

REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture

\*\*\*\*\*

Institution de la Recherche et de

L'Enseignement Supérieur

Agricoles



Ministère de l'Enseignement

Supérieur et de la Recherche

Scientifique

\*\*\*\*\*

Université de Carthage

## Institut National Agronomique de Tunisie

Département de Génie Rural, Eaux et forêts

PROJET DE FIN D'ETUDES

DU CYCLE INGENIEUR

Présenté par :

**Saida Manel**

Spécialité : Génie Rural, Eaux et Forêts

Option : Hydraulique et Aménagement rural

### **Modélisation hydraulique et énergétique de réseau d'adduction KAIROUANNAIS**

Devant le jury composé de :

Mr. Ben Mansour Chaouki

Mr. Nouri Issam

Mr. Baouab Mohamed Hassen

Mme. Tarhouni Jamila

Président du jury

Encadreur INAT

Encadreur SONEDE

Examinatrice



Juin 2015

# Dédicaces

Je dédis ce travail

A ma chère mère AMEL

L'âme qui éclaire ma vie

A mon cher père TAHER

Que Dieu le protège

A ma chère sœur CHAIMA

ma petite qui voit ses rêves dans mes yeux

A mes chers frères MOHAMMED et MAJDI

A celui qui ne sait vers quel il navigue

nul vent n'est jamais favorable (HD)

A Mr Taher Ttir

le père idéal que je lui rencontre dans ma vie

A mes cousins

Les jumeaux qui m'ont accompagné mon chemin

A mes amis

pour tous les bons moments que nous les partageons

A mes enseignants

A tous ceux qui me sont chers

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

# Remerciements

C'est parce que j'ai beaucoup estimé tous ceux qui écouté, conseillé, critiqué et encadré que je tiens à leurs faire part de toute ma gratitude, et plus particulièrement, je tiens à remercier à travers ces courtes lignes :

Mon encadrant INAT Monsieur **Inouiri Issam**, d'avoir accepté d'encadrer ce travail et pour ses conseils judicieux et ses encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la réalisation de ce projet.

Mon encadrant SONEDE Monsieur **Baouab Mohamed Hassen**, qui m'a entouré d'une assistance parfaite et m'a prodigué des conseils très utiles dans mon avenir professionnel.

Madame **Tarhouni Jamila**, pour ses conseils stimulants que j'ai eu l'honneur de recevoir de leur part.

Monsieur **Abd Aziz Mechri** Chef de la Division Production Sahel, qu'il m'a fournit toute la base de données nécessaire pour la réalisation de mon projet.

Madame **Houda Mhiri** ingénieur aide joint à la DPS, pour ses efforts, sa patience qu'elle a déployée pour m'initier à la recherche et pour l'intérêt qu'elle a constamment manifesté pour la réalisation de ce projet fin d'étude.

Monsieur **Derbali Hamza**, pour les conseils qu'il m'a prodigués et pour tout le temps et l'énergie qu'il a consacré à la réalisation de ce travail, son soutien et son amitié.

Monsieur **Kamel Sta**, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien, son aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Mr **Hamdi Mohamed**, ingénieur chercheur à l'INAT pour son aide et sa disponibilité tout au long mon travail.

Mademoiselle **Ouni Houda**, ingénieur chercheur à l'INAT pour son aide, son temps et ses conseils.

A Monsieur **Ouni Ezzedine**, ingénieur de la direction de maîtrise d'énergie, pour son aide.

Tous qui je rencontre à la Société National d'Exploitation et Distribution Eaux Ras Tabia, qui ont contribué au succès de mon stage et plus particulièrement, **Mr Mohamed Bouhlila**, Mme **Houda Abidi**, Mme **Hayfa Mesbah**, Mr **Issam Bourara**, Mr **Bassem Agougui**.

Ma profonde gratitude s'adresse à tous les membres du jury, qui m'ont honoré en acceptant d'évaluer ce modeste travail.

# Table des matières

Introduction générale :.....	1
Chapitre 1 : Analyse bibliographique.....	3
1.1. Généralités:.....	3
1.2. Un réseau hydraulique d'adduction et ses contraintes.....	5
1.2.1. Définition.....	5
2.2. La topographie :.....	6
2.3. Le phénomène du coup de bélier :.....	6
2.4. Les Fuites.....	7
2.5. Les casses :.....	7
2.6. Diamètre et vitesse :.....	8
2.7. Paramètres caractéristiques d'un réseau hydraulique :.....	8
2.8. Caractéristiques et indicateurs des performances des groupes de pompage :.....	11
2.8.1. Caractéristiques des groupes de pompage :.....	11
2.8.2. Indicateurs de performance des groupes de pompage :.....	13
Chapitre 2 : Présentation du cas d'étude.....	15
2.1. Préliminaire :.....	15
2.2. Les nappes Kairouannais :.....	16
2.3. Le système d'adduction d'eau potable du Kairouan :.....	17
2.3.1. Les conduites du réseau d'adduction :.....	21
2.3.2. Les débits véhiculés :.....	21
2.3.3. Evolution de la production au niveau du système d'adduction du Kairouannais :..	22
2.3.4. Les problèmes du réseau d'adduction :.....	23
2.4. Conclusion partiel :.....	27
Chapitre 3 : Méthodologie.....	28
3.1. Introduction.....	28

3.2. Les étapes d'élaboration de la base de données SIG et Interfaçage SIG-EPANET .....	29
3.2.1. Création de la base de données géographique : .....	29
3.2.1.1. Géoréférencement : .....	30
3.2.1.2. Digitalisation du réseau d'adduction .....	30
3.2.1.3. Création d'un nouveau projet GisRed : .....	32
3.2.1.4. Interfaçage SIG-Hydraulique : .....	34
Chapitre 4 : Collecte et Analyse des données .....	40
4.1. Collecte de données : .....	40
4.2. Analyse de données : .....	42
4.2.1. La production des forages Kairouannais : .....	42
4.2.2. La consommation d'énergie électrique en KWh et la consommation spécifique en KWh/m <sup>3</sup> : .....	43
4.2.3. L'évolution de la hauteur manométrique totale (Hmt) : .....	45
4.2.4. La consommation spécifique par Hmt: .....	47
4.2.5. L'évolution du coût du m <sup>3</sup> d'eau potable : .....	52
4.2.6. Les rendements du groupe électropompe : .....	59
Chapitre 5 : Modélisation et calage hydraulique et énergétique du réseau d'adduction Kairouan .....	61
Partie A : Modélisation et calage hydraulique.....	61
5.1. Présentation général du logiciel EPANET : .....	61
5.3. Calage du modèle : .....	67
Partie B : Modélisation et calage énergétique du réseau d'adduction du Kairouan .....	70
5.4. Débit de pompage : .....	70
5.4.1. Interprétation : .....	74
5.5. La consommation spécifique : .....	74
5.5.1. Interprétation : .....	77
5.5.2. Interprétation : .....	79
5.6. Le coût du KWh en dinars (Dt/KWh) : .....	80

5.6.1. Interprétation :.....	84
Chapitre 6 : Satisfaction des besoins 2015-2040 et choix de la variante optimale .....	86
6.1.2.1. Interprétation: .....	91
6.1.3. Satisfaction des besoins futurs :.....	91
6.1.3.1. Satisfaction des besoins 2016 :.....	92
6.1.4. Description générale et affectation des ressources 2019-2040 .....	95
6.1.4.1. Aménagements projetés : .....	96
6.1.5. Conclusion partiel :.....	97
6.2. Scenarii pour la satisfaction de la demande en eau et Choix de la variante optimale :.	98
6.2.1. Etude des variantes : .....	98
6.2.1.1. Etude de la variante 1 :.....	98
6.2.1.2. Etude de la variante 2 :.....	104
6.2.1.3. Etude de la variante 3 :.....	109
6.3. Echelonnement et coûts des aménagements projetés .....	114
6.3.1. Echelonnement.....	114
6.3.2. Coûts d'investissement : .....	116
6.4. Choix de la variante optimale :.....	118
6.5. Conclusion partiel.....	119
Conclusion générale :.....	120
Références bibliographiques :.....	122

## **Liste des abréviations**

AC : Amiante ciment

BA : Béton armé

DPS : Division Production Sahel

F : Fonte

Hmt : Hauteur manométrique total

MDT : Millions de dinar tunisien

mm : millimètre

PEHD : Polyéthylène haute densité

Qpj : débit de pointe journalière

SIG : Système d'information géographique

SONEDE : Société National d'Exploitation et de Distribution des eaux

STEG : Société Tunisienne d'Electricité et du Gaz



# Liste des figures

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude (SONEDE, 2012) .....	15
Figure 2: Réseau d'adduction d'eau potable du Kairouan .....	18
Figure 3: Schéma du réseau d'adduction du Kairouanais (SONEDE /DPS, 2012).....	20
Figure 4: Pourcentage de type de conduite .....	21
Figure 5: Evolution de la production moyenne mensuelle des forages Kairouanais d'eau potable entre 2010 et 2014.....	22
Figure 6: Production mensuelle moyenne des forages kairouanais entre 2010 et 2014 .....	23
Figure 7: Evolution de la production mensuelle moyenne d'eau entre 2010 et 2014.....	24
Figure 8: l'évolution de coût des fuites,des casses et d'entretien des conduites entre 2012 et 2014 .....	25
Figure 9: Réseau des eaux du Nord en 2012.....	26
Figure 10: Organigramme de la méthodologie adoptée .....	29
Figure 11: Carte d'Etat Major géoréférencée .....	30
Figure 12: Digitalisation du Réseau d'adduction kairouanais par ArcGis10.1 .....	31
Figure 13: Export des couches shapefile vers ArcView (Capture écran) .....	32
Figure 14: Création d'un projet GISRed.....	33
Figure 15: Digitalisation sous l'extension GisRed .....	33
Figure 16 :Export ArcView-Epanet.....	34
Figure 17: Détermination des caractéristiques des forages .....	35
Figure 18: Détermination des caractéristiques des conduites .....	35
Figure 19: Détermination des caractéristiques des nœuds .....	36
Figure 20: Détermination des caractéristiques d'une vanne de contrôle de débit .....	37
Figure 21: détermination de la courbe de fonctionnement de pompe .....	37
Figure 22: Détermination de la courbe d'efficience de pompe .....	38
Figure 23: Détermination de l'identifiant de la courbe de pompe.....	38
Figure 24: le réseau d'adduction kairouanais sur EPANET.....	39
Figure 25: Production des forages Kairouanais par champ.....	43
Figure 26: Consommation d'énergie électrique des forages Kairouanais par champ.....	44
Figure 27: Consommation spécifique des forages Kairouanais par champ .....	45
Figure 28: Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages El Grine .....	46
Figure 29: Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages Chrechira .....	46
Figure 30: Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages Bou Hafna .....	47

