

Projet de Fin d'Études

**Licence Sciences et Techniques
Filière : Eau et Environnement**

SIMULATION (PAR EPANET) HYDRAULIQUE ET DE LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE DANS LE RESEAU DE DISTRIBUTION DANS LA ZONE AMELKIS (MARRAKECH)

Réalisé par : DOBARANG BOYATERE Lionel Blondin

Sous la direction de :

Ing. Ibtissam CHAHID

Pr. Nadia KHAMLI

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Brahim IGMOULLAN Professeur FST Marrakech

Nadia KHAMLI Professeur FST Marrakech

Dédicaces

À ma très chère Maman

Je te dédie ce projet de fin d'études, aucun mot ne peut décrire à quels points, j'exprime ma gratitude pour vous dédier ce mémoire. Tu es tout pour moi et tu es toujours là au bon moment quand j'ai besoin de vous. Mes mots ne peuvent jamais combler mes affections pour vous, merci pour la force, pour tes prières de tous les jours. Aucune dédicace ne peut exprimer ce que je ressens pour vous.

Pour votre amour dont vous m'avez généreusement entouré.

À l'ampleur des sacrifices et des souffrances que vous avez endurées pour pouvoir m'éduquer et pour pouvoir m'aider à franchir cette étape.

Ma très chère Maman,

Aucun mot ne saurait exprimer tout mon amour et toute ma gratitude pour vous.

Merci pour tes sacrifices le long de ces années. Merci pour ta présence rassurante même de loin.

Merci pour tout l'amour que tu procures à notre petite famille...

Puisse le Bon Dieu vous accorde une longue vie et bonne santé afin que je puisse vous garder à mes côtés le plus longtemps possible.

Je dédie ce travail à mon cher frère, ma sœur et à mon père, j'espère que tu es heureux de me voir de là où tu es Papa.

Merci à toute ma FAMILLE.

Remerciements

La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans la contribution de nombreuses personnes à qui j'exprime ma reconnaissance.

Premièrement, je tiens à exprimer ma gratitude envers le Bon DIEU pour le souffle de vie, courage et la force qu'il nous donne pour accomplir ce parcours, sans oublier mes parents qui sont toujours là pour me soutenir et également tous mes Professeurs de la Faculté des Sciences de Techniques de Marrakech, à tous les personnelles de la RADEEMA et particulièrement aux personnelles du Département de l'exploitation des Eaux de la RADEEMA.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Madame Directrice Générale et par Délégation, La Cheffe du Département Ressources Humaines Madame Karima REGRAGUI pour son accord pour ce stage au sein de la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Électricité de Marrakech (RADEEMA). Mes sincères remerciements vont à l'égard du Chef de Département d'Exploitation des Eaux Monsieur Driss KONDAH qui a facilité mon stage et à mis à ma disposition tous les documents qui me sont utiles pour ce projet et à Madame CHAHID IBTISSAM, Ingénieur au sein du département qui n'a pas hésité une seule seconde d'accepter de m'accompagner dans la réalisation de ce travail et qui m'a beaucoup aidé et soutenu par ses conseils, son attention et surtout qui est disponible à tout moment quand j'ai besoin de lui.

Je profite pour remercier ma famille, mes frères et sœurs ainsi que mes camarades de classe avec qui j'ai passé de bons et de mauvais moments tout au long de mon parcours. Mes vifs remerciements à tous le personnel et à tous les professeurs de la FSTG.

Je saisir cette opportunité pour remercier le Chef du Département de Sciences de la Terre au sein de l'Université Cadi Ayyad, Professeur BRAHIM IGMOULLAN et notre responsable de filière Monsieur JALAL MOUSTADRAF pour leurs soutiens durant toute l'année.

Je désire remercier de tout mon cœur, mon encadrant interne au sein du département de Sciences de la Terre, Professeur Nadia KHAMLI pour ses conseils et ses opinions pour améliorer le travail effectué et surtout pour sa disponibilité.

Mes remerciement vont au Professeur BRAHIM IGMOULLAN qui a accepté de siéger à mon jury et d'améliorer mon travail par ses remarques précieuses.

RESUME

Le but du travail c'est de faire une simulation hydraulique et de la qualité de l'eau potable dans les lignes de distributions de la Zone Amelkis (Marrakech). Cette simulation du réseau de distribution débute depuis le réservoir de stockage jusqu'à la distribution dans les différentes branches d'utilisation et consommation à la maison. Cette modélisation permet de détecter ou de prévoir des éventuelles détériorations des normes de l'eau destinée à la consommation ou à l'utilisation.

Le moyen utilisé pour la modélisation du réseau d'AEP du secteur Amelkis est le logiciel EPANET. Ce logiciel est largement utilisé pour analyser les réseaux de distribution d'eau potable car il donne le modèle le plus représentatif possible de la réalité. La simulation commence par la création de bases de données numériques, complétée 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.

Cette collecte de données a permis l'appréhension du fonctionnement intégral du réseau et a donné lieu à la création du modèle structurel à l'aide du logiciel de modélisation Epanet. Dans un deuxième temps, une campagne de mesures a permis de caler le modèle en vérifiant la correspondance des premiers résultats simulés avec la réalité. Le modèle ainsi calé peut éventuellement pointer différents problèmes liés notamment à la forte variation de pression, aux faibles vitesses ou encore aux temps de séjours relativement longs dans le réseau et d'anticiper ainsi des solutions d'aménagements pour y remédier.

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 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.

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la RADEEMA	14
Figure 2 : Organigramme du Département Exploitation Eau	15
Figure 3 : Carte de la région de Marrakech - Safi (siredd.environnement.gov.ma)	16
Figure 4 : Délimitation géographique du secteur (Image prise par le satellite 25/04/20.....	17
Figure 5 : Schéma géologique de Marrakech.....	18
Figure 6 : Diagramme Ombrothermique Marrakech (climats Maroc).....	19
Figure 7 : Ressource en eau de la ville de Marrakech (siredd.environnement.gov.ma)	22
Figure 8 : Photo du réservoir SIDI MOUSSA (Source Google Earth).....	23
Figure 9 : Carte satellitaire du réseau de distribution d'AEP (RADEEMA/2023)	24
Figure 10 : Vue d'ensemble du logiciel (Epanet 2 Fr).....	26
Figure 11 : Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau (Epanet 2 Fr)	28
Figure 12 : Zones de réactions à l'intérieur d'un tuyau (le réseau réacteur d'après LEVI – 1995)	34
Figure 13 : L'organigramme suivant récapitule les étapes de création du modèle	38
Figure 14 : Tracer du réseau direct sur Epanet	39
Figure 15 : Exemple de saisie des données des tuyaux	41
Figure 16 : Exemple de saisie des données des nœuds	49
Figure 17 : Courbe de modulation du débit d'entrée d'Amelkis sous EPANET	50
Figure 18 : Excusions de la simulation hydraulique sur EPANET sans erreur.	51
Figure 19 : Résultats de l'exécution de la simulation sur Epanet pour la zone Amelkis.	51
Figure 20 : Variation de la pression au niveau du nœud 12 sur une durée de 24 h.....	52
Figure 21 : Variation de la vitesse au niveau du tronçon 16 sur une durée de 24 heures	52
Figure 22 : fichier de calage de débit pour le tuyau 16	53
Figure 23 : Comparaison des valeurs de débit obtenues par simulation et celles mesurées pour le tuyau 16	54
Figure 24 : fichier de calage de pression pour le nœud 12 et 5.....	54
Figure 25 : Comparaison des valeurs de pression obtenues par simulation et celles mesurées pour le nœud 60, 23, 12, 5.	55
Figure 26 : Comparateur colorimétrique du chlore.....	56
Figure 27 : les différentes étapes de prélèvement sur le terrain.....	57
Figure 28 : Répartition des points de mesure du chlore sur le réseau étudié	57
Figure 29 : Comparaison des valeurs moyennes du chlore mesurées et simulées.	58
Figure 30 : Variations de la pression pour le nœud 102	59
Figure 31 : Variations du débit pour le tuyau 91	59
Figure 32 : Courbe de distribution de chlore.....	60

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Chiffres en Assainissement	13
Tableau 2 : Chiffres en Eau Potable	13
Tableau 3 : Chiffres en Électricité	13
Tableau 4 : Capacité du réservoir SIDI MOUSSA	23
Tableau 5 : Capacité du réservoir Route OURIKA	24
Tableau 6 : Formules de perte de charge totale pour toute la longueur de la canalisation en charge (la perte de charge est exprimée en m.c.e. et le débit en m3/s) (Epanet 2 Fr).....	30
Tableau 7 : Diamètres, longueurs et rugosités des tuyaux du réseau étudié.....	41
Tableau 8 : Rugosité saisie en fonction de la matière et le diamètre des conduites.....	41
Tableau 9 : Différents types de conduites- Caractéristiques, avantages et inconvénients	42
Tableau 10 : Diamètres et pressions disponibles	43
Tableau 11 : Altitudes en m de chaque nœud du modèle hydraulique.....	44
Tableau 12 : Consommation mensuelle de la demande de base	47
Tableau 13 : superficie partielle (m²) et les demandes de base (l/s) de la zone d'Amelkis	48
Tableau 14 : Mesures des concentrations du chlore au niveau des nœuds sélectionnés	57

LISTES DES ABREVIATIONS

RADEEMA : La Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Électricité de Marrakech

ONEP : Office National d'Eau Potable

AC : Amiante Ciment

PVC : Polychlorure de vinyle

PFE : Projet de Fin d'Études

DN : Diamètre nominal

PMS : Pression maximale de service

PRV : Résine de Verre

Table des matières

Dédicaces	2
Remerciements	3
RESUME	4
LISTES DES FIGURES	5
LISTES DES TABLEAUX	6
LISTES DES ABREVIATIONS	7
INTRODUCTION	11
Chapitre I : DONNEES GENERALE SUR LA ZONE D'ETUDE	13
I. PRESENTATION GENERALE DE LA RADEEMA	13
1. Objectifs et mission de la RADEEMA	13
2. Organigramme de la RADEEMA	14
3. Département Exploitation Eau	15
a. Présentation du Département	15
b. Organigramme du département exploitation eau	15
II. Données générales sur la ville de Marrakech	15
1. Emplacement géographique	16
2. Données géologique	17
3. Données climatiques	18
4. Données topographiques	19
Chapitre II : ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE MARRAKECH	20
1. Système d'Alimentation en Eau Potable de la ville de Marrakech	20
a. Eaux de Surfaces	20
❖ Les Barrages	21
b. Eaux Souterraines	21
III. RESEAU DE DISTRIBUTION DE L'EAU POTABLE DE LA VILLE DE MARRAKECH	22
1. Réservoirs du stockage	22
a. Réservoir SIDI MOUSSA	22
b. Réservoir Route OURIKA	23
IV. Réseau de distribution	24
V. CONCLUSION	24
Chapitre III : PRESENTATION DU LOGICIEL EPANET	25
I. INTRODUCTION	25
1. La simulation des réseaux d'AEP	26
a. Intérêts de la simulation dans les réseaux d'AEP	26

b. Modèle hydraulique.....	26
2. Modélisation sur EPANET.....	27
2-1. Paramètre physique	27
❖ Bâche	28
❖ Réservoirs	28
❖ Nœud de demande	29
❖ Tuyaux.....	29
❖ Calcul des pertes de charge	30
❖ La nature des conduites :	31
❖ Pompes	32
❖ Vannes	32
2-2. Composants non-physiques.....	32
❖ Courbes.....	32
❖ Courbes de modulation.....	33
❖ Commandes	33
3. Le Modèle de simulation de la qualité de l'eau.....	33
3-1. Modélisation du transport	33
A. Réactions modifiant la qualité de l'eau	34
B. Temps de séjour et dépistage des sources	34
4. Résultat de simulation	35
❖ Nature de simulation	35
4-1. Calage du modèle	35
a. Intérêts et objectifs du calage	36
Conclusion.....	36
Chapitre IV : SIMULATION DU MODELE DE LA QUALITE DU RESEAU D'EAU POTABLE DE LA ZONE AMELKIS.....	37
I. Présentation de la modélisation.....	37
❖ Principe.....	37
1. Fonctionnement hydraulique	38
II. Construction du modèle hydraulique.....	38
1. La méthodologie de travail.....	38
a. Méthodologie pour la construction du modèle	39
❖ Tracé direct sous Epanet.....	39
2. Les données nécessaires à saisir pour la modélisation du réseau	39
2-1. Diamètre nominal des conduites	39
2-2. Longueurs des conduites	39

2-3. Rugosité des conduites	41
❖ Caractéristiques des canalisations	41
a. Matériaux utilisés	41
b. Diamètres et pressions disponibles.....	42
Remarque :	43
❖ Choix du type de matériau.....	43
3. Altitudes des nœuds.....	43
3-1. Demande de base des nœuds.....	44
❖ Besoin à la distribution.....	44
A. Débit de dimensionnement.....	45
B. Vitesses limites.....	45
C. Pression au sol	45
D. Nature et diamètre des conduites.....	45
E. Calcul du réseau	46
F. Répartition spatiale des besoins.....	46
4. Collecte et préparation des données	46
❖ Les Nœuds.....	46
4-1. Calage des données d'entrées	49
4-2. La courbe de modulation.....	49
4-3. Diagnostic hydraulique du réseau	50
4-4. Exécution de la simulation.....	50
4-5. Diagnostic des pressions et débits.....	51
5. Le calage du modèle.....	52
A. Le fichier des calages	53
❖ Calage de débit	53
❖ Calage de pression.....	54
III. Modélisation du chlore.....	55
1. Temps de séjour.....	55
2. Campagne d'échantillonnage	55
3. Calage du chlore	58
4. Diagnostic du réseau	58
Conclusion.....	60
Conclusion générale	61
BIBLIOGRAPHIE	62
❖ Sites web consultés.....	62

INTRODUCTION

Contexte général du travail

L'eau couvre environ 70% de la surface du globe terrestre, la plus grande partie est sous forme d'eau salée dans les Océans. Au Maroc, qui est situé dans le domaine semi-aride, et comme partout dans le monde, le pays est confronté à des difficultés liées à la disponibilité de l'eau potable.

La gestion des ressources en eau constitue un enjeu majeur devant le stress hydrique que connaît la planète, du fait du réchauffement climatique et de l'accroissement démographique. En dépit de toutes situations, les gestionnaires des réseaux d'adduction d'eau potable sont sensés assurer un service satisfaisant sur les plans disponibilité et qualité de l'eau.

Confronté à cette situation, les chercheurs ont su développer au cours de ces dernières décennies des outils d'aide à l'optimisation de la gestion de l'eau. La modélisation hydraulique constitue un de ces outils permettant de gérer de manière efficace les réseaux d'eau potable et leurs évolutions. Les professionnels de la distribution de l'eau potable sont ainsi sensés maîtriser la modélisation hydraulique car c'est un véritable outil d'aide à la prise de décision. Néanmoins, il nécessite une mise à jour régulière en vue de suivre l'évolution rapide des réseaux d'eau potable, particulièrement en zone urbaine.

C'est dans cette optique de maîtrise d'un outil de modélisation que s'inscrit mon stage de fin d'études, réalisé au sein de la RADEEMA, et qui porte sur la simulation hydraulique du réseau d'AEP de la zone Amelkis à Marrakech par le moyen du logiciel EPANET.

Objectif du travail

Le présent travail a pour objectif de faire la simulation du comportement hydraulique dynamique et de la qualité de l'eau à long terme dans les réseaux sous pression dans la zone d'Amelkis à Marrakech. En effet la modélisation a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau dans les systèmes de distribution. Elle permet non seulement de simuler le fonctionnement d'un réseau dans sa configuration actuelle mais aussi de simuler des scénarios futurs et des situations de crise.

Démarche suivie

Le moyen utilisé pour cette simulation est EPANET, c'est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et de la qualité de l'eau. Largement utilisé dans le monde, il permet d'aboutir à une meilleure gestion du réseau et de la qualité de l'eau distribuée dans les réseaux.

Pour la réalisation de cette modélisation, la présente étude s'est articulée sur les principaux axes suivants :

- Tout d'abord, la collecte de données et les vérifications effectuées sur le terrain afin de maîtriser le fonctionnement global du réseau;
- Étudier le système d'alimentation et le réseau de distribution d'eau potable de la ville de Marrakech et de la zone Amelkis;

- La numérisation du réseau;
- Ensuite, la prise en main du logiciel EPANET et la création du modèle qui correspond au réseau d'étude afin de reproduire les données du réseau réel sur le modèle construit;
- La vérification des données saisies;
- La simulation et 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 des données simulées par le logiciel Epanet et celles mesurées sur le terrain par le calcul de la pression, du débit et de la concentration du chlore;
- Puis le calage du modèle en s'appuyant sur les résultats de la campagne de mesures de façon à correspondre les éléments collectés à la réalité;
- Analyse de résultat.

Une fois ces étapes accomplies, le réseau peut être diagnostiqué afin de déceler tout éventuel dysfonctionnement pour lequel des aménagements ultérieurs pourront être envisagés afin d'y remédier.

Présentation du mémoire

Ce mémoire comporte 4 parties. Il débute par une introduction. Le premier chapitre est consacré aux données générales sur la zone d'étude, le deuxième chapitre traite l'alimentation en eau de la ville de Marrakech. La présentation du logiciel Epanet et son mode d'utilisation sont présentés en détail dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation du modèle hydraulique et le modèle de qualité de la zone d'Amelkis. Les conclusions tirées de cette étude sont présentées à la fin du mémoire.

