24,44	12,44
17 :00	45,19	5,55	26,11	13,52
18 :00	44,22	4,16	26,66	13,38
19 :00	39,91	4,16	23,61	12,13
20 :00	38,02	4,16	23,88	9,97
21 :00	35,77	3,61	20,55	11,61
22 :00	30,22	3,61	18,33	8,27
23 :00	28,72	3,05	18,05	7,61

Ces données vont permettre la réalisation du calage du modèle. Les résultats du calage de débit sont représentés par la figure 14. D'après cette figure, nous constatons que les valeurs moyennes mesurées des débits et celles calculées sont acceptables. (Tolérance de 5 à 10% pour le débit).

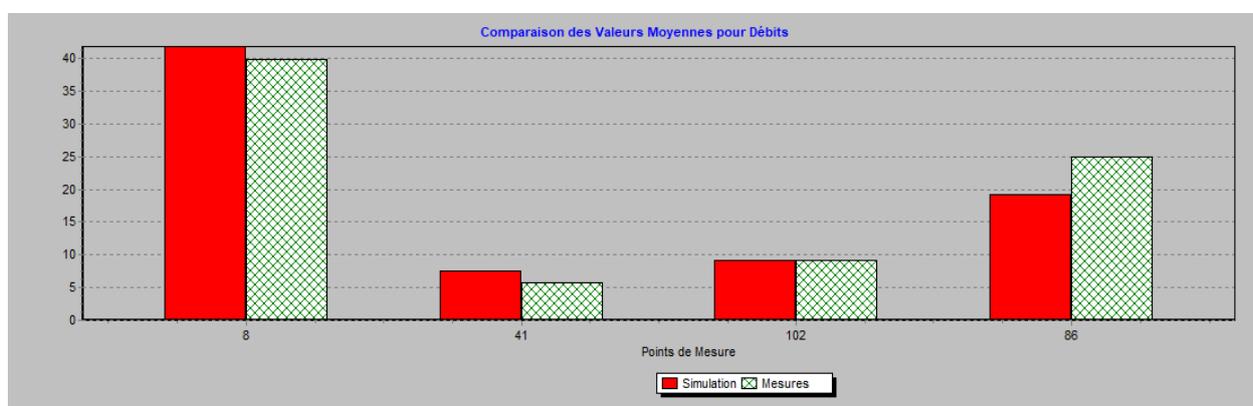


Fig.14 : Comparaison des valeurs moyennes des débits mesurés et simulés.

III. Modélisation du chlore :

La qualité d'eau fournie par un réseau d'eau potable dépend directement de sa concentration en chlore résiduel libre. Transporté par l'eau dans le réseau, le chlore réagit avec la matière organique pouvant y être présente pour assurer une bonne désinfection. La modélisation du chlore est la première raison du développement des modèles de qualité d'eau potable. C'est pourquoi, un grand nombre de recherches essayent de comprendre son mécanisme pour mieux modéliser cette substance dans les systèmes hydrauliques. Dans le cadre de l'approche systémique adoptée pour comprendre le système d'AEP, l'approche qualité vient compléter

ce qu'on avait déjà développé par la réalisation d'une campagne d'échantillonnage qui permettra de mesurer la concentration du chlore au sein du réseau puis le calage du chlore pour confirmer la validité du modèle.

III .1 Campagne d'échantillonnage :

La campagne d'échantillonnage a été réalisée le 24 mai 2018. Les prélèvements de l'eau sont effectués au niveau de trois nœuds éparpillés au sein du réseau étudié (tableau 14). L'étape suivante est de tester la présence du chlore résiduel. Les mesures du chlore qui nous avons réalisées ont nécessité :

L'Orthotolidine : C'est un réactif liquide coloré qui permet de mesurer le chlore total.

Le Comparateur colorimétrique (figure 15) : Appareil colorimétrique pratique et compact adapté aux analyses mobiles et fixes. Livré avec un grand nombre d'échelles chromatiques différentes, il constitue une base de système d'analyse colorimétrique complet et simple à utiliser.

Chaque disque contient une échelle chromatique continue permettant d'obtenir une correspondance exacte de couleur entre l'étalon coloré et l'échantillon. Ces disques sont spécialement fabriqués dans des matériaux sélectionnés pour assurer une stabilité des couleurs sur une longue période et garantissent des résultats de mesure fiables et reproductibles.



Fig.15 : Comparateur colorimétrique du chlore.