Figure 31: L'évolution de KWh/m <sup>3</sup> /m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2010 .....	48
Figure 32: L'évolution de KWh/m <sup>3</sup> /m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2011 .....	48
Figure 33: L'évolution de KWh/m <sup>3</sup> /m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2012.....	50
Figure 34: L'évolution de KWh/m <sup>3</sup> /m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2013 .....	50
Figure 35: L'évolution de KWh/m <sup>3</sup> /m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2014.....	51
Figure 36: l'évolution du coût de m <sup>3</sup> d'eau en millimes entre 2010 et 2014 .....	52
Figure 37: Variation du coût du m <sup>3</sup> d'eau des forages du champ Bou Hafna.....	53
Figure 38: les pourcentages des heures de pompage du champ Bou Hafna .....	53
Figure 39: Variation du coût de m <sup>3</sup> d'eau des forages du champ El Grine.....	54
Figure 40: les pourcentages des heures de pompage du champ El Grine.....	55
Figure 41: Variation du coût de m <sup>3</sup> d'eau des forages du champ Chrechira .....	56
Figure 42: les pourcentages des heures de pompage du champ Chrechira.....	56
Figure 43: Le coût du m <sup>3</sup> d'eau en millimes par forage et par champ .....	58
Figure 44: Les rendements du groupe électropompe par forage et par champ .....	60
Figure 45: coefficient de la modélisation horaire .....	62
Figure 46: Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais .....	63
Figure 47: Résultat de simulation hydraulique dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014.....	64
Figure 48: Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014	65
Figure 49: Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014	66
Figure 50 : Forme générale de fichier de calage .....	68
Figure 51: résultat de calage de pression par EPANET .....	68
Figure 52: Comparaison entre les valeurs de débit réelle et simulé .....	71
Figure 53: forages du groupe 1 .....	72
Figure 54: forages du groupe 2.....	73
Figure 55: forages du groupe 3.....	73
Figure 56: forages du groupe 4.....	74
Figure 57: la consommation spécifique simulée par Epanet .....	75
Figure 58: Comparaison entre les valeurs de la consommation spécifique réelle et simulé .....	76
Figure 59: forages du groupe 1' .....	78
Figure 60: forages du groupe 2' .....	78
Figure 61: forages du groupe 3' .....	79
Figure 62: forages du groupe 4' .....	79
Figure 67: forages du groupe 4'' .....	84
Figure 69: Bilan futur besoin-ressource en cas de réalisation des nouveaux forages locaux en 2016..	94
Figure 70: Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V1).....	103
Figure 71 : Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V2).....	108
Figure 72: Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V3).....	113

# Liste des tableaux

Tableau 1: Statistique de la production et de la consommation d'Énergie électrique par les stations de la Division Production du Sahel .....	41
Tableau 2: Répartition de l'ordre des forages selon le coût .....	86
Tableau 3: Bilan besoins-ressources 2010-2014 (Qpj) .....	87
Tableau 4: volume consommés facturés et Evolution annuelle du Kairouan .....	88
Tableau 5: Bilan futur besoins-ressources2010-2040 .....	89
Tableau 6: Répartition des projets de la phase urgente 2016-2019.....	92
Tableau 7 : Bilan futur besoin-ressource en cas de réalisation des projets urgents (nouveaux forages locaux) .....	93
Tableau 8 : Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 1 .....	102
Tableau 9: les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 2.....	104
Tableau 10: Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 2 .....	107
Tableau 11 : les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 3.....	109
Tableau 12: Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 3 .....	112
Tableau 13: les débits disponibles en 2040 .....	114
Tableau 14: Echelonnement des projets.....	115
Tableau 15: coût d'investissement (en MDT hors taxes).....	117
Tableau 16: choix de la variante.....	118

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est la modélisation hydraulique et énergétique avec la proposition des solutions pour la réhabilitation du système d'adduction Kairouannais. Le présent travail consiste d'abord à faire une collecte des données sur le réseau d'étude. Ensuite la création d'une base des données numérique à l'aide de l'outil SIG. Un diagnostic technique et énergétique sur l'état actuel du réseau est élaboré en utilisant des indicateurs de performance.

Hydrauliquement, notre réseau a une importance régionale dans l'alimentation de différentes localités Kairouannais, mais aussi une importance nationale puisqu'il joue un rôle essentiel dans l'équilibre de système adduction Nord. Par la suite, la construction d'un modèle hydraulique sur EPANET, aura lieu, a permis d'analyser le fonctionnement hydraulique de ce complexe réseau.

Les résultats de la simulation ont montré que notre réseau transporte un débit important de l'ordre de 1000 l/s au cours de route pour atteindre les 640l/s au point d'arrivée qui est le réservoir El ONK pour passer par la suite vers le Sahel.

Pour tout le système, la consommation énergétique moyenne s'élève à 0,54 KWh/m<sup>3</sup>, avec une valeur maximale d'environ 1,6 KWh/m<sup>3</sup> pour Chrechira5 appartenant au champ de Captage Chrechira et de 0,91KWh/m<sup>3</sup> pour le Grine7ter appartenant au champ de captage, El Grine. Les valeurs maximales de la consommation d'énergie sont expliquées par les grandes valeurs de Hmt surtout pour le champ de Chrechira et El Grine.

Les solutions de réhabilitation proposées consistent en quelques nouveaux projets concernant le Kairouan, des nouveaux projets concernant le système d'adduction Nord pour équilibrer le bilan, et d'installer des compteurs spécifiques à l'entrée et à la sortie de chaque groupe de motopompe et de changement de quelques équipements pour des autres.

**Mots clés :** Réseau d'adduction, eau potable, rendement, énergie, modélisation.

## **Abstract**

The objective of this work is the water and energy modeling with the proposed solutions for the rehabilitation of the Kairouannais supply system. This work is first to make a collection of data on the study network, then the creation of a database of digital data using the GIS tool. Finally, technical and energy diagnosis of the current state of the network is constructed using performance indicators.

Hydraulically, our networks have a regional water supply importance in the different localities Kairouannais, but also a national importance because it plays a vital role in North supply system balance. Subsequently, the construction of a hydraulic model EPANET will be used to analyze the hydraulic operation of this complex network.

The simulation results showed that our network carries a high flow rate, about 1000 l/s in the way to reach 640 l/s to the end point the Sahel.

For the entire system, the average energy consumption amounts to 0.54 kWh/m<sup>3</sup>, with a maximum value about 1.6 kWh/m<sup>3</sup> for Chrechira5 belonging to the Well field Chrechira, 0,91kWh/m<sup>3</sup> for Grine7ter belonging to the well field El Grin. The maximum power consumption values are explained by the high values of Hmt especially for Chrechira field and El Grin.

The proposed rehabilitation solutions consist of a few new projects on Kairouan, new projects for the North-supply system to balance the balance sheet and install designated counters at the entrance and exit of each motor pump group and change some equipment by others.

**Keys words:** supply system, potable water, efficiency, energy, modeling

## الخلاصة

يهدف هذا العمل إلى تشخيص شبكة الإمداد للمياه الصالحة للشرب بالقيروان، و ذلك لإعادة تأهيلها و اقتراح بعض الحلول للمشاكل المدروسة.

تتمثل المرحلة الأولى من هذه الدراسة في جمع البيانات اللازمة التي تخص الشبكة التي سيتم تقييمها.

بعد هذه المرحلة، قمنا بإنشاء قاعدة بيانات رقمية و ذلك بالاعتماد على نظام المعلومات الجغرافية (SIG) بعد ذلك، قمنا بتشخيص تقني و طاقي للحالة الراهنة للشبكة اعتمادا على مختلف مؤشرات الأداء.

تتميز الشبكة المدروسة، من الناحية الهيدروليكية، بأهمية إقليمية حيث تمكن من تغطية احتياجات مدينة القيروان، فضلا عن أنها تتميز بأهمية وطنية، ذلك أنها تلعب دورا حيويا في توازن شبكة نقل الشمال.

من ثمة، قمنا بإنشاء نموذج باعتماد برنامج Epanet، و ذلك حتى نشرح سير العملية الهيدروليكية بالشبكة.

وقد أظهرت النتائج أن هذه الشبكة تنقل معدل تدفق يصل حتى 1000 لتر في الثانية بين الأنابيب الرئيسية ويصل حتى 640 لتر في الثانية إلى خزان العنق لينتقل فيما بعد إلى الساحل.