Chapitre I : DONNEES GENERALE SUR LA ZONE D'ETUDE

I. PRESENTATION GENERALE DE LA RADEEMA

La Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Électricité de Marrakech (RADEEMA) est un organisme qui assure la distribution de l'eau potable, de l'électricité et du service d'assainissement liquide dans la ville de Marrakech sur un territoire vaste qui a plus de 24 000 ha et une population plus de 1 398 015 d'habitants. C'est une Régie communale territoriale qui est à pour mission de service public à caractère industriel et commercial, caractérisée par les principes de continuité de services, d'adaptabilité aux évolutions technologiques, économiques et sociales.

La Régie est administrée par un conseil d'Administration présidé par le Wali de Marrakech et un comité de Direction. L'ensemble des services de la RADEEMA sont gérées par un Directeur Général.

Le conseil d'administration est composé des élus et des représentants des Ministères de l'intérieur et de l'Économie et Finances.

1. Objectifs et mission de la RADEEMA

La RADEEMA assure la distribution de l'eau potable et de l'électricité ainsi que la gestion du service public d'assainissement liquide au sein du périmètre qui couvre leurs trois (3) actions.

Populations	1 398 015
Abonnés domestiques	313 610

Tableau 1 : Chiffres en Assainissement

Populations	1 398 015
Abonnés domestiques	313 610

Tableau 2 : Chiffres en Eau Potable

Populations	1 398 015
Abonnés domestiques	277 998

Tableau 3 : Chiffres en Électricité

La RADEEMA assure les missions suivantes :

- La distribution d'eau potable et d'énergie électrique conformément aux normes.
- Le service d'assainissement liquide conformément aux normes
- Le traitement des eaux usées collectées notamment dans l'objectif de permettre une réutilisation des eaux usées aux fins d'irrigation des espaces verts.
- L'exploitation et entretien des réseaux, des équipements des ouvrages.
- La réalisation des études et des travaux d'infrastructure, de renouvellement et d'extension.

- La réalisation des branchements et des raccordements.
- L'organisation et la gestion des services publics d'eau, d'électricité et d'assainissement sur les plans technique, administratif, comptable et commercial.

2. Organigramme de la RADEEMA

Comme tous les grands organismes, la RADEEMA dispose d'un organigramme (Fig. 1) et d'un manuel qui regroupe tous ses activités autour de quatre (4) Départements et quatre (4) Directions. Le but de l'organigramme de la Régie est de faciliter le contrôle, satisfaire et respecter les règlements.

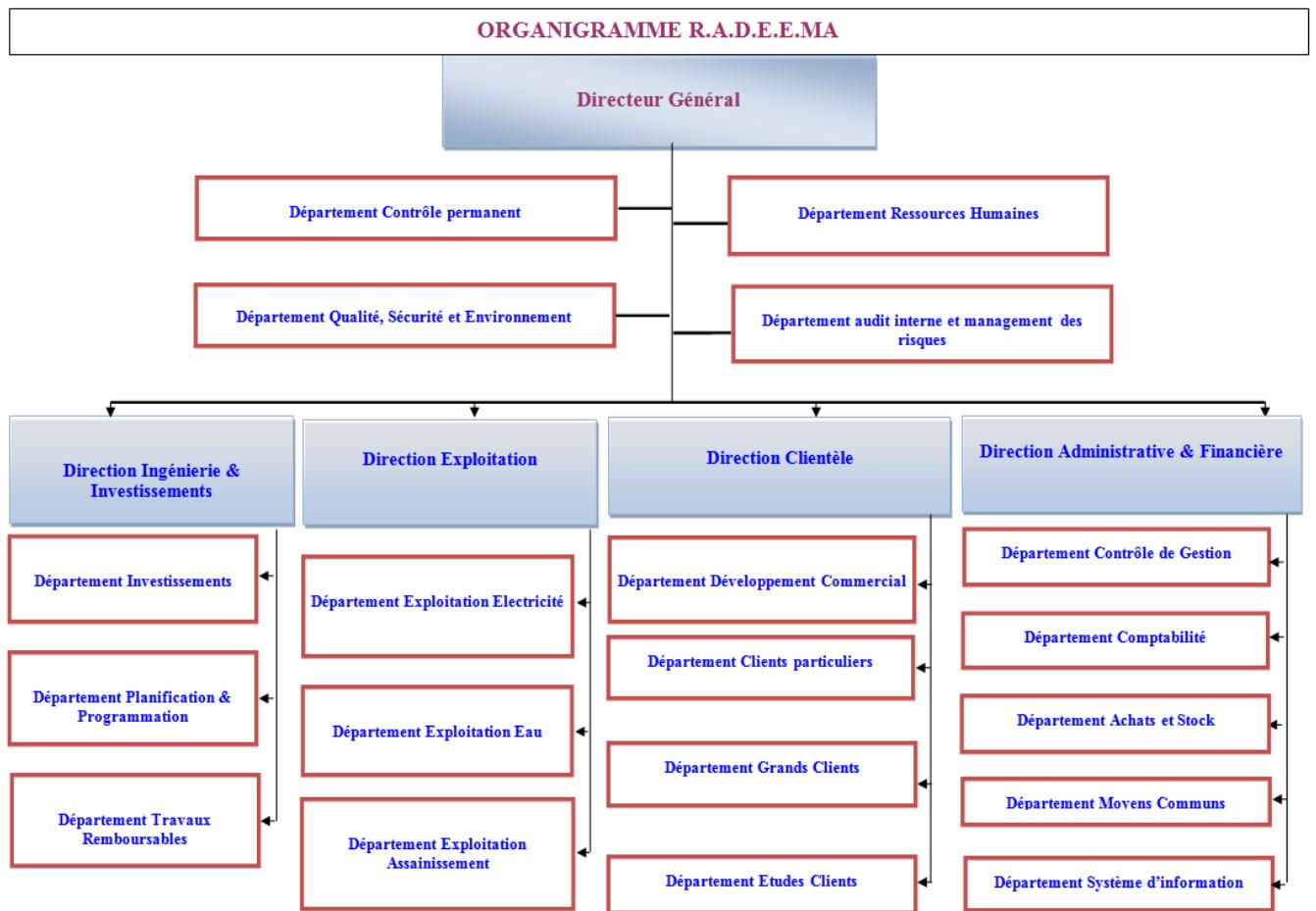


Figure 1 : Organigramme de la RADEEMA

3. Département Exploitation Eau

a. Présentation du Département

La mission du département des exploitations des eaux de la RADEEMA c'est d'assurer la production, la distribution de l'eau potable, contrôler la quantité et la qualité de l'eau distribuer à la population de la ville de Marrakech. D'autres rôles du département exploitation eau potable est d'exploiter le réseau d'eau potable dans le respect du niveau de qualité de service, réparer les fuites sur branchement et sur conduites dans les bons délais, assurer une bonne qualité de l'eau distribué et assurer une qualité de service en termes de pression d'assurer la pérennité et la bonne gestion du patrimoine et d'accompagner la mise en place des projets et des outils d'exploitation. Le département est divisé en deux divisions :

- Division Conduites Réseau
- Division Mesures et Amélioration du Rendement

Les ressources en eau potable mobilisées pour l'AEP de Marrakech sont constituées d'eaux superficielles et de ressources souterraines récupérer et au niveau des différents barrages.

b. Organigramme du département exploitation eau

Cet organigramme (Fig. 2) montre les différentes organisations du département sur son fonctionnement au sein du département.

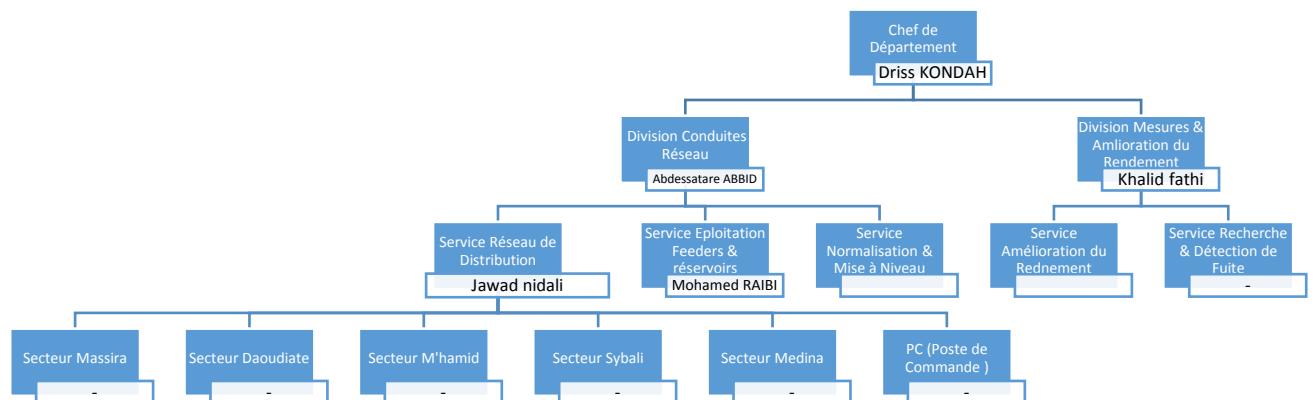


Figure 2 : Organigramme du Département Exploitation Eau

II. Données générales sur la ville de Marrakech

Marrakech est une ville située dans le centre-sud du Maroc au pied des montagnes de l'Atlas. Il est le chef-lieu de la plaine du Haouz, et de loin sa principale agglomération.

Marrakech et son aire urbaine comptent en 2020 un peu plus d'un million d'habitants. Par sa population, la ville est la troisième agglomération du pays.

Marrakech abrite une vaste vieille médina de 900 ans qui s'étend sur une superficie de 600 hectares. Elle est la plus peuplée d'Afrique du nord, et classée par l'UNESCO au patrimoine mondial de l'humanité. La superficie de la ville de Marrakech est de 230 km².

1. Emplacement géographique

Marrakech s'étend sur une superficie de 2625 Km². Il est limité au Nord par la Province d'El Kelaa des sgharna et la province de R'hamna, au Sud par la Province d'Al Haouz, à l'Est par la Province de R'hamna et à l'Ouest par la Province de Chichaoua et la province de Youssoufia. L'agglomération de Marrakech se situe dans la plaine de Haouz central entouré par le massif du Haut Atlas au sud et celui des Jbilets au Nord et qui s'étend sur une superficie de 230km². Le site de Marrakech est une plaine uniforme qui s'incline doucement selon une pente orientée du Sud-Est au Nord-Ouest depuis 500 NGM (zone touristique de la route d'Ourika) jusqu'à la cote 380 NGM (oued Tensift). Les seuls reliefs sont constitués par les collines Guéliz et Koudiat Al Abid. (Rapport CID-EMM, 2016).

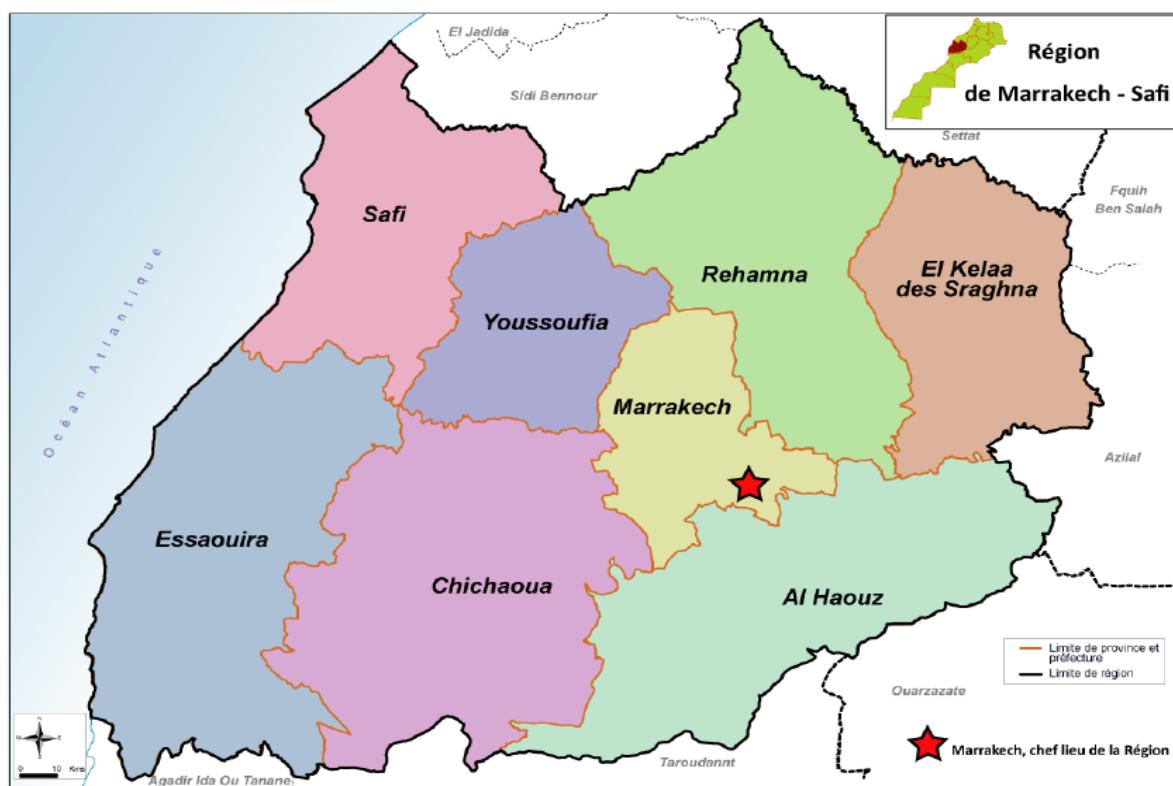


Figure 3 : Carte de la région de Marrakech - Safi (siredd.environnement.gov.ma)

La zone Amelkis (notre secteur d'étude) est située à environ 8 à 12 km du centre-ville de Marrakech. Elle se trouve plus précisément à proximité de l'Atlas Golf Ressort, au sud de la route menant à la ville de Tahanaout. C'est une zone réputée par son immobilier de luxe et ses terrains de golf (Fig4).

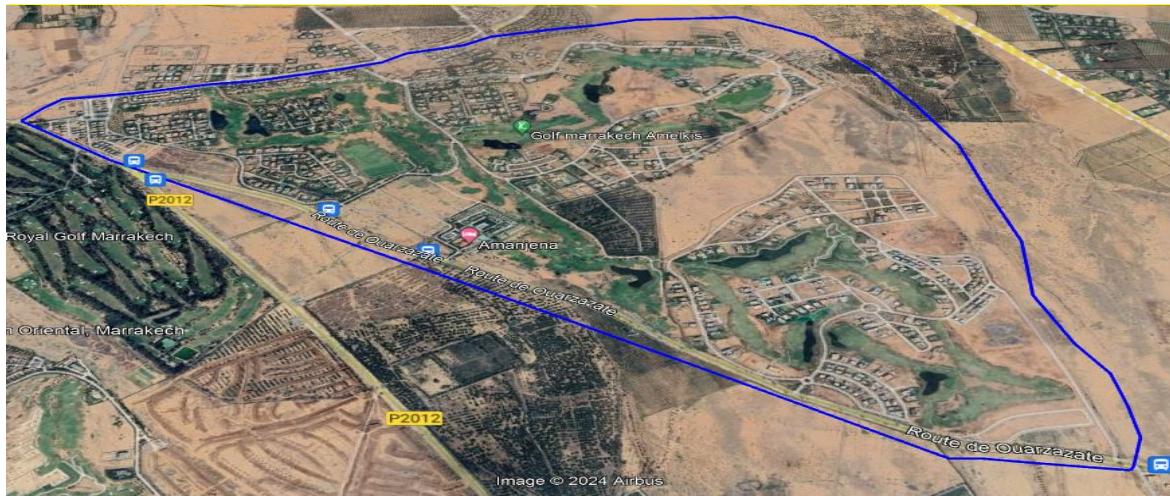


Figure 4 : Délimitation géographique du secteur (Image prise par le satellite 25/04/20)

2. Données géologique

La plaine de Haouz s'étale entre les chaines du Haut Atlas au Sud et les Jbilets au Nord. Elle s'est formée sur un socle paléozoïque essentiellement schisteux et imperméable. Elle est recouverte d'alluvions graveleuses du Quaternaire. Ce dépôt résulte de l'érosion des roches de l'Atlas par des réseaux hydrographiques au régime torrentiel. Ces dépôts insérés dans une matrice souvent argileuse sont extrêmement hétérogènes. Les collines calcaires de Jbel Guéliz et Koudiat Al Abid sont les seuls reliefs de cette plaine issus de l'érosion du socle paléozoïque. (CID-EMM, 2016).

