

# Development of Strategic Framework for upgradation to a smart water network system through technological interventions in Sousse and Monastir in Tunisia

Hydraulic models of Sousse and Monastir  
Deliverable 2.2.4

Report  
Project No 22-002

June 2024

Prepared for CTCN



Development of Strategic Framework for upgradation to a smart water network system through technological interventions in Sousse and Monastir in Tunisia

Hydraulic models of Sousse and Monastir - Deliverable 2.2.4

Report  
Project No 22-002

Prepared for: CTCN  
Represented by Ms Nadège Trocellier

Contact person: Nadège Trocellier  
Project Manager: Magali Larsson  
Quality Supervisor: Maija Bertule  
Author: Mortadha Guermitti  
Project No.: 11827067  
Revision: 2.0 FINAL  
Classification: **Confidential**

File name: Modélisation\_Rapport\_2\_2\_4\_FINAL.docx

## Table des matières

<b>Summary</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>6</b>
1.1 Cadre du projet .....	6
1.2 Activités et objectifs .....	6
1.3 Logiciel utilisé pour la modélisation des réseaux de Monastir .....	7
<b>2 Modèle hydraulique de distribution</b> .....	<b>9</b>
2.1 Réseaux .....	9
2.2 Sectorisation et consommation .....	12
2.3 Fonctionnement du réseau .....	14
2.4 Hypothèses sur les données manquantes ou incertaines .....	15
2.5 Performance du modèle .....	16
2.6 Paramétrage du modèle hydraulique de distribution .....	17
2.7 Propositions d'amélioration .....	20
<b>3 Modèle hydraulique de production</b> .....	<b>22</b>
3.1 Réseaux .....	22
3.2 Fonctionnement du système d'adduction .....	24
3.3 Paramétrage du modèle hydraulique d'adduction .....	26
3.4 Propositions d'amélioration .....	29
<b>4 Modèle de production futur</b> .....	<b>30</b>
4.1 Données utilisées et hypothèses sur l'état futur .....	30
4.2 Résultats de la simulation en scénario futur .....	32

## Figures

Figure 1-1: Organisation des modules sur MIKE+. Le cadre orange indique les modules qui ont été utilisés dans le cadre du projet. ....	7
Figure 1-2: Interface de MIKE+ .....	8
Figure 2-1: Le réseau de distribution d'eau de Monastir (rouge : zone basse ; bleu : zone haute).....	9
Figure 2-2: Définition des vannes fermées du réseau de Monastir sur MIKE+.....	10
Figure 2-3: Exemple d'une définition du réservoir sur le réseau de Monastir .....	11
Figure 2-: Modélisation du système de réservoir et de pompage de Monastir .....	11
Figure 2-: Courbe caractéristique de pompe du réseau de Monastir .....	12
Figure 2-: Sectorisation du réseau de Monastir (rouge : zone haute ; bleu : zone basse) .....	12
Figure 2-: Définition des tournées sur MIKE+.....	13
Figure 2-: Profil de consommation défini sur le réseau de Monastir .....	13
Figure 2-: La répartition des points de mesure de pression (en jaune) sur le réseau de Monastir.....	14
Figure 2-: Extrait du fichier résumé du modèle de distribution de Monastir .....	17
Figure 2-: Règles de contrôle appliquées en entrée des réservoirs de Monastir.....	18
Figure 2-: Courbes de marnage des réservoirs de Monastir.....	18
Figure 2-: Carte de la charge hydraulique en mètre de colonne d'eau sur le réseau de Monastir .....	19
Figure 2-14: Carte des pressions du réseau de Monastir en mètre de colonne d'eau (mCE).....	19
Figure 2-: Proposition de sectorisation sur le réseau de distribution Monastir.....	21
Figure 3-1: Le modèle d'adduction de Monastir .....	22
Figure 3-2: Exemple de définition du réservoir Harkoussia.....	23
Figure 3-3: Courbes caractéristiques des pompes de Belli .....	24
Figure 3-4: Exemple de synoptique utilisé pour la construction du modèle de production .....	24
Figure 3-5: Exemple de données issues de la télégestion : débit au départ de Harkoussia .....	25
Figure 3-6: Extrait du fichier résumé pour le modèle adduction .....	26
Figure 3-7: Règles de contrôle des réservoirs sur le modèle adduction .....	27
Figure 3-8: Exemple d'une comparaison du niveau mesuré et modélisé : Réservoir BC2.....	27
Figure 3-9: Exemple d'une comparaison du niveau mesuré et modélisé : réservoir BC1 .....	27
Figure -1: Réseau d'adduction de Monastir après l'ajout des projets futurs .....	30
Figure -2: Projection de l'évolution de la population de la ville de Monastir entre 2004 et 2041 .....	31
Figure -3: Marnage des réservoirs sur le modèle d'adduction futur .....	32

## Tables

Table 2-1: Tableau de comparaison des pressions mesurées et modélisée (en heure de pointe) .....	20
Table 3-1: Tableau de bilans volumiques des réservoirs .....	28
Table -1: Caractéristiques hydrauliques appliquées aux ressources futures dans le modèle .....	31

## Summary

The project aims to evaluate the performance of a pilot area, conduct case studies on smart water networks, implement smart meters, and optimize the operational strategy using hydraulic models. The goal is to develop a national action plan for a smart water network in Tunisia and prepare a concept note for the Green Climate Fund. The report focuses on Activity 2.2.5: Establish the hydraulic profile of the production and distribution systems.

### *Hydraulic operation of the water distribution system*

The Monastir distribution network is supplied by four water tanks and consists of two pressure zones: a high-pressure zone supplied by pumping and a low pressure zone supplied by gravity. GIS data provided by SONEDE was used to model this network using MIKE+ software. The network's pipes and nodes were imported, checked for connectivity, and closed valves were integrated to represent existing sectorization. Tanks and pumps, along with their characteristics, were defined in the model.

### *Sectorization and Consumption*

Sectorization was carried out by isolating the high- and low-pressure zones of the network. Consumption zones were defined to inject water demand into the model. In total, 4 042 demand nodes were defined in the MIKE+ model, with demand profiles allocated to model the temporal variation in water demand.

### *Hydraulic operation of the water production system*

The Monastir water production network was also modelled. It includes pipes, reservoirs, tanks and pumps, and was calibrated using available measurement data. The model allows analysis of the current system operation and simulation of future scenarios, including new infrastructure such as the Kalaa Kebira dam and a seawater desalination plant in Sousse.

### *Propositions of improvement*

The report proposes several improvements for the hydraulic distribution and production models, aiming to increase the reliability and performance of the networks. This includes recommendations for tank management, sectorization, and operational cost optimization.

### *Software Used*

MIKE+ software was used for modelling, with its WD-Basic and WD-Tools modules to simulate pressurized flows and analyse networks. MIKE+ allows designing, diagnosing, and managing complex networks, providing results on current operations, future sizing, water quality, and network optimization.

### *Conclusion*

The report concludes by highlighting the importance of hydraulic modelling for the transition to smart water networks in Sousse and Monastir. The developed models offer essential tools for the efficient management of water resources and future planning, thus contributing to the sustainable development of hydraulic infrastructures in Tunisia.

# 1 Introduction

## 1.1 Cadre du projet

La présente étude entre dans le cadre du projet intitulé « Elaboration d'un cadre stratégique pour la mise en place d'un système de réseau d'eau intelligent à Sousse et Monastir ».

Le projet traite les activités suivantes :

1. Evaluation des performances de la zone pilote ;
2. Etude de cas de réseaux d'eau intelligents ;
3. Etude pilote sur les compteurs intelligents ;
4. Application pour les consommateurs ;
5. Réalisation de modèles hydrauliques représentant le système d'adduction et de distribution de la zone pilote ;
6. Optimisation de la stratégie opérationnelle avec l'aide des modèles hydrauliques ;
7. Plan d'action national pour le développement d'un réseau intelligent en Tunisie ;
8. Etablissement d'une Note Conceptuelle pour le Fond Vert pour le Climat ;

La présente étude développe l'activité 5 concernant la réalisation de modèles hydrauliques.

## 1.2 Activités et objectifs

Les activités et leurs objectifs sont présentés dans ce qui suit :

- Analyser le fonctionnement hydraulique du système de distribution d'eau :  
Le but de cette activité est de comprendre dans quelle mesure l'eau non facturée peut être réduite grâce à la mise en œuvre d'un modèle hydraulique et de compteurs intelligents. Une zone de distribution sera choisie au sein du réseau de Sousse et Monastir.  
L'activité est divisée en les étapes suivantes :
  - Collecte et analyse de données SIG
  - Construction d'un modèle hydraulique
  - Analyse hydraulique du système théorique car aucune donnée de mesure n'est disponible à l'heure actuelle.
  - Division du réseau en zones de comptage en proposer d'installer des débitmètres sur le réseau de distribution.
- Analyser le fonctionnement hydraulique du système de production d'eau :  
L'activité est divisée en les étapes suivantes :
  - Collecte et analyse de données (SCADA, SIG, Systèmes d'Information Client)
  - Construction du modèle hydraulique
  - Calibrage du modèle à partir des données de mesures disponibles
  - Réalisation d'une analyse hydraulique du système existant
  - Mise en place d'un scénario de modèle hydraulique de production future d'eau (incluant le barrage de Kalaa Kebira et la nouvelle usine de dessalement des eaux de Sousse).

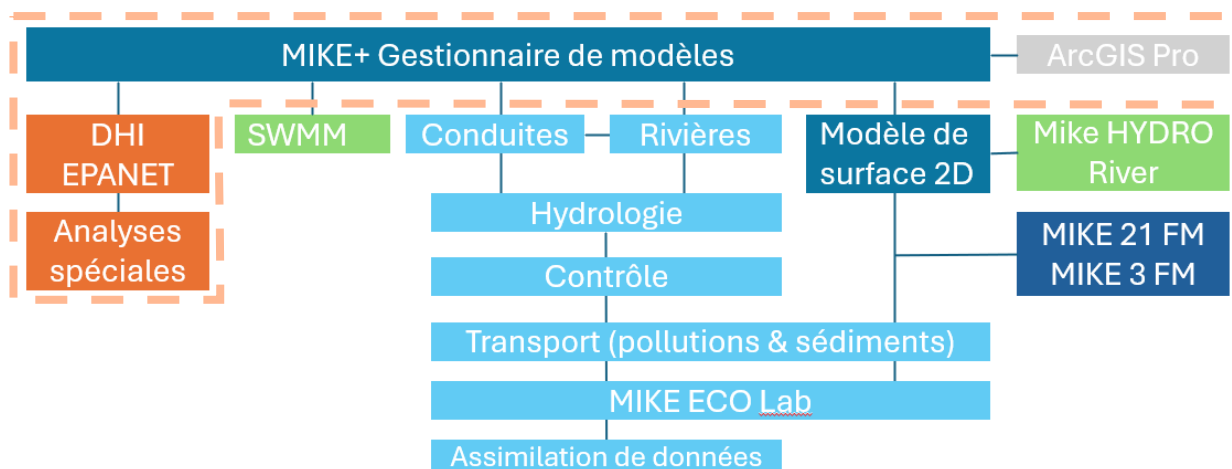
### 1.3 Logiciel utilisé pour la modélisation des réseaux de Monastir

La construction du modèle a été réalisée sur MIKE+.

Le logiciel MIKE+ permet la modélisation des écoulements d'eau à l'échelle locale ainsi qu'à l'échelle du bassin versant :

- Réseaux d'adduction d'eau potable et systèmes de collecte en milieu urbain (réseaux d'eaux pluviales et d'eaux usées) ;
- Rivières et cours d'eau ;
- Ecoulements de surface en zone urbaine ou dans les champs d'expansion de crues en 2 dimensions.

L'architecture des modules du logiciel MIKE+ est la suivante :



**Figure 1-1: Organisation des modules sur MIKE+. Le cadre orange indique les modules qui ont été utilisés dans le cadre du projet.**

Dans le cadre ce projet, seuls les modules nécessaires à la modélisation des réseaux d'alimentation en eau potable ont été utilisés, soit **MIKE+ WD**.