أما بالنسبة لاستهلاك الطاقة، فإن متوسط الاستهلاك يصل إلى 0.54 كيلو واط للمتر المكعب، حيث يسجل بئر شريشيرة أكبر حصة استهلاك تصل إلى 1.6 كيلوواط للمتر المكعب، في حين يسجل بئر القرين 7 تار 0.91 كيلو واط للمتر المكعب.

و يعود ارتفاع معدل استهلاك الطاقة إلى الارتفاع المائومتري الكلي في كل من حقلي القرين و شريشيرة.

تتمثل الحلول المقترحة لإعادة التأهيل في حفر بعض الآبار الجديدة في القيروان، و بعض المشاريع الجديدة التابعة لشبكة نقل المياه الصالحة للشرب بالشمال مع تركيب عدادات للطاقة، بالإضافة إلى تغيير بعض المضخات.

**الكلمات المفاتيح:** شبكة إمدادات مياه الشرب، التشخيص، الأداء، الطاقة، النمذجة

## **Introduction générale :**

L'eau est une ressource fragile, rare et vitale (Margat, 1992). C'est une exigence qui a acquis une valeur stratégique hautement importante dans notre existence (Durga, 2005). Ainsi, il faut bien l'exploiter en rationaliser l'utilisation en mettant en places des stratégies et des programmes nationaux spécifiques.

D'une part, la rareté de cet or bleu n'est pas restreinte aux pays avec des eaux abondantes, mais cette rareté touche même les régions pluvieuses. On parle même de "crise d'eau" moins de ressources pour plus des besoins de l'eau pour irriguer les cultures et alimenter les populations.

D'une autre part, la consommation en énergie par le pompage préoccupe les auteurs dans le monde.

En Tunisie, la production et la distribution de l'eau potable sont assurées par la société Nationale d'Exploitation et de Distribution de l'Eau (SONEDE).

La production de l'eau en Tunisie est estimée pour l'année 2013 à 507 millions m<sup>3</sup> provenant de 3 sources principales : les eaux de surface (69%), les eaux souterraines (28%) et les eaux dessalées (3%).

Le nombre total d'abonné en milieux rural et urbain, était de 2 567 439 avec une évolution de 4,6 % entre 2012 et 2013. Le rendement global des réseaux est estimé à 72,6%, correspond à un rendement des réseaux d'adduction de 92,3 % et un rendement des réseaux de distribution de 77,9%. Ces chiffres sont atteints malgré les multiples problèmes liés à l'eau potable : des problèmes au niveau de la production, au niveau du transfert ou même au niveau de la distribution, en se répartissant sur 3 volets principaux : les problèmes hydrauliques, énergétiques, et de qualités.

Sur le plan économique, le pompage de l'eau constitue une charge importante pour chaque gestionnaire de réseau (Nouiri, 2009). D'ailleurs, 20% de l'énergie mondiale (électrique ou autre) est consacrée au pompage de l'eau. Dans quelques régions, la part de l'électricité peut atteindre 50% du prix de l'eau produite.

De plus, la quantité d'énergie consommée ne dépend pas de la qualité de matériel utilisé uniquement, mais aussi de la manière de gérer le réseau : volume d'eau pompé, les conditions d'exploitation, l'état des stations de pompage, en plus de la durée de fonctionnement de système et le coût.

Dans ce contexte et afin d'évaluer les performances hydrauliques et énergétiques que peut rencontrer un réseau d'eau potable, s'inscrit ce projet de fin d'étude (PFE). Il vise le diagnostic du fonctionnement du réseau d'adduction d'eau potable entre Kairouan et Sousse, au centre de la Tunisie.

Ce document est structuré en six chapitres et clôturé par une conclusion:

- ❖ Le premier chapitre intitulé «**Analyse bibliographique**»: met l'accent sur l'importance de SIG.
- ❖ Le Deuxième chapitre intitulé «**Présentation de la zone d'étude**»: permet d'étudier les principales caractéristiques de la région d'étude.
- ❖ Le troisième chapitre intitulé «**Méthodologie**»: décrit la méthodologie de travail.
- ❖ Le quatrième chapitre intitulé «**Collecte et Analyse des données**»: permet d'étudier quelques exemples de l'utilité de cette base de données.
- ❖ Le cinquième chapitre intitulé «**Modélisation et calage hydraulique et énergétique du réseau d'adduction Kairouan** »
- ❖ Le sixième chapitre intitulé «**Satisfaction des besoins 2015-2040 et choix de la variante optimale** »



# Chapitre I : Analyse bibliographique

## 1.1. Généralités:

Les ressources en eau comprennent toutes les eaux accessibles et disponibles pour l'homme et tout être vivant. Cette ressource est indispensable pour toutes les activités et tous les secteurs industriel, agricole, touristique ou même domestique (alimentation en eau potable).

Dans ce contexte et depuis 1997, plusieurs ministères, scientifiques et militants écologiques participent au forum mondial de l'eau pour étudier les moyens de prévenir une "crise de l'eau" qui, selon l'ONU (l'Organisation internationale des Nations Unies) et le Conseil mondial de l'eau, affectera près de la moitié de la population mondiale d'ici 2030.

Dans la méditerranée, l'eau est au cœur des interactions et des tensions, voire des conflits entre l'environnement et le développement. En effet, la mauvaise répartition entre les régions et les pays amplifie ce problème. D'ailleurs, 187 milliards m<sup>3</sup>/an pour l'Italie alors que 0,7 milliards m<sup>3</sup>/an pour la Libye et seulement 0,025 milliards m<sup>3</sup>/an pour Malte (Margat, 1992)

Dans le sud de la méditerranée, où les régions sont arides en majorité, les pays sont très pauvres en eaux de surfaces mais riches en eaux souterraines profondes tel que la Tunisie et la Libye. Donc la solution adoptée consiste à utiliser intensément ces réservoirs par le biais du pompage, et parfois pour transférer l'eau aux zones littorales, et à part la grande quantité d'énergie consommée pour épuiser ces réservoirs, ces eaux sont des sources non renouvelables.

En Tunisie, à cause de sa position géographique, entre la mer méditerranée et le Sahara, les ¾ de son territoire sont semi-arides ou arides. L'influence de cette aridité fait de l'eau une ressource rarissime et très limitée ayant une répartition temporelle irrégulière et spatiale inégale.

D'après la Direction générale des ressources en eau (DGRE) du Ministère de l'Agriculture, les ressources en eau conventionnelles sont de 4,875 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an, dont 2,700 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an (55%) proviennent des eaux de surface et 2,175 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an (45%) découlent des eaux souterraines.

1,560 10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>/an (72%) des eaux souterraines sont renouvelable et 0,615 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an (28%) sont non renouvelables.

La Tunisie se caractérise par la rareté de ses ressources en eau et par une variabilité accentuée du climat dans l'espace et dans le temps (Jabbari, 2010). En effet, les précipitations balancent entre 1500 mm dans le nord et moins de 50 mm dans le sud. Annuellement, elle reçoit une moyenne de l'ordre de 36 milliards m<sup>3</sup>. En année sèche ce volume peut atteindre 11 milliards m<sup>3</sup> uniquement, mais il peut atteindre 90 milliard m<sup>3</sup>/an, en année fortement pluvieuse (Chaabane, 2014)

D'après le rapport de la banque mondiale : en Tunisie « L'agriculture utilise la part la plus importante des ressources en eau, même si la part consacrée à l'eau potable augmente légèrement en passant de 13,4% en 2010 à 17,7% en 2030. Les parts de l'industrie et du tourisme restent très faibles, même si elles subissent une très légère augmentation ».

Si le Nord tunisien est le réservoir des eaux renouvelables du pays. Il renferme presque la totalité du potentiel des eaux soit 59% du total. Alors que le Centre et le Sud ne possèdent que, respectivement, 18% et 23% du potentiel total.

Malgré toutes ces contraintes, pour les autorités tunisiennes, la gestion des ressources hydriques reste une priorité absolue et a conduit les planificateurs Tunisiens à mettre en place un programme de soutien pour ce secteur.

Ce programme est basé sur trois aspects qui sont :

- La gestion et la conservation intégrée de l'eau
- L'efficience économique de l'utilisation de l'eau dans le domaine agricole
- La restructuration des institutions et le renforcement des capacités dans ce secteur

En 1980, les gouvernements et les agences d'aide s'étaient fixé pour objectif de fournir l'eau potable pour tous au terme de décennie (décennie internationale de l'eau potable et d'assainissement). (Jaglin, 2001)

La Tunisie est parmi les pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, qui atteint le plus haut taux d'accès à l'approvisionnement et à l'assainissement de l'eau. D'ailleurs, à la fin de

l'année 2006, l'accès à l'eau potable est universel : c'est-à-dire proche de 100% dans les zones urbaines et 90% dans les zones rurales (DGEGBI, 2012)

La responsabilité des systèmes d'approvisionnement en eau dans les zones urbaines et dans les grands centres ruraux est effectué par la Société National d'Exploitation et de Distribution des Eaux (SONEDE). Elle est chargée de produire, traiter et de distribuer l'eau dans ces zones. En parallèle, l'élaboration des programmes d'approvisionnement en eau potable dans les zones rurales, la valorisation des eaux non conventionnelles en agriculture et l'aménagement des périmètres irrigués et d'assainissement agricole sont à la charge de la direction générale de Génie Rural de l'exploitation des eaux (DG/DGEE).

De plus, pour la coordination et la détermination des besoins en matière d'ouvrages de mobilisation des ressources hydrauliques, gestion des périmètres publics irrigué, et la gestion de la planification des investissements sont chargés aux Commissariats régionaux de développement agricole (CRDA) .