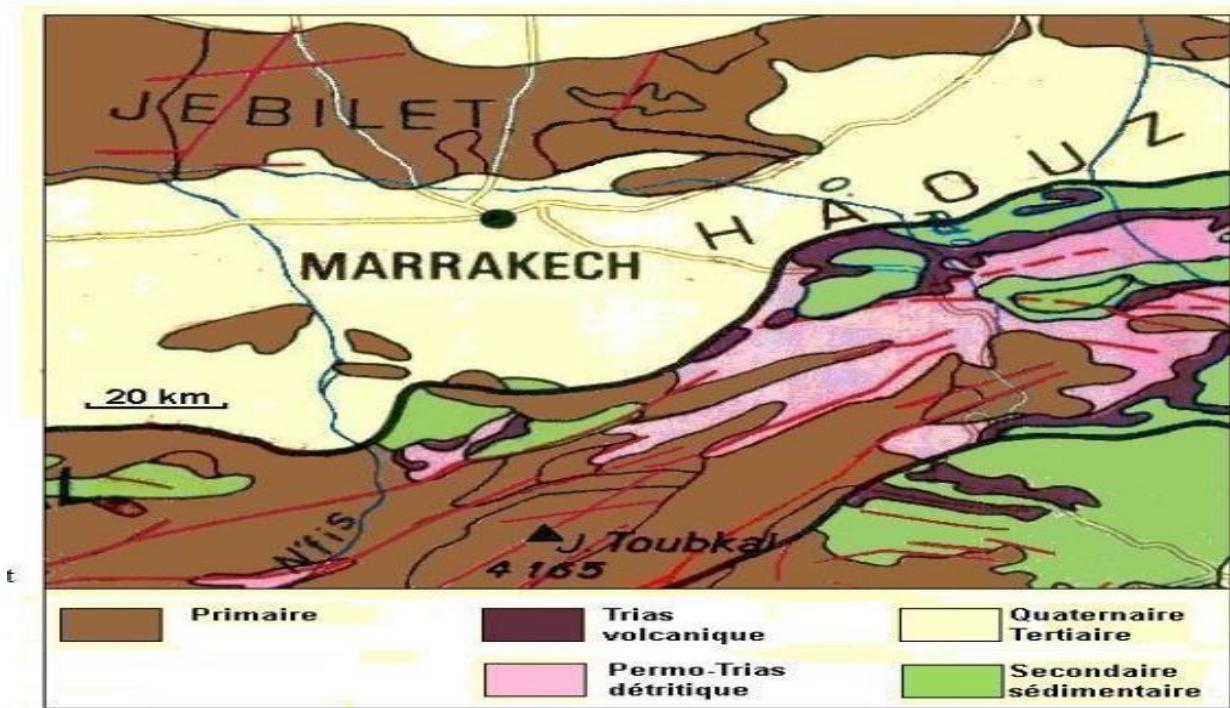


Figure 5 : Schéma géologique de Marrakech

3. Données climatiques

La région de Marrakech bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et relativement pluvieux.

Étés chauds : Pendant les mois d'été, de juin à août, les températures à Marrakech, y compris dans la zone d'Amelkis, peuvent atteindre des niveaux élevés, souvent dépassant les 30°C voire 40°C pendant les mois les plus chauds. Les journées sont généralement ensoleillées et chaudes, avec peu de précipitations.

Hivers doux : Les hivers à Marrakech sont doux par rapport à de nombreuses autres régions, avec des températures diurnes qui restent généralement entre 15°C et 20°C pendant la journée. Les nuits peuvent être fraîches, surtout en janvier, le mois le plus froid, où les températures peuvent descendre jusqu'à 5°C. Les précipitations sont plus fréquentes pendant cette période, bien que généralement modérées.

Printemps et automne agréables : Le printemps (mars à mai) et l'automne (septembre à novembre) offrent des températures agréables à Marrakech, avec des journées ensoleillées et des températures modérées, idéales pour explorer la région et profiter des activités de plein air.

Ensoleillement abondant : Marrakech bénéficie d'un ensoleillement abondant tout au long de l'année, avec plus de 300 jours ensoleillés par an.

Le climat d'Amelkis à Marrakech est caractérisé par des étés chauds et secs, des hivers doux et des périodes de transition printanières et automnales agréables, avec un ensoleillement abondant tout au long de l'année.

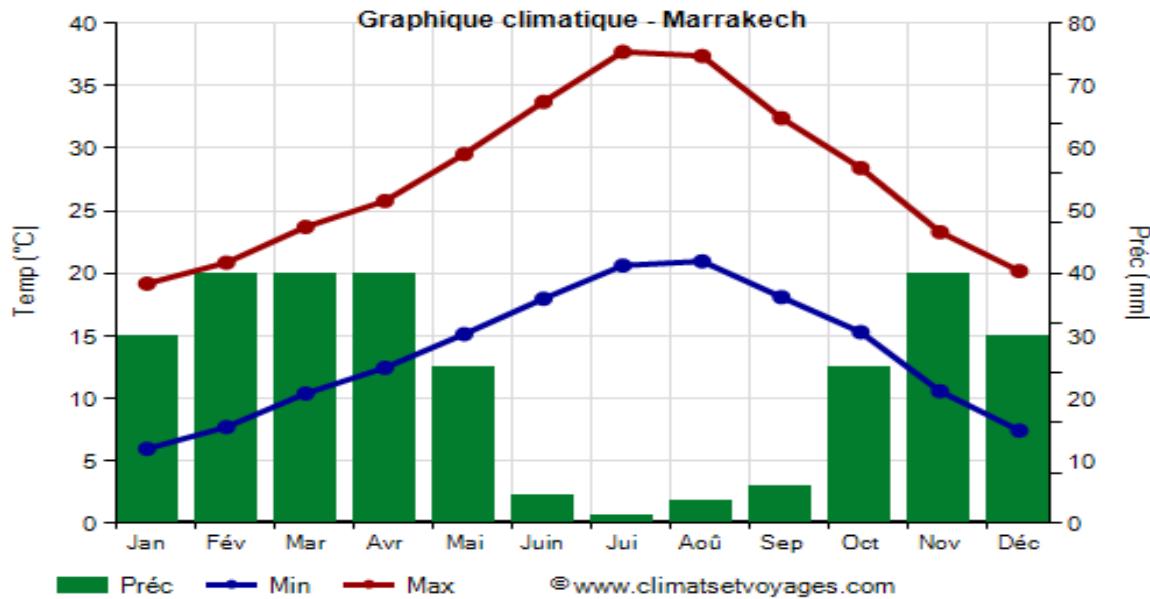


Figure 6 : Diagramme Ombrathermique Marrakech (climats Maroc)

4. Données topographiques

La zone d'Amelkis à Marrakech est caractérisée par une topographie variée, typique de la région. La région présente généralement un relief légèrement vallonné, avec des plaines et des petites collines éparpillées. La topographie de la région peut également inclure des formations rocheuses caractéristiques, des oliveraies et des jardins aménagés dans les zones résidentielles. Certains quartiers peuvent être légèrement inclinés, tandis que d'autres peuvent être plus plats, en fonction de la configuration du terrain et des aménagements urbains. Les altitudes varient entre 472 m et 497m d'altitudes.

Chapitre II : ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE MARRAKECH

1. Système d'Alimentation en Eau Potable de la ville de Marrakech

Les ressources en eau potable mobilisées pour l'AEP de Marrakech sont constituées d'eaux superficielles et de ressources souterraines respectivement de 99% et 1%. Ces eaux sont puisées au niveau du (Fig. 7) :

- Barrage sidi Driss qui est lui-même alimenté par le barrage Hassan 1^{er}
- Barrage Lalla Takerkouste comme adduction de secours
- Barrage al Massira (future adduction)

L'eau est ensuite véhiculée par le canal de Rocade (capacité de transit 12 m³/s) qui approvisionne en eau brute la station de traitement de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), située à Sidi Moussa, qui a un débit de produit de 2300 l/s.

a. Eaux de Surfaces

Le réseau hydrographique de la région comprend un grand bassin versant, celui du Tensift, et une partie du bassin versant d'Oum Er Rbia, formés par plusieurs sous-bassins versants et drainant le versant nord du Haut Atlas, avec des apports d'origine pluvionivale. Les eaux des Oueds, dont le volume est évalué à 23,64 m³/s, sont captées à la sortie de la montagne par des séguias et ne coulent que rarement dans les plaines lors des crues. Les plus importants affluents de l'Oued Tensift (Fig. 7) sont constitués des Oueds N'Fis, R'dat, Zat, Ourika, Rhéraya et Assif El Mal.

Le réseau hydrographique de la Province d'Essaouira se réduit à quelques oueds dont le plus important est l'Oued Ksob. Ce dernier prend sa source au niveau du Haut Atlas occidental et constitue le principal collecteur d'eau de la province, son débit moyen est estimé à 1,44 m³/s. La partie orientale de la Région, relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin hydraulique d'Oum Er Rbia, est drainée par le système hydrographique des Oueds Tassaout – Lakhdar (Fig. 7). Leur régime est plus régulier que ceux des affluents de l'Oued Tensift. Ils présentent un débit moyen annuel respectif de 11,7 et 16,1 m³/s.

La plaine centrale reçoit un certain nombre de petits Oueds irréguliers qui descendent des collines de Rehamna et Youssoufia et qui convergent vers la région de Sidi Bennour (oued Aouja, M'tal, Farhi, Bouchane). Les ressources en eau de surface sont irrégulières et inégalement réparties. Les montagnes constituent le château d'eau des écoulements de surface. Les apports moyens annuels sont évalués à près de 824,5 Mm³. Ces apports varient entre un minimum de 116 Mm³ et un maximum de l'ordre de 2 677 Mm³. En outre, le bassin de Tensift bénéficie d'un transfert de l'ordre de 300 Mm³ à partir du bassin de l'Oum Er Rbia destinés à l'alimentation en eau de la ville de Marrakech et à l'irrigation dans le Haouz central.

Les montagnes constituent le château d'eau des écoulements de surface. Les apports moyens annuels sont évalués à près de 824,5 Mm³.

- Oued Tensift avec ses affluents : Oued N'Fis, Ghmat, Minzzat, et Assif El Mha. Le débit moyen est évalué à 23,64 m³/s captées à la sortie de la montagne par des séguias.
- Oued Oum Er-Rabiaâ : un des principaux cours d'eau à débit moyen interannuel de 117 m³/s.
- Oued Ksob : principal collecteur des eaux de la province d'Essaouira avec un débit moyen estimé à 1,44 m³/s.
- Oueds Tassaout et Lakhdar : drainant la partie orientale de la Région, relevant de la zone d'action de l'ABH d'Oum Er Rbia avec un débit moyen annuel respectif de 11,7 et 16,1 m³/s.

❖ Les Barrages

La région compte 9 grands barrages opérationnels (Fig. 7) d'une capacité totale de stockage de 380 Mm³. 2 grands autres barrages sont en cours de construction, il s'agit :

- Du barrage BOULOUANE localisé à Chichaoua et qui aura une capacité de stockage de 66 Mm³
- Du barrage AIT ZIAT localisé à Al Haouz avec une capacité de stockage de 171 Mm³

b. Eaux Souterraines

Les réservoirs d'eau souterraine dans lesquels s'accumulent ou transitent les eaux pluviales infiltrées sont d'extension inégale. Les plus importants sont (Fig. 7):

- La nappe du Haouz qui s'étend d'Est en Ouest entre les deux reliefs de l'Atlas et des Jbilets sur une superficie d'environ 6 000 Km².
- La nappe du Mejjate qui s'étend sur une superficie de 1 000 Km² environ entre le Tensift au nord et le Haut Atlas au sud.
- La nappe de la Bahira qui s'insère entre les massifs des Jbilet au sud et les plateaux des Rehemna et des Gantour au nord et s'étend sur une superficie d'environ 5 000 Km².
- La nappe de la plaine de Abda: Les aquifère du Jurassique (2 000 Km²) et des calcaires du Dridrat (1 000 Km²) sont alimentés essentiellement par les infiltrations des eaux de pluie sur les affleurements et au niveau des secteurs recouverts directement par le Plio-quaternaire, ainsi que par le drainage des formations supérieures. Des infiltrations importantes dans le Jurassique se produisent également au niveau de la daya Jemaa Shaim
- La nappe de Meskala : s'étendant sur une superficie de l'ordre de 1600 km².

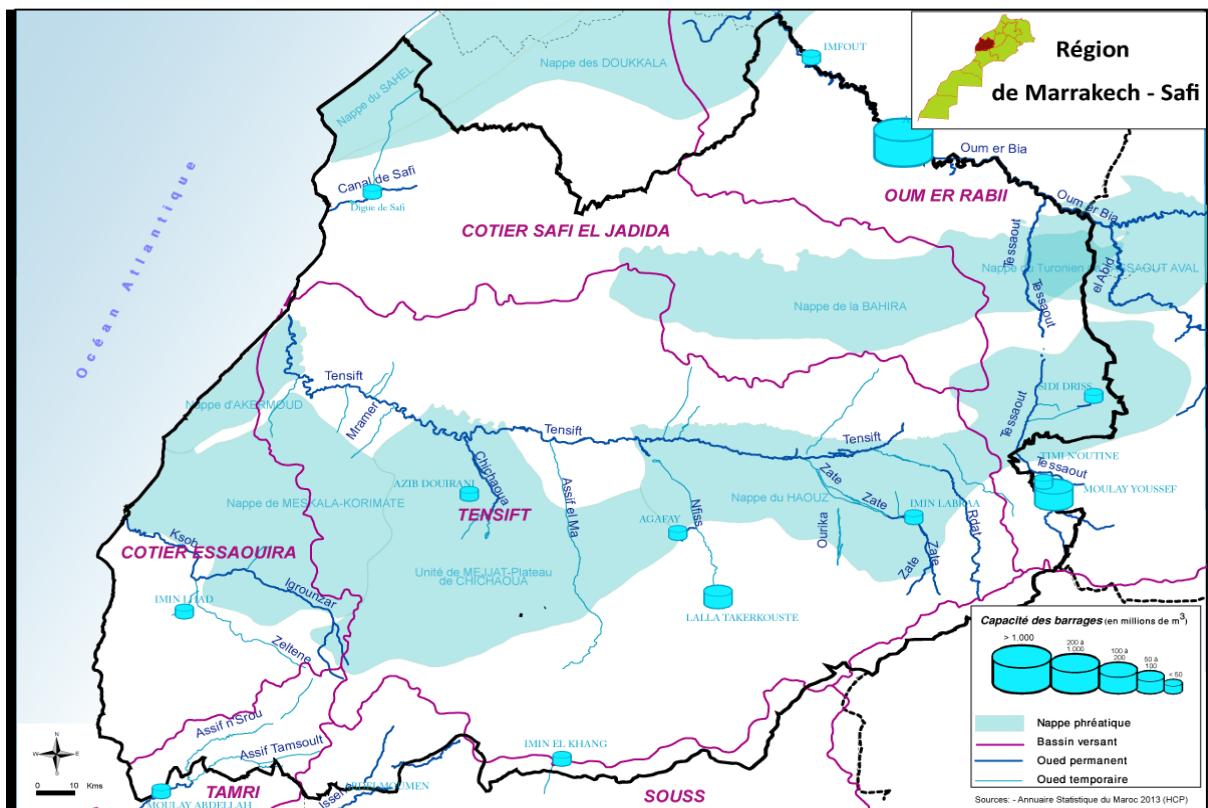


Figure 7 : Ressource en eau de la ville de Marrakech (siredd.environnement.gov.ma)

III. RESEAU DE DISTRIBUTION DE L'EAU POTABLE DE LA VILLE DE MARRAKECH

1. Réservoirs du stockage

Une fois traiter l'eau par l'ONEP, la RADEEMA se charge du stockage des eaux avant d'envoyer à la population de Marrakech pour la consommation. La Régie dispose de deux réservoirs de stockages en marche qui sont : le réservoir de SIDI MOUSSA et celui du Complexe Hydraulique Route de OURIKA.

a. Réservoir SIDI MOUSSA

Le réservoir SIDI MOUSSA dispose de deux réservoirs de stockage : un souterrain et un réservoir de stockage surélevé.

- Réservoir Sidi Moussa (Étage Haut Service) : avec une capacité de stockage de 50000m³. Ce réservoir assure l'AEP de la partie sud de la ville de Marrakech (Mhamid, Syba, Medina-Sud...etc.) Il est composé de deux cuves permettant de stocker chacune 12500 m³ et une troisième cuve d'une capacité de 25000 m³.

Deux conduites se trouvent à la sortie du réservoir, ayant chacune un diamètre de 800mm.

On retrouve également dans ce réservoir un château d'eau (Étage Très Haut Service) d'une capacité de stockage de 500m³ qui alimente l'agglomération avoisinant le réservoir.

Capacité	50 000 m ³
Capacité du réservoir surélevé	500 m ³

Tableau 4 : Capacité du réservoir SIDI MOUSSA



Figure 8 : Photo du réservoir SIDI MOUSSA (Source Google Earth)

b. Réservoir Route OURIKA

Le réservoir du complexe hydraulique Route OURIKA est le réservoir du stockage primaire à de la ville de Marrakech et constitué de deux réservoirs souterrains.

- Réservoir Route de l'Ourika (Étage Bas Service). Avec une capacité de stockage de 85000 m³, ce réservoir alimente en eau potable la partie nord de la ville de Marrakech (Daoudiate, Guéliz, Médina-Nord...etc.).

Il comprend :

- Un premier réservoir : composé lui-même de 3 cuves permettant de stocker chacune 10000 m³.
- Un deuxième réservoir : composé de 7 cuves, permettant de stocker un volume total de 55000 m³.

À la sortie du réservoir, on trouve deux conduites de diamètres 1200 mm et 800 mm. Il y a également une troisième conduite de diamètre 800 mm mais n'est pas encore mise en service.

Capacité	55 000 m ³
Capacité	30 000 m ³

Tableau 5 : Capacité du réservoir Route OURIKA

IV. Réseau de distribution

La RADEEMA dispose d'un réseau de distribution sur une étendue vaste avec une plus de 3 000 km pour la distribution en eau potable de la ville de Marrakech. L'écoulement se fait de l'amont vers l'aval soit par gravitaire ou sous pression.