La mesure colorimétrique consiste à :

- Remplir deux tubes d'échantillon d'eau. Traiter avec le réactif l'un des tubes, l'autre tube sert de témoin,
- Insérer le disque face au tube témoin, les filtres colorés se superposent avec le tube témoin. Tourner le disque jusqu'à obtenir la même couleur que le tube traité,
- Lire directement sur le disque la concentration en mg/l.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 14 :

Tableau 14 : Mesures des concentrations du chlore au niveau des nœuds sélectionnés

Point de mesure	Concentration du chlore mesurée en mg/l
42	0,6
127	0,5
102	0.4

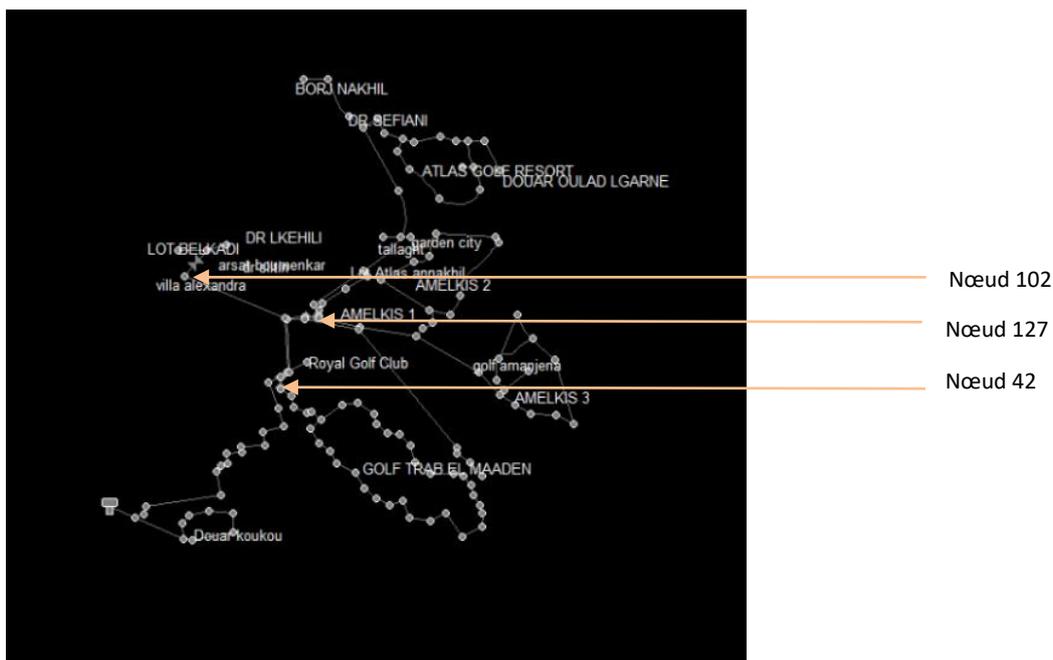


Fig.16 : Répartition des points de mesure du chlore sur le réseau étudié

Le tableau 14 représente les concentrations du chlore en mg/l des trois nœuds mesurées pendant la campagne d'échantillonnage.

La figure 16 représente la répartition des points de mesure du chlore sure le modèle réalisé.

D'après le tableau 14 et la figure 16 on remarque que la concentration du chlore baisse le long du réseau tout en s'éloignant de la source et ce qui peut être dû aussi au taux de consommation de l'eau dans ces zones durant les différentes périodes de la journée.

III .2. Calage du chlore :

Les mesures des concentrations du chlore effectuées le 24/05/2018 ont permis d'effectuer le calage de qualité de modèle.

La figure 17 représente la comparaison des valeurs moyennes du chlore mesurées et celles simulées par le logiciel Epanet.

D'après cette figure nous constatons que les valeurs simulées des concentrations du chlore sont donc acceptables et proches de celles mesurées.

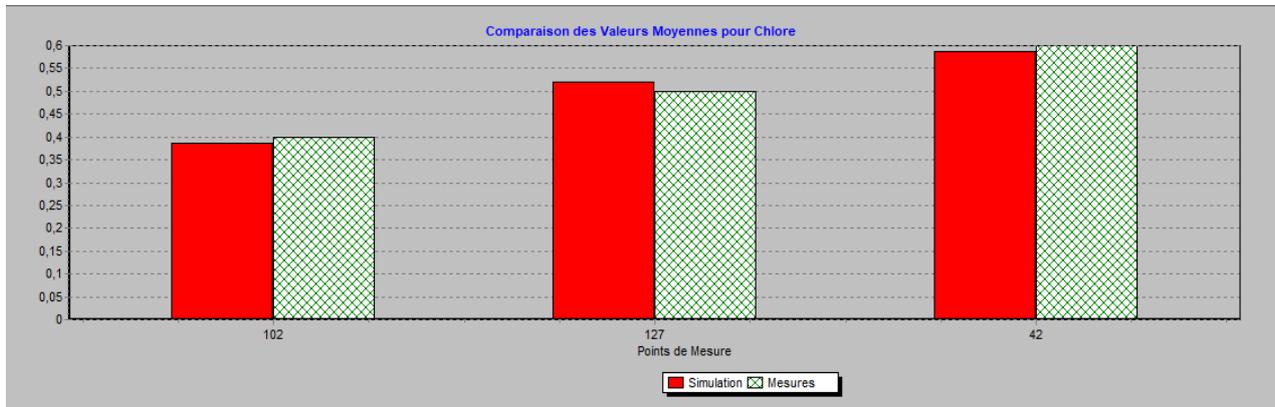


Fig.17 : Comparaison des valeurs moyennes du chlore mesurées et simulées.