## **1.2. Un réseau hydraulique d'adduction et ses contraintes**

### **1.2.1. Définition**

L'adduction de l'eau constitue les techniques qui permettent d'amener l'eau depuis sa source vers les réservoirs de distribution à travers un réseau des conduites. Ils sont généralement des gros diamètres amenant des gros débits. On rencontre deux types d'adduction :

#### **✓ Adduction gravitaire :**

Ce type est caractérisé par la pression importante de l'écoulement de l'eau. Cette pression est causée, généralement, par la différence des niveaux hydrauliques. Si par exemple l'altitude de la source est supérieure que celle du point de consommation, dans ce cas la force gravitaire intervient. Dans ce type de conduite on n'a pas besoin d'utiliser les stations de pompage pour amener l'eau de la source vers les zones de distribution.

#### **✓ Adduction par refoulement :**

Dans ce type de conduite, on est obligé d'utiliser les pompes entre la source et le réservoir pour maintenir un débit  $Q$  à une hauteur géométrique  $H_g$ . Le choix de diamètre de refoulement dans ce cas est une tâche très importante et pour bien optimiser ce diamètre, il

suffit de varier la puissance de la station de pompage. D'ailleurs, plus le diamètre est petit, plus la perte de charge est importante plus la puissance fournie par la pompe est grande.

### **2.2. La topographie :**

La tâche de choisir la pente est parmi les tâches les plus sensibles, exactement comme le choix des conduites. En générale,  $1\text{m}^3$  d'eau coûte environ 750 millimes pour la SONEDE, mais dans certains cas précis ou la zone, qu'on veut alimenter, est caractérisée par une pente plus faible avec une distance moyenne du réservoir de distribution qui est lui-même proche du forage. On n'a pas besoin des stations de pompage et le coût sera réduit considérablement.

### **2.3. Le phénomène du coup de bélier :**

Ce phénomène est dû essentiellement à des changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront plus importants si la modification du débit est accidentelle. Le phénomène de coup de bélier consiste aux variations de pression provoquées par une modification du régime d'un liquide s'écoulant à l'intérieur d'une canalisation.

En réalité, il existe deux types de coup de bélier :

- Le coup de bélier de masse : il est observé surtout dans les installations hydrauliques.
- Le coup de bélier d'ondes : du essentiellement à la non stationnarité des écoulements à l'intérieur des canalisations.

Les causes des coups de bélier sont diverses mais les plus importants sont observées lors du démarrage ou de l'arrêt d'une installation hydraulique, par exemple, une fermeture de vanne ou un arrêt rapide de pompe.

Ce phénomène a des conséquences fâcheuses telles que la rupture de canalisations et la détérioration d'appareils traversés par l'eau.

Afin de réduire leurs effets, il est très important d'étudier ce phénomène transitoire. Les solutions les plus utilisées sont : l'utilisation de dispositifs anti-bélier et le dimensionnement correct des différents composants d'une installation (Frelin, 2002)

## 2.4. Les Fuites

Le journal économique française « Sudouest », affirme qu'à cause des fuites, en moyenne, 20% d'eau potable soit perdue ce qui est équivalent à un milliard de m<sup>3</sup> d'eau par an. (Sudouest, 2014).

Autrement dit, pour 5 litres d'eau mis en distribution, 1 litre d'eau revient au milieu naturel sans passer par le consommateur (révélé par le rapport français de 2014 de l'observatoire des services publics d'eau et d'assainissement).

D'où chercher des solutions efficaces pour réduire les fuites dans les réseaux d'eau potable serait une obligation impérieuse. D'ailleurs, les fuites ont un effet touchant sur le rendement de réseau. Par ces fuites, l'atteinte d'un rendement à 100% est irréaliste. Mais ce rendement peut atteindre une valeur importante de l'ordre de 85 à 95% à condition de se donner les moyens de bien connaître les réseaux, de rechercher les fuites et d'entretenir les conduites.

Le rapport de la SONEDE (D17, 2009) mentionne que parmi les facteurs générateurs des fuites on peut citer : la corrosion et âge des conduites, le trafic routier, la pression de service, et le phénomène de coup de bélier.

Jusqu'à maintenant, il existe deux méthodes utilisées par la SONEDE pour détecter les fuites : la première est basée sur le procédé acoustique et la deuxième se fait à l'aide de la mesure du niveau de bruit.

Les techniques disponibles sont plus au moins efficaces et la recherches des nouvelles solutions plus performantes, plus précises, et plus adaptés avec le progrès technologique pour trouver les fuites doit être l'objet d'une recherche objective. (Le Monde, 2014)

## 2.5. Les casses :

Une casse est une fissure sur conduite qui ne peut être réparée qu'après coupure d'eau.

On distingue deux types de casses :

- ❖ Les casses spontanées ou inévitables : constatées à des fissures. Ce type de casse est dû essentiellement au vieillissement des conduites, au glissement des terrains, aux inondations...
- ❖ Les casses provoquées : sont accidentelles, suite aux travaux des entreprises qui travaillent pour le compte des organismes autre que la SONEDE, tels que l'ONAS, la STEG...Mais ils peuvent être provoquée aussi par les citoyens.

## 2.6. Diamètre et vitesse :

### ✓ Diamètre

La tâche du choix de diamètre est une tâche délicate, puisque il faut chercher le diamètre qui permet de faire passer le débit qu'on a besoin avec le coût le plus faible.

Le choix est basé sur trois critères importants qui sont : le matériau, la pression de service, et le diamètre nominal.

### ✓ Vitesse

Il faut vérifier que la vitesse moyenne  $V$  dans la conduite reste acceptable c'est à dire comprise entre 0,5 et 1,5 m/s. D'une part, une vitesse inférieure à 0,5 m/s favorise les dépôts dans les conduites, parfois difficiles à évacuer, et l'air s'achemine vers les points hauts. D'autre part, les grandes vitesses risquent de créer des difficultés d'exploitations telles que le coup de bélier, la cavitation et le bruit.

## 2.7. Paramètres caractéristiques d'un réseau hydraulique :

Les casses, les fuites, et l'âge du réseau sont des raisons assez suffisantes pour obtenir un taux de perte important. L'évaluation des pertes d'eau sur le réseau permet de juger son efficacité et son rendement.

Mais avant de déterminer ce taux, il faut déterminer le volume produit  $V_p$  qui est le volume issu des ouvrages de production du service pour être introduit dans le réseau de distribution, et le volume distribué  $V_d$  comptabilisé au niveau des sorties des réservoirs de distribution. On peut alors calculer le rendement  $R_d$ .

### ✓ Calcul de rendement du réseau d'adduction :

Le rendement du réseau d'adduction  $R_d$ , est par définition, le rapport entre le volume produit et le volume distribué :

$$R_d = \left( \frac{V_d}{V_p} \right) * 100 \quad (1)$$

C'est sur la base de ce rendement qu'on mesure la performance d'un réseau d'AEP. Le souci de tout gestionnaire est d'augmenter cette valeur et la maintenir à un niveau acceptable. (DINEPA, 2013)

✓ **Calcul de taux de perte et de coefficient de perte :**

Ce taux est calculé en appliquant la formule suivante :

$$T(\%) = 1 - Rd \quad (2)$$

$$C_{per} = \frac{1}{Rd} \quad (3)$$

Avec :

T : taux de perte global ; Cper : coefficient de perte ; Rd : rendement du réseau

✓ **La charge hydraulique :**

En générale, la charge hydraulique dans une section quelconque d'une conduite est défini par la formule suivante :

$$H = Z + \left(\frac{U^2}{2g}\right) + \frac{P}{\rho g} \quad (4)$$

Avec : Z : la côte moyenne la conduite (en m) ; U : la vitesse moyenne de l'eau dans la conduite (en m/s) ; P : la pression moyenne de la conduite (en Pa) ; g : l'accélération de pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>) ; ρ : La masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

Le théorème de Bernouilli pour un fluide réel permet d'écrire cette formule autrement :

$$H1 = H2 + \Delta H \quad (5)$$

Avec : H<sub>1</sub> : la charge hydraulique dans la section 1 ; H<sub>2</sub> : la charge hydraulique dans la section 2 ; ΔH : La perte de charge totale entre les sections S1 et S2.

En effet, la perte de charge ΔH est notée aussi J : il existe deux types de perte de charge : l'une linéaire et l'autre singulière.

✓ **La perte de charge linéaire :**

Les frottements visqueux, turbulents, et contre la paroi sont les causes principales qui peuvent provoquer la perte de charge linéaire qui se répartie sur toute la longueur de la conduite. La perte de charge linéaire est calculée par plusieurs formules :

Formule de chezy-Manning :

$$J = \frac{v^2}{C^2 R} \quad (6)$$

Avec : V : vitesse de l'écoulement (m/s) ; C : coefficient de Chézy (m<sup>1/2</sup>/s) ; C = KR<sup>1/6</sup> avec K : coefficient de Strickler ou K=1/n avec n=le coefficient de Manning ; R : Rayon hydraulique (m)

K et n sont des constantes qui ne dépendent que de la nature de la conduite dans l'hypothèse d'un écoulement turbulent rugueux.

#### Formule de Darcy-Weisbach :

$$\Delta H = \frac{\lambda L}{D} * \frac{1}{2g} * \frac{Q}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} \quad (7)$$

Avec : λ : coefficient de pertes de charge donnée par la formule de Colebrook ; D : Diamètre de la conduite (m) ; L : longueur du tronçon(m) ; Q : Débit (m<sup>3</sup>/s).