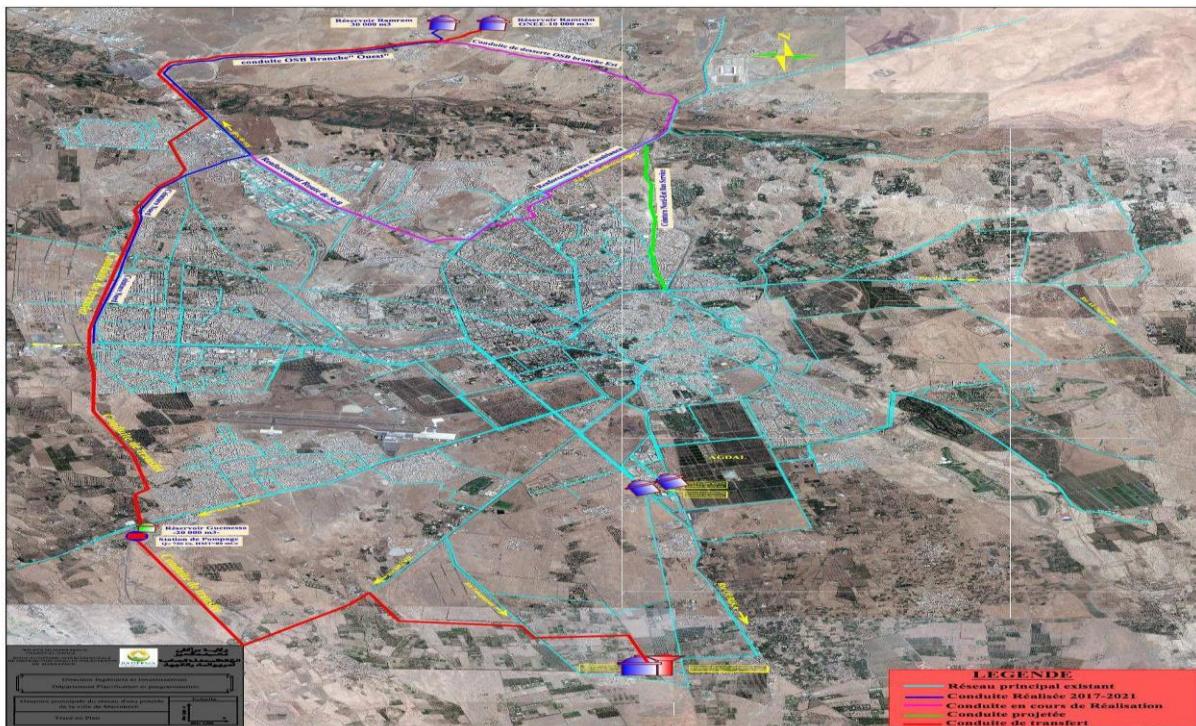


Figure 9 : Carte satellitaire du réseau de distribution d'AEP (RADEEMA/2023)

V. 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. Compte tenu de la période de stage limitée et de la vaste étendue du territoire de la ville de Marrakech, avec un réseau de d'AEP de plus de 3300 km, notre étude de simulation avec le logiciel EPANET se fera sur la seule zone Amelkis. Ce pour avoir un modèle théorique de la simulation de la qualité de l'eau qui débute dans le réservoir du stockage avec une distance bien définie jusqu'à la population et confronter à un modèle pratique pour que l'eau ne se détériore pas au cours de la distance et ne perd pas sa qualité destinée à l'utilisation ou à la consommation de la population.

Chapitre III : PRESENTATION DU LOGICIEL EPANET

I. INTRODUCTION

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau sur de longues durées dans les réseaux sous pression (conduites). Un réseau est un ensemble de tuyaux, nœuds (jonctions de tuyau), pompes, vannes, bâches et réservoirs. EPANET calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs, et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau, au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes. Le logiciel est également capable de calculer les temps de séjour et de suivre l'origine de l'eau.

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une étude bibliographique sur le sujet abordé dans le cadre du présent stage. L'objectif de cette étude est d'expliquer le principe de la modélisation hydraulique et son utilité dans la gestion des réseaux d'alimentation en eau potable. Un intérêt particulier a été donné au logiciel Epanet qui représente l'élément clé de cette modélisation et l'outil indispensable à sa mise en œuvre. L'analyse documentaire effectuée porte également sur l'ensemble des composantes d'un système de distribution.

EPANET a pour objectif une meilleure compréhension de l'écoulement et de l'usage de l'eau dans les systèmes de distribution. Il peut être utilisé pour différents types d'application dans l'analyse des systèmes de distribution :

- Définition d'un programme de prélèvement d'échantillons.
- Calage d'un modèle hydraulique.
- Simulation du chlore résiduel.

EPANET offre une aide à la recherche de stratégies alternatives pour gérer le réseau, comme par exemple:

- Utilisation en alternance des différentes ressources du système,
- Modifier le régime de pompage ou de marnage des réservoirs,
- Préciser l'usage des stations de rechloration (ou autres retraitements) en réseau,
- Planifier l'entretien et le remplacement de certaines canalisations.

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.

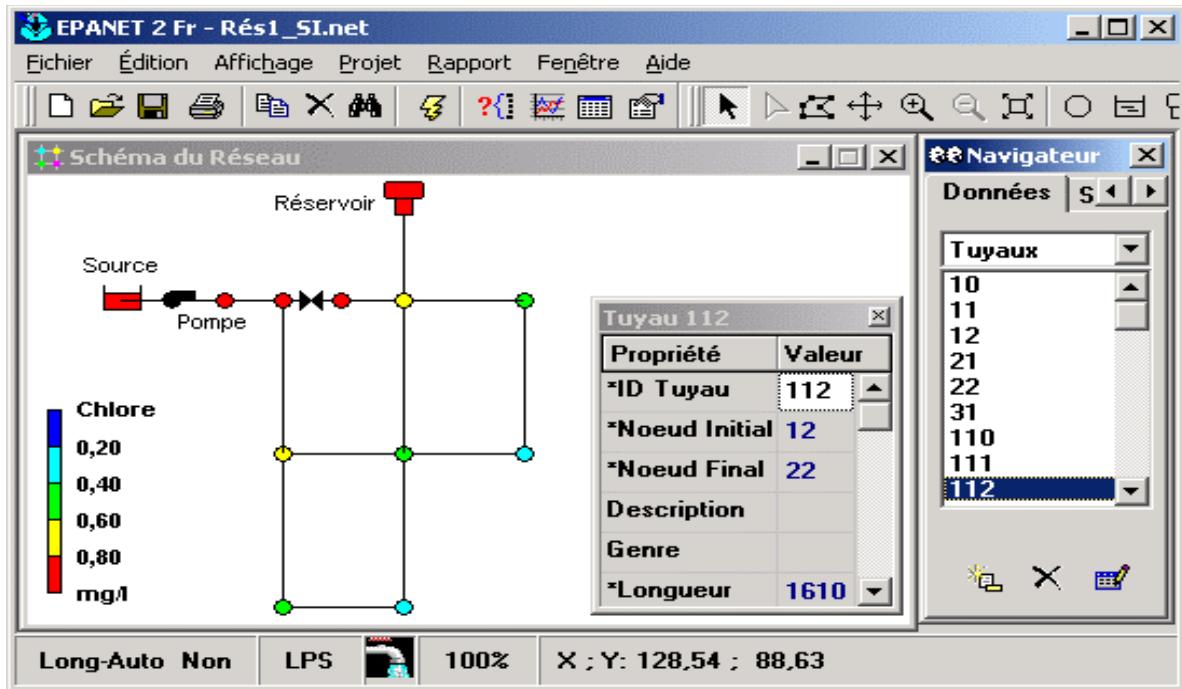


Figure 10 : Vue d'ensemble du logiciel (Epanet 2 Fr)

1. La simulation des réseaux d'AEP

La simulation c'est l'établissement d'un modèle mathématique ou physique destiné à étudier ou à tester un système, un phénomène ou un appareil. Le modèle prend dans la majorité des cas la forme d'une série d'hypothèse concernant le fonctionnement du système et qui sont exprimé à l'aide de relation mathématique, logique ou symbolique entre les entités.

a. Intérêts de la simulation dans les réseaux d'AEP

La simulation numérique est une étape fondamentale dans la conception des bases de données utiles pour la gestion du réseau d'eau potable. Elle permet de reproduire le monde réel avec un certain degré de fidélité dépendamment de sa complexité. Dans le domaine des réseaux de distribution d'eau potable, les modèles hydrauliques accordent un rôle fondamental à la complexité topologique, à l'expansion incessante de ces réseaux et à leur comportement dynamique. La simulation hydraulique permet de déterminer les caractéristiques d'un réseau telles que la pression en chaque point de celui-ci, le sens d'écoulement, le débit aux points de fonctionnement de l'ouvrage (réservoir, pompe, régulateur, etc.).

b. Modèle hydraulique

Le modèle hydraulique se base sur les paramètres de fonctionnement d'un réseau, en particulier le débit, le sens d'écoulement, la perte de charge dans les canalisations ainsi que la pression en chaque point. Les logiciels permettent de modéliser tous les éléments d'un réseau : réservoirs, régulateurs, pompes, etc. La représentativité d'un modèle dépend de la qualité des informations qui y sont intégrées. La phase préalable de collecte des données est donc essentielle. La réalisation d'une campagne complète de mesures sur le terrain permet le calage du modèle et sa validation. De nos jours, les outils de simulation sont devenus incontournables à la gestion des

réseaux d'eau potable, de plus en plus. Les gestionnaires ont à leur disposition une large gamme de modèles pour mieux gérer, concevoir, suivre dans le temps, l'état du réseau et la qualité de l'eau qui transite dans ce dernier et de prévoir des réparations.

Le modèle hydraulique assume un rôle fondamental, permet de connaître le fonctionnement hydraulique du réseau sur les différents horizons actuels et futurs et aussi d'estimer les besoins en renforcement et en extension du réseau.

Avant de construire ce modèle, il est nécessaire de rassembler une énorme quantité de données sur le réseau. Il y a plusieurs façons de rassembler ces données et les sources pour les obtenir varient fréquemment entre organisations responsables de ces réseaux. De plus, chaque organisation développe une stratégie propriétaire pour la structuration de ces informations ce qui oblige à un traitement différencié pour chaque cas.

- Carte avec les informations sur les conduites, connectivité, matériel, diamètre, l'emplacement d'autres éléments comme les réservoirs, stations de pompages et vannes.
- Carte topographique avec les courbes d'altitude ou disponibles sous la forme de modèle numérique d'élévation.
- Registre de données de gestion opérationnelle, comme par exemple, les débits ou taux de production des stations de traitement ou de pompage, l'information volumétrique des consommations des abonnés ou l'information des niveaux des réservoirs.
- Les informations de consommation volumétrique ou de facturation.

2. Modélisation sur EPANET

La modélisation des réseaux de distribution d'eau potable est devenue facile à l'aide du logiciel EPANET qui donne une bonne estimation des débits, des pressions d'eau dans les conduites, sans oublier son rôle important dans la simulation de la qualité du réseau de l'eau potable. Dans notre cas on parle de la qualité du réseau de l'eau potable ou la dégradation de la qualité du réseau de l'eau potable dans le réseau étudié.

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
- Saisir les propriétés des éléments du réseau
- Décrire le fonctionnement système
- Sélectionner un ensemble d'options de simulation
- Lancer une simulation hydraulique
- Visualiser les résultats d'une simulation Cette partie expose les principes de base du travail du logiciel EPANET, au niveau des objets physiques constituant le réseau et les méthodes de calcul utilisés.

2-1. Paramètre physique

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 formant le réseau.

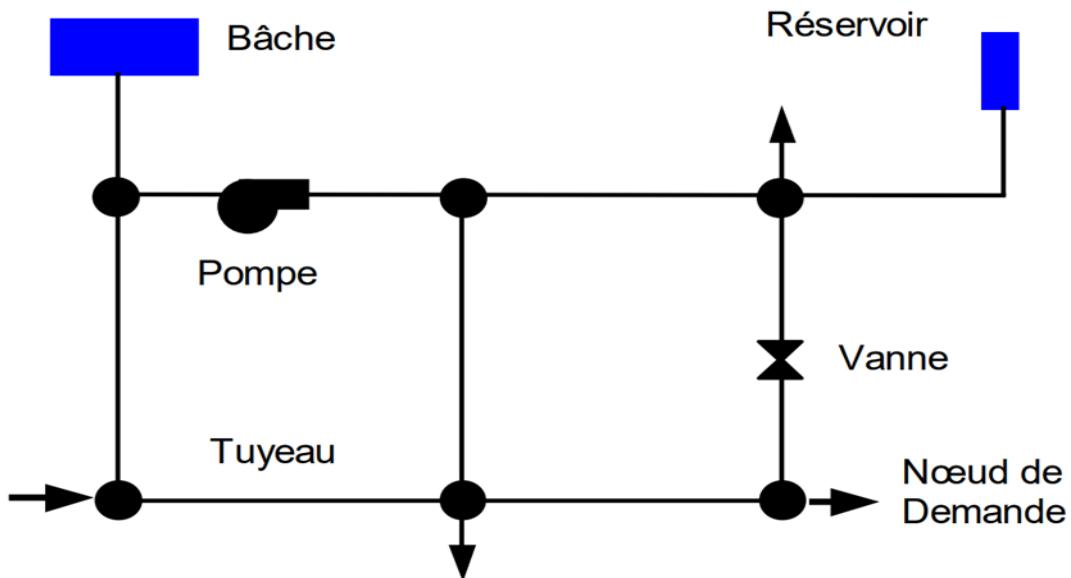


Figure 11 : Composants Physiques d'un Système de Distribution d'Eau (Epanet 2 Fr)

❖ Bâche

Les Bâches sont des nœuds représentant soit une source externe de capacité infinie. Elles sont utilisées pour modéliser des éléments tels que les lacs, les fleuves, les couches aquifères souterraines ou les arrivées de réseaux extérieurs. Les bâches peuvent également servir de point d'injection d'une substance entrant dans le réseau.

❖ Réservoirs

Les Réservoirs sont des nœuds avec une capacité de stockage, dont le volume d'eau stocké peut varier au cours du temps.

➤ L'altitude du radier :

Ce champ correspond à la hauteur à laquelle se situe la base de réservoir qui constitue une référence pour les autres points.

Les données de bases pour les réservoirs sont :

Les données d'entrées

- l'altitude du radier (où le niveau d'eau est zéro).
- le diamètre (ou sa forme s'il n'est pas cylindrique).
- niveaux initial, minimal et maximal de l'eau.
- la qualité initiale de l'eau.

Réservoir

Les données de sortie

- la charge (altitude de l'eau)
- la pression (niveau de l'eau)
- la qualité de l'eau

❖ Nœud de demande

Les Nœuds de Demande sont les points du réseau où les arcs se rejoignent. Ce sont des points d'entrée ou de sortie d'eau et peuvent également ne pas avoir de débit.

➤ Altitudes 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.

➤ Demande de base :

Paramètre propre aux nœuds, il s'agit d'insérer la demande en eau dans chacun d'eux en l/s, La détermination de la demande de base des nœuds nécessite la réalisation d'une sectorisation et délimitation commerciale des consommations. Avant de calculer demande de base il faut d'abord calculer le besoin en eau.

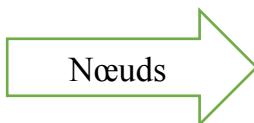
Les données saisir pour les nœuds sont :

Les données d'entrée

- Altitude
- Demande de base
- La qualité initiale d'eau

Données de sorties

- Charge hydraulique
- Pression
- Qualité de l'eau



❖ Tuyaux

Les tuyaux sont des arcs qui transportent l'eau d'un point du réseau à l'autre. EPANET suppose que tous les tuyaux sont pleins à tout instant. L'eau s'écoule de l'extrémité qui a la charge hydraulique la plus élevée (altitude + pression, ou énergie interne par poids d'eau) à celle qui a la charge hydraulique la plus faible.

Parmi les valeurs calculées pour les tuyaux ont trouvent la perte de charge ou la charge hydraulique perdue à cause du frottement de l'eau avec les parois du tuyau peut être calculée en utilisant une de ces trois formules : (Tab : 6)

- Formule de Hazen-Williams
- Formule de Darcy-Weisbach
- Formule de Chezy-Manning

Formule	Perte de charge totale (A)	Exposant du débit (B)
Hazen-Williams	$10,674 C^{-1.852} d^{-4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0827 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$10,294 n^2 d^{-5.33} L$	2

Explication des symboles: C = coefficient de rugosité de Hazen-Williams
 ϵ = coefficient de rugosité de Darcy-Weisbach (m)
f = facteur de friction (dépend de ϵ , d, et q)
n = coefficient de rugosité de Manning
d = diamètre du tuyau (m)
L = longueur du tuyau (m)
q = débit (m^3/s)

Tableau 6 : Formules de perte de charge totale pour toute la longueur de la canalisation en charge (la perte de charge est exprimée en m.c.e. et le débit en m3/s) (Epanet 2 Fr)

❖ Calcul des pertes de charge

➤ Pertes de charge linéaires

Le calcul des pertes de charges linéaires peut être effectué par le logiciel sous 3 formules différentes (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning) selon le choix de l'utilisateur.

La formule de Hazen-Williams est une relation empirique très utilisée aux États-Unis et n'est valable que pour l'eau en écoulement turbulent. La formule de Chezy-Manning est une formule d'hydraulique à surface libre, souvent utilisée pour les réseaux à conduites de grands diamètres qui ne sont pas sous pression. Mon choix s'est alors porté sur la formule de Darcy-Weisbach, communément utilisée en Europe, c'est une relation théorique, valable pour tous les fluides et tous les régimes d'écoulement.

Ces trois formules se basent toutes sur la formule qui suit (Lewis A. Rosman, septembre 2003) :

$$h = A \cdot qB$$

Avec

h : la perte de charge en mCE

Q : le débit en m³/s

A : le coefficient de résistance

B : l'exposant du débit.