IV. Analyse de fonctionnement du réseau :

Le modèle obtenu permet l'analyse de la pression, le débit et de la qualité de l'eau par la concentration du chlore dans les différents points du réseau.

L'analyse du fonctionnement du réseau durant la journée de calage en heure de pointe de consommation (12h00) mentionné dans le tableau 10, montre que les pressions sont acceptables dans la plupart des zones. La pression moyenne varie de 2 à 5 bars. L'analyse de ces résultats montre aussi qu'en quelques points les pressions fluctuent autour de 1,79 bar à 1,89 bar ; citons par exemple le cas du nœud 72 situé au sud du golf trab el Maaden (Figure 18). Cependant, ceci ne constitue pas de vrai problème puisque ces valeurs de pression sont très proches de la norme (pression minimale 2 bars). Par ailleurs, de fortes pressions sont observées au niveau du nœud 102. Ces pressions dépassent les 5 bars. La figure 19 illustre la variation de la pression pour le nœud 102, siège d'une surpression qui peut être modulé par l'installation des réducteurs de pression.

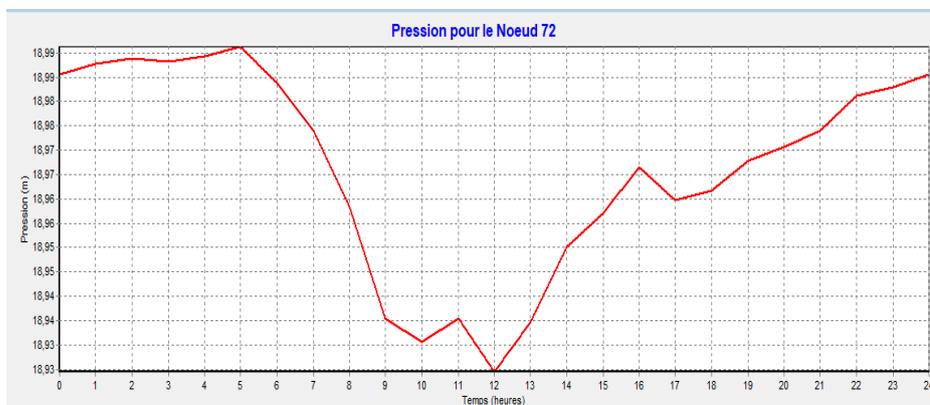


Fig.18 : Variations de la pression pour le nœud 72

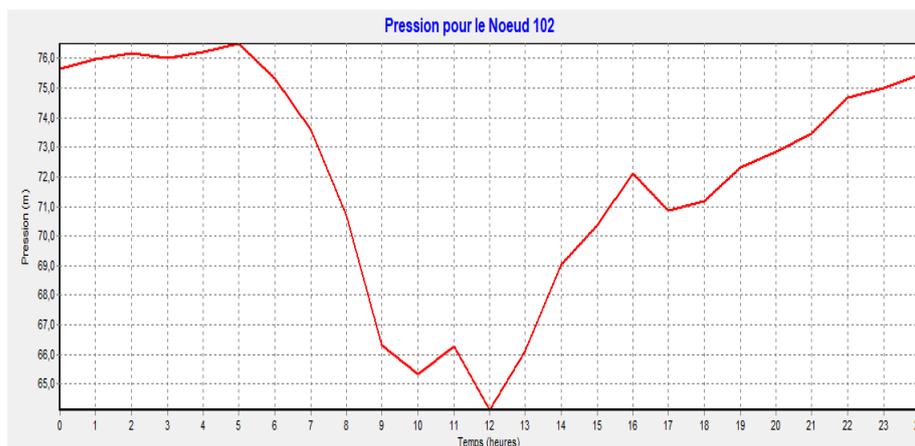


Fig.19 : Variations de la pression pour le nœud 102

La pointe de consommation de la journée du calage est mentionnée à 12h00 (mesures du tableau 10). En cette période de la journée l'augmentation du débit est expliquée par la forte consommation, tandis que les périodes de nuit sont marquées par une diminution des débits dû à la faible consommation. La figure 20 représente la variation des débits en fonction du temps pendant la journée du calage pour le tuyau 91.