#### Formule de Hazen-Williams:

$$J = 10.66 * \frac{Q}{(CHW)^{1.852}} * \frac{1}{D^{4.87}} \quad (8)$$

Avec : J : perte de charge (m) ; Q : Débit qui transit dans la conduite (m) ; C<sub>HW</sub> : coefficient de pertes charge de Hazen-Willilams

#### ✓ La perte de charge singulière :

On dit aussi perte de charge locale. Elle est du généralement à la présence de singularités qui peuvent être soit des changements au niveau de la section de conduite tels que les élargissements, les rétrécissements, ou les diaphragmes, soit des changements de la direction d'écoulement tels que les coudes, les robinets, les dérivation ou les vannes (Degrémont, 1978). Ces singularités peuvent être placées le long des conduites.

La perte de charge singulière est exprimée par la formule suivante :

$$j = K * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (9)$$

Avec : j=perte de charge singulière (Pa) ; V=vitesse d'écoulement (m) ; K : coefficient qui dépend de la résistance locale ;  $\frac{\rho * V^2}{2}$  : La pression dynamique du fluide (l'eau dans notre cas)



**Remarque** : pour la valeur du coefficient  $K$ , on a deux cas qui se présentent :

- $K$  peut prendre des valeurs constantes quel que soit le diamètre du réseau (C'est surtout dans le cas de réduction ou entrée et sortie de canalisation)
- $K$  peut prendre des valeurs variables selon le diamètre du réseau (c'est essentiellement dans le cas de perte de charge due au frottement ou turbulence qui se produit par exemple dans une vanne)

En outre, on peut retirer la valeur du coefficient  $K$  à partir des abaques avec  $K = \frac{2j}{\rho V^2}$

## 2.8. Caractéristiques et indicateurs des performances des groupes de pompage :

Il faut bien connaître que chaque paramètre a des spécificités et est utilisé à des fins bien précises.

### 2.8.1. Caractéristiques des groupes de pompage :

#### ✓ Puissance hydraulique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$Ph = \frac{\rho * g * Q * HMT}{\eta p} \quad (10)$$

Avec  $\rho$  : la masse volumique de l'eau ( $\text{Kg/m}^3$ )

$g$  : L'accélération de pesanteur ( $\text{m/s}^2$ )

$Q$  : Le débit de la pompe ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$HMT$  : la hauteur manométrique totale de la pompe (m)

$\eta p$  : Le rendement de la pompe

Ph est exprimé en W.

✓ **Puissance de groupe de pompe :**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$Pg = \frac{Ph}{\eta m * \eta t} \quad (11)$$

Avec :

$\eta m$  : rendement du moteur

$\eta t$  : rendement de transmission entre le moteur et la pompe

Elle est exprimée en **W**

✓ **Puissance unitaire :**

Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$Pu = \frac{Pg}{Q * HMT} = \frac{\rho * g}{\eta p * \eta m * \eta t} \quad (12)$$

Elle est exprimée en **KW/(m<sup>3</sup>/s).m**

✓ **Puissance volumique :**

$$Pv = \frac{Pg}{Q} \quad (13)$$

Elle est exprimée en **KW/ (m<sup>3</sup>/s)**

✓ **Puissance manométrique :**

Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$Pm = \frac{Pg}{HMT} \quad (14)$$

Elle est exprimée en **KW/m**

### 2.8.2. Indicateurs de performance des groupes de pompage :

#### ✓ Energie spécifique :

Cet indicateur renseigne sur la quantité d'énergie consommée par le groupe de pompage ou par la station de pompage pour pomper 1 m<sup>3</sup> d'eau vers sa destination. Par suite, on peut prendre une idée sur le rendement des pompes et la hauteur géométrique de pompage. Elle est donnée par la formule suivante :

$$Es(T) = \frac{Ec(T)}{Vp(T)} \quad (15)$$

Avec : Ec(T) : quantité d'énergie consommée (KWh)

Vp(T) : volume d'eau pompé (m<sup>3</sup>) durant la période T

Es(T) est exprimée en **KWh/m<sup>3</sup>**

#### ✓ Energie unitaire :

Cet indicateur calcule la quantité d'énergie consommée par le groupe de pompage ou par la station de pompage pour élever 1 m<sup>3</sup> d'eau de 1m.

En utilisant cet indicateur on peut faire une comparaison entre les groupes de pompage de différentes caractéristiques.

A partir de la valeur de cet indicateur on peut renseigner sur le mode de fonctionnement du groupe de pompage d'une part et son état d'entretien d'une autre part.

L'énergie unitaire à la période T Eu(T) est donnée par la formule suivante :

$$Eu(T) = \frac{Ec(T)}{Vp(T)*hp} \quad (16)$$

Avec : hp : la hauteur de pompage du groupe (en m)

Eu(T) est exprimé en **KWh/m<sup>3</sup>.m**

En plus des indicateurs énergétiques, deux indicateurs de performance financiers des groupes de pompage sont très importantes et nécessaire pour bien évalué le choix de station .Ces indicateurs financiers sont :

✓ **Coût spécifique net de pompage :**

Il est donné par la formule suivante :

$$Csn(T) = \frac{Ce(T)}{Vp(T)} \quad (17)$$

Avec :  $Ce(T)$  : le coût d'énergie électrique de pompage (en Millimes) durant la période T

$Vp(T)$  : le volume pompé durant la période T

$C_{sn}(T)$  est exprimé en **Millimes/m<sup>3</sup>**

✓ **Coût spécifique net unitaire de pompage :**

Cet indicateur représente la quantité d'énergie électrique consommée par le groupe de pompage ou par la station de pompage pour élever 1 m<sup>3</sup> d'eau de 1m. Il permet de comparer les performances des gestions de groupe de pompage diverses et de suivre l'évolution des performances du groupe dans le temps.

On le détermine par la formule suivante :

$$Csnu(T) = \frac{Csn(T)}{HMT} \quad (18)$$

$C_{snu}(T)$  est exprimé en **Millimes/ (m<sup>3</sup> .m)**

## Chapitre 2 : Présentation du cas d'étude

### 2.1. Préliminaire :

Le gouvernorat du Kairouan est créé le 21 juin 1956. Elle est située dans le centre du pays. Elle couvre une superficie de 6 712 km<sup>2</sup> ce qui est équivalent à 4,1 % de la superficie de la Tunisie. En 2014, Kairouan abrite une population de l'ordre de 570 559 habitants (INS : recensement 2014).

Ce gouvernorat est limité par : le gouvernorat de Zaghouan au nord, de Siliana, de Kasserine et de Sidi Bouzid à l'ouest et par le gouvernorat de Sfax, de Sousse et de Mahdia à l'est.

Kairouan (**figure1**) est une région semi-aride caractérisée par une température moyenne qui se situe entre 5°C et 21 °C en hiver et entre 25°C et 42°C en été.

La moyenne de la pluviométrie interannuelle de Kairouan est de l'ordre de 303 mm (Annuaire de l'exploitation des nappes profondes, 2005).



**Figure 1:** Carte de localisation de la zone d'étude (SONEDE, 2012)

## 2.2. Les nappes Kairouannais :

Malgré une importante infrastructure de mobilisation des eaux de surface, Kairouan reste par excellence la région d'exploitation de ses ressources en eau souterraine.

En effet, les nappes du Kairouannais sont exploitées par les forages pour alimenter le système d'adduction sont :

- **La Nappe l'Oligocène de Bou Hafna :** avec une exploitation de 13,89 Mm<sup>3</sup> et des ressources renouvelables de 9,5 Mm<sup>3</sup>, elle est parmi les nappes les plus sollicitées de la région. La bonne qualité de l'eau, l'accès relativement facile et économique, a poussé la SONEDE qui est le principal exploitant de pomper sans cesse depuis près de 30 ans sur ce réservoir. La surexploitation de cet acquière pourrait être atténuée avec l'alternative d'exploitation du transfert des eaux du Nord.
- **Nappe de l'oligocène de Chrechira :** C'est un réservoir de taille très réduite. Il est dans la même situation d'exploitation que la nappe de Bou Hafna avec un utilisateur unique (SONEDE), très consommateur d'eau, et avec un pompage très localisé et mal réparti. Il est impératif de revoir le bilan de cette nappe, en effet on prétend toujours qu'on est deçà des ressources renouvelables malgré que la piézométrie soit en baisse continue.
- **Nappe de Haffouz :**
- ✓ **Nappe du Mio-Pliocène Haffouz :** l'exploitation de cette nappe tend à augmenter ces dernières années. Elle est 0,85 Mm<sup>3</sup>. Elle est entre exploitée par l'unité d'eau conditionnée JANNET à Haffouz.
- ✓ **Nappes des calcaires de l'Eocène de Haffouz :** l'exploitation est de l'ordre de 0,49 Mm<sup>3</sup> et se fait par le biais de deux forages (Haffouz 2 et Mselsel 2), appartenant à la SONEDE et d'excellente qualité d'eau.
- **Nappe du bassin Kairouan :**
- ✓ **Nappe de la plaine de Kairouan :** l'exploitation de ce réservoir géant, constituant le château de gouvernorat, est de 33,21 Mm<sup>3</sup>. Elle a dépassé les ressources renouvelables

qui sont de 31Mm<sup>3</sup>. Le réservoir a une recharge à partir de deux grands barrages d'El Houareb de Sidi Saad constitue une alternative maîtrisable et d'efficacité tangible.

Sans oublier qu'il existe d'autres nappes exploitées mais d'une façon moins importante tels que la nappe des calcaires de Djebel Oueslat, nappes d'Ain el Beidha, nappe de Miocène de Serdja-Chouachi, nappe d'El Bhira, nappe de Sisseb El Alem.