Pour la formule de Darcy-Weisbach, les coefficients A et B sont les suivants :

$$B = 2 \text{ et } A = 0,0827 \cdot f \cdot d^{-5} \cdot L$$

Avec f : le facteur de friction, dépend de la rugosité, du diamètre et du débit et est calculé suivant la valeur du nombre de Reynolds

D : le diamètre du tuyau en m

L : la longueur du tuyau en m

➤ Pertes de charge singulière

Les pertes de charges singulières sont essentiellement dues aux modifications géométriques de la conduite. On peut y compter les changements de direction (coudes, raccords en T), les variations de section, les rugosités, les vannes ou robinets, les appareils de mesure, etc.

La formule utilisée est (Rosman, 2003) :

$$h_L = K \cdot v^2 / 2g$$

Avec K : coefficient de perte de charges singulières renseigné par l'utilisateur

V : vitesse de l'écoulement en m/s

G : l'accélération de la pesanteur en m.s⁻²

➤ Conduites (les tuyaux) :

Les conduits sont des arcs qui assurent l'écoulement de l'eau d'un point à un autre de réseau. Il existe plusieurs types de conduites qu'ils sont différenciés selon le matériau principal qui constitue leur structure.

❖ La nature des conduites :

✓ Caractéristiques des canalisations

Les conduites sont caractérisées par 3 paramètres essentiels :

- La nature des matériaux qui les constituent,
- Le diamètre nominal qui correspond au diamètre intérieur pour la majorité des conduites existantes sur le marché, excepté le PVC et le polyéthylène pour lesquels le diamètre normalisé est le diamètre extérieur.
- La pression à laquelle elles peuvent résister et qui doit correspondre à la pression maximale de service (PMS).

✓ Matériaux utilisés

Les matériaux généralement utilisés dans les conduites d'eau potable sont les suivants :

- Le PVC (polychlorure de vinyle)
- Le Polyéthylène
- La Fonte
- L'Acier

- Le Béton précontraint

➤ **Rugosité des conduites :**

La rugosité est la deuxième donnée physique saisir pour les conduites renseigne sur l'état des parois en contact avec le fluide. Elle agit sur les frottements de surface et dépend du diamètre des conduites.

➤ **Longueur des conduites :**

Le troisième paramètre à introduire pour les conduites est leur longueur en mètre.

Les données saisies pour les tuyaux :

Données d'entrées

- Diamètre
- Coefficient de rugosité
- Longueur
- État du tuyau (ouvert ou fermé)



Données de sortie

- Débit
- Vitesse d'écoulement
- Perte de charge

❖ **Pompes**

Les pompes sont des arcs qui ajoutent de l'énergie à un fluide et augmentent ainsi sa charge hydraulique. Les principaux paramètres d'entrée pour une pompe sont ses nœuds d'aspiration et de décharge et sa courbe caractéristique (la combinaison des charges hydrauliques et des débits que la pompe peut fournir à sa vitesse nominale). Au lieu d'une courbe caractéristique, la pompe peut être représentée comme un élément qui fournit une puissance constante (en kilowatts) au fluide pour toutes les combinaisons de débit et de charge hydraulique.

❖ **Vannes**

Les vannes sont des arcs qui limitent la pression ou le débit en un point précis du réseau.

2-2. Composants non-physiques

En plus des composants physiques, EPANET utilise trois types d'objets non physiques: des courbes, des courbes de modulation et des commandes de contrôle. Ils décrivent le comportement et les aspects fonctionnels d'un système de distribution.

❖ **Courbes**

Les courbes en général sont des objets qui contiennent des couples de données ayant une relation entre elles. Deux objets ou plus peuvent partager la même courbe. Dans EPANET, on peut appliquer les types de courbes suivants:

- Courbe caractéristique
- Courbe de rendement

- Courbe de volume
- Courbe de perte de charge.

❖ Courbes de modulation

Une courbe de modulation est un ensemble de multiplicateurs qui peuvent être appliqués à une valeur de base pour lui permettre d'évoluer au cours du temps. On peut assigner des courbes de modulation à la demande d'un nœud, au niveau d'une bâche, à la vitesse de rotation d'une pompe, à la qualité de l'eau dans une source et au prix de l'énergie.

❖ Commandes

Les commandes sont des instructions qui déterminent comment le réseau est géré pendant la simulation. Elles indiquent l'état d'arcs déterminés en fonction du temps, l'état des niveaux d'eau aux réservoirs et la valeur de la pression à certains points du réseau. Deux catégories de commandes peuvent être utilisées:

- Commandes simples.
- Commandes élaborées.

3. Le Modèle de simulation de la qualité de l'eau

Le simulateur de la qualité de l'eau d'EPANET utilise une approximation pour suivre, à intervalles définis, ce qui se passe dans des portions d'eau discrètes, lorsqu'elles circulent dans les tuyaux et se mélangent aux nœuds de demande. Ces intervalles de calcul sont normalement beaucoup plus courts que les intervalles utilisés pour calculer le comportement hydraulique (par exemple, plutôt des minutes que des heures), parce que le temps de séjour de l'eau dans un tuyau peut être très court. Néanmoins, les résultats sont affichés uniquement pour les instants déterminés par l'utilisateur, tout comme dans le cas de l'analyse hydraulique.

3-1. Modélisation du transport

Cette méthode suit la concentration et les dimensions d'une série de volume élémentaire d'eau qui circulent dans le réseau sans se mélanger. À mesure que l'eau entre dans le tuyau en amont et sort en aval :

- La taille du volume élémentaire le plus en amont augmente;
- La taille du volume élémentaire le plus en aval diminue d'autant;
- La taille des autres volumes élémentaires de l'arc reste inchangée.

À tout moment du calcul de la qualité, le contenu de chaque élément de volume d'eau est soumis à des réactions. La masse et le volume qui entrent dans le nœud sont calculés, les caractéristiques et les positions des segments sont mises à jour à chaque pas de temps de calcul. De nouvelles concentrations dans les nœuds sont calculées, prenant en compte les contributions de toutes les sources extérieures. Les concentrations dans les réservoirs de stockage sont mises à jour selon le type de modèle de mélange qui est utilisé. En conclusion, un nouveau segment sera créé à l'extrémité amont de l'arc qui reçoit un apport d'un nœud, si la différence entre la nouvelle qualité dans le nœud et celle du dernier volume est supérieure à une tolérance définie

par l'utilisateur. Au début de la simulation, chaque tuyau du réseau contient un unique élément de volume d'eau, dont la qualité est égale à la qualité attribuée au nœud en amont. Dans le cas où il se produirait une inversion de l'écoulement, les volumes élémentaires seront réordonnés dans le nouveau sens.

A. Réactions modifiant la qualité de l'eau

Le réseau de distribution de l'eau potable est souvent décrit comme un véritable réacteur, où l'eau et son contenu (conduite ...) sont le siège d'interactions physicochimiques et biologiques. 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 le réseau) afin d'anticiper et d'éviter des problèmes potentiels.

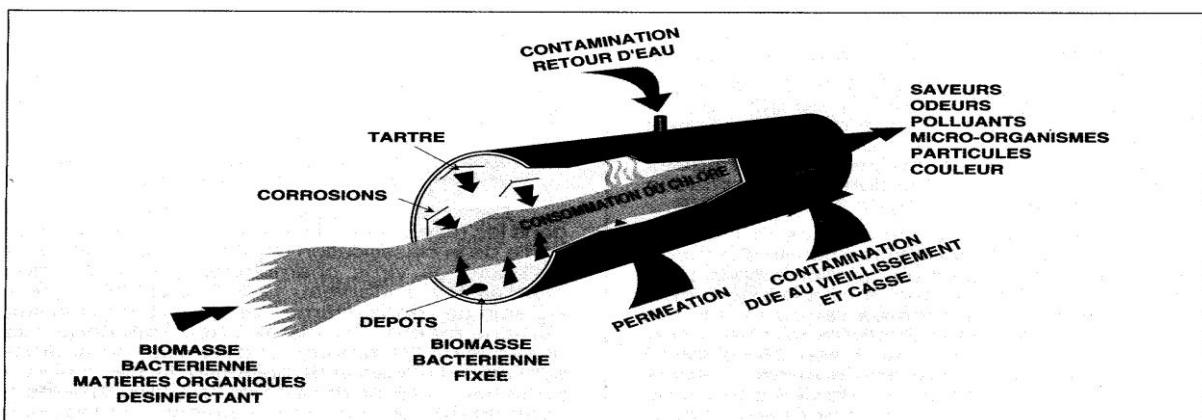


Figure 12 : Zones de réactions à l'intérieur d'un tuyau (le réseau réacteur d'après LEVI – 1995)

B. Temps de séjour et dépistage des sources

La conservation de la qualité de l'eau est facilitée par une réduction du temps de séjour dans le réseau. Dans les réseaux urbains, il y a souvent un maillage élevé, ce qui assure la sécurité quantitative, impératifs de la sécurité incendie, permet de parer aux heures de pointes et facilite les arrêts d'eau s'il y a lieu. Il accroît cependant le temps de séjour de l'eau dans le réseau. Dans les réservoirs, le temps de séjour de l'eau peut augmenter en fonction de contraintes d'exploitation, ou même résulter d'erreurs de conception pour la conception de points singuliers sur le réseau.

Le temps de séjour n'est pas une seule valeur pour le réseau, mais est représenté par une distribution statistique. Le temps de séjour moyen dans le réseau peut être de l'ordre de quelques jours mais certains volumes d'eau peuvent stagner plus d'une dizaine de jours dans des zones du réseau où l'écoulement est faible ou bien la demande en eau quasiment nulle (en périodes de vacances par exemple).

Des études ont montré que les problèmes de stagnation favorisant corrosion et dépôts apparaissent dès que la vitesse de l'eau est inférieure à 0.01 m. S-1 et disparaissent au-delà de 0.1 m. S1 (Tricard, 1995).

Lors de la conception de réseaux, le diamètre des canalisations est ainsi calculé à partir des débits de pointes horaires. Il est conseillé des valeurs guides d'écoulement entre 0,5 et 1,5m. S-1.

On a vu que l'écoulement de l'eau limite la croissance bactérienne par un effet d'arrachage du biofilm. Ainsi, la qualité microbiologique de l'eau peut se dégrader avec une augmentation de la vitesse d'écoulement, surtout lorsque celle-ci est brusque, par exemple lors de la mise en marche d'une bouche d'incendie. Une demande élevée de l'eau en été (arrosage, piscines, etc.) peut aussi entraîner une dégradation de la qualité de l'eau pour la même raison.

4. Résultat de simulation

❖ Nature de simulation

La réalisation de simulation consiste choisir une des deux types de simulation à savoir une simulation permanente et une simulation à longue durée. La simulation 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.

Simulation d'écoulement permanente : Simulation instantanée pour des conditions de fonctionnement telles que le jour et l'heure de point.

Simulation de longue durée : Indique une succession d'écoulement permanent, pendant lesquels les niveaux d'eau des réservoirs sont mis à jour périodiquement.

La simulation adoptée pour notre PFE est une simulation de longue durée, vu qu'on doit avoir le comportement hydraulique du modèle de la qualité de l'eau potable de la zone Amelkis pendant 24h.

Une fois les données nécessaires sont toutes introduites à savoir les données des équipements les options de simulation et la nature de simulation, la simulation est prête pour être lancer afin de sortir les éléments de sortie.

Quand on lance la simulation, le logiciel effectue une série de calcul, L'étape suivante est la validation du modèle hydraulique, si un message d'erreur s'affiche donc il faut revoir les données d'entrée et s'en assurer, sinon la simulation sera révélée réussie.

Pour chaque nœud on aura les données concernant la charge totale est la pression, tandis que pour les conduites les résultats de la simulation porteront sur la vitesse et les pertes de charge.

4-1. Calage du modèle

Le calage a pour objectif de rapprocher le comportement du modèle de celui du système réel, il permet de comparer l'évolution des pressions et débits calculées par le modèle mathématique avec celles effectivement mesurées sur le terrain. Le modèle est considéré comme calé lorsque

le pourcentage d'erreur entre les valeurs données par le modèle et celles données par les mesures ne dépasse pas 10 %.

Il existe deux types de calage à savoir :

- ✓ Calage de pression.
- ✓ Calage de débit

Si les résultats de la simulation sont proches de la réalité le réseau est considéré fiable. Si non le réseau construit ne reflète pas la réalité.

a. Intérêts et objectifs du calage

Le calage sert à obtenir un modèle mathématique conforme à la réalité afin de pouvoir tenir compte des spécificités du réseau de distribution existant. L'objectif est d'estimer et de localiser les différentes pertes de charge sur le réseau (vannes bridées, rugosité importante d'un tronçon de conduites). Cette opération permet également de maîtriser le fonctionnement du réseau et de repérer les dysfonctionnements éventuels (fuite locale, passage au trop-plein d'un réservoir, vanne fermée mais supposée ouverte initialement).

Cette étape de calage est donc indispensable pour disposer d'un outil décisionnel fiable avant de se lancer dans des simulations (impact d'une casse de conduite stratégique, extension du réseau, etc.).

Conclusion

La simulation hydraulique est un outil de simulation numérique des réseaux d'AEP. Il est doté d'un modèle de calcul puissant qui permet la résolution d'équations complexe relative au réseau d'AEP modélisé et à son mode de fonctionnement. Le logiciel dispose également d'une interface graphique qui permet à l'utilisateur de mener les différentes étapes de la simulation de façon interactive et de visualiser les résultats de la modélisation hydraulique.

Chapitre IV : SIMULATION DU MODELE DE LA QUALITE DU RESEAU D'EAU POTABLE DE LA ZONE AMELKIS

Rappelons que la présente étude concerne la zone Amelkis qui est l'un des secteurs de la ville de Marrakech et qui se situe à l'Est de celle-ci. Cette zone couvre une superficie de 577 ha. Elle fait partie du domaine desservi par le réseau d'alimentation en eau potable de la RADEEMA et plus particulièrement celle alimentée par le réservoir Sidi Moussa surélevé de 30 m d'une capacité de stockage de 500 m3.

La zone étudiée correspond à plusieurs secteurs de distribution de l'étage haut service de la ville de Marrakech. Notre zone d'étude est constituée de : Amelkis 1, Amelkis 2 et Amelkis 3.

De point de vue topographique, la zone présente des altitudes qui varient entre 472 m et 497 m d'altitudes.

I. Présentation de la modélisation

❖ Principe

Le principe de la modélisation hydraulique est de représenter le fonctionnement réel du réseau suivant des lois hydrauliques et des données de réseau collectées. La réalisation de ce modèle permettra en plus de comprendre le fonctionnement du réseau en temps normal, d'étudier sa réaction à une situation de crise et d'analyser son comportement à long terme.

La conception du modèle hydraulique s'appuie essentiellement sur 3 étapes principales :

➤ La création du modèle

Le modèle initial est réalisé à partir des données "réseau" du Google Earth et des données des consommations abonnées du service dédié à la facturation. Ensuite, sont modélisés les ouvrages et les installations hydrauliques existants sur le réseau. Les données statiques sont ainsi intégrées dans le modèle. Après vient le renseignement des règles d'asservissement et de contrôle qui représentent les données dynamiques. Ceci amène à la réalisation du modèle.

➤ La campagne de mesures

Cette étape réside la réalisation de mesures de débits, de niveaux d'eau dans les réservoirs et de pressions en continue pendant une période précise de consommation de pointe. Ces éléments constituent les données du terrain.

➤ Le calage et la validation

Cette étape consiste en l'ajustement des paramètres du modèle afin d'obtenir la meilleure corrélation possible entre les premiers résultats calculés et les valeurs observées sur le terrain.

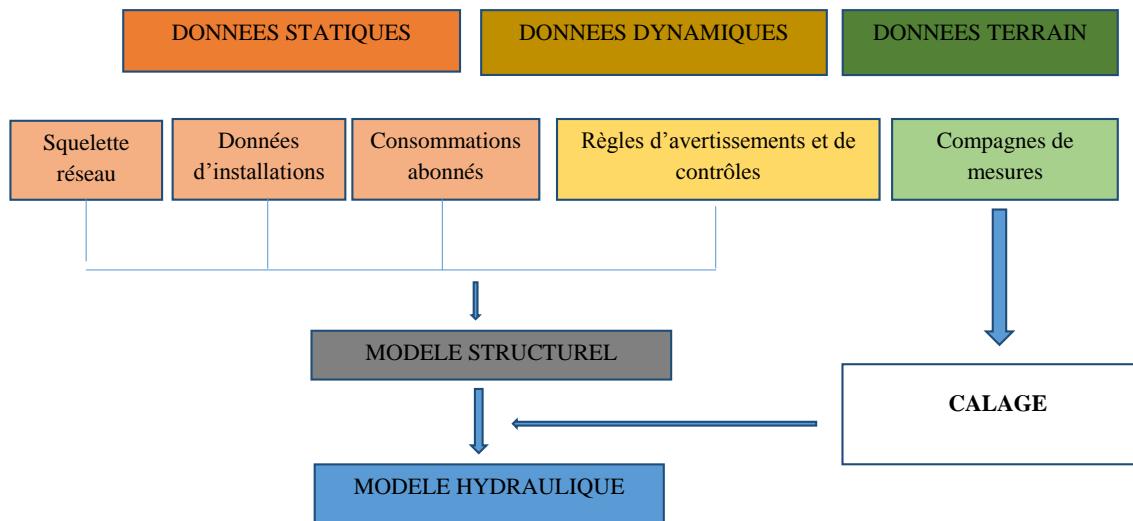


Figure 13 : L'organigramme suivant récapitule les étapes de création du modèle

1. Fonctionnement hydraulique

À partir de l'usine de production d'AEP de la ville de Marrakech, l'eau est acheminée par un réseau de canalisation exploitée par la RADEEMA vers différents réservoirs. La zone étudiée appartient à l'étage de haut service de Marrakech alimenté par le réservoir de Sidi Moussa dont la capacité est de 500 m3. L'entrée de l'eau dans la zone Amelkis se fait par une conduite 315 mm de diamètres avec un débitmètre stabilisateur et les trois (3) zones Amelkis ne sont pas connecté, chaque entrée de la zone de l'eau se fait par une conduite en AC et avec une pression de trois (3) bars pour Amelkis, 1 et 2, pour Amelkis 3 la pression de l'eau varie entre 2 et 1.5 bars dans les conduites.