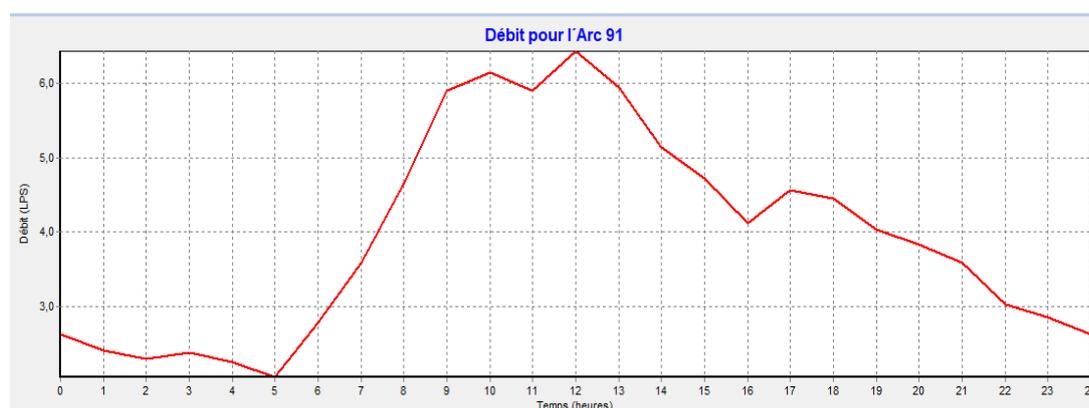


Fig.20 : Variations du débit pour le tuyau 91

Le taux de chlore libre acceptable est compris entre 0,1 et 1 mg/l.

Le figure 21 représente la courbe de distribution la courbe de distribution du chlore , elle montre que les nœuds du réseau présentent des taux de chlore libre qui varient entre 0.1 et 0.6,nous constatons donc que le réseau assure une désinfection convenable et que même suite à la diminution de la concentration du chlore et dans différentes périodes de la journée à cause de la consommation ou bien sa dégradation le long du réseau il en reste toujours des traces du désinfectant dans l'eau.

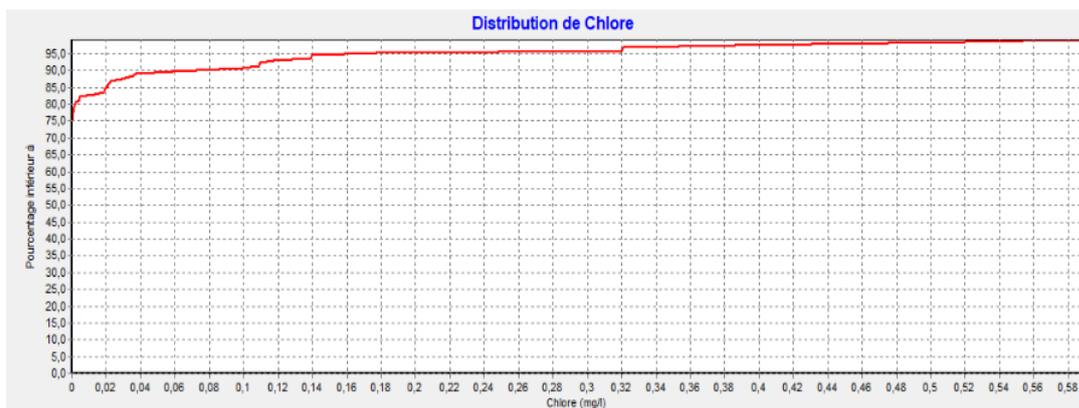


Figure 21: Courbe de distribution de chlore

Conclusion :

D'après notre étude nous constatons que les résultats de calage qui en découlent permettent d'obtenir une précision importante, et un fonctionnement de réseau simulé le plus proche de la réalité. Ceci montre une bonne estimation du modèle et par suite une bonne qualité de calage du modèle qui permettra l'analyse du le fonctionnement du réseau.

Conclusion Générale

Ce mémoire porte sur l'élaboration d'un outil méthodologique capable de gérer le réseau d'alimentation en eau potable. A l'aide d'un système d'information géographique (SIG), ce travail a consisté à réaliser une modélisation hydraulique et de qualité d'eau par le logiciel Epanet. Le secteur choisi correspond à une partie du réseau de distribution d'eau potable desservi par la RADEEMA située à l'étage haut service et alimentée par le réservoir Sidi Moussa. Un modèle hydraulique et de qualité d'eau a été élaboré dans le but d'analyser le fonctionnement du réseau du secteur d'étude par le calcul du débit, de la pression et de la concentration du chlore.

Ce projet a été réalisé en plusieurs étapes. La modélisation commence d'abord par la création d'une base de données numérique la plus représentative possible de la réalité et qui sera complétée par la collecte de données qui se révèle une étape primordiale pour la validité du modèle. Une campagne de mesure et une campagne d'échantillonnage de mesures du chlore, pression et débit ont été réalisées afin de caler et ajuster le modèle la comparaison et la superposition des données mesurées et de celles simulées.