**MIKE+ module WD** est un logiciel professionnel permettant de simuler les écoulements sous pression (calcul des débits, pressions, vitesses...). Ce logiciel s'applique aussi bien à des réseaux simples de quelques tronçons, qu'à des réseaux maillés complexes et étendu comprenant plusieurs milliers de conduites. Il permet de concevoir, de diagnostiquer et de gérer des réseaux, apportant ainsi des résultats sur :

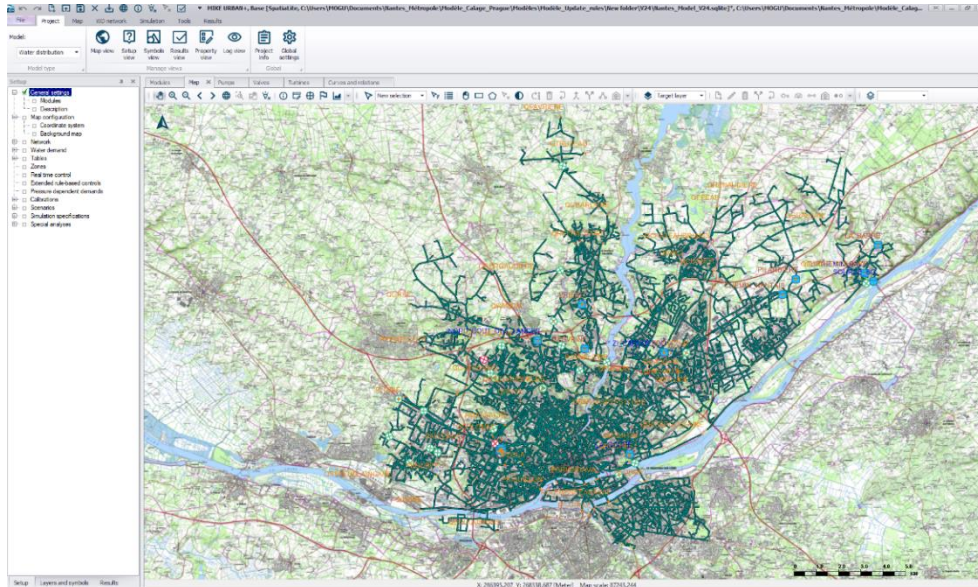
- Le fonctionnement actuel du réseau (études des réservoirs, étude d'adduction d'eau...)
- Le dimensionnement et les impacts d'aménagements nouveaux (évolution des demandes, extension du réseau...)
- La qualité des eaux (zones d'influences, chloration, âge de l'eau)
- L'optimisation des réseaux (réduction des coûts de fonctionnement, détection des fuites)

Sur le logiciel MIKE+, la modélisation des réseaux de distribution d'eau est réalisée avec le moteur de calcul EPANET 2.0 et EPANET 2.2 contenu dans le module WD-Basic.

Facilité d'utilisation, flexibilité, intégration sous SIG et robustesse du moteur de calcul font partie des nombreux avantages de cet outil.

Les fonctionnalités SIG enrichies par ArcGIS Pro d'ESRI fournissent des outils complets de manipulation et traitement des données permettant une gestion efficace des séries temporelles et une visualisation très appropriée de toutes les données.

MIKE+ dispose d'un module gestionnaire de modèles appelé MM (Model Manager). Les données relatives aux réseaux urbains sont stockées dans une base de données géoréférencée. Le gestionnaire de modèles inclut des fonctionnalités performantes du SIG telles que l'interface graphique moderne et conviviale, la gestion des données du réseau, l'analyse en détails des résultats grâce aux outils de visualisation et de cartographie.



**Figure 1-2: Interface de MIKE+**

Le module appelé WD-Outils contient un ensemble de fonctionnalités spécialement développées pour l'analyse des réseaux sous pression. Les outils permettent, entre autres :

- La simulation de l'écoulement transitoire dans des systèmes sous pression ;
- La pression statique et dynamique, dépendante des demandes, pour les systèmes à l'arrêt ou de distribution intermittents ;
- La cartographie des zones et étage de pression ;
- L'analyse du débit incendie en fonction du débit et de la pression résiduelle disponible ;
- Les options de contrôle avancées (commandes PID, pompes à vitesse variable, les commandes élaborées) pour des simulations sur des périodes étendues ;
- L'aide à l'analyse des résultats de simulation afin de comprendre les déficiences du système, améliorer la conception et l'opérationnel par l'analyse de la criticité de chaque conduite, la durabilité et les coûts des opérations liées à la gestion patrimoniale ;
- L'analyse des purges des conduites ;
- La planification d'interruptions de service et les simulations incluant des conduites endommagées.

## 2 Modèle hydraulique de distribution

Le réseau de distribution de la ville de Monastir est alimenté par quatre réservoirs : deux de 5 000m<sup>3</sup> et deux de 800m<sup>3</sup>. Il est constitué par deux étages de pression : une zone haute centrale alimentée par refoulement et une zone basse à l'est et l'ouest alimentée en gravitaire.

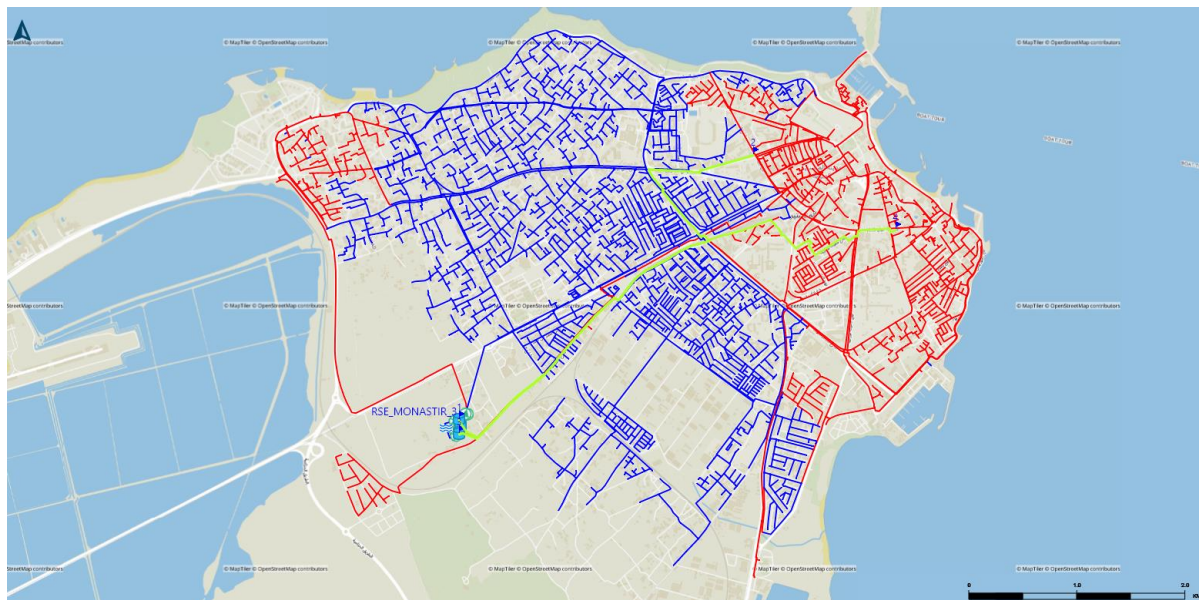


Figure 2-1: Le réseau de distribution d'eau de Monastir (rouge : zone basse ; bleu : zone haute)

### 2.1 Réseaux

Les données utilisées sont issues du SIG transmis par la SONEDE. Elles sont listées aux sous-chapitres suivants.

#### 2.1.1 Conduites et nœuds de réseau

Le réseau de la ville de Monastir est composé d'environ 290Km linéaire de conduites. Ces conduites ont été reçues en format Shape (SIG) et importées dans MIKE+ avec les attributs suivants :

- ID SIG
- Matériau,
- Diamètre,
- Date de pose,
- Secteur,
- Etage,

L'identifiant SIG des conduites a été conservé dans le modèle afin qu'il soit commun entre les deux outils. De la sorte, le modèle pourra être mis à jour aisément.

Les nœuds définissant les conduites du réseau ont été importés à partir de la couche SIG de la SONEDE.

Les champs importés sont les suivants :

- ID SIG,
- Altitude,
- Secteur,
- Etage,
- Tournée (donnée pour la consommation)

A noter qu'une partie des nœuds a été créé automatiquement sur MIKE+ via l'outil de réparation topologique. Cet outil permet de bien gérer les conduites en T, ce qui conserve la structure exacte du réseau dans le modèle, sans déconnection.

Une fois les nœuds créés, une vérification de la connectivité des conduites a été menée. Le test de la connectivité du réseau permet de s'assurer qu'il n'y a pas de partie hydrauliquement isolée.

## 2.1.2 Vannes

Les vannes ont été créées sur le modèle de distribution de la ville de Monastir en se basant sur les rapports et les informations transmis par la SONEDE.

Ces vannes ont été définies manuellement en fermant les conduites directement sur MIKE+.

Seules les vannes fermées ont été mises en place dans le modèle. Les vannes ouvertes ne sont pas intégrées pour ne pas alourdir les calculs inutilement.

Au total 24 vannes fermées ont été intégrées, qui modélisent la sectorisation existante entre la zone haute et la zone basse du réseau.



ID	From node	To node	Length [m]	Diameter [mm]	Wall thickness [mm]	Inner diameter [mm]	Geometric length [m]	Initial status	Zone ID	Is active	Roughness [mm]
4	D44T-00007889	Junction_774	256222	250	0	250	9.1829673107634	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
5	D44T-00005694	Junction_709	266765	176.2	0	176.2	16.568771700054	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
6	D44T-00007170	266797	266798	100	0	100	15.558896447391	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
7	D44T-00006390	Junction_494	1685044	300	0	300	11.718767052891	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
8	D44T-00007775	Junction_550	259905	300	0	300	57.707307425979	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
9	D44T-00007545	256770	257238	200	0	200	321.12064152406	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
10	D44T-00007577	Junction_499	256769	100	0	100	13.374438478364	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
11	D44T-00007580	Junction_498	257731	200	0	200	5.5162482294437	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
12	D44T-00007972	257238	Junction_...	200	0	200	4.7328742898084	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
13	D44T-00005550	252874	252873	250	0	250	26.839209156632	Closed	PUMPING	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
14	D44T-00006308	251456	Junction_...	250	0	250	5.1566293290447	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
15	D44T-00006309	Junction_463	251455	300	0	300	6.8161458327122	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
16	D44T-00005430	251459	Junction_...	200	0	200	3.5782615108570	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25
17	D44T-00005433	251456	251462	300	0	300	15.700029077951	Closed	GRAVITY	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25

Figure 2-2: Définition des vannes fermées du réseau de Monastir sur MIKE+

## 2.1.3 Réservoirs

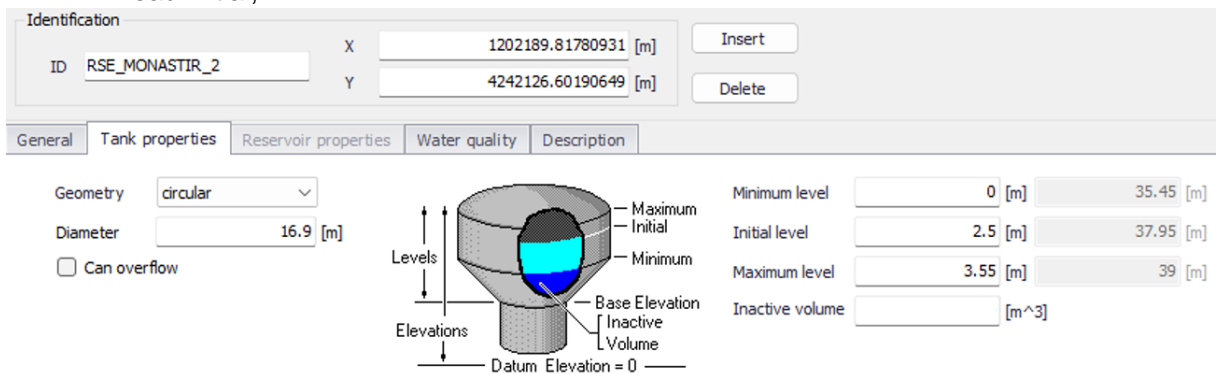
La ville de Monastir est alimentée à partir de quatre réservoirs, eux-mêmes alimentés à partir d'un piquage sur la conduite des eaux du nord DN 1250mm en béton.

Les 4 réservoirs sont en équilibre.

Les réservoirs ont une capacité totale de 11 600 m<sup>3</sup>.