II. Construction du modèle hydraulique

1. La méthodologie de travail

La première étape de la modélisation des réseaux AEP consiste à créer le squelette du réseau hydraulique sous le logiciel, tout en y affectant les consommations. Le traitement des fichiers de consommation des abonnés consiste à répartir ces consommations par rue et par commune après avoir identifié les gros consommateurs dont la consommation est retirée du fichier. En effet, cette identification s'appuie sur le nombre des consommateurs dont le volume facturé est remarquablement important au vue des autres volumes facturés dans le même réseau. De plus ce nombre peut être réduit suivant les moyens d'instrumentation disponibles dans l'entreprise.

Les étapes suivies pour la réalisation de la modélisation hydraulique de la zone Amelkis sont les suivantes :

- ✓ Schématiser manuellement le modèle sous EPANET et tracé du réseau.
- ✓ La saisie des données relatives aux différentes composantes du réseau.
- ✓ Exécution de la simulation.
- ✓ Calage Hydraulique

a. Méthodologie pour la construction du modèle

La méthodologie adoptée consiste à schématiser manuellement le modèle sous Epanet puis à introduire toutes les données afférentes au réseau à simuler.

❖ Tracé direct sous Epanet

On peut tracer notre réseau directement sous Epanet. Cette opération nécessite le géo référencement du plan du réseau à l'aide des coordonnées géographique extraite lors de la délimitation de la zone d'étude sur Google Earth.

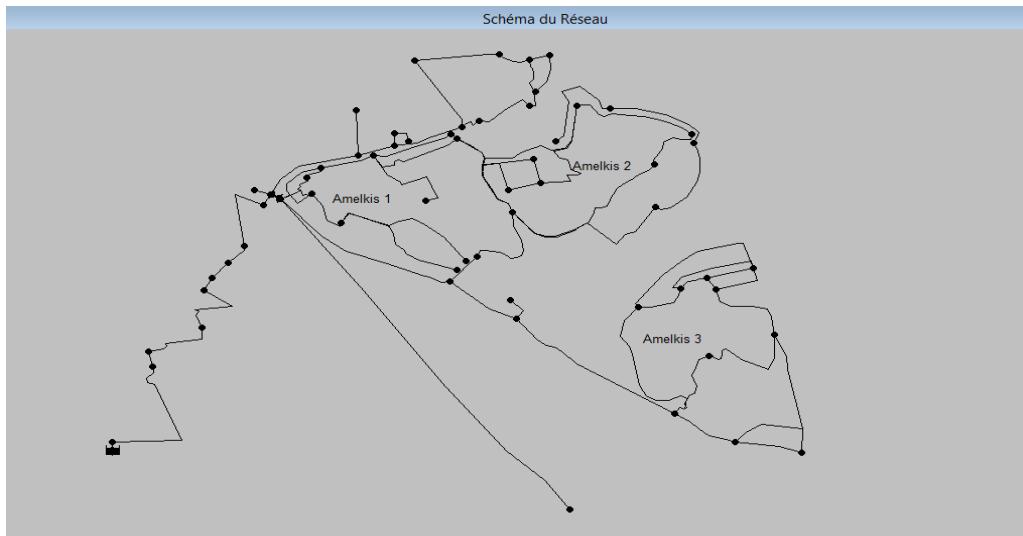


Figure 14 : Tracer du réseau direct sur Epanet

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 :

2-1. Diamètre nominal des conduites

Le diamètre nominal désigne le diamètre intérieur d'un tube. 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.

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.

N° Tuyau	Longueur (m)	Rugosité	Diamètre (mm)	N° Tuyau	Longueur (m)	Rugosité	Diamètre (mm)
----------	--------------	----------	---------------	----------	--------------	----------	---------------

1	169.92	0.5	315	35	903.02	1.5	300
2	48.64	0.5	315	36	298.20	0.5	160
3	258.26	0.5	315	37	364.39	0.5	160
4	227.14	0.5	315	38	312.22	0.5	160
5	110.70	0.5	315	39	1012	0.001	110
6	453.75	0.001	110	40	626.03	0.001	110
7	360.87	0.5	315	41	380.56	0.001	110
8	688.56	0.001	110	42	282.89	0.5	160
9	3003	0.5	225	43	104.83	0.001	110
10	531.41	1.5	300	44	587.47	0.001	110
11	59.77	1.5	300	45	532.64	0.001	110
12	633.02	0.001	110	46	547.40	0.5	315
13	756.64	1.5	200	47	463.22	0.001	110
14	513.23	1.5	200	48	706.12	0.5	315
15	247.24	1.5	200	49	459.87	0.001	110
16	1370	1.5	300	50	887.16	0.001	110
17	522.13	1.5	300	51	393.41	0.001	110
18	273.39	0.5	160	52	1030	0.001	110
19	1020	1.5	200	53	1030	0.001	110
20	675.06	0.5	315	54	249.35	0.5	315
21	343.66	0.5	315	55	353.65	0.5	315
22	722.02	1.5	200	56	502.03	0.001	110
23	867.44	0.5	225	57	453.26	0.5	315
24	1020	0.5	160	58	599.55	0.5	160
25	797.84	0.001	110	59	590.80	0.5	225
26	187.02	0.5	225	60	203.34	0.001	110
27	651.38	0.001	110	61	400.18	0.001	110
28	149.86	0.001	110	62	426.77	0.001	110
29	736.71	0.001	110	63	166.02	0.5	225
30	463.09	0.001	110	64	144.95	0.5	225
31	723.03	0.5	160	65	438.12	0.5	225
32	605.12	0.5	160	66	1027	0.5	160
33	100.33	0.001	110				

Tableau 7 : Diamètres, longueurs et rugosités des tuyaux du réseau étudié

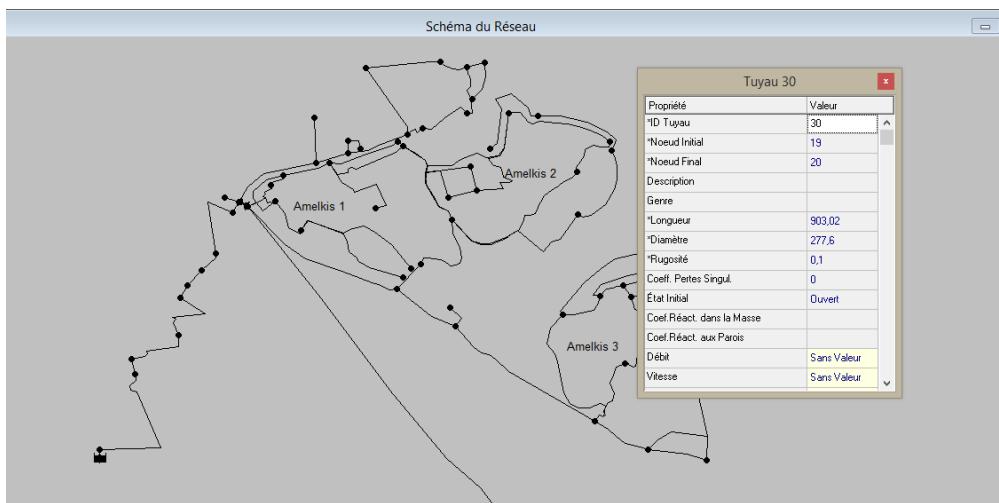


Figure 15 : Exemple de saisie des données des tuyaux

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.

Matière du tuyau	Rugosité	Diamètres des conduites (mm)
PVC	0.001	110-90-75
PVC	0.5	315-225-160
Béton	1	600
AC	1.5	300-200-150

Tableau 8 : Rugosité saisie en fonction de la matière et le diamètre des conduites

❖ Caractéristiques des canalisations

Les conduites sont caractérisées par 3 paramètres essentiels :

- La nature des matériaux qui les constituent,
- Le diamètre nominal qui correspond au diamètre intérieur pour la majorité des conduites existantes sur le marché, excepté le PVC et le polyéthylène pour lesquels le diamètre normalisé est le diamètre extérieur.
- La pression à laquelle elles peuvent résister et qui doit correspondre à la pression maximale de service (PMS).

a. Matériaux utilisés

Les matériaux généralement utilisés dans les conduites d'eau potable sont les suivants :

- Le PVC (polychlorure de vinyle)
- Le Polyéthylène
- La Fonte
- L'Acier

- Le Béton précontraint

Les avantages et les inconvénients de chaque type de conduites sont présentés ci-dessous :

Type de conduite	Avantages	Inconvénients
PVC	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau hydrauliquement lisse avec des faibles pertes de charge • Léger • Résistant • Isolant thermiquement • Coût moins cher • Résistance à la corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'un lit de pose soigné • Pièces spéciales très chères • Difficiles à retrouver les conduites enterrées par les méthodes classiques
Polyéthylène	<ul style="list-style-type: none"> • Conduites souples • Moins chères • Résistance à la corrosion • Longueur élémentaire plus importante (100 m), donc moins de pièces spéciales 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance très faible • Lit de pose soigné • Disponible pour les petits diamètres
Béton précontraint	<ul style="list-style-type: none"> • Avantages du béton précontraint 	<ul style="list-style-type: none"> • Très lourd, coût élevé de transport • Diamètres disponibles supérieurs à 300mm • Difficultés de réalisation des travaux de raccordement et de branchement en réseau • Risque de corrosion en terrain sensible
Fonte ductile	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible pour tout diamètre • Facile à travailler 	<ul style="list-style-type: none"> • Très faible résistance à la corrosion • Coût relativement cher, quoique sur dans certains cas nous avons enregistré des prix très compétitifs

Tableau 9 : Différents types de conduites- Caractéristiques, avantages et inconvénients

b. Diamètres et pressions disponibles

Le tableau ci-après récapitule les diamètres et les pressions disponibles sur le marché national.

Matériau	Pression maximale de service (PMS) en bars	Diamètres disponibles (mm)
PVC	6 - 10 - 16 et 25 bars	25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 75 - 90 - 110 - 125 - 140 - 160 - 200 - 225 - 250- 315- 400 – 500
Polyéthylène	6 - 10 et 16 bars	25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 75 - 90 - 110
Fonte ductile	Jusqu'à 40 bars	60 - 80 - 100 - 150 - ... jusqu'à 2000 mm
Béton Précontraint	Jusqu'à 15 bars	400 - 500 - 600 - 700 - 800 - 900 - 1000 - 1100 - 1200 - 1400 - 1500 - 1600 – 1800 – 2000- 2100 - 2200
Acier	Fabriqué selon la pression désirée	Faonné à partir de plaques d'acier selon le diamètre souhaité

Tableau 10 : Diamètres et pressions disponibles

Remarque :

Depuis peu de temps, un nouveau matériau est produit et commercialisé au Maroc ; il s'agit du tuyau en Polyester renforcé de Résine de Verre (PRV). C'est un matériau qui présente les mêmes avantages que le PVC (faible rugosité, poids, facilité de pose et de branchement, ...) et qui offre en plus :

- Une large gamme de diamètres (DN 300 à 3000 mm),
- Des pièces spéciales en PRV avec un coût réduit,
- Des éléments d'une longueur qui peut atteindre 21 m.

❖ Choix du type de matériau

Plusieurs facteurs entrent en jeu pour le choix du matériau de canalisations ; les principaux sont les suivants :

- Les possibilités de diamètres offertes par le matériau,
- Les pressions admissibles par les tuyaux,
- La résistance chimique à l'eau agressive et aux sols,
- La longévité des conduites compte tenu de la qualité des eaux véhiculées,
- La facilité de pose,
- Les conditions du marché local et le prix du tuyau.

À ce stade du présent projet et compte tenu des différentes contraintes, les matériaux utilisés sont le PVC pour les diamètres nominaux inférieurs à 500 mm et l'acier pour les grands diamètres.

Au niveau des points bas où la pression est élevée, et des traversées des oueds, on prévoit des tronçons en fonte ou en acier, avec les protections nécessaires.

3. Altitudes 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.

N° Nœuds	Altitudes (m)	N° Nœuds	Altitudes (m)
1	475	27	484
2	476	28	492
3	476	29	487
4	476	30	487

5	475	31	487
6	476	32	486
7	476	33	488
8	476	34	490
9	481	35	490
10	482	36	496
11	482	37	497
12	482	38	497
13	482	39	476
14	477	40	473
15	478	41	475
16	478	42	475
17	477	43	475
18	479	44	476
19	482	45	472
20	481	46	473
21	479	47	474
22	476	48	476
23	480	49	475
24	481	50	474
25	480		
26	485		

Tableau 11 : Altitudes en m de chaque nœud du modèle hydraulique

3-1. 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 mensuelles du réseau étudié relevées, 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 12).

Besoins en eau : les besoins sont délicats, car ils peuvent varier d'une région à une autre ou même au sein de la même agglomération en fonction du temps, les besoins en eau sont liés au type de dotation :

- ✓ Dotation domestiques
- ✓ Dotation industrielle
- ✓ Dotation administrative et communale administratifs

❖ Besoin à la distribution

La consommation n'est pas constante tous les jours de l'année ; elle subit des fluctuations selon les mois de l'année, selon les semaines du mois, selon les jours de semaine et selon les heures de la journée. Cette variation reflète dans le temps le rythme des activités humaines, c'est pour cela qu'on a le coefficient de pointe :

A. Débit de dimensionnement

Pour l'horizon considéré, le réseau est calculé avec les débits de distribution de pointe journalière et horaire, déterminés sur la base des besoins moyens à la distribution affectée des coefficients suivants :

- Coefficient de pointe journalière : 1,2
- Coefficient de pointe horaire : 1,5

B. Vitesses limites

Le dimensionnement du réseau sera fait de manière à satisfaire les conditions de vitesse suivantes :

- Vitesse maximale : 2 m/s (en pointe horaire),
- Vitesse minimale : 0,2 m/s.

C. Pression au sol

Pour l'ensemble des nœuds du réseau, les pressions doivent satisfaire les conditions suivantes :

✓ Pression minimale

La pression au sol requise varie en fonction de l'élévation des constructions dominées, comme suit :

Habitat à moins de 4 niveaux : 20 mètres

Habitat à 4 niveaux : 24 mètres

Habitat à 5 niveaux: 28 mètres

Au-delà de 5 niveaux, les immeubles doivent disposer de surpresseurs.

Dans le présent projet, les variantes étudiées doivent permettre d'assurer en tout point du réseau et dans les conditions les plus défavorables une pression minimum de 20 mètres.

✓ Pression maximale

En tout point du réseau de distribution, la pression maximale ne doit pas dépasser 60 m. Dans le cas de variation importante d'altitude, un réseau étagé sera conçu ou bien des appareils de réduction de pression seront prévus.

D. Nature et diamètre des conduites

Le choix de la nature des conduites projetées a porté sur le PVC. Les diamètres commercialisés au Maroc varient de 20 mm à 500 mm. Pour des besoins d'exploitation, et s'agissant de l'ossature de réseau, nous adopterons le diamètre minimal de 160 mm.

Pour des diamètres supérieurs à 500 mm, des conduites en Acier ou Fonte peuvent être adoptées.

Au niveau des traversées des obstacles, il faudra prévoir des matériaux adaptés avec les protections nécessaires :

- ✓ Mise en place de dallettes de protection de la conduite sous la voirie principale,
- ✓ Enrobage des conduites mitoyennes au réseau d'assainissement,
- ✓ Conduites en fonte ductile sur les traversées des oueds,
- ✓ Enrobage des conduites traversant les chaâbas.

E. Calcul du réseau

Formules employées

Les pertes de charge sont calculées selon les formules de Darcy et de Colebrook.

Formule de Darcy

$$j = \frac{\lambda V^2}{2gD}$$

Formule de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71D} + \frac{2,51\mu}{VD\sqrt{\lambda}} \right)$$

Où :

- j = Pertes de charge linéaires (m/m)
- λ = Coefficient de perte de charge (adim)
- D = Diamètre de la conduite (m)
- V = Vitesse de l'eau (m/s)
- g = Accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)
- μ = Viscosité cinétique ($\mu = 1,32 \cdot 10^{-6}$ m²/s pour une température de 10°C)
- k = Rugosité (m)

Le calcul hydraulique du réseau de distribution a été effectué au moyen du logiciel PICCOLO. Les différentes étapes de la modélisation du réseau (préparation des données, simulations, sortie des résultats, ...)

F. Répartition spatiale des besoins

La répartition spatiale des besoins en eau est faite selon la méthode nodale qui se base sur les projections démographiques et urbanistiques réalisées.

4. Collecte et préparation des données

Une fois le tracé du réseau d'AEP terminé, l'étape qui suit consiste à introduire dans EPANET les caractéristiques de tous les éléments du réseau, à savoir : les longueurs des conduites, les altitudes des nœuds de demande, la rugosité des canalisations, paramètres du réservoir, etc. Les figures ci-dessous illustrent cette importante étape qui précède la modélisation proprement dite.