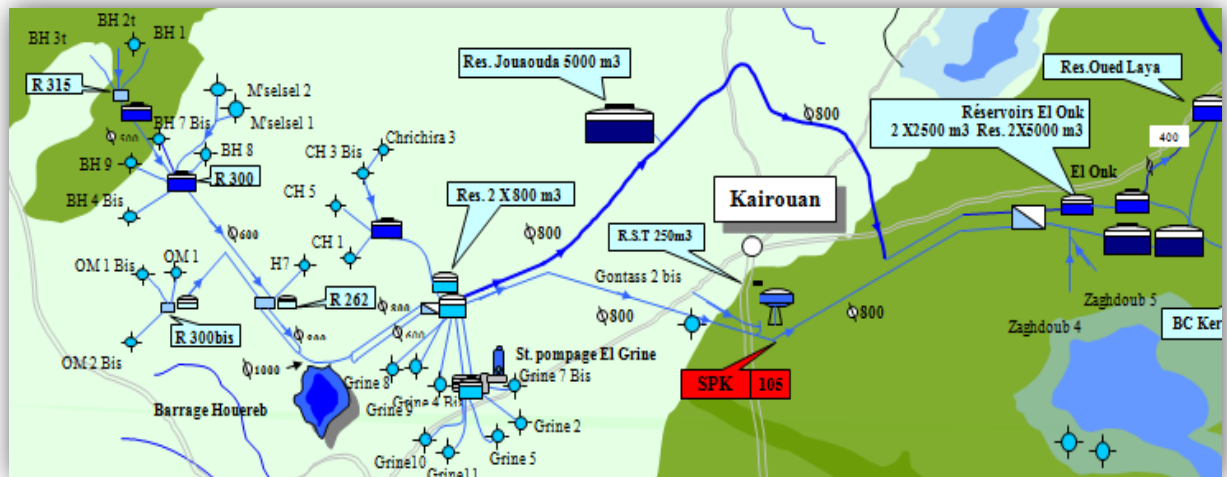
Les dernières années, les prélèvements à partir de ces nappes ont augmenté de plus en plus, d'une façon importante. En effet, le suivi du niveau statique des nappes réalisé par la SONEDE montre cette réalité, citons l'exemple du forage Gontass 2 bis dont le niveau piézométrique a diminué de -60,3 m en 2006 à -69,55 m en 2013 c'est-à-dire que le niveau de la nappe a eu un rabattement de 1,32m/an ans ce qui montre que la nappe est très sollicitée de plus qu'un mètre chaque année. La même situation est observée pour le forage Grine 7ter où le niveau passe de -46,25 m en 2012 à -48,75 m en 2013, aussi Grine 8 qui passe de -55,86 m en 2012 à -57,23 m en 2013. La situation est assez grave pour les autres forages tel que Grine 10 qui a un rabattement de plus que 8 m en une seule année : le niveau passe de -63,5 m en 2012 à -72 m en 2013.

### **2.3. Le système d'adduction d'eau potable du Kairouan :**

Le Kairouan renferme 32 forages d'eau potable assurant une production totale d'environ 34 Mm<sup>3</sup> (1092 l/s) en 2014. Ce débit est acheminé dans un réseau de plus de 440 km. Les forages les plus productifs sont : Bou hafna 7ter avec un débit de 51,79 l/s, Bou hafna 8 avec un débit de l'ordre de 51,27 l/s, Bou hafna 8 avec un débit de l'ordre de 50,7 l/s et Bou hafna 9 avec un débit de 47,09 l/s (ces débits sont enregistré en 2014) .

Ces forages sont devisés en 3 champs : Champ El Grine ; Champ Chrechira ; Champs Bou Hafna. Le plus productif est le champ Bou Hafna avec un débit moyen de l'ordre de 562 l/s en 2014 représentant 51% de la production totale (SONEDE/DPS, 2014).

La **figure2** suivante montre le réseau d'adduction d'AEP Kairouannais :



**Figure 2:** Réseau d'adduction d'eau potable du Kairouan

L'eau commence son chemin à partir des forages : les côtes les plus important au niveau des forages d'El Msalsel: Msalsel 3, Msalsel 2 et Msalsel 1 déversent leurs productions dans une bache qui elle-même déverse son contenu gravitairement dans un autre réservoir R300 de capacité  $1500 \text{ m}^3$  par l'intermédiaire de deux conduites en polyéthylène haute densité (PEHD) de diamètre 200 mm.

D'une autre côté, les forages : Bou hafna 3 ter, Bou hafna 10, et Bou hafna 1 bis déversent leurs contenus dans un reservoir R315, ce réservoir achemine l'eau vers le reservoir R300, dans lequel déverse directement la production des forages Bou hafna 8, Bou hafna 7 bis, Bou hafna 9, et Bou hafna 4 bis. Par suite, dans le reservoir R300 de capacité  $1500 \text{ m}^3$  s'accumule la production de 10 forages. Ensuite cette eau passe gravitairement vers un autre réservoir R262 de capacité  $1000 \text{ m}^3$  où déverse directement le forage Haffouz 7.

Les forages d'El Msileh c'est-à-dire Oued Msileh 1, Oued Msileh 1 ter et Oued Msileh 3 ter amènent leurs productions dans un réservoir R300bis qui lui-même achemine l'eau vers un même réservoir R262. A partir de ce dernier, l'eau passe par deux conduites : l'une de diamètre 800 mm et l'autre de diamètre 600 mm. Ces deux conduites se croisent au niveau oued Merguellil et deviennent une seule de diamètre 1000 mm en passant par le barrage de LAHOUAREB. Après 2173 mètres linéaire, cette conduite se ramifie de nouveau en deux conduites. l'eau arrive à la brise charge de côte 238 m et de capacité totale  $4100 \text{ m}^3$  dévisée en 3 réservoirs. Le réservoir chrechira où se fait la collecte de trois forages : chrechira1, chrechira3+3bis et chrechira5 amène l'eau aussi vers la brise charge 238. Au niveau de cette dernière, la reprise d'El Grine reffoule l'eau de 5 forages : Grine 2 ter, Grine 4 ter, Grine 7 ter, Grine 10 et Grine 11.



Pour Grine 8 et Grine 9, ils déversent directement dans la brise charge. Ainsi, la brise charge 238 constitue un point d'arrivée de toute la production d'eau du kairouannais. Ensuite, l'eau passe par deux grosses conduites K et J de diamètre 800 mm, se fait au niveau de point appelée Gontass où le forage de Gontass 2bis déverse directement sa production dans la conduite J.

Les conduites K et J se ramifient au tour de siège du gouvernorat de Kairouan pour l'alimenter avec des piquages tels que Rakada, Jwawda, Chbika. Les deux conduites K et J se croisent de nouveau dans un point connu par Gabgoub au niveau de Side El Heni. Les deux forages Zardoub 5 et Zardoub 4, qui seront exploités par la SONEDE just en periode de chômage du canal d'adduction nord,dévesent leurs productions directement dans la conduite K . Enfin, après l'alimentation de la population kairouannais et les piquages qui existent au niveau des conduites K et J, l'eau restante arrive vers réservoir El ONK d'une capacité totale 14 000 m<sup>3</sup> dévisée en quatre cuves:deux de capacité de 5000 m<sup>3</sup> et les deux autres de capacité 2 000 m<sup>3</sup> pour alimenter essentiellement le Sahel: Sousse, Mounastir et Mahdia .la **figure 3** présente notre réseau.