Les réservoirs ont été définis sur MIKE+ en utilisant les données suivantes :

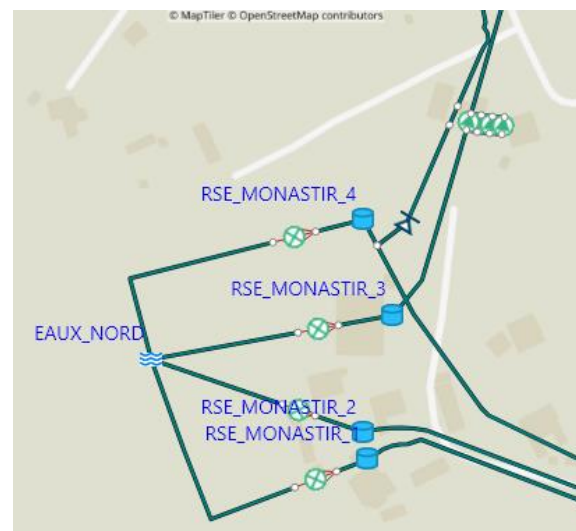
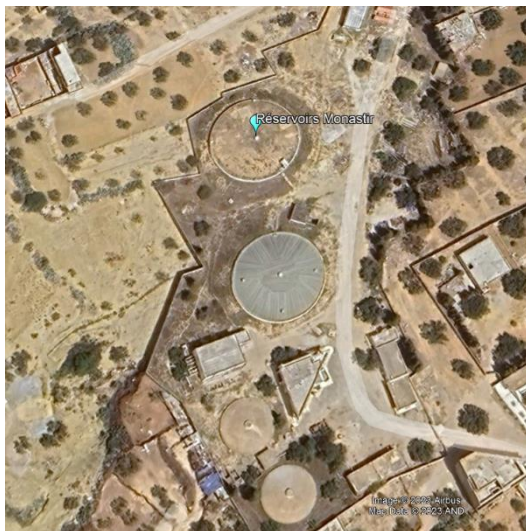
- Géométrie (forme),
- Diamètre,
- Cote radier,
- Niveau minimum et maximum,
- Niveau initial,



**Figure 2-3: Exemple d'une définition du réservoir sur le réseau de Monastir**

### 2.1.4 Pompes

Le réseau de Monastir comprend une station de pompage constituée de quatre pompes. Le pompage à partir des réservoirs permet d'alimenter la zone haute du réseau.

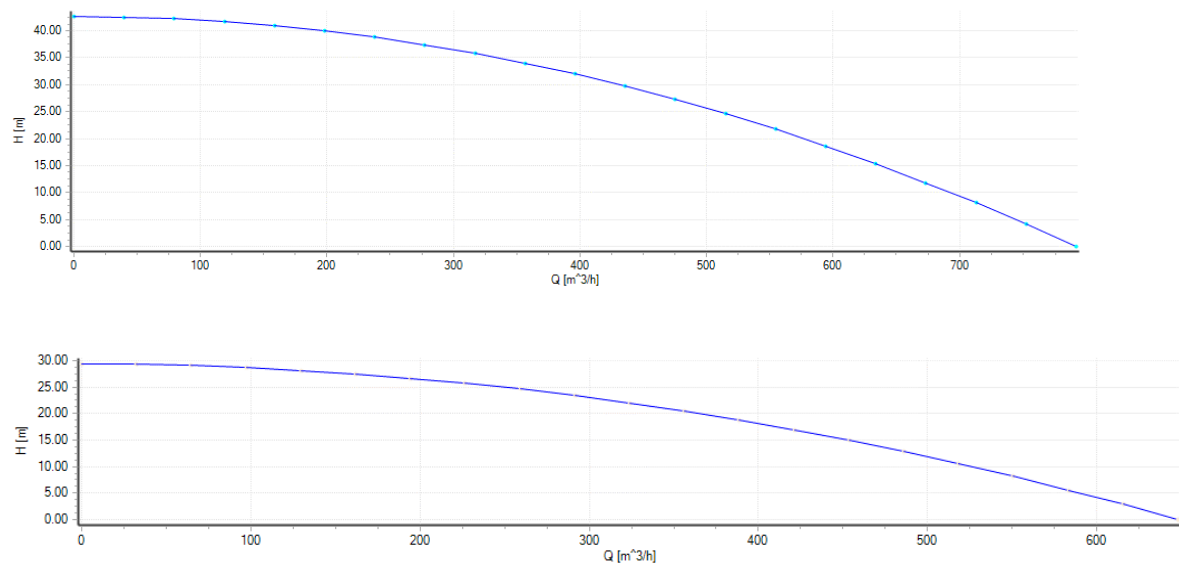


**Figure 2-4: Modélisation du système de réservoir et de pompage de Monastir**

Les 4 pompes en fonctionnement ont des caractéristiques différentes. Il y a deux couples de pompes identiques ayant les points de fonctionnement suivants :

- HMT=32m et Q=396 m<sup>3</sup>/h.
- HMT=35m et Q=324 m<sup>3</sup>/h.

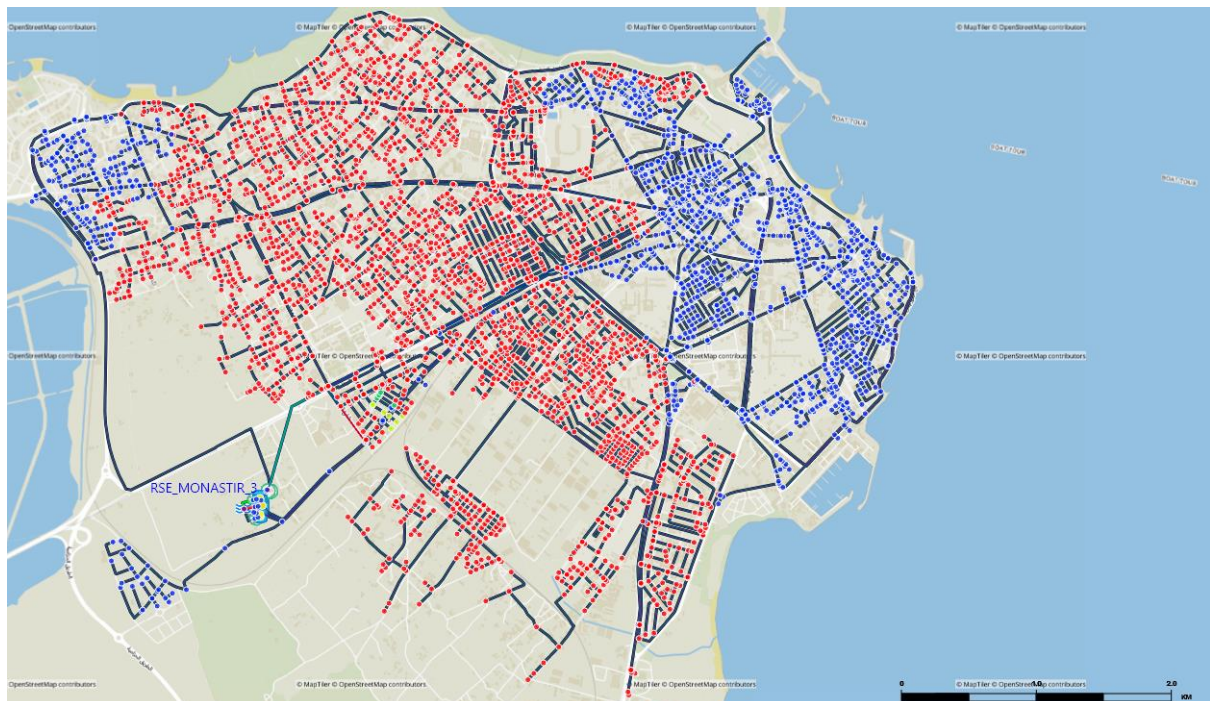
Les courbes caractéristiques intégrées au modèle pour les pompes sont présentées ci-dessous :



**Figure 2-5: Courbes caractéristiques des pompes du réseau de Monastir**

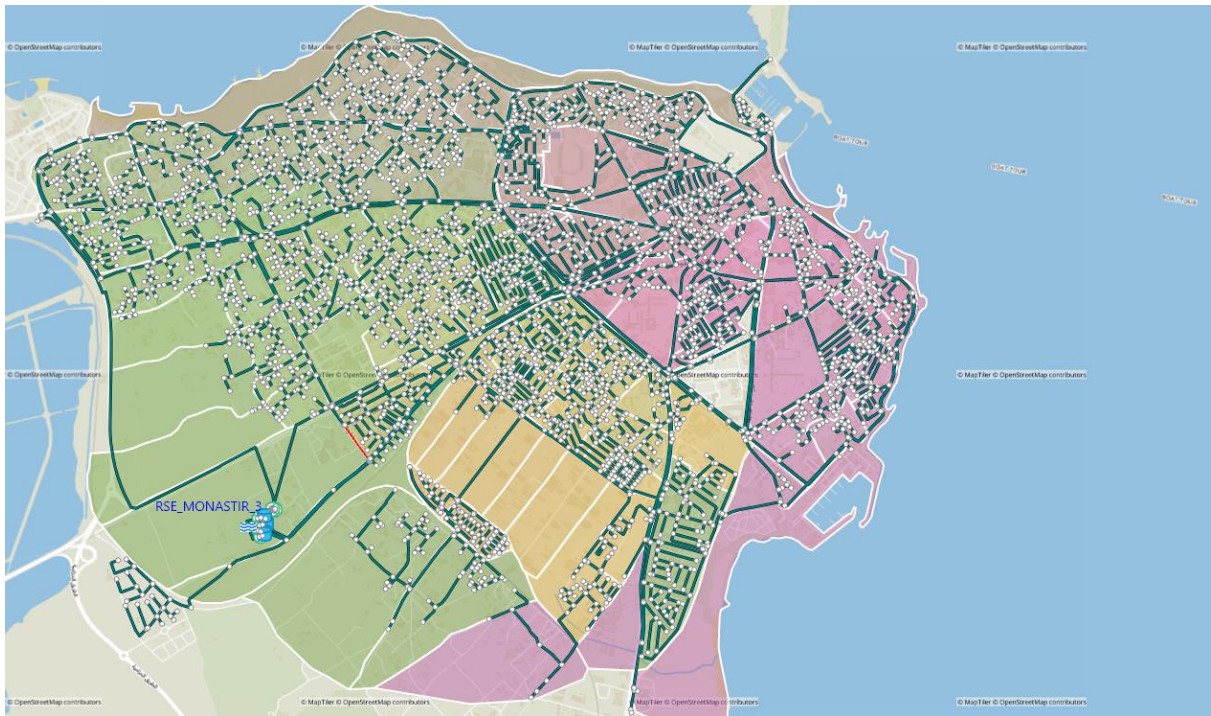
## 2.2 Sectorisation et consommation

La sectorisation sur le réseau de Monastir a été définie par la mise en place des vannes fermées qui ont permis d’isoler les deux zones principales : la zone basse et la zone haute.



**Figure 2-6: Sectorisation du réseau de Monastir (rouge : zone haute ; bleu : zone basse)**

Un deuxième niveau de sectorisation a été mis en place dans le modèle. Il est issu des plans KMZ transmis par la SONEDE, contenant les informations des « tournées » (ou zones de consommation) sur le réseau. Ces zones ont été définies afin de pouvoir injecter la demande en eau dans le modèle par zone de consommation.

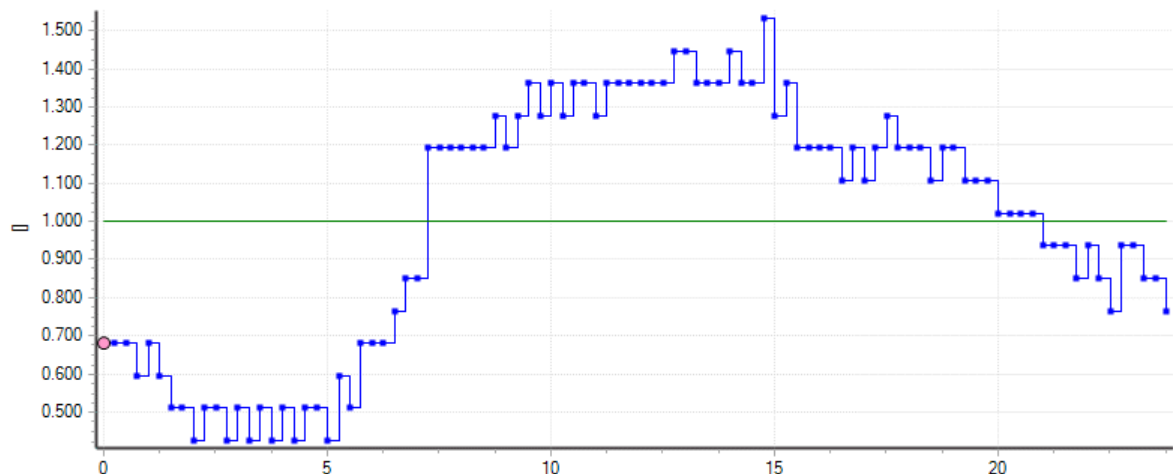


**Figure 2-7: Définition des tournées sur MIKE+**

Après avoir mis en place la sectorisation du réseau, l'affectation des consommations a donc été réalisée à partir du fichier Excel des tournées transmis par la SONEDE. Un traitement en amont du fichier clients avait d'abord été effectué afin de bien géocoder les tournées.