❖ Les Nœuds

✓ La demande de base des nœuds :

Paramètre propre aux nœuds : il s'agit d'insérer la demande en eau dans chacun d'eux en l/s
Le tableau ci-dessous présente la consommation moyenne totale du secteur pour le mois de Mai 2023.

Demande de Base en m ³ /h (par mois)	Demande de Base en l/s
210,069	58,35

Tableau 12 : Consommation mensuelle de la demande de base

Ces besoins ont été repartis aux nœuds comme suit :

On affecte la demande de base aux nœuds de la zone d'étude par la méthode de superficie.

La méthode superficie consiste à calculer dans un premier lieu la superficie partielle pour chaque zone d'Amelkis en se basant sur Google Mapp, on la calcule comme suit :

- **Superficie d'Amelkis : 5778496 m²**

- **La demande de base : 58.3525 l/s**

Exemple de calcul du nœud 2 :

5778496  **58,35**

41841  **Demande de base du nœud 1**

N° Nœuds	Superficie (m ²)	Demandes de base en l/s
1	41841	0,42
2	37296	0,38
3	14453	0,15
4	77536	0,78
5	9931	0,10
6	105804	1,07
7	8380	0,08
8	30752	0,31
9	24432	0,25
10	167756	1,69
11	7437	0,07
12	34214	0,35
13	37419	0,38
14	44652	0,45
15	32586	0,33
16	41865	0,42
17	44969	0,45
18	68226	0,69
19	248318	2,51
20	120742	1,22
21	48887	0,49
22	102437	1,03

23	33712	0,34
24	36117	0,36
25	105582	1,07
26	11286	0,11
27	45463	0,46
28	312121	3,15
29	12373	0,12
30	8771	0,09
31	24032	0,24
32	166141	1,68
33	27762	0,28
34	86936	0,88
35	81148	0,82
36	56133	0,57
37	233343	2,36
38	280727	2,83
39	72354	0,73
40	1271	0,01
41	18568	0,19
42	6351	0,06
43	7948	0,08
44	5966	0,06
45	1912	0,02
46	13289	0,13
47	17567	0,18
48	37113	0,37
49	29426	0,31
50	120066	1,21

Tableau 13 : superficie partielle (m²) et les demandes de base (l/s) de la zone d'Amelkis

- Les altitudes et les demandes de base sont les données d'entrées pour les nœuds (fig16) représente l'exemple de saisie des propriétés du nœud 1.

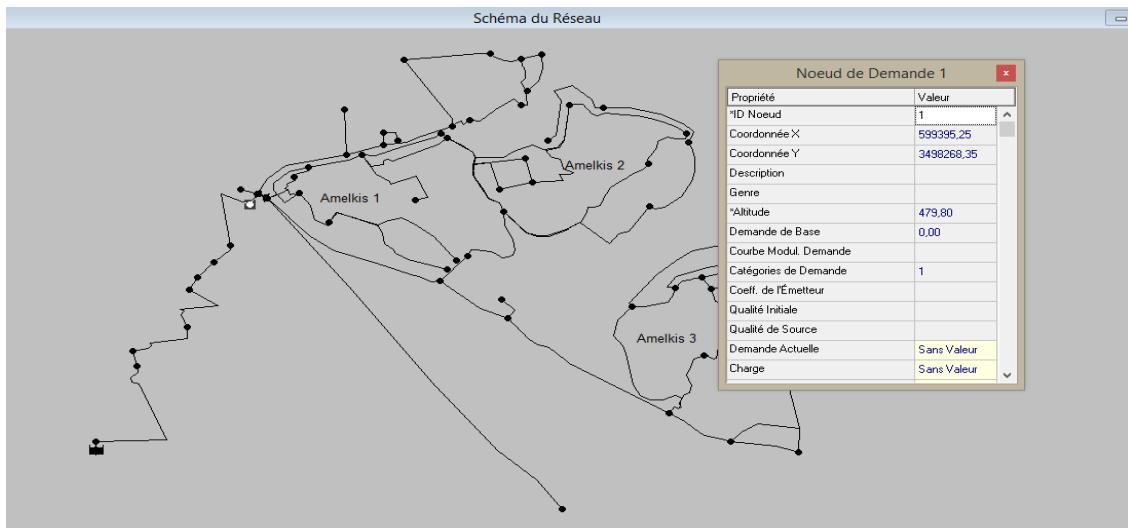


Figure 16 : Exemple de saisie des données des nœuds

4-1. Calage des données d'entrées

L'objectif de cette étape est de créer une évolution représentative de la réalité avant de passer au calage. Cela revient à ajuster les données d'entrée en affectant des profils hydrauliques représentant l'évolution réelle durant la journée de calage des demandes de base et de la charge totale des points d'entrée.

4-2. La courbe de modulation

Les consommations importées sur EPANET depuis le modèle sont des moyennes mensuelles affectées aux demandes de base des nœuds. Ces consommations sont converties en l/s en appliquant un multiplicateur de demande dans les options hydrauliques du modèle afin que l'unité soit homogène avec celle adoptée sur le logiciel. Toutefois, les demandes de base ne représentent pas l'évolution du débit sur la journée de calage. C'est pourquoi, la charge totale affectée par l'utilisateur dans un premier temps à chacune des nœuds en entrée de chaque secteur est fixe, ce qui n'est pas représentatif de la réalité. Afin de simuler l'évolution réelle de la charge d'entrée durant la journée de calage, une courbe de modulation de la charge totale (Figure 18) est assignée à chacune des nœuds d'entrée. Ces courbes par analogie à celles des demandes sont formées de suite de coefficients multiplicateurs calculés par le rapport du débit horaire sur la moyenne de tous les débits horaires provenant des mesures de pressions en entrée de chaque secteur durant la journée de calage avec un pas de temps d'une heure (1h).

$$\text{Coefficient de modulation} = \frac{\text{Débit horaire}}{\text{La moyenne de tous les débits horaires}}$$

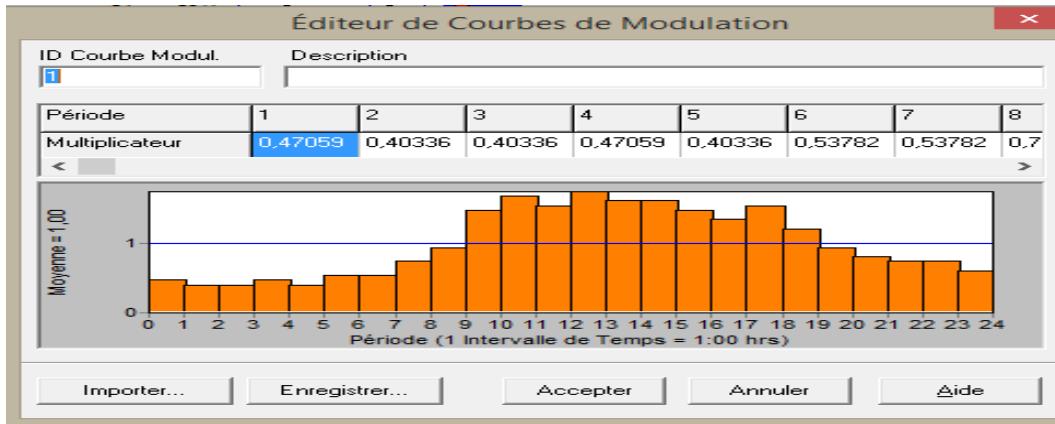


Figure 17 : Courbe de modulation du débit d'entrée d'Amelkis sous EPANET

4-3. Diagnostic hydraulique du réseau

Le modèle ainsi calé permet d'effectuer différentes simulations pour diagnostiquer le réseau d'une part et pour tester des situations présentant des problématiques de fonctionnement du réseau d'autre part. Il est devenu un véritable outil d'aide à la décision pour différents projets d'évolution du réseau. Le diagnostic du réseau permet l'optimisation de son fonctionnement en relevant diverses problématiques éventuelles, telles que les zones de faibles ou de fortes pressions, le surdimensionnement des canalisations, les secteurs de fortes ou faibles vitesses d'écoulement d'eau ou encore l'implantation de nouveaux ouvrages. Le modèle permet éventuellement de réaliser le diagnostic et la résolution des problèmes liés à la défense incendie sur le réseau en s'appuyant sur les normes.

4-4. Exécution de la simulation

La simulation 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 la saisie de tous les paramètres du réseau, on peut lancer la simulation. Une fois le calcul terminé, si le modèle ne comporte pas d'erreurs, le logiciel affiche le message suivant « **La simulation a Réussi** » comme la figure le montre ci-dessous.

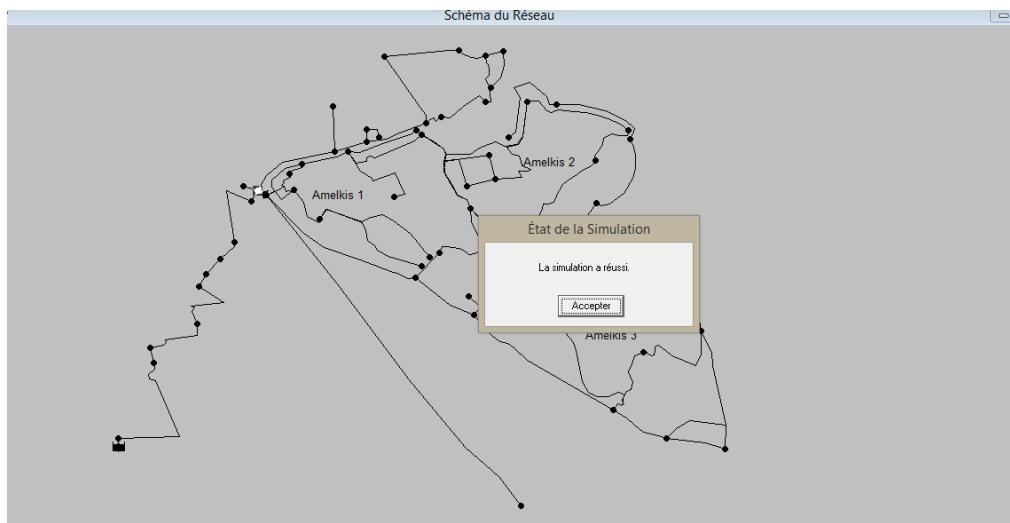


Figure 18 : Excusions de la simulation hydraulique sur EPANET sans erreur.

- Le résultat final de la simulation hydraulique du réseau d'alimentation en eau potable de la zone Amelkis 1, 2, et 3 est illustré sur la figure 18.

La réussite de simulation dépend de bonne saisie des données d'entrées de chaque élément de réseau et de dessin de réseau qui doit être proche à la réalité.

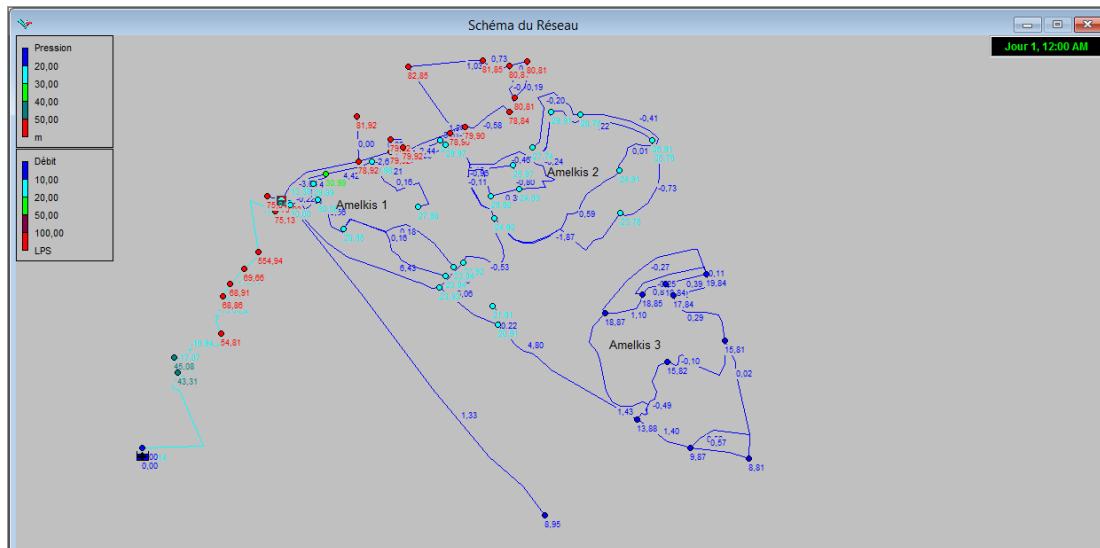


Figure 19 : Résultats de l'exécution de la simulation sur Epanet pour la zone Amelkis.

4-5. Diagnostic des pressions et débits

Les paramètres considérés pour l'analyse du fonctionnement du réseau sont : le débit et la pression. Les variations de ces deux paramètres sur une journée entière pour le nœud 12 et pour le tuyau 16 sont illustrées sur les figures 20 et 21 ci-dessous.

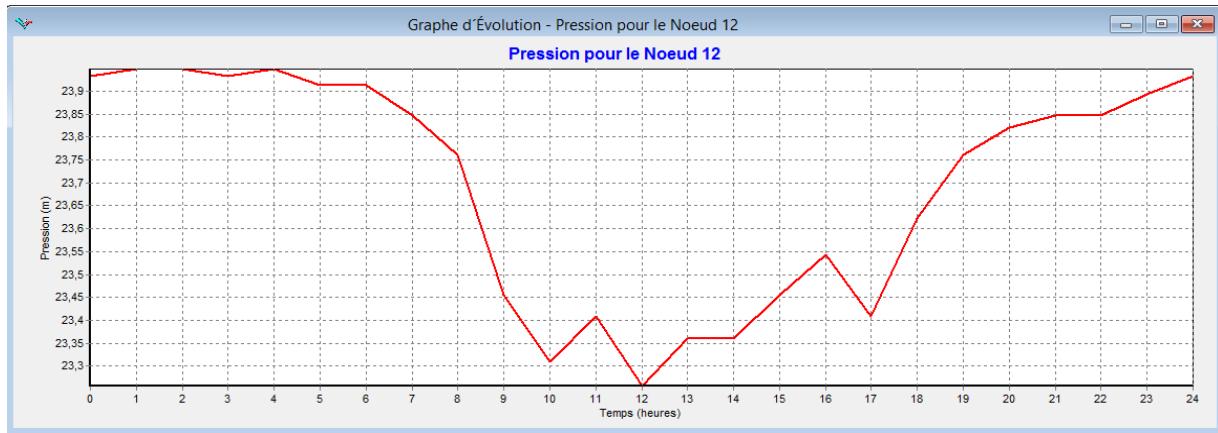


Figure 20 : Variation de la pression au niveau du nœud 12 sur une durée de 24 h.

- L'analyse des mesures obtenues montre que les valeurs de pression subissent une légère chute entre 09h00 et 17h00, ce qui est dû à l'augmentation de la consommation durant cette période de la journée.



Figure 21 : Variation de la vitesse au niveau du tronçon 16 sur une durée de 24 heures

- Celles du débit affichent un maximum à la mi-journée (entre 10 H et 13 H).

La courbe de débit donnée montre que, la période de pointe horaire est focalisée sur 10h du Matin.

5. 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 5m pour La pression

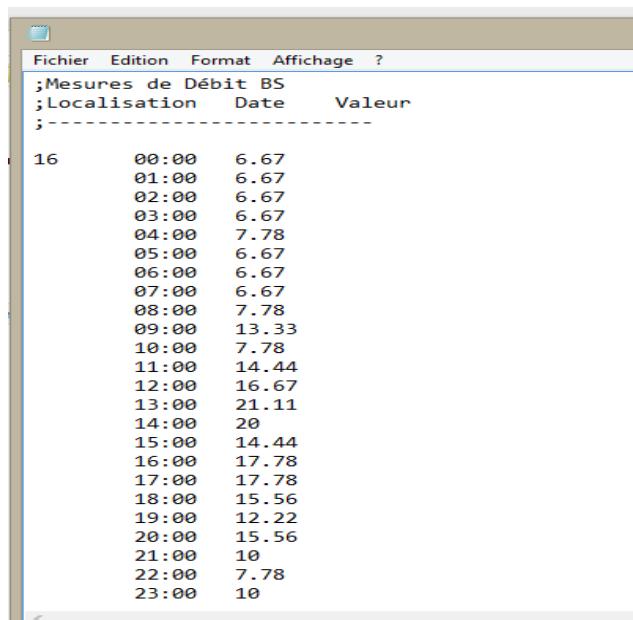
5 à 10% pour le débit

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 24 mai 2024 au niveau d'un ensemble de nœuds et tuyaux éparpillés sur toute l'étendue du réseau.

A. Le fichier des calages

Le fichier de calage est un document texte qui contient les mesures de certains paramètres effectuées au niveau d'un (ou de plusieurs) point(s) du réseau.

❖ Calage de débit



The screenshot shows a Windows Notepad window with the following content:

Localisation	Date	Valeur
16	00:00	6.67
	01:00	6.67
	02:00	6.67
	03:00	6.67
	04:00	7.78
	05:00	6.67
	06:00	6.67
	07:00	6.67
	08:00	7.78
	09:00	13.33
	10:00	7.78
	11:00	14.44
	12:00	16.67
	13:00	21.11
	14:00	20
	15:00	14.44
	16:00	17.78
	17:00	17.78
	18:00	15.56
	19:00	12.22
	20:00	15.56
	21:00	10
	22:00	7.78
	23:00	10

Figure 22 : fichier de calage de débit pour le tuyau 16

Pour effectuer le calage des débits, nous nous sommes basées sur les mesures que nous avons réalisées au niveau du tronçon 16.