Le modèle obtenu permet l'analyse de la pression, il dégage les zones marquées par des surpressions ainsi que celles qui représentent des fluctuations. Pour le débit il permet de déterminer les variations des consommations en fonction du temps et du période de la journée. Ce modèle facilite aussi le suivi de la concentration du chlore en tout point du réseau.

La modélisation réalisée sous Epanet permet donc de caractériser l'état actuel du fonctionnement du réseau d'alimentation en eau potable et facilite la programmation de l'intervention pouvant être effectuée en tout point du réseau. Il reste un outil de contrôle qui offre aux exploitants du réseau une méthode performante de gestion, disposant d'une base de données relationnelle, pouvant être interrogée en tout instant.

ANNEXE 1 : Fiche technique d'Epanet

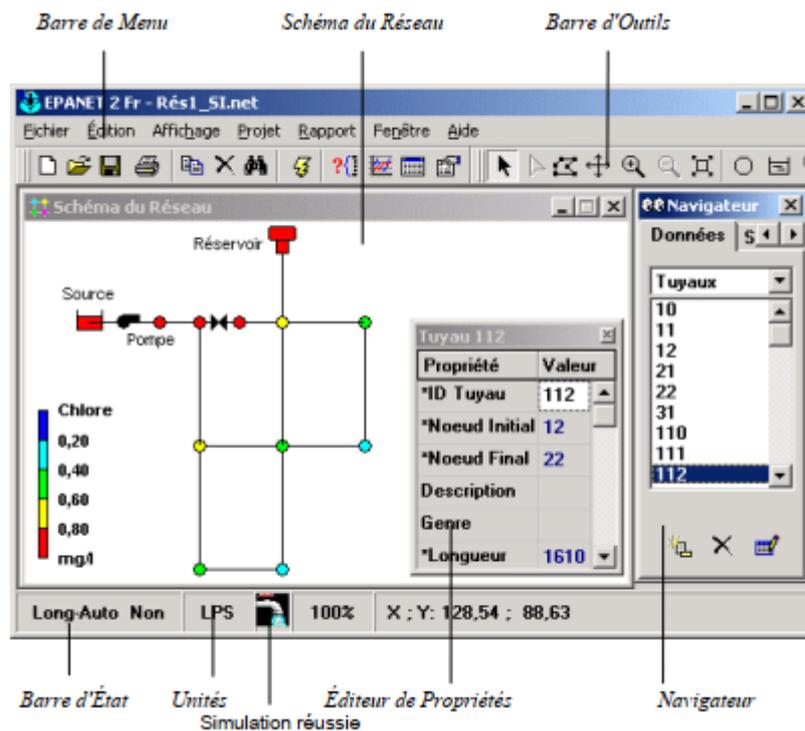
I. Historique

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.

II. Ce qu'est Epanet :

C'est un logiciel développé pour la simulation du comportement des systèmes de distribution d'eau d'un point de vue hydraulique et également d'un point de vue qualité de l'eau.

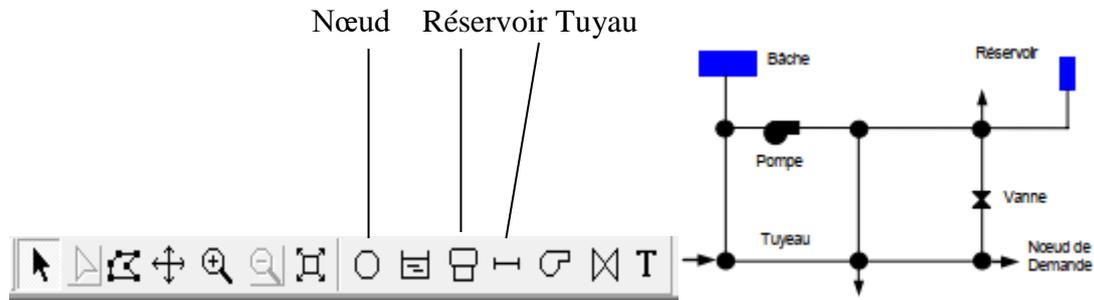
III. Vue d'ensemble de l'environnement d'Epanet :



IV Composants physiques :

EPANET modélise un système de distribution d'eau comme un ensemble d'arcs reliés à des nœuds. Les arcs représentent des tuyaux, des pompes, et des vannes de contrôle. Les nœuds représentent des nœuds de demande, des réservoirs et des

bâches. La figure ci-dessous indique les liaisons entre les différents objets de la barre d'outils.