En total, 4 042 nœuds de consommation ont été définis sur le modèle MIKE+.

Une fois les points de consommations affectés aux nœuds du réseau, un profil de consommation y a été alloué afin de modéliser la variation temporelle de la demande en eau sur la journée.



**Figure 2-8: Profil de consommation défini sur le réseau de Monastir**

Ce profil de consommation journalière adimensionnel a été calculé à partir de l'analyse des données de consommation de l'année 2017.

## 2.3 Fonctionnement du réseau

### 2.3.1 Rapports de référence

Pour la description de fonctionnement du système dans MIKE+, les sources de données utilisées sont les suivantes :

- Rapport CTR intelligents
- Rapport de l'activité 2.2.1

Ces deux rapports décrivent le fonctionnement des ouvrages et détaillent les informations nécessaires pour la mise en place du modèle. Ils contiennent des informations sur la géométrie des réservoirs et leur marnage, ainsi que leur mode d'alimentation. Ils précisent également les consignes de fonctionnement des stations de pompage.

### 2.3.2 Télégestion du réseau

La SONEDE ne dispose pas de données de télégestion sur le réseau de distribution de Monastir.

Les données exploitées sont les mesures de pression issues de la campagne de mesures réalisée lors du SDAEP de 2017, durant la période du 17/11/2017 au 20/11/2017. Au total 10 mesures de pression ont été transmises par la SONEDE.



**Figure 2-9: La répartition des points de mesure de pression (en jaune) sur le réseau de Monastir**

### 2.3.3 Entrevues avec les services de la SONEDE

L'objectif des entrevues avec les services de la SONEDE a été de collecter le maximum d'informations sur le fonctionnement du réseau.

Elles se sont déroulées au mois d'octobre 2023, simultanément aux visites de terrain.

## 2.4 Hypothèses sur les données manquantes ou incertaines

Lors de la construction et du calage du modèle, plusieurs hypothèses ont été choisies et définies en cas de non-confirmation de données ou de l'absence de données :

- Tous les tronçons du SIG ont été conservés et considérés comme fonctionnels ;
- Le diamètre appliqué est le diamètre intérieur des conduites ;
- Les diamètres manquants ont été interpolés selon les conduites adjacentes ;
- Les élévations manquantes ont été interpolées par rapport au TN ;
- La sectorisation a été définie selon le fichier KMZ des vannes et la carte des zones haute et basse ;
- L'alimentation des réservoirs de Monastir via les eaux du nord a été modélisée comme une source constante avec des vannes régulatrices de débit permettant le remplissage/vidange des réservoirs ;
- Le marnage des réservoirs a été défini en se basant sur le rapport ;
- Les profils de consommation ont été définis avec les données de 2017.

## 2.5 Performance du modèle

Une fois le modèle construit, nous avons procédé à la configuration d'une première simulation test dans le but d'étudier le comportement du modèle afin de le stabiliser.

### 2.5.1 Configuration de la simulation

- Type de simulation : Simulation période étendue
- Durée: 24 heures
- Pas-de-temps hydraulique : 15 min
- Pas-de-temps du profil de consommation : 15 min
- Pas-de-temps du rapport de simulation : 15 min

### 2.5.2 Elimination des erreurs

À la suite du lancement d'une simulation test, les premiers bugs peuvent être identifiés en consultant en détails le fichier résumé « summary ». Il permet en effet de chercher les erreurs par mots clés et d'identifier rapidement les problèmes à corriger.

Il n'y a pas eu des bugs sur le modèle de distribution lors de cette première simulation test.

### 2.5.3 Convergence du modèle

Le paramètre le plus important à optimiser lors de l'opération du macro-calage est l'équilibre hydraulique du modèle. L'équilibre est représenté par le nombre d'itérations effectuées afin de trouver la balance hydraulique. Selon les références du moteur de calcul EPANET et notre expérience sur le logiciel MIKE+, le nombre seuil est défini à 40 itérations. Au-delà de ce nombre, l'équilibre du modèle est faussé.

Le nombre maximum d'itérations a donc été établie à 40 la configuration de la simulation du modèle de Monastir.

Ce niveau n'a jamais été atteint puisque le modèle de Monastir tourne très rapidement et trouve son équilibre au bout de quelques itérations seulement.

```

Hydraulic Status:
-----
0:00:00: Balancing the network:

Trial 1: relative flow change = 2.752832
Trial 2: relative flow change = 0.454784
Pump POMPE_MONASTIR_4 switched from open to closed
Trial 3: relative flow change = 0.289969
Trial 4: relative flow change = 0.071557
Trial 5: relative flow change = 0.009885
Trial 6: relative flow change = 0.000452
          maximum flow change = 0.1091 for Link D44T-00006268
          maximum head error = 0.0002 for Link D44T-00005423

0:00:00: Balanced after 6 trials
0:00:00: Reservoir EAUX_NORD is emptying
0:00:00: Tank RSE_MONASTIR_1 is emptying at 2.50 m
0:00:00: Tank RSE_MONASTIR_2 is filling at 2.50 m
0:00:00: Tank RSE_MONASTIR_3 is filling at 2.50 m
0:00:00: Tank RSE_MONASTIR_4 is filling at 2.50 m
0:00:00: Pump POMPE_MONASTIR_4 closed because cannot deliver head

WARNING: Pump POMPE_MONASTIR_4 closed because cannot deliver head at 0:00:00 hrs.

0:15:00: Balancing the network:

Trial 1: relative flow change = 0.026947
Trial 2: relative flow change = 0.013981
Trial 3: relative flow change = 0.003558
Trial 4: relative flow change = 0.000300
          maximum flow change = 1.9683 for Link D44T-00007664
          maximum head error = 0.0000 for Link D44T-00007664

0:15:00: Balanced after 4 trials

WARNING: Pump POMPE_MONASTIR_4 closed because cannot deliver head at 0:15:00 hrs.

0:30:00: Balancing the network:

```

**Figure 2-10: Extrait du fichier résumé du modèle de distribution de Monastir**

## 2.6 Paramétrage du modèle hydraulique de distribution

### 2.6.1 Principe

Le paramétrage du modèle consiste à un ajustement de certains éléments et paramètres du modèle permettant aux résultats des simulations de coller au plus près avec les mesures enregistrées par la télégestion au cours de la semaine de calage du 17/11/2017 au 20/11/2017.

Plusieurs paramètres peuvent être ajustés :

**Tableau 2-1 : Liste des paramètres ajustables pendant le calage du modèle**

Calage	Paramètres ajustables
Débit	Profil de consommation
	Consommation moyenne journalière par zone
	Fuites
Niveau	Règles de contrôle
	Caractéristiques et schématisation des réservoirs
Pression	Rugosité

La méthodologie consiste à commencer par un calage des niveaux des réservoirs et débits, et ensuite des pressions. Cet exercice est réalisé de manière systématique, secteur par secteur, en commençant par les secteurs périphériques aux extrémités du réseau, pour revenir vers les sources.

L'observation se fait sur une semaine, pour laquelle les courbes de modulation journalière de consommation sont répétées. Les simulations finales sont donc exécutées sur une durée de 7 jours avec un pas de temps de 15 min. Le temps de calcul reste très rapide.

Pour évaluer le calibrage du modèle, les critères suivants sont étudiés :

- Adéquation des marnages des réservoirs mesurés avec le modèle,
- Reproduction de la répartition de la charge hydraulique des deux zones basse et haute,
- Adéquation avec les valeurs de pression de la campagne de mesure.

Les résultats du paramétrage du modèle, illustrés par la comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées par le modèle sont présentées dans les chapitres suivants.

## 2.6.2 Marnage des quatre réservoirs

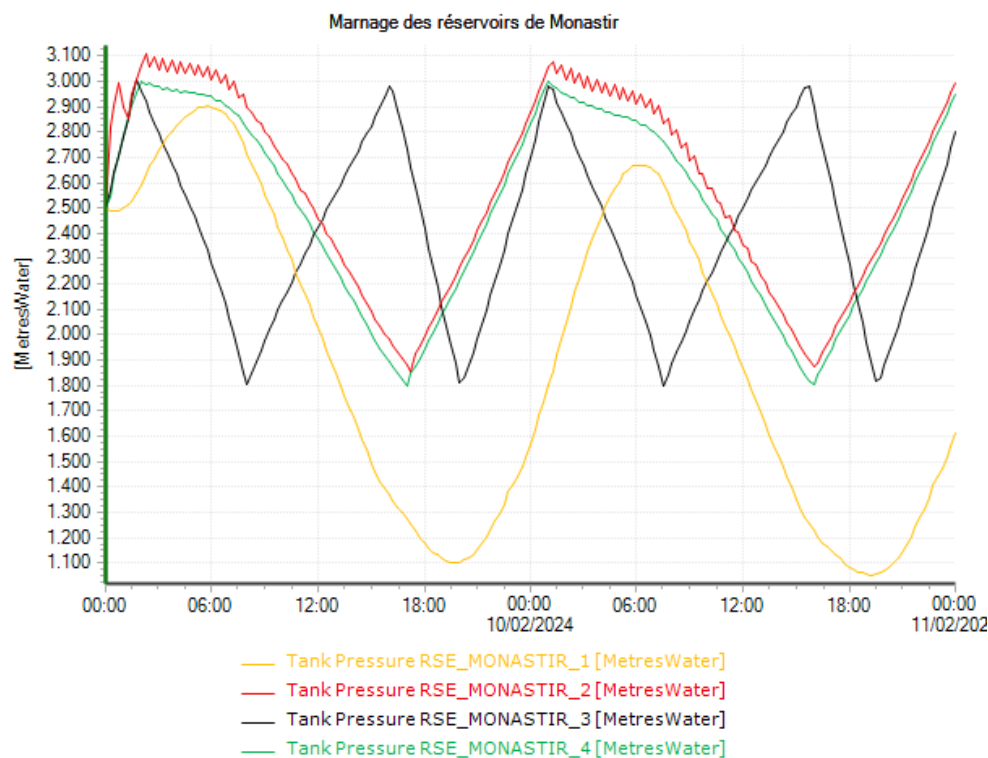
En l'absence de mesures de débit en entrée et sortie des réservoirs, des vannes régulatrices de débits asservies au niveau ont été placées à l'amont, afin de pouvoir reproduire le marnage.

Ces vannes suivent des règles de contrôle qui dépendent des niveaux dans les réservoirs.

Vanne entrée	Niveau fermeture	Niveau ouverture	Débit d'entrée
Monastir 1	2.9m	1.1m	25
Monastir 2	3m	1.8m	200
Monastir 3	3m	1.8m	700
Monastir 4	3m	1.8m	400

**Figure 2-11: Règles de contrôle appliquées en entrée des réservoirs de Monastir**

Les courbes de marnage obtenues reflètent les règles de contrôle qui ont été imposées.



**Figure 2-12: Courbes de marnage des réservoirs de Monastir**

### 2.6.3 Représentation des zones de pression haute et basse

Le deuxième critère sur lequel nous nous sommes basés afin de se rapprocher de la réalité du terrain, était la représentativité des deux zones de pression haute et basse de Monastir, tel que présenté ci-dessous.

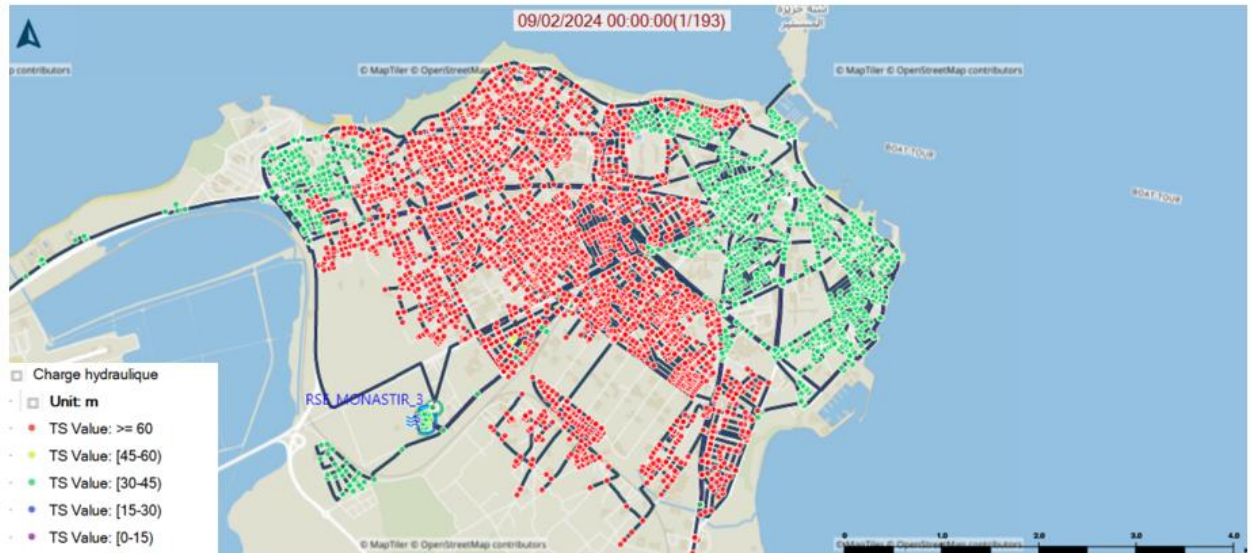


Figure 2-13: Carte de la charge hydraulique en mètre de colonne d'eau sur le réseau de Monastir

### 2.6.4 Comparaison des valeurs de pression calculées et mesurées

Pour valider le calage du modèle, nous avons effectué une comparaison entre les valeurs de pression issues de la campagne de mesure de 2017 et les valeurs calculées par le modèle hydraulique.