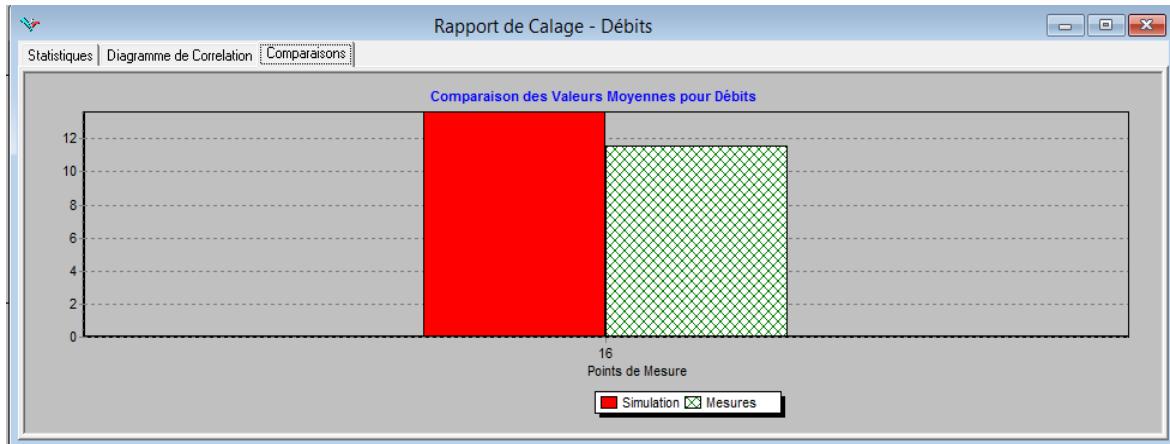


Figure 23 : Comparaison des valeurs de débit obtenues par simulation et celles mesurées pour le tuyau 16

- Les résultats de calage pour le débit sont proche de la réalité avec une moyenne d'erreur ($\pm 10\%$) donc le réseau est fiable et reflète la réalité.

❖ Calage de pression

Le calage des pressions a été effectué en utilisant les valeurs que nous avons recueillies par des mesures au niveau du nœud 12, 5, 23 et 60 du réseau d'AEP de la zone.

Fichier			Fichier		
Edition			Edition		
Format			Format		
Affichage			Affichage		
?			?		
;Mesures de Pression Amelkis 2			;Mesures de Pression Amelkis 1		
;Localisation Date Valeur			;Localisation Date Valeur		
;-----			;-----		
12	00:00	24	5	00:00	33
	01:00	24.5		01:00	34
	02:00	24.5		02:00	35
	03:00	25		03:00	35
	04:00	25		04:00	35
	05:00	25		05:00	36
	06:00	25		06:00	34
	07:00	24.5		07:00	33
	08:00	24		08:00	31
	09:00	23.5		09:00	28
	10:00	22		10:00	25
	11:00	22		11:00	22
	12:00	22		12:00	22
	13:00	21.5		13:00	20
	14:00	22		14:00	24
	15:00	22		15:00	26
	16:00	22.5		16:00	25
	17:00	23		17:00	28
	18:00	23		18:00	28
	19:00	23		19:00	28
	20:00	23.5		20:00	30
	21:00	23		21:00	29
	22:00	23		22:00	30
	23:00	24		23:00	31

Figure 24 : fichier de calage de pression pour le nœud 12 et 5

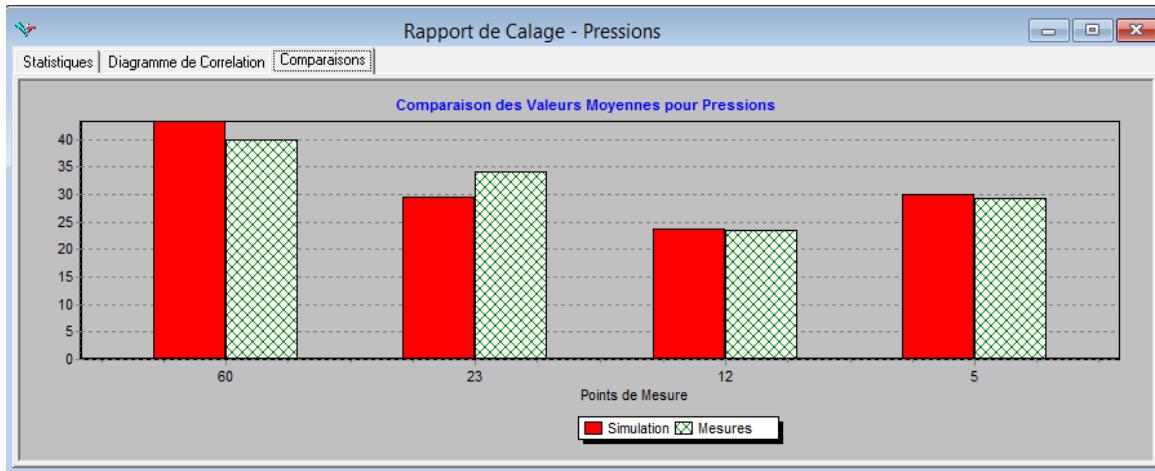


Figure 25 : Comparaison des valeurs de pression obtenues par simulation et celles mesurées pour le nœud 60, 23, 12, 5.

- Les résultats de calage montrent que le pourcentage d'erreur est compris entre 4% et 8%, et ne dépasse pas la marge tolérable de 10%. Ce résultat montre une bonne qualité de calage du modèle.

III. Modélisation du chlore

À la suite de la modélisation hydraulique, une modélisation qualité est réalisée. Elle se base en premier lieu sur le résultat de la simulation hydraulique et la finesse de ses résultats dépendra donc de la précision du calage hydraulique initial. Dans le cadre de l'approche de notre réseau adopté 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. Du modèle hydraulique calé en débit et en pression au cours des étapes précédentes du projet.

1. Temps de séjour

Un des indicateurs de la qualité de l'eau est le temps de séjour de l'eau. Il représente le temps que met l'eau entre le point de production (stockage) ou le point de rechloration et le point de livraison. Ce temps est important pour l'évaluation de la qualité de l'eau car le taux de réactif désinfectant (chlore) décroît notamment avec le temps de séjour de l'eau dans les conduites. C'est pourquoi des stations de rechloration peuvent être placées sur le réseau. EPANET permet de calculer le temps de séjour maximum de l'eau dans le réseau.

2. Campagne d'échantillonnage

La campagne du prélèvement a été réalisée le 24 mai 2024. Les prélèvements de l'eau sont effectués au niveau de trois nœuds épargnés au sein du réseau étudié. L'étape suivante est de tester la présence du chlore résiduel. Les mesures du chlore que nous avons réalisées ont nécessité :

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

Le Comparateur colorimétrique (figure 26) : 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.



Figure 26 : Comparateur colorimétrique du chlore.

✓ **La mesure colorimétrique consiste à :**

- Remplir un ou deux tubes d'échantillon d'eau. Traiter l'un des tubes avec le réactif, 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 méthodes de prélèvements sont présentées ci-dessous :





Figure 27 : les différentes étapes de prélèvement sur le terrain

- Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N° échantillon	102	127	42
Lieu de prélèvement	Amelkis 1	Amelkis 2	Amelkis 3
Heure de prélèvement	13h14min	13h32min	13h50min
Concentration du chlore mesuré en mg/l	0,40	0,50	0,60

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



Figure 28 : Répartition des points de mesure du chlore sur le réseau étudié

- D'après le tableau 14 et la figure 28 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.

3. Calage du chlore

Les mesures des concentrations du chlore effectué le 24 mai 2024 ont permis d'effectuer le calage de qualité du modèle.

La figure ci-dessous représente la comparaison des valeurs moyennes du chlore mesuré 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.

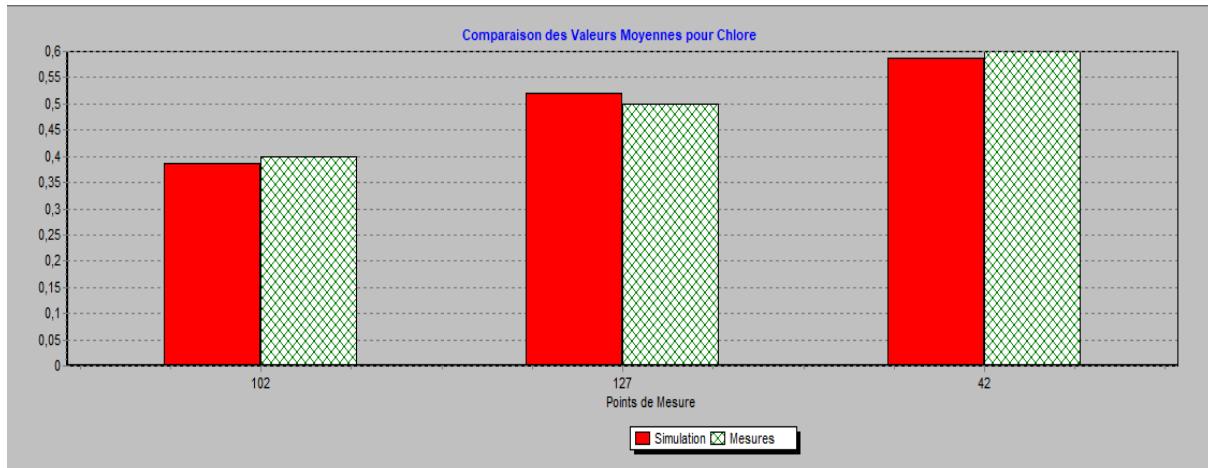


Figure 29 : Comparaison des valeurs moyennes du chlore mesurées et simulées.

4. Diagnostic 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), 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 ; 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 des quelques nœuds. Ces pressions dépassent les 5 bars. La variation de la pression pour ses nœuds, siège d'une surpression qui peut être modulé par l'installation des réducteurs de pression.

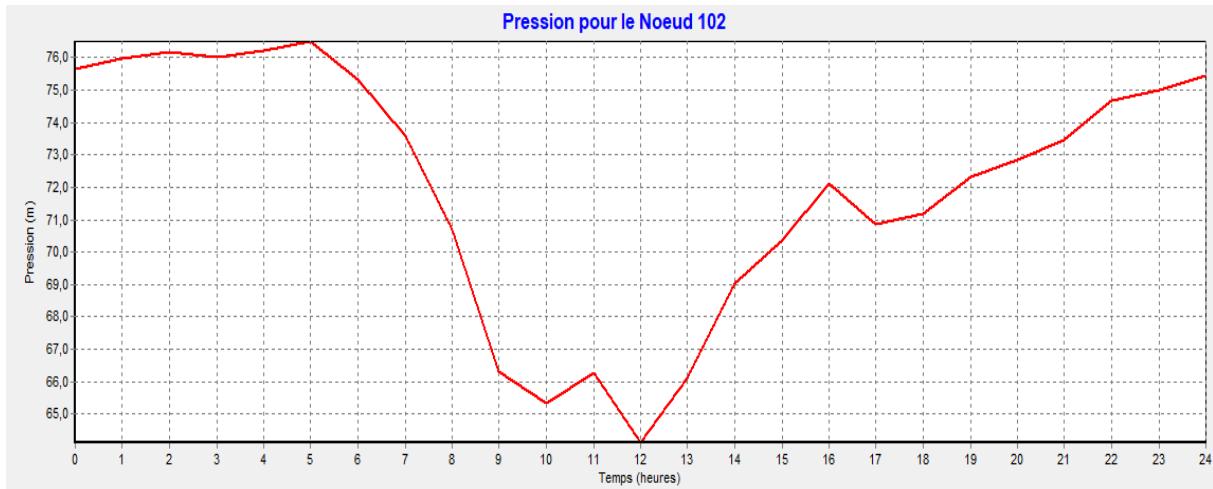


Figure 30 : Variations de la pression pour le nœud 102

- La pointe de consommation de la journée du calage est mentionnée à 12h00. 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 due à la faible consommation. La figure 31 représente la variation des débits en fonction du temps pendant la journée du calage, pour le tuyau 91.



Figure 31 : Variations du débit pour le tuyau 91

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

La figure 32 représente 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 0.7mg/l. Nous constatons donc que le réseau assure une désinfection convenable. Cette figure confirme 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 à cause de sa dégradation le long du réseau, il en reste toujours des traces du désinfectant dans l'eau.



Figure 32 : Courbe de distribution de chlore

Conclusion

Ce travail a été une grande occasion pour découvrir et maîtriser le logiciel Epanet, développé par US Environmental Agency.

Cet outil informatique incontournable dans le secteur de l'alimentation en eau potable est utilisé dans la conception de nouveaux réseaux d'approvisionnement en eau potable offrant les débits, les pressions et les vitesses les plus parfaits possibles.

Dans cette étude, nous l'avons utilisé pour modéliser le réseau d'AEP (déjà existant) de la zone d'Amelkis (Marrakech).

L'étude a montré que les résultats de la simulation hydraulique (pressions, débits) et de la qualité de l'eau, obtenues par Epanet, sont proches de la réalité mesurée sur le terrain.

Elle a montré également que l'eau distribuée par la RADEEMA dans le secteur Amelkis est bien conforme aux normes.

Conclusion générale

La modélisation hydraulique a permis d'apporter une meilleure connaissance du fonctionnement actuel du réseau d'AEP à Amelkis et de dégager ainsi ses atouts et ses faiblesses. Elle nous a également permis de simuler un scénario futur hypothétique et d'analyser le comportement du réseau face à cette situation.

Cette modélisation se révèle donc un véritable outil d'aide à la décision quant aux aménagements proposés pour remédier aux éventuelles défaillances dans le réseau.

Pour nous, la connaissance et la maîtrise du fonctionnement global du réseau, ses interconnexions et ouvrages étaient des étapes cruciales dans ce travail de modélisation. Pour cela, la réalisation de la collecte des données et les vérifications que nous avons effectuées sur le terrain se sont révélées nécessaires. Cette étape a permis de créer le modèle structurel du réseau sur EPANET à l'aide d'un système d'information géographique. La campagne de mesures est ensuite réalisée en vue de caler ce modèle avec la réalité. Cependant, l'existence de plusieurs intervenants sur le réseau du secteur a contribué au prolongement de la durée de cette phase. Une fois le modèle calé, celui-ci est diagnostiqué afin de déceler d'éventuels dysfonctionnements.

Le diagnostic du réseau d'Amelkis a permis de conclure sur son état hydraulique. Les zones de fortes et de faibles pressions ont ainsi été délimitées et une variation de pressions a été constatée sur la commune. Par ailleurs, le réseau ne présente pas de problème de sous dimensionnement en raison de l'absence de fortes vitesses d'écoulement.

Outre le fonctionnement hydraulique du réseau dans son état actuel, la simulation a conclu que la capacité du réseau à alimenter à lui seul ce quartier Amelkis reste limitée.

Finalement, je conclus que l'utilisation du logiciel EPANET s'est montrée adéquate à la réalisation de modèles numériques des réseaux du secteur Amelkis, contribuant ainsi à déployer des outils de gestion patrimoniale.

Pour les besoins des communes urbaines, d'autres outils internes pourront également être mis en place, telle que le module d'analyse du taux de défaillance des conduites utilisé pour l'aide au programme de renouvellement des canalisations.

Pour affiner encore plus les résultats obtenus, cette étude de simulation nécessite d'être approfondie par plus informations complémentaires sur le projet.

BIBLIOGRAPHIE

Canada.ca (2009) - Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique, 51 pages

DINEPA (2013) Réalisation d'une modélisation hydraulique d'un réseau d'eau potable Guide technique.

CELERIER J., FABY J., LOISEAU G., JUERY C., (2001) - La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux, document technique, FNDAE, hors-série n°12. p. 9.

CELERIER J., FABY J., LOISEAU G., JUERY C., (2001) - La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux, document technique, FNDAE, hors-série n°12. p. 22-25.

RADEEMA, Les ressources en Alimentation en Eau Potable de Marrakech, RADEEMA 2016.

RADEEMA, Rapport de Gestion et des Règlements de la RADEEMA, 2017.

Rapport CID-EMM. (2016) -Actualisation des études des schémas directeurs d'eau potable et d'assainissement liquide de la ville de Marrakech.

Rosman L. A., (2003) - Epanet 2.0 Simulation hydraulique et qualité pour les réseaux d'eau sous pression "Manuel de l'utilisateur ". p.13

Rosman. L. A., (2003) - Epanet 2.0 Simulation hydraulique et qualité pour les réseaux d'eau sous pression "Manuel de l'utilisateur ". p.35-57.

Zoungrana D., Cours d'approvisionnement en eau potable. Novembre 2003 P15-23.

❖ Sites web consultés

https://siredd.environnement.gov.ma/Marrakech-Safi/Home/Ressources_Eau, consulté le 17/04/2024, La Région de Marrakech-Safi.

<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/qualite-eau/recommandations-qualite-eau-potable-canada-tableau-sommaire.html>, consulté le 20/05/2023 document technique sur le chlore.

<https://www.equipement.gov.ma/Carte-Region/RegionMarrakech/Presentation-de-la-region/Monographie/Pages/Monographie-de-la-region.aspx>, consulté le 17/04/2024, La carte du région de Marrakech.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal, consulté le 10/04/2024, Recensement de la population et présentation de la ville de Marrakech.

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_de_Darcy-Weisbach, consulté le 15/05/2024, Les équations mathématiques, Chezy-Manning, Hazen-Williams, Darcy-Weisbach.