V. Les Étapes d'utilisation d'EPANET

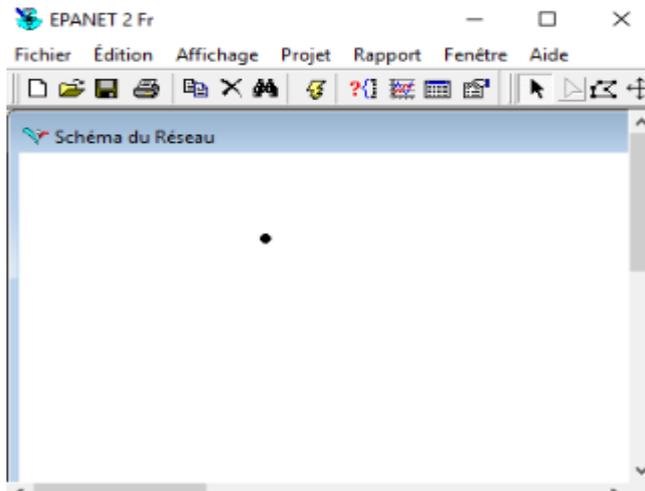
Les étapes classiques de l'utilisation d'EPANET pour modéliser un système de distribution d'eau sont les suivantes:

- Dessiner un réseau représentant le système de distribution ou importer une description de base du réseau enregistrée dans un fichier au format texte
- Saisir les propriétés des éléments du réseau
- Décrire le fonctionnement système
- Sélectionner un ensemble d'options de simulation
- Lancer une simulation hydraulique ou une analyse de la qualité
- Visualiser les résultats d'une simulation.
- Calage du modèle pour la superposition des données mesurés et données simulés.

V.1 Saisie des objets :

Pour ajouter un objet il suffit de cliquer sur le bouton qui le correspond sur la barre d'outils puis marquer son emplacement dans le schéma du réseau.

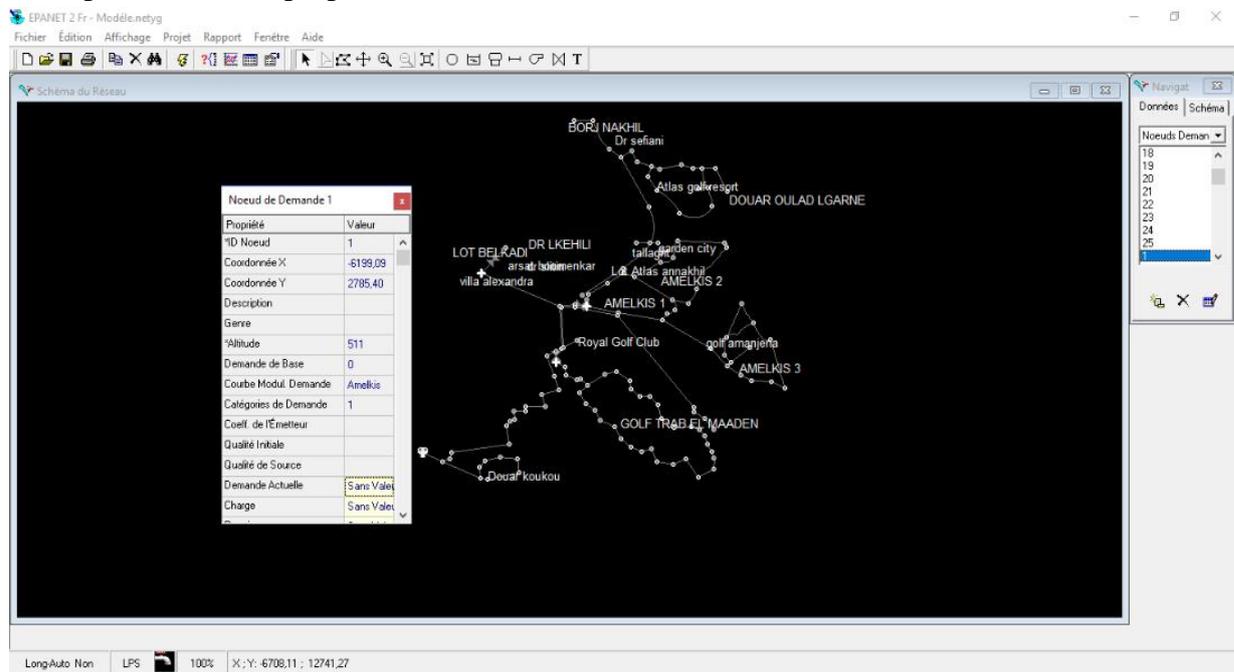
Exemple : Schéma du réseau après ajout d'un nœud



V.2 Saisie des propriétés des objets :

Après avoir terminé l'ajout des objets du modèle, l'étape suivante est de saisir leurs propriétés. Pour modifier la valeur d'une propriété particulière d'un objet, il faut double cliquer sur l'objet dans le schéma, par la suite apparaîtra l'éditeur de propriétés ou l'on peut saisir les différents données des objets du modèle.