La carte de pression ci-dessous reflète les pressions sur le terrain. Les pressions sont globalement assez faibles (entre 1 et 4,5 bars) du fait de la topographie de la zone qui est relativement plate.

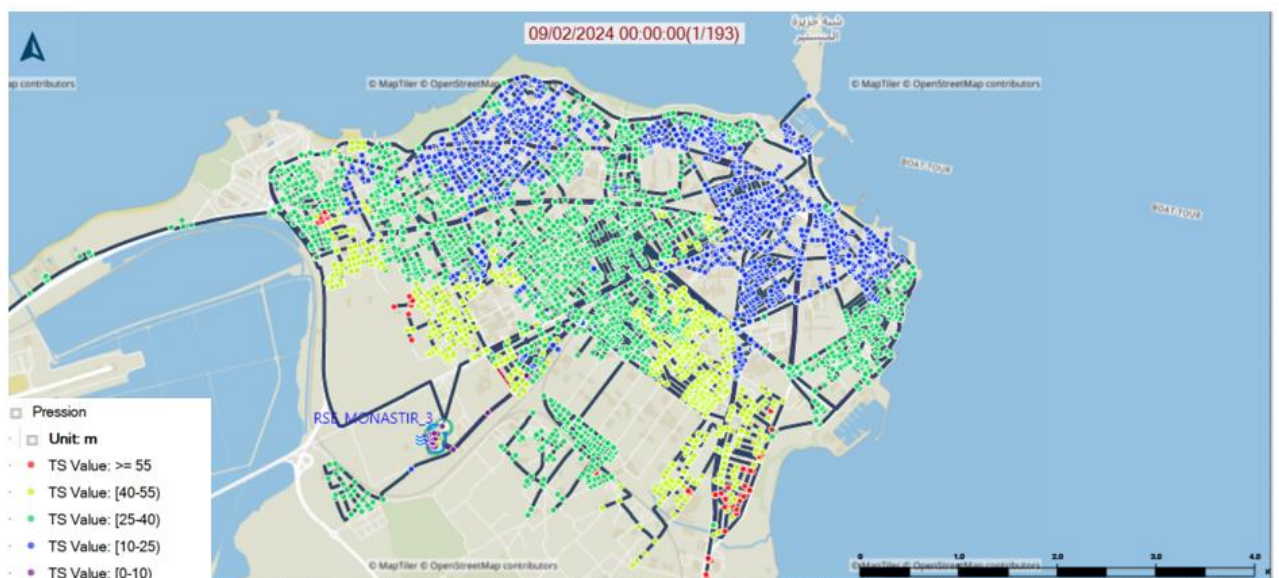


Figure 2-14: Carte des pressions du réseau de Monastir en mètre de colonne d'eau (mCE)

La comparaison des pressions s'est portée sur les pressions de pointe.

**Table 2-1: Tableau de comparaison des pressions mesurées et modélisée (en heure de pointe)**

N° sur le plan	Pression mesurée (bar)	Pression modélisée (bar)	Différence (absolue)
PMn-1	4.26	4.67	0.41
PMn-2	3.54	3.59	0.05
PMn-3	4.72	4.67	0.05
PMn-4	2.42	1.70	0.72
PMn-5	2.83	2.62	0.21
PMn-6	2.96	2.99	0.03
PMn-7	5.94	5.37	0.57
PMn-9	5.14	5.25	0.11
PMn-10	7.12	7.25	0.13

Les écarts entre les pressions mesurées et les pressions modélisées restent relativement faibles sur la majorité des points (<0.75bars). Ceci permet de conclure que la qualité du calage du modèle, au regard des mesures disponibles, est satisfaisant.

## 2.7 Propositions d'amélioration

### 2.7.1 Performance réseau Monastir

D'après l'étude de performance réalisée dans le cadre du projet et présentée dans le rapport *Performance Assessment and Study Case, Deliverable 2.2.1*, les rendements du réseau de distribution de la ville de Monastir enregistrés au cours de la période allant de 2017 à 2021 varient entre 82 et 86%. Afin d'améliorer ce rendement, une des préconisations que nous pouvons proposer sur le réseau de distribution de Monastir est de retravailler la sectorisation.

La sectorisation est un paramètre important dans la gestion et le suivi des fuites. Une sectorisation plus fine permettrait de mieux gérer les pertes grâce à la maîtrise des volumes entrant et sortant dans des périmètres restreints et contrôlés. Cette maîtrise, qui facilite l'identification des tronçons fuyards et les interventions rapides sur le terrain, permettrait donc augmentation du rendement du réseau.

La zone haute du réseau de Monastir, composée de 200Km linéaire fortement maillé en zone très urbaine, constitue un secteur difficile à gérer.

Nous proposons de diviser cette zone en 5 sous-secteurs avec des linéaires entre 30 et 50 km, par la pose 8 débitmètres de sectorisation (entrée et sortie de secteur), tel que présenté ci-dessous :

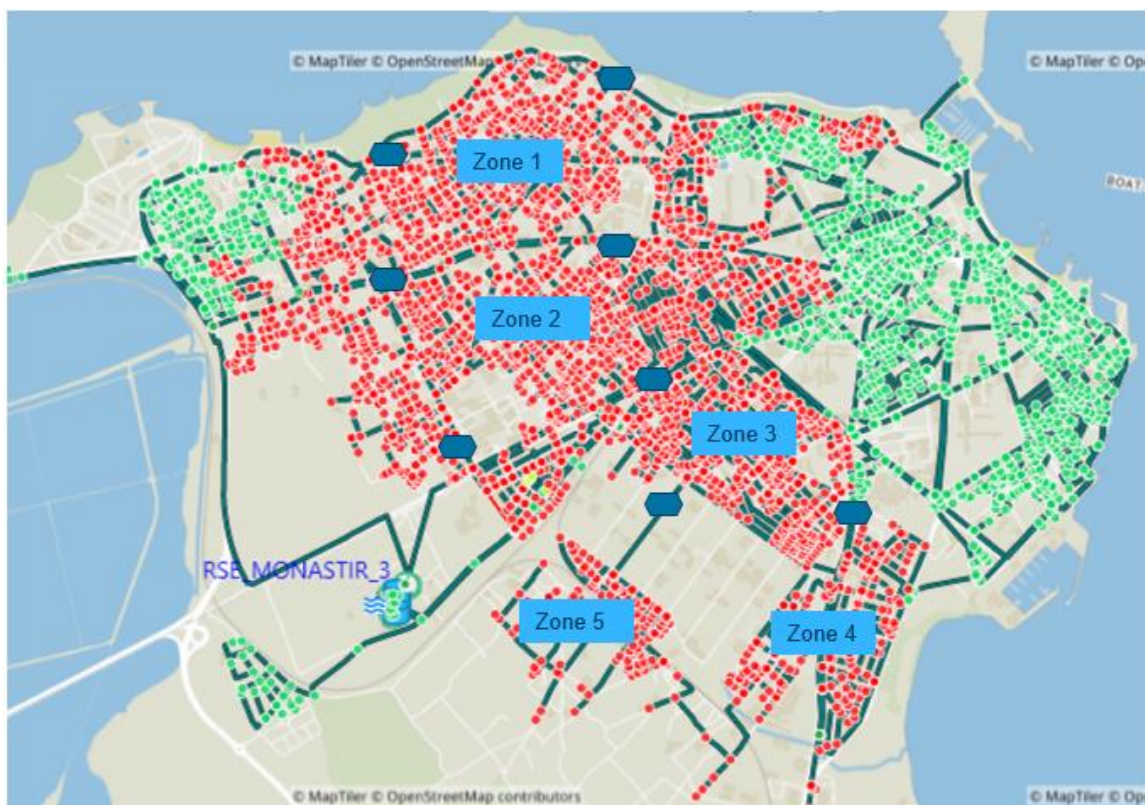


Figure 2-15: Proposition de sectorisation sur le réseau de distribution Monastir

## 2.7.2 Fiabilité du modèle hydraulique de distribution

Le modèle de distribution de Monastir a été calibré sur la base des données assez peu nombreuses et datant de 2017. Dans le but de l'améliorer pour fiabiliser son exploitation, nous pouvons recommander :

- A- Mener une nouvelle campagne de mesures ou suivre en télégestion les points suivants :
- Débit et pression des pompes de Monastir vers l'étage haut.
  - Niveau de tous les réservoirs
  - Débit par compteurs télégerés pour les plus gros consommateurs ayant des profils journaliers atypiques (non domestiques).
  - Plusieurs points de pressions répartis sur le réseau
- B- Caler le modèle sur la base de ces nouvelles mesures pendant une période de pointe de consommation en eau.

### 3 Modèle hydraulique de production

Le système de production globale est destiné à alimenter en eau potable les régions du Cap Bon, du Sahel et de Sfax à partir des eaux de Nord. Il comporte essentiellement (de l'amont vers l'aval):

- Le complexe de traitement et de production de Belli ;
- Les deux conduites d'adduction des eaux de Nord entre Belli et Sousse (BC3)
- La conduite d'adduction des eaux du nord entre BC3 et les réservoirs de Sfax
- La conduite d'adduction du Sahel central et Sahel sud.

Le réseau d'adduction de Monastir qui a été construit par DHI commence au niveau du complexe de production de Belli et représente le transfert des eaux du nord en passant par les réservoirs de tête, SS1, SS2, BC1, BC2, les réservoirs Ezzouhour, les réservoirs Monastir, les réservoirs Moûtmar, les réservoirs Harkoussia et le départ vers Sfax.

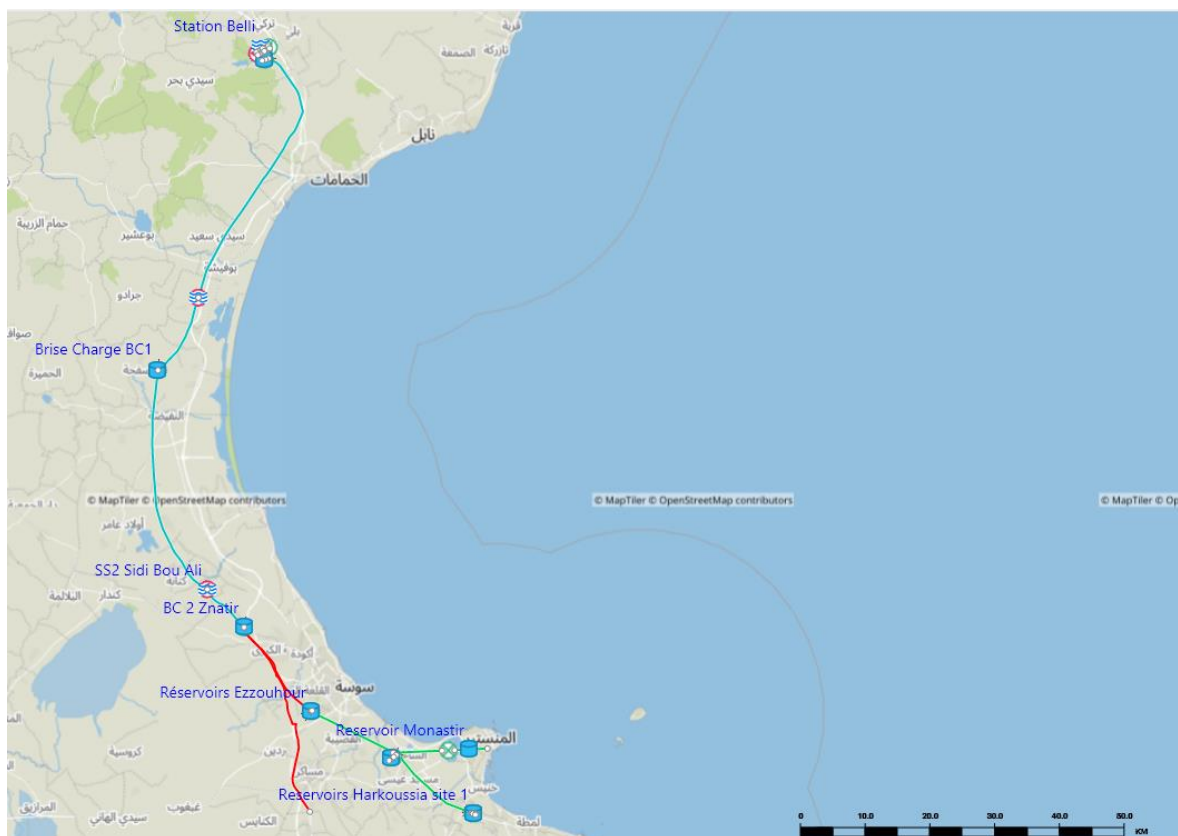


Figure 3-1: Le modèle d'adduction de Monastir

#### 3.1 Réseaux

La construction du modèle d'adduction suit les mêmes étapes que celle du modèle de distribution présentée au chapitre précédent.