SONEDE  
DCP/DTPCS  
DPS/SAK

**SCHEMA DU RESEAU D'ADDUCTION  
DU KAIROUANAIS**

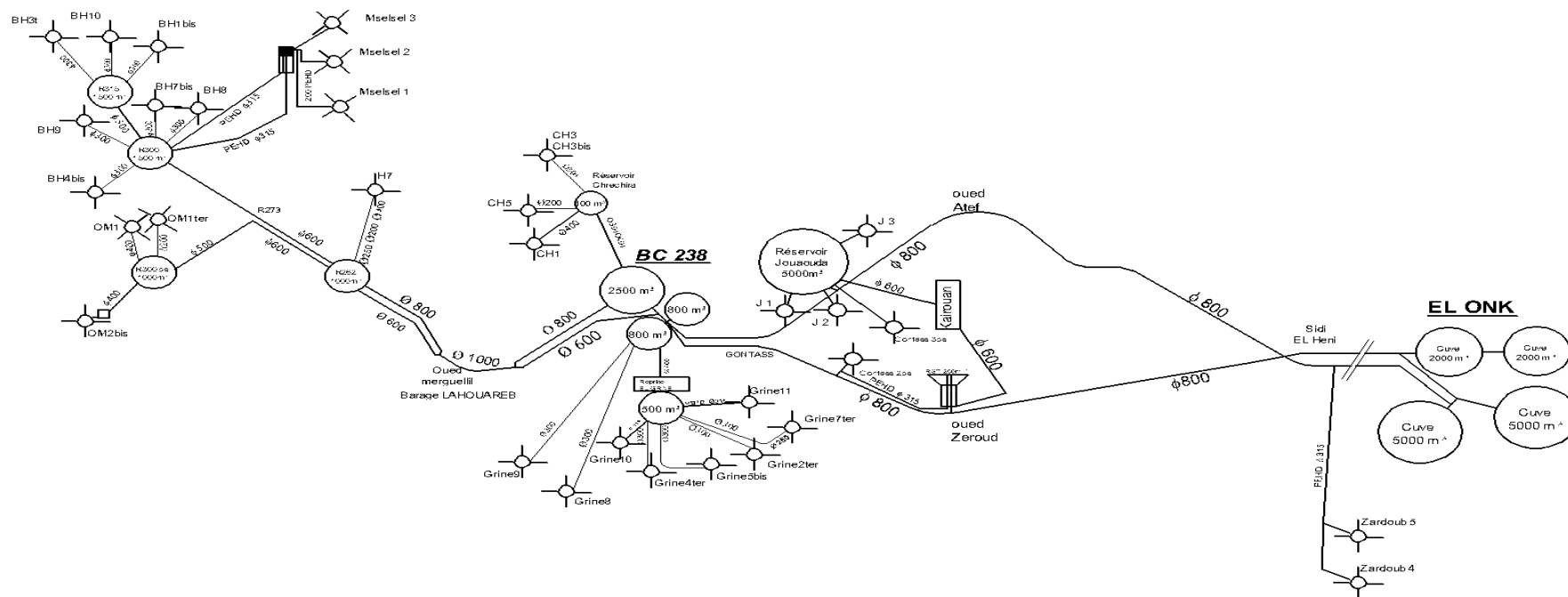
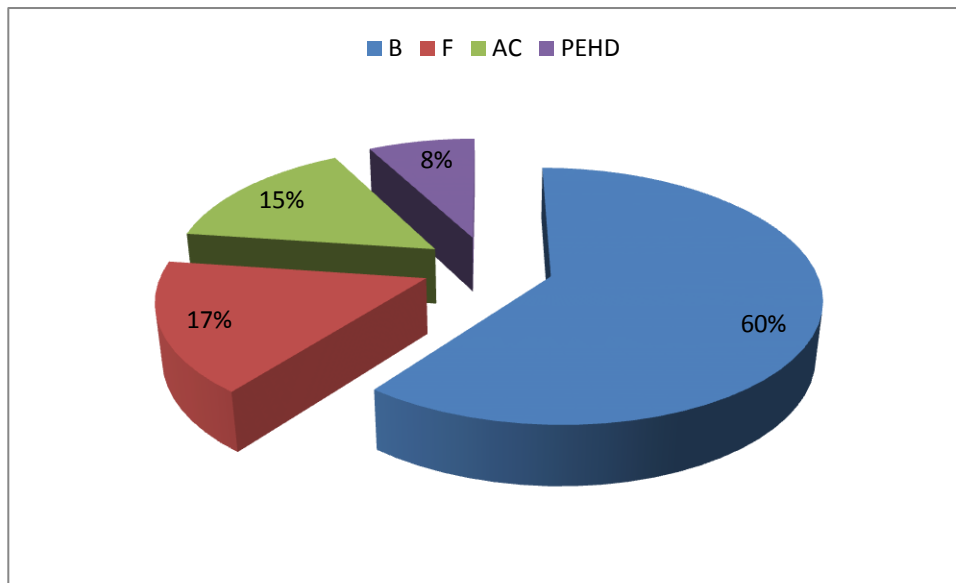


Figure 3: Schéma du réseau d’adduction du Kairouanais (SONEDE /DPS, 2012)

### 2.3.1. Les conduites du réseau d'adduction :

Les conduites de ce réseau sont de nature, âge et diamètre différents. La **figure 4** décrit leurs caractéristiques. On rencontre quatre types de conduites : amiante ciment(AC), fonte(F), béton armée (BA), et polyéthylène haute densité (PEHD) et la conduite la plus âgée date depuis 1930. On constate que la majorité des conduites sont de type béton B et fonte F, ce qui est normal vu l'âge des conduites.



**Figure 4:** Pourcentage de type de conduite

### 2.3.2. Les débits véhiculés :

En 2014, la production moyenne mensuelle de l'eau potable des forages a atteint 2 368 899 m<sup>3</sup> dont 794 457 m<sup>3</sup> sont consommés par la région du Kairouan et le reste de l'eau produite (de l'ordre 1 574 523 m<sup>3</sup>) arrive au réservoir El-Onk pour être transféré par la suite au Sahel (Sousse, Mounastir et Mahdia).

L'eau produite est transmise à partir des forages par l'intermédiaire de deux conduites K et J de diamètre 800 mm chacun. Les deux conduites d'adduction transportent un débit de l'ordre de 2285 l/s et alimentent plusieurs localités avant d'arriver au réservoir Al-Onk.

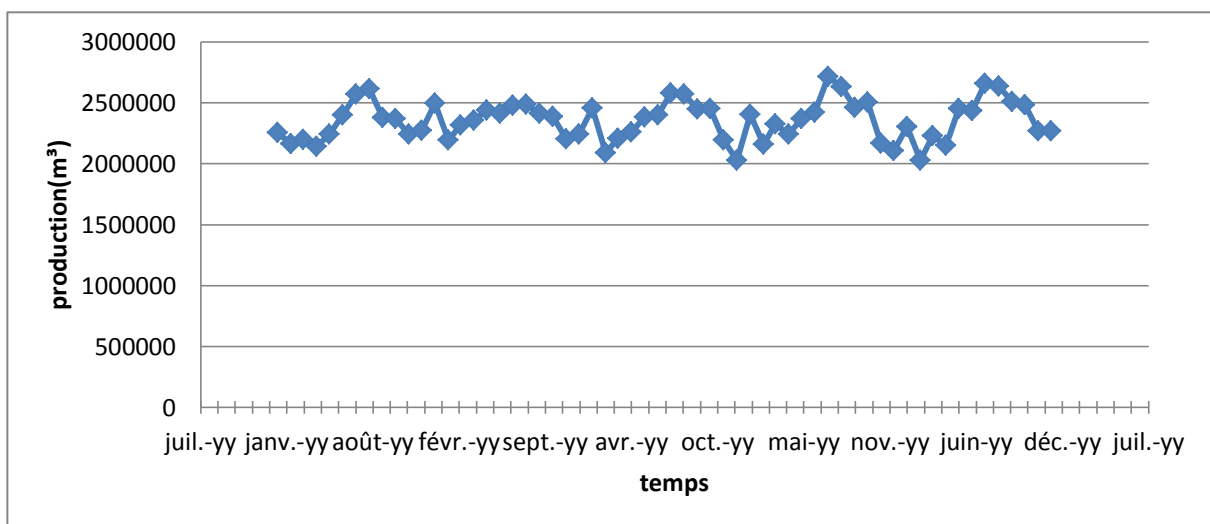
Les localités alimentés par la conduite k sont : Chbika, Jlaissia, réservoir Aoumria Majdoub, Tasmliia, El Aoumria, réservoir Jouaouda, réservoir Dhraa Tammer , Metbasta, El Houamed, El Gabet, Ouled Khechine, Ouled Faleh, réservoir Houareb EL Karma, piquage Zardoub, et

Sidi El Hani. Concernant la conduite J, elle alimente les localités suivantes : Chbika, Jlaisia, Ragada, Ouled Chamekh, Ouled Nhar, piquage Khazazia, piquage Humbez, Ghribet, Sidi El Hani, et Ouled Alouane. Sans oublier, les autres conduites d'adduction connu par A, B, C, C', D, H, G et H, qui sont moins importantes que les conduites K et J de point de vue débit, mais ils alimentent d'autres localités tels que Ouled Youssef, Ouled Naceur, Ain Ghrab et Khit l'Oued.

### 2.3.3. Evolution de la production au niveau du système d'adduction du Kairouannais :

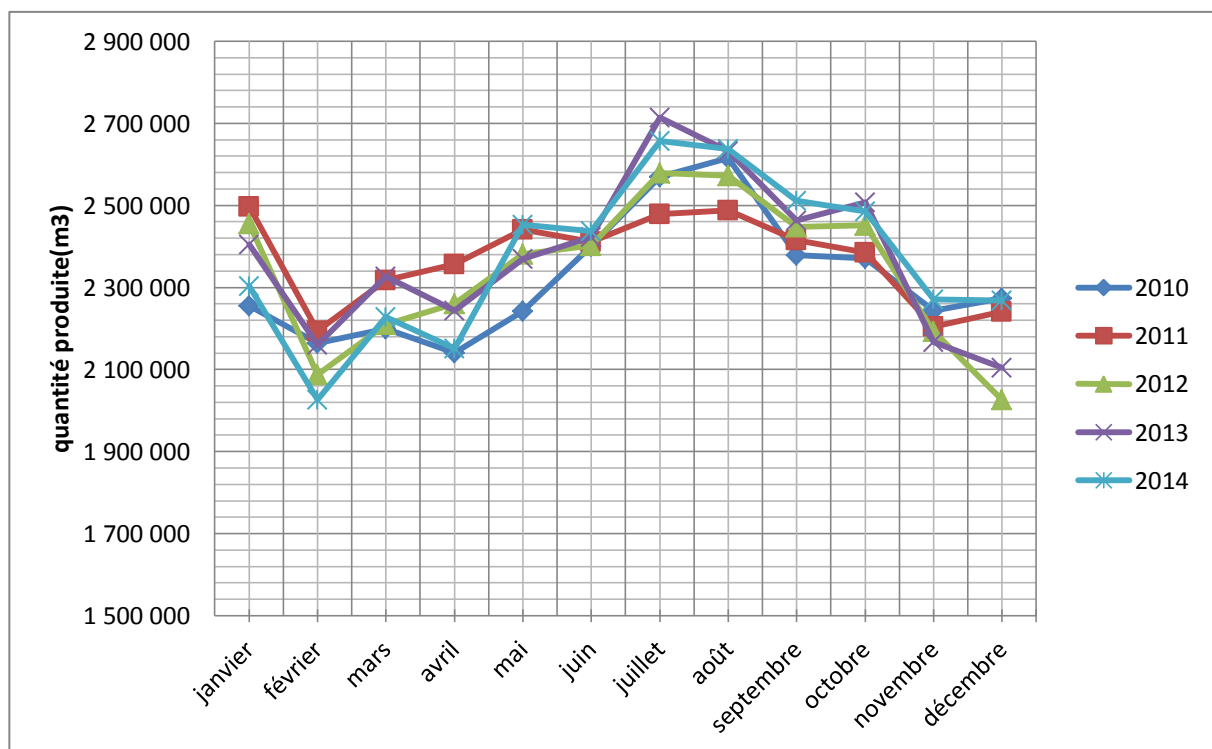
Le réseau d'alimentation en eau potable de Kairouan qui représente la zone d'étude de ce travail, se caractérise hydrauliquement par a une importance locale puisque il est capable de satisfaire les besoins de la région Kairouan, et une importance nationale puisque le réseau d'adduction d'eau potable de Kairouan fait partie indispensable de l'équilibre du système d'adduction des eaux du Nord. Ce dernier s'étend du Cap-Bon à Sfax en passant par le Sahel.