Exemple : Saisie des propriétés du nœud de demande 1



VI. Simulation :

Après avoir saisi tous les informations nécessaires pour la construction du modèle, on arrive à l'étape de l'exécution d'une simulation d'écoulement permanent (ou bien pour un instant

déterminé). Pour exécuter la simulation, choisissez Projet >> Lancer la simulation ou cliquez sur le bouton lancer la simulation 

Pour rendre notre étude plus réaliste et pour simuler le comportement du système sur une longue durée nous allons créer une Courbe de Modulation dans laquelle les demandes aux nœuds changent périodiquement pendant la journée.

Il faudra d'abord remplir l'éditeur de propriétés pour fixer la durée de l'intervalle du temps pour la simulation qui apparaîtra en cliquant sur Options Temps dans le Navigateur des Données

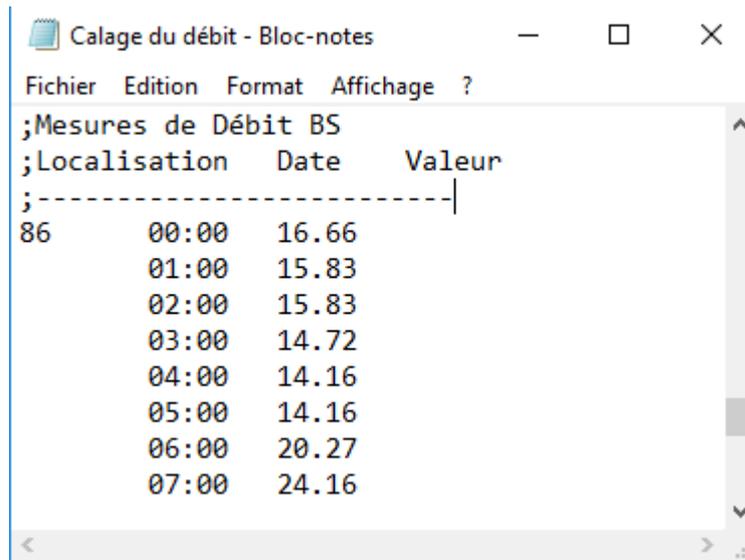
Propriété	Hrs:Min
Durée Totale	24
Intervalle Hydraulique	1:00
Intervalle Qualité	0:05
Intervalle Courbes Modulat	1:00
Heure Début Courbes Modu	0:00
Pas de Temps entre Deux R	1:00
Heure Début du Rapport	0:00
Heure Réelle Début de la Si	12 am

Pour créer la courbe de modulation, il faut sélectionner Courbes Modulation dans le Navigateur puis cliquer sur le bouton Ajouter (ou taper la touche Insertion)

VII Calage du modèle :

L'étape de calage est une étape cruciale dans la construction et l'utilisation d'un modèle mathématique. Elle détermine la pertinence des résultats issus des simulations, elle convient donc de procéder à un calage à partir des données de terrain.

EPANET prend les valeurs mesurées à travers un document texte commémontre la figure suivante :



The screenshot shows a Notepad window with the following content:

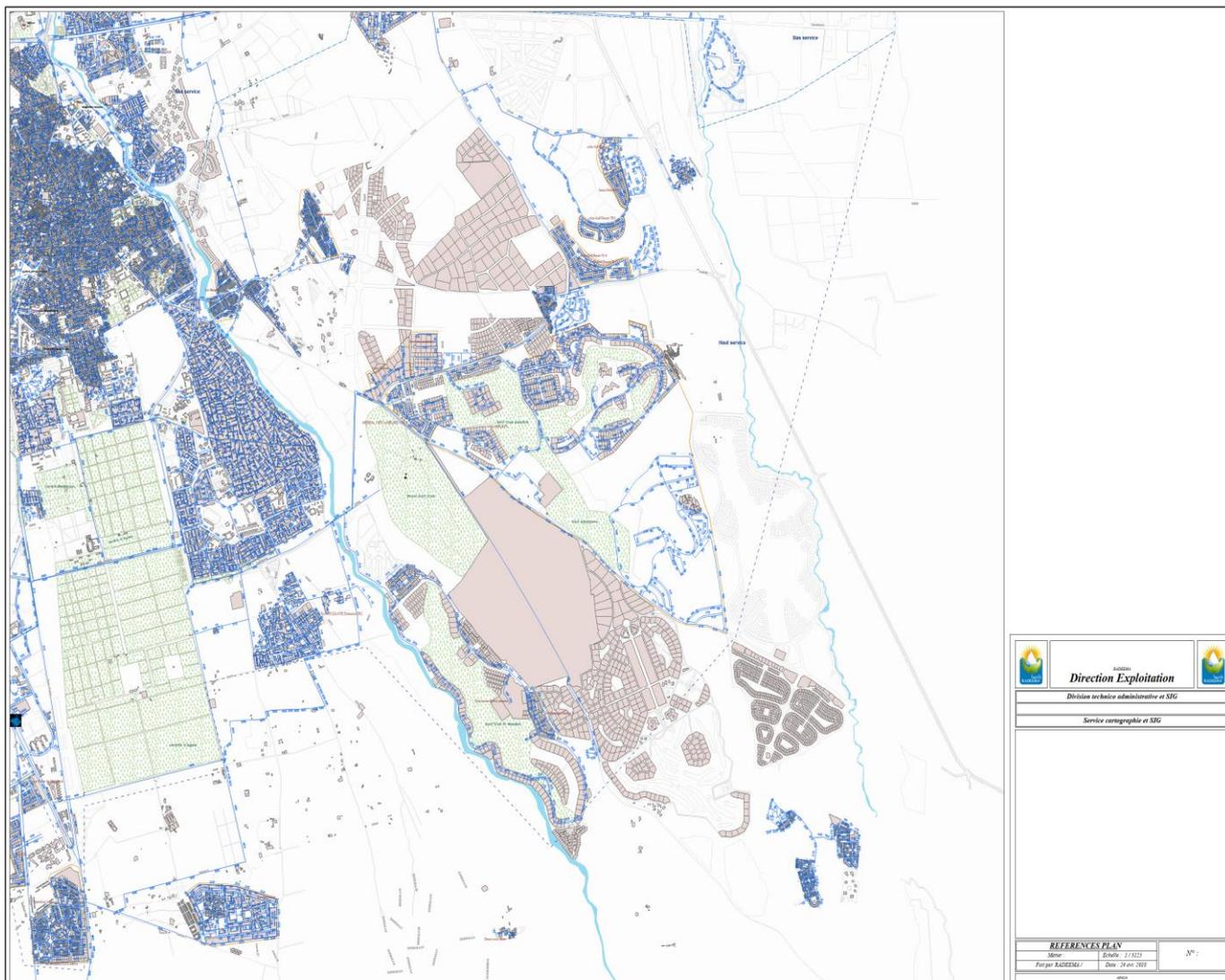
```
Fichier Edition Format Affichage ?
;Mesures de Débit BS
;Localisation Date Valeur
;-----|
86      00:00  16.66
        01:00  15.83
        02:00  15.83
        03:00  14.72
        04:00  14.16
        05:00  14.16
        06:00  20.27
        07:00  24.16
```

Localisation	Date	Valeur
86	00:00	16.66
	01:00	15.83
	02:00	15.83
	03:00	14.72
	04:00	14.16
	05:00	14.16
	06:00	20.27
	07:00	24.16

En cliquant sur le Menu Projet puis données du calage, ce dernier déclare les fichiers contenant les données du calage.

Le Menu Rapport contient les commandes pour visualiser les résultats de l'analyse.

ANNEXE 2 : Carte du réseau hydraulique (Service cartographie et SIG 2018) échelle : 1/3125



Bibliographie

1. **RADEEMA**. Historique de la RADEEMA . *www.radeema.ma*. [En ligne]
2. **A.Rossman, Lewis**. EPANET 2.0 Simulation Hydraulique et de Qualité pour les Réseaux d'Eau sous Pression. France : s.n., 01/09/2003. p. 13.
3. **J.CELERIER, J.FABY, G.LOISEAU, C.JUERY**. La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux. p. 60.
4. **S.GUILSOU**. Modélisation sur le logiciel Epanet du réseau d'eau potable de la commune d'urrugne (064) . Strasbourg : s.n., Juin 2007. p. 20.
5. **SNIMA**. Norme Marocaine NM 03.7.001. Qualité des eaux d'alimentation humaine. 2006. p. 3.
6. **SNIMA 2011**. Norme Marocaine NM 03.7.002. Contrôle et surveillance de l'eau dans les réseaux d'approvisionnement public. 2011. p. 3.
7. **J.CELERIER, J.FABY, G.LOISEAU, C.JUERY**. La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux. p. 9.
8. **J.CELERIER, J.FABY, G.LOISEAU, C.JUERY**. La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux. p. 21.
9. Atlas des populations et pays du monde. *www.populationdata.net*. [En ligne]
10. **RADEEMA**. Rapport de gestion 2016. 2016. p. 28.
11. **Zoungrana, Denis**. Cours d'approvisionnement en eau potable. Novembre 2003. p. 100.
12. **Zoungrana, Denis**. Cours d'approvisionnement en eau potable. Novembre 2003. p. 101.
13. **Zoungrana, Denis**. Cours d'approvisionnement en eau potable. Novembre 2003. p. 102.