Les données utilisées sont issues du SIG envoyé par la SONEDE ; elles sont listées aux paragraphes suivants.

### 3.1.1 Conduites et nœuds de réseau

Le réseau d'adduction est composé d'environ 200Km linéaire de conduites. Ces conduites ont été récupérées sous format Shape (SIG) et importées dans MIKE+ avec les attributs suivants :

- Longueur,
- Matériau,
- Diamètre,
- Description.

Les conduites n'avaient pas d'identifiants SIG d'origine. Les identifiants attribués sont les MUID créés automatiquement par MIKE+.

Les nœuds définissant les conduites du réseau ont été importés à partir de la couche SIG de la SONEDE.

Une majeure partie des nœuds a été créé automatiquement sur MIKE+ via l'outil de réparation topologique. Cet outil permet de bien gérer la topologie des conduites qui permet de garder la structure exacte du réseau.

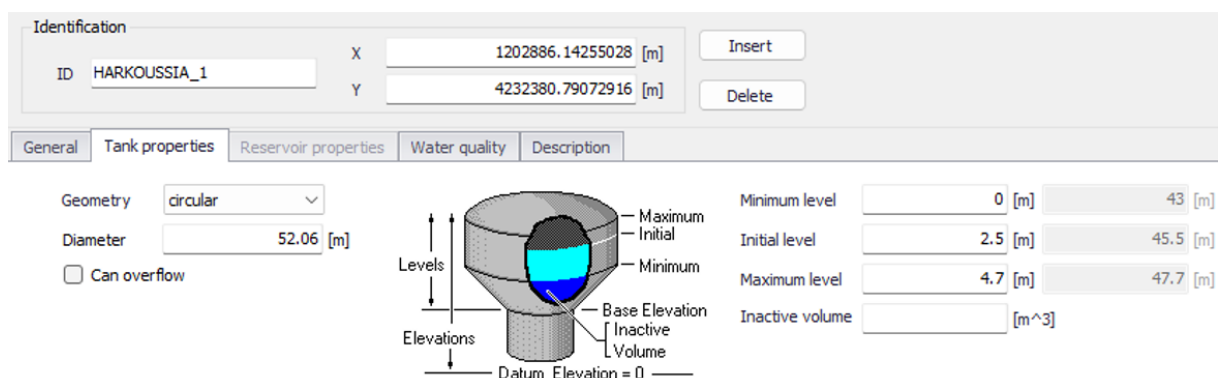
Une fois les nœuds créés, une vérification de la connectivité des conduites a été faite pour s'assurer que toutes les conduites du réseau sont connectées et garantir l'absence de parties hydrauliquement isolées.

### 3.1.2 Réservoirs

Le modèle d'adduction du réseau de Monastir comprend 8 ouvrages de stockage : Le réservoir de tête à la station Belli, les brise charge1 et 2 (Znatir), les réservoirs de Ezzouhour, Moûtmar, Monastir, Harkoussia 1 et 2.

La définition des réservoirs est faite selon la même méthode que pour le modèle de distribution avec les données listées ci-dessous :

- Géométrie,
- Diamètre,
- Cote radier,
- Niveau minimum et maximum,
- Niveau initial,
- Volume.



Property	Value	Unit
Minimum level	0	[m]
Initial level	2.5	[m]
Maximum level	4.7	[m]
Inactive volume		[m <sup>3</sup> ]

Figure 3-2: Exemple de définition du réservoir Harkoussia

### 3.1.3 Les pompes

Seul le pompage de production permettant l'alimentation du réseau à partir de Belli a été modélisé. La station de pompage est composée de 8 pompes dont 6 pompes marchent en simultanée au maximum.

Les pompes ont toutes les mêmes caractéristiques : HMT= 72m et Q= 2 520m<sup>3</sup>/h.

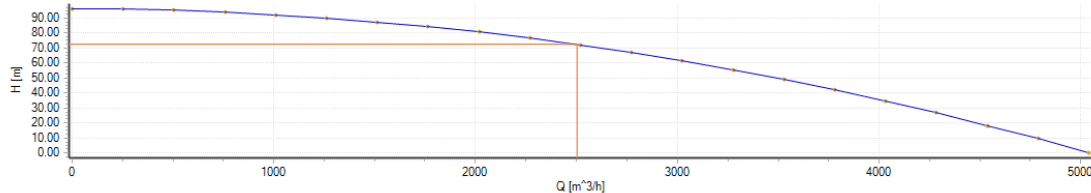


Figure 3-3: Courbes caractéristiques des pompes de Belli

## 3.2 Fonctionnement du système d'adduction

### 3.2.1 Données de référence

Pour la description de fonctionnement dans le modèle MIKE+, les sources de données suivantes ont été exploitées :

- Rapport de l'activité 2.2.1
- Synoptiques transmises par la SONEDE
- Fichier KMZ du réseau
- Fichiers Excel des pompes

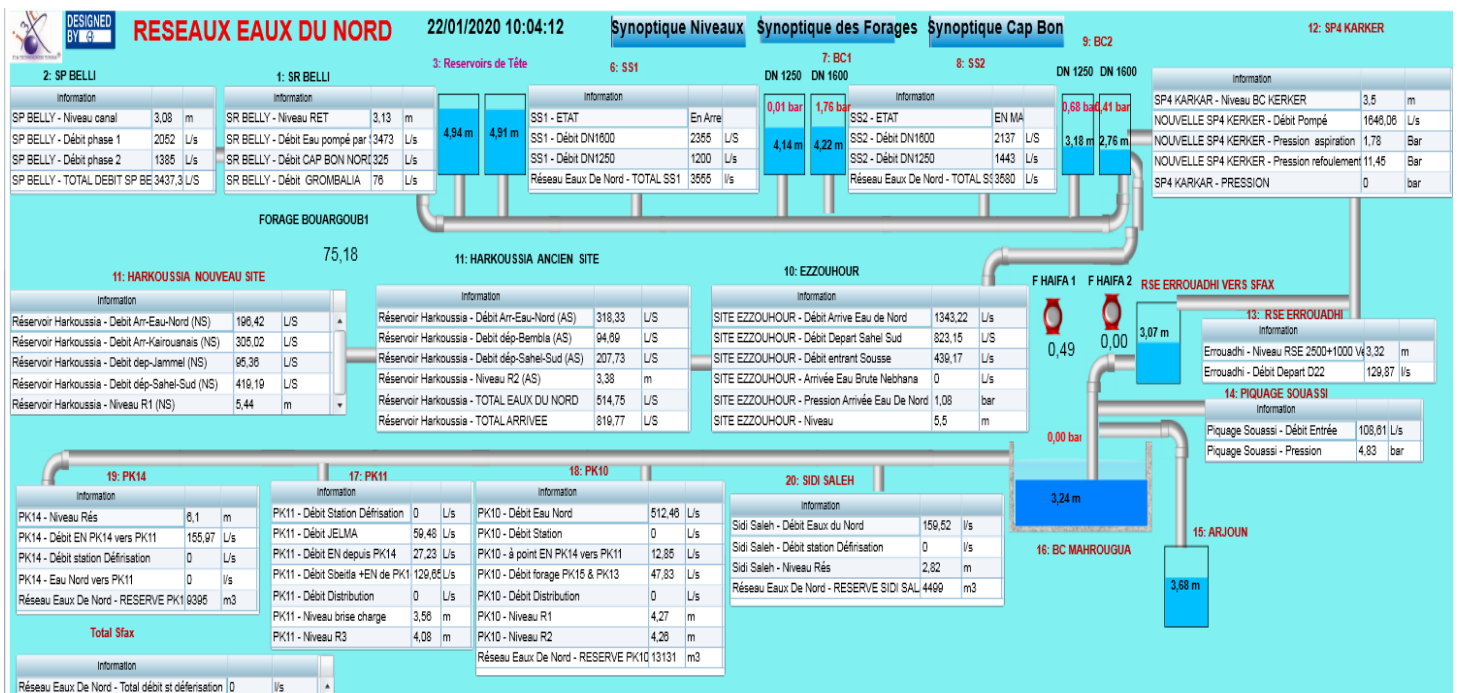
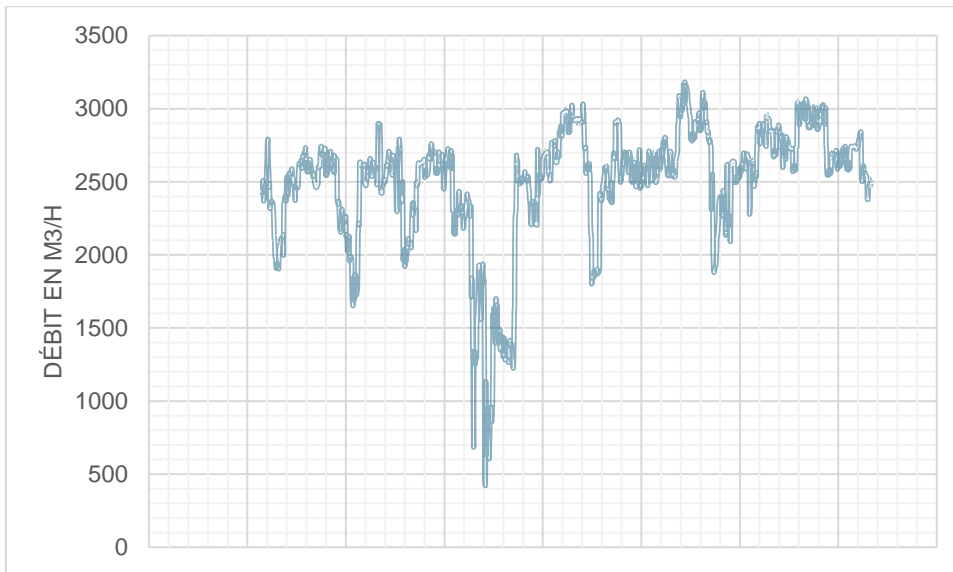


Figure 3-4: Exemple de synoptique utilisé pour la construction du modèle de production

### 3.2.2 Données de la télégestion

Sur le réseau de production d'eau, les données de télégestion transmises par la SONEDE pour la construction et le calibrage des modèles sont les suivantes :

- Débit de production de Belli,
- Niveau du réservoir de tête,
- Niveau du réservoir BC1,
- Niveau du réservoir BC2,
- Débit SS1,
- Débit SS2.
- Niveau du réservoir Ezzouhour,
- Débit vers Ezzouhour,
- Débit vers Harkoussia,



**Figure 3-5: Exemple de données issues de la télégestion : débit au départ de Harkoussia**

### 3.2.3 Hypothèses de construction et de calage du modèle de production

Lors de la réalisation du modèle, plusieurs hypothèses ont été définies afin de remédier aux éventuels manques de données :

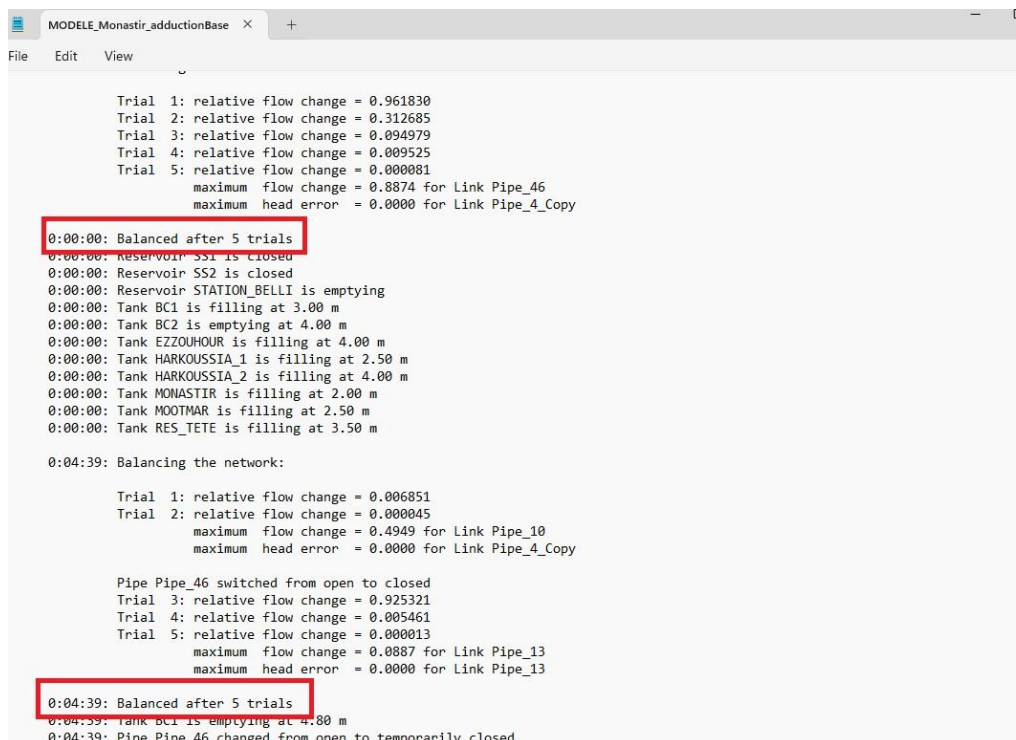
- La modélisation démarre en aval de la production (pas de modélisation de traitement).
- Les diamètres manquants ont été interpolés selon les conduites adjacentes.
- L'alimentation des réservoirs a été modélisée avec des vannes régulatrices de débit permettant leur remplissage/vidange.
- Le marnage des réservoirs a été défini en se basant sur les informations du rapport et les valeurs de télégestion.
- La consommation en eau appliquée à l'aval des réservoirs correspond à la valeur moyenne calculée sur les séries temporelles du modèle de distribution.
- Le profil de consommation journalier calculé sur les données de Monastir a été appliqué à la totalité du modèle.
- Le volume partant vers Sfax a été calculé en faisant la soustraction entre le volume total de Belli et le volume distribué sur les autres secteurs.
- Les piquages se trouvant sur la conduite d'adduction des eaux de Nord ne sont pas modélisés (absence de la donnée).

### 3.3 Paramétrage du modèle hydraulique d'adduction

#### 3.3.1 Performance du modèle

Le travail de configuration et vérification de la première simulation est identique que pour le modèle de distribution.

Le modèle de base (scénario actuel) tourne et converge très rapidement. La simulation se lance sur une semaine entière (pas de temps de 15 min), avec un temps de calcul très faible.



```

MODELE_Monastir_adductionBase
File Edit View

Trial 1: relative flow change = 0.961830
Trial 2: relative flow change = 0.312685
Trial 3: relative flow change = 0.094979
Trial 4: relative flow change = 0.009525
Trial 5: relative flow change = 0.000081
        maximum flow change = 0.8874 for Link Pipe_46
        maximum head error = 0.0000 for Link Pipe_4_Copy

0:00:00: Balanced after 5 trials
0:00:00: Reservoir SS1 is closed
0:00:00: Reservoir SS2 is closed
0:00:00: Reservoir STATION_BELLI is emptying
0:00:00: Tank BC1 is filling at 3.00 m
0:00:00: Tank BC2 is emptying at 4.00 m
0:00:00: Tank EZZOUHOUR is filling at 4.00 m
0:00:00: Tank HARKOUSSIA_1 is filling at 2.50 m
0:00:00: Tank HARKOUSSIA_2 is filling at 4.00 m
0:00:00: Tank MONASTIR is filling at 2.00 m
0:00:00: Tank MOOTMAR is filling at 2.50 m
0:00:00: Tank RES_TETE is filling at 3.50 m

0:04:39: Balancing the network:

Trial 1: relative flow change = 0.006851
Trial 2: relative flow change = 0.000045
        maximum flow change = 0.4949 for Link Pipe_10
        maximum head error = 0.0000 for Link Pipe_4_Copy

Pipe Pipe_46 switched from open to closed
Trial 3: relative flow change = 0.925321
Trial 4: relative flow change = 0.005461
Trial 5: relative flow change = 0.000013
        maximum flow change = 0.0887 for Link Pipe_13
        maximum head error = 0.0000 for Link Pipe_13

0:04:39: Balanced after 5 trials
0:04:39: Tank BC1 is emptying at 4.00 m
0:04:39: Pipe Pipe 46 changed from open to temporarily closed
  
```

**Figure 3-6: Extrait du fichier résumé pour le modèle adduction**

Afin de caler le modèle d'adduction nous nous sommes basés sur deux critères :

- Adéquation du marnage des réservoirs
- Bilans volumiques : " water balance"

#### 3.3.2 Marnage des réservoirs

Le marnage est l'effet selon lequel le niveau d'eau dans un réservoir oscille entre un niveau haut et un niveau bas, sans jamais atteindre le trop plein ni la vidange totale.

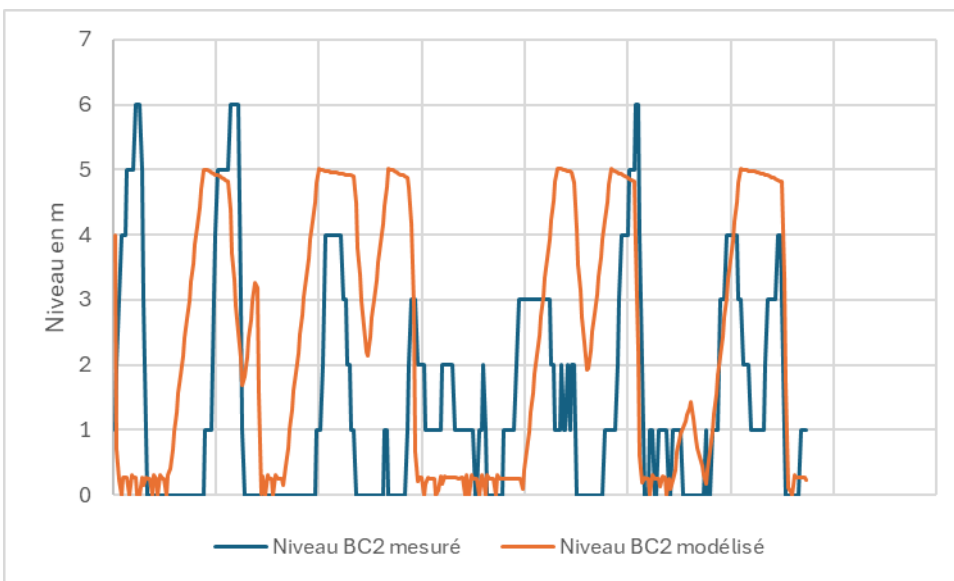
Le marnage des différents réservoirs a été généré dans le modèle grâce à la mise en place des règles de contrôle agissant sur le vidange/remplissage en fonction des niveaux d'eau. Ces règles ont été appliquées via des vannes régulatrices de débits (FCV).

Le paramétrage du modèle consiste à déterminer la valeur de débit d'entrée permettant aux réservoirs de marnage dans les conditions de demande en eau appliquées au modèle.

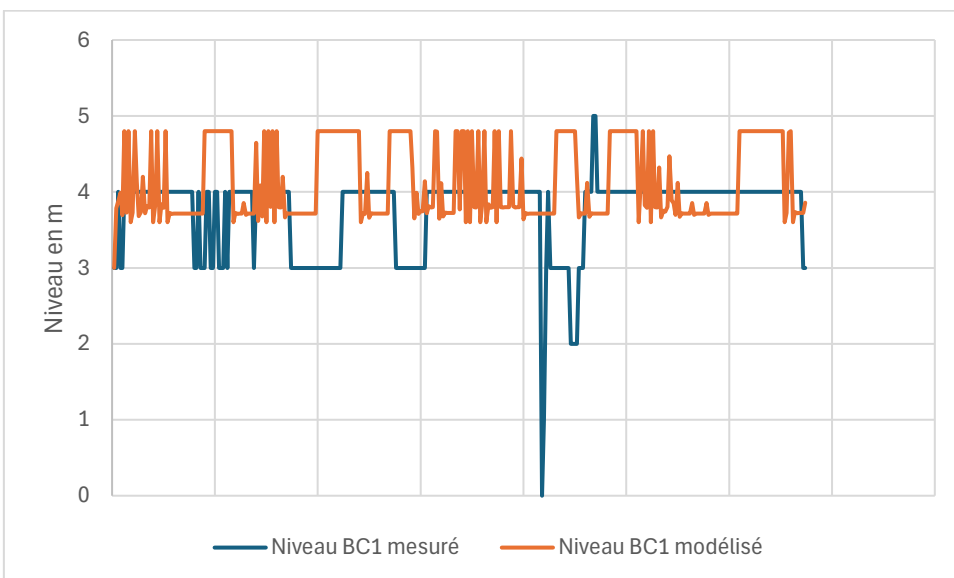
Vanne entrée réservoir	Niveau fermeture	Niveau ouverture	Débit d'entrée
BC1	5m	3.8m	500 m3/h
BC2	4m	2.7m	500 m3/h
Réservoir de tête	5m	3.6m	400 m3/h
Rezzoouhour	5.2m	4m	3150 m3/h
Harkoussia 1	4.5m	3m	1146 m3/h
Harkoussia 2	4.5m	3m	707 m3/h
Moôtmar	4m	2.8m	320 m3/h
Monastir	3.2m	2m	630 m3/h

**Figure 3-7: Règles de contrôle des réservoirs sur le modèle adduction**

Le contrôle du débit d'entrée permet ainsi le marnage des réservoirs selon la même amplitude que celle mesurée sur le terrain, comme illustré ci-dessous :

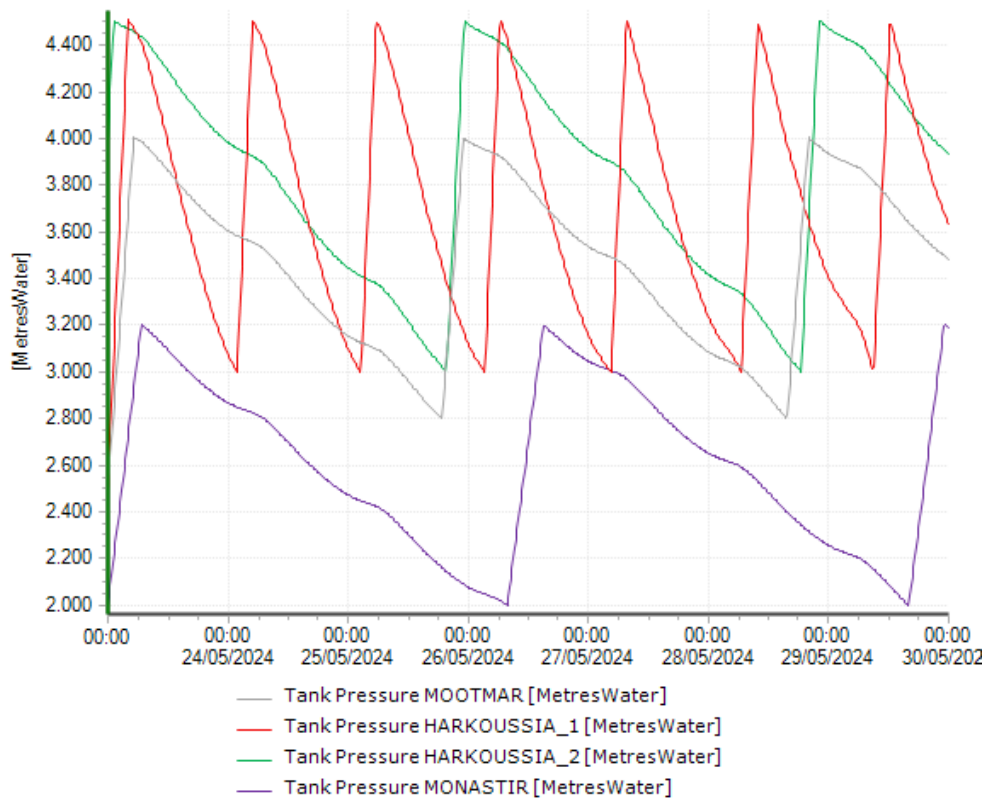


**Figure 3-8: Exemple d'une comparaison du niveau mesuré et modélisé : Réservoir BC2**



**Figure 3-9: Exemple d'une comparaison du niveau mesuré et modélisé : réservoir BC1**

Les réservoirs du modèle d'adduction marnent de manière satisfaisante : aucun réservoir ne se vide ni ne déborde sur les 7 jours de simulation.



### 3.3.3 Bilans volumiques

Ce deuxième critère évalue également la qualité du calage dans la mesure où il reflète la justesse des déplacements d'eau entre les entrées et sorties du modèle.

Les volumes en entrée et sortie des réservoirs sont étudiés et comparés, afin de garantir le « water balance » par secteur de distribution.

**Table 3-1: Tableau de bilans volumiques des réservoirs**

Réservoir	Volume cumulé sur une semaine (m <sup>3</sup> )		Ecart
	Entrée	Sortie	
Réservoir de tête	67 200	65 855	2%
Réservoir de Monastir	11 340	9 055	22%
Réservoir Moûtmar	7 920	7408	7%
Réservoir Harkoussia 2	5 832	5 761	1%
Réservoir Harkoussia 1	27 217	23 049	17%
Réservoir Ezzouhour	50 832	41 159	21%
Moyenne			11%

La différence de 11% en moyenne sur les bilans volumiques des réservoirs s'explique du fait que les réservoirs n'ont pas les mêmes horaires de remplissage et de vidange. Chaque réservoir possède un cycle propre. Les réservoirs sont considérés comme pleins en début de simulation, et peuvent ne pas avoir terminé leur cycle en fin de simulation.

Le bilan moyen est satisfaisant au regard des données disponibles.

### 3.4 Propositions d'amélioration

#### 3.4.1 Fiabilité du modèle hydraulique de production

Le modèle de production vers Sousse et Monastir a été calibré sur la base des données concernant en particulier les zones de Monastir et Sousse. Dans le but de l'améliorer pour fiabiliser son exploitation, nous pouvons recommander d'intégrer les piquages et les débits au sud de Monastir.

- A- Mener une nouvelle campagne de mesures ou suivre en télégestion les points suivants :
- Débit en sortie de chaque réservoir.
  - Niveau de tous les réservoirs.
- B- Caler le modèle sur la base de ces nouvelles mesures pendant une période de pointe de consommation en eau.

## 4 Modèle de production futur

Un modèle futur a été construit sur la partie adduction du réseau d'eau.

Son objectif est de tester la capacité des projets futurs à alimenter le réseau d'adduction et satisfaire la demande liée à l'évolution démographique sur le territoire.

Ce modèle a été défini comme un scénario du modèle actuel, en effectuant les modifications suivantes :

- Augmentation de la consommation en eau des différents secteurs
- Modélisation du barrage de Kalaa Kebira comme ressource d'appoint
- Modélisation de la station de désalinisation comme ressource de secours

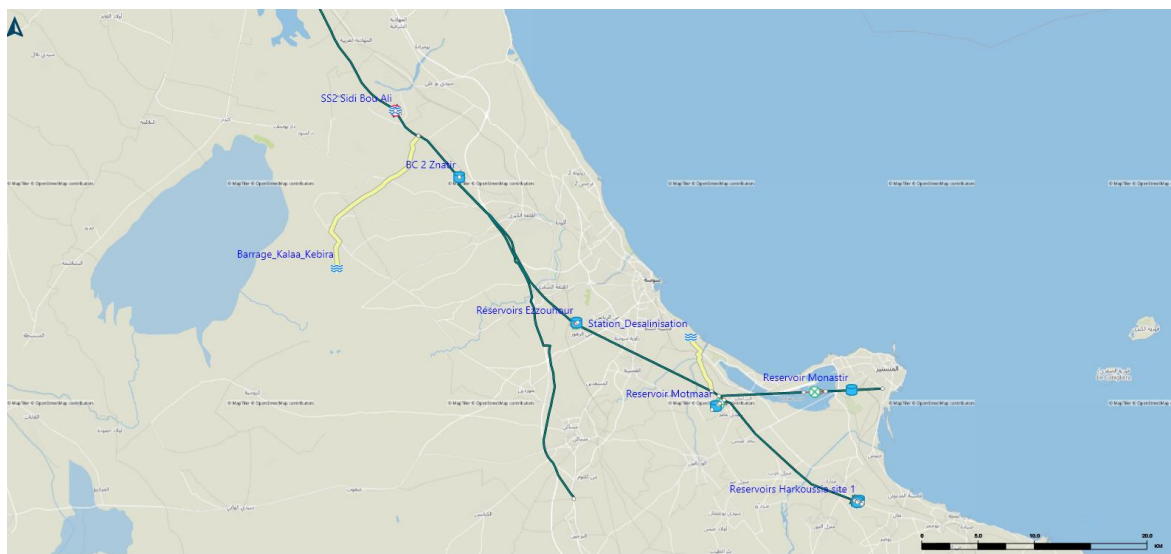
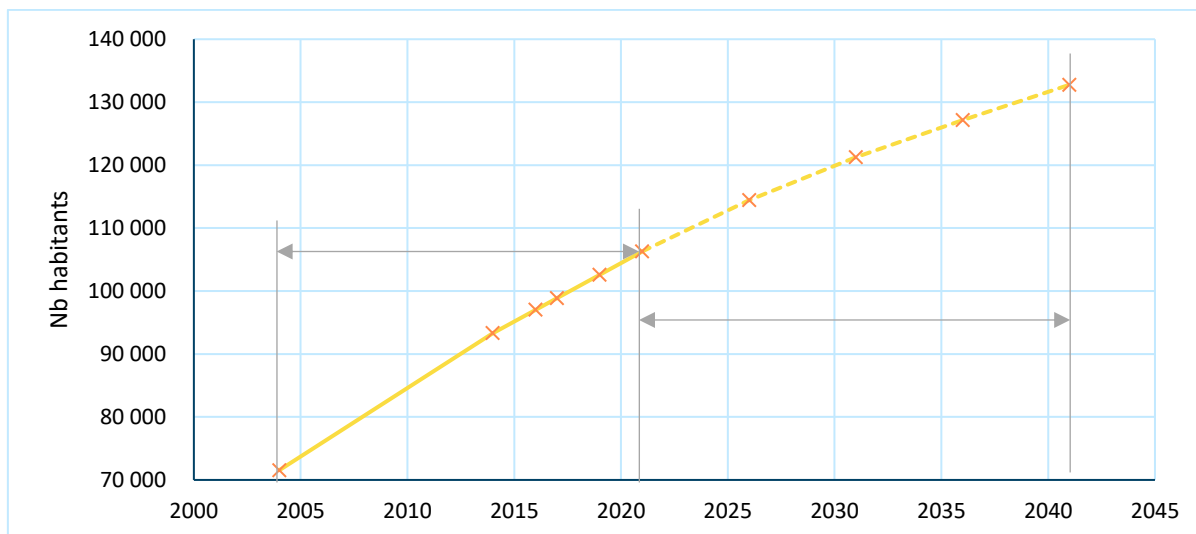


Figure 4-1: Réseau d'adduction de Monastir après l'ajout des projets futurs

### 4.1 Données utilisées et hypothèses sur l'état futur

#### 4.1.1 Evolution de la consommation en eau

Un coefficient de croissance a été calculé afin de modéliser l'augmentation de la consommation. Les données de projection d'évolution de la population de Monastir entre 2017 et 2041 ont été utilisées pour ce calcul.



**Figure 4-2: Projection de l'évolution de la population de la ville de Monastir entre 2004 et 2041**

Par projection de l'évolution démographique, la population de 2041 aura augmenté d'un tiers (34%) par rapport à la population de 2017.

**Un coefficient de 1.34 est donc appliqué sur la consommation afin de modéliser la demande en eau à l'horizon 2041 - en faisant l'hypothèse que, en incluant la demande industrielle et touristique, la consommation moyenne par habitant reste inchangée.**

Ce coefficient a été appliqué à tous les points de consommation de Monastir et généralisé sur toutes les autres zones. Cette hypothèse de travail a été choisie au regard de l'absence de données sur les autres secteurs.

Ce premier scénario ne tient pas compte de l'évolution de la consommation suite à l'installation de compteurs ou de l'amélioration de la performance du réseau (diminution des pertes). Cela sera étudié plus en profondeur lors de l'activité d'optimisation énergétique.

#### 4.1.2 Fonctionnement des ressources futures

La stratégie opérationnelle qui sera appliquée en présence des nouvelles ressources n'a pas encore été établie de manière définitive par le maître d'ouvrage.

Par conséquent, et dans le but de répondre aux objectifs par la modélisation, leur fonctionnement a été simplifié dans le modèle hydraulique.

Ainsi, dans un premier temps, le barrage Kalaa Kebira et la station de désalinisation ont été modélisés sur MIKE+ comme des sources d'eau avec un niveau hydraulique constant. Cela se traduit par un débit plafonné à la capacité maximale de l'ouvrage et une charge hydraulique fixe en mètre de colonne d'eau.

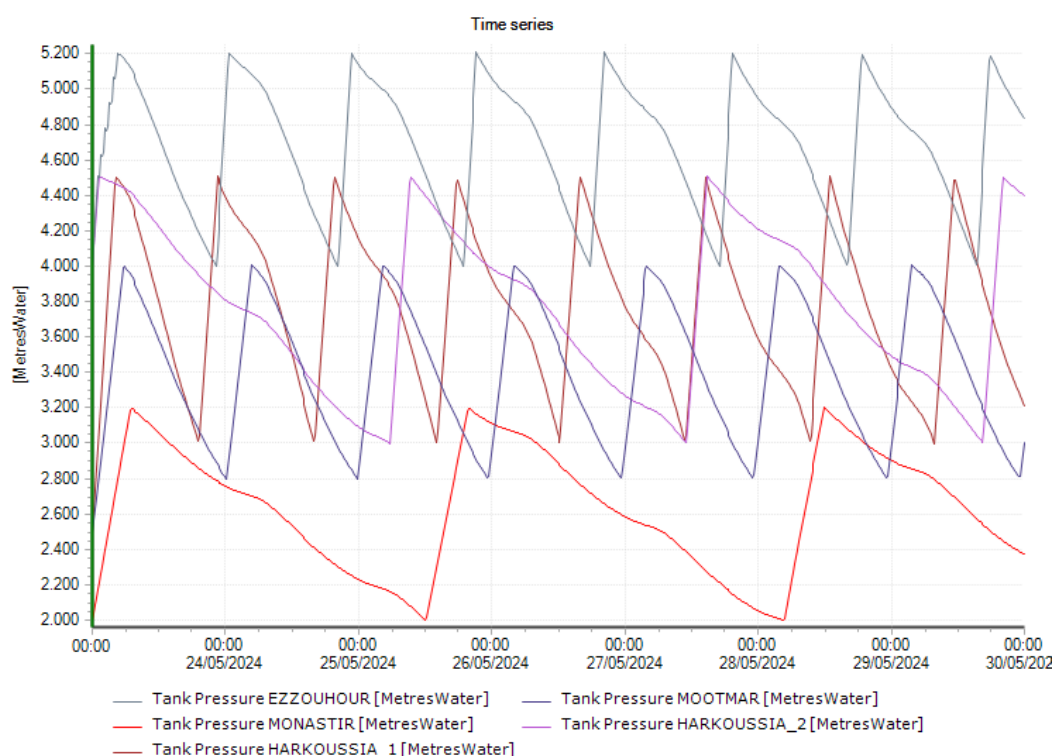
**Table 4-1: Caractéristiques hydrauliques appliquées aux ressources futures dans le modèle**

Ouvrage	Capacité de traitement
Retenue Kalaa Kebira	4 m <sup>3</sup> /s (max 345 000 m <sup>3</sup> /j)
Station de désalinisation	0.6 à 1.16m (m <sup>3</sup> /s) (max 100 000 m <sup>3</sup> /j)

## 4.2 Résultats de la simulation en scénario futur

Des simulations de calcul ont été lancées sur le modèle incluant les modifications à étudier. Le modèle hydraulique converge sur 7 jours, avec des temps de calcul rapide.

Malgré l'augmentation de la demande en eau, nous observons que tous les réservoirs du système maintiennent sur des hauteurs acceptables pendant toute la durée de la simulation (aucun réservoir ne se vide). Selon les premiers résultats, les deux ressources d'appoint permettraient donc de supporter la hausse de consommation d'eau. Le marnage des réservoirs a été étudié afin d'évaluer l'impact des projets futurs.



**Figure 4-3: Marnage des réservoirs sur le modèle d'adduction futur**

Des tests complémentaires doivent être menés sur le modèle afin d'approfondir l'analyse et la stratégie de pompage. Ceux-ci seront réalisés et restitués dans le rapport associé à l'activité d'optimisation énergétique.