D'après les données de la SONEDE, concernant la production mensuelle des forages du Kairouan de l'année 2010 jusqu'à l'année 2014, la courbe d'évolution de la production montre une stabilité de la production avec une augmentation plus au moins importante. En effet, la valeur la plus élevée enregistrée entre janvier 2010 et décembre 2014 est égale à 2 657 022 m<sup>3</sup> en juillet 2014, la production le plus faible est de l'ordre de 2 026 267 m<sup>3</sup> en décembre 2012.



**Figure 5:** Evolution de la production moyenne mensuelle des forages Kairouannais d'eau potable entre 2010 et 2014

La production d'eau est saisonnière, c'est-à-dire qu'au cours de l'année les volumes pompés les plus élevés sont enregistrés en été vu que la demande domestique augmente d'une façon remarquable en juin, juillet, et août comme montre la figure ci-dessus. En prenant l'exemple en 2014, la courbe est caractérisée par une allure variable d'un mois à un autre : la production commence par une valeur égale à 2 302 805 m<sup>3</sup> en janvier, puis la courbe montre des pics d'une façon croissante et continue d'un mois à un autre, atteint un maximum en juillet avec une valeur égal à 2 657 022 m<sup>3</sup>, après le mois d'août la courbe diminue progressivement pour atteindre une valeur minimale au mois de décembre égale à 2 268 233 m<sup>3</sup>. De même en 2013, la production commence par une valeur égale à 2 404 721 m<sup>3</sup> en janvier, un pic important en juillet avec une production égale à 2 714 331 m<sup>3</sup>, puis la courbe diminue de nouveau pour atteindre une valeur moins important de l'ordre de 2 104 874 m<sup>3</sup> en décembre.

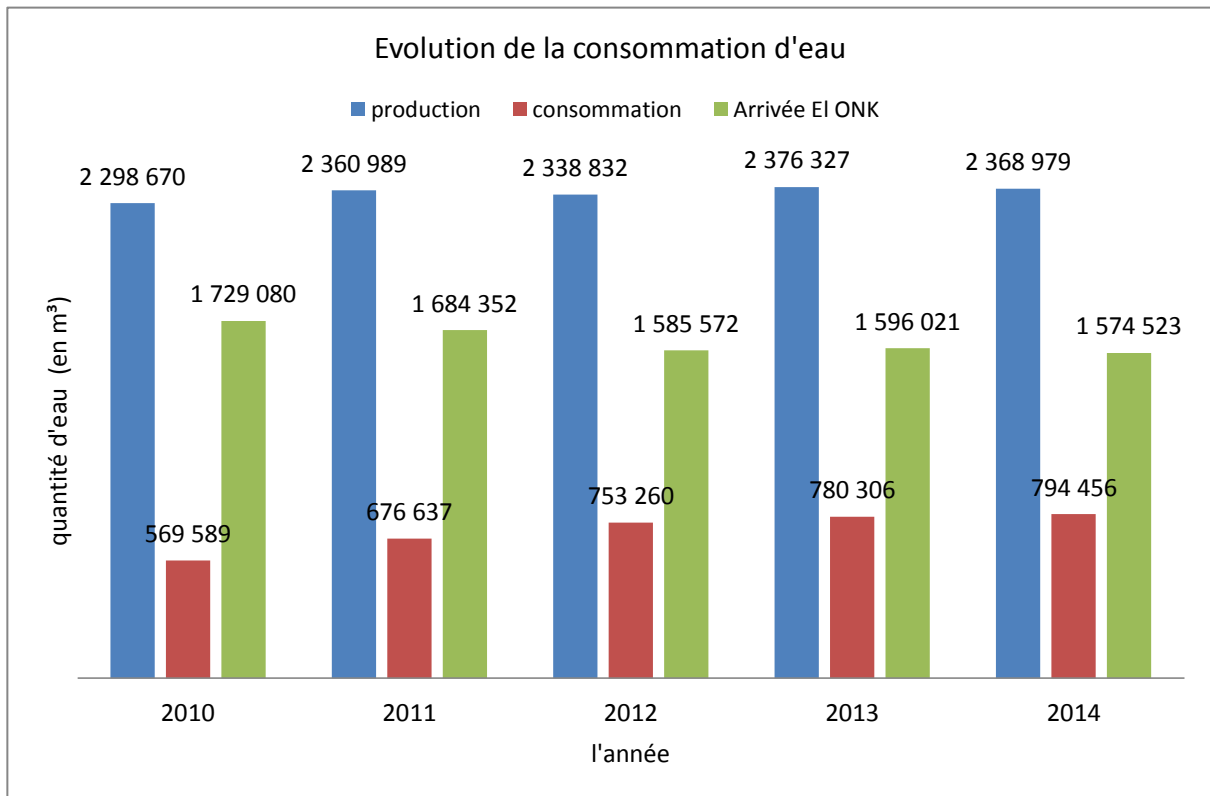


**Figure 6:** Production mensuelle moyenne des forages kairouannais entre 2010 et 2014

#### 2.3.4. Les problèmes du réseau d'adduction :

Le réseau d'adduction Kairouannais s'insère dans le système du réseau d'adduction des eaux du Nord qui est d'une fragilité remarquable et d'une importance stratégique vu qu'il assure

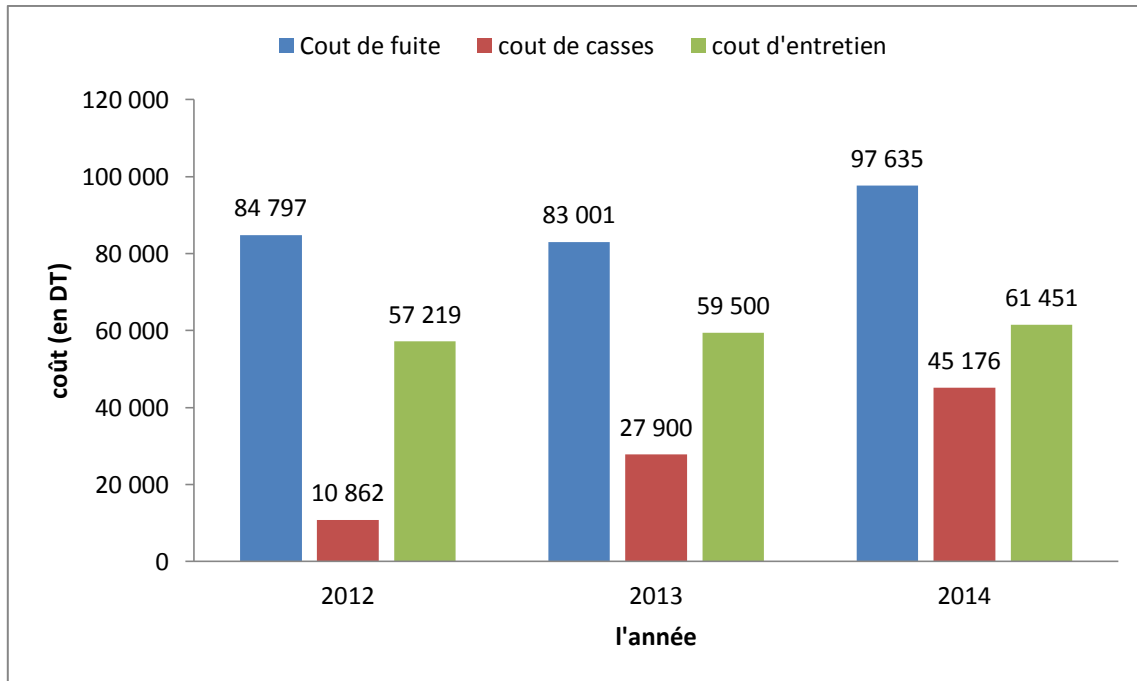
l'alimentation en eau potable de plusieurs gouvernorats (CapBon, Sousse, Monastir, Mahdia et Sfax). Notre zone d'étude joue un rôle important dans le renforcement et l'alimentation de ce dernier, en effet, 80% de la production des forages du Kairouan atteint le réservoir Al Onk pour alimenter le Sahel.



**Figure 7:** Evolution de la production mensuelle moyenne d'eau entre 2010 et 2014

A partir du graphique, on remarque que la quantité d'eau qui arrive au réservoir El-Onk pour alimenter le Sahel diminue progressivement de 1 729 080 m<sup>3</sup>/mois en 2010 vers 1 574 523 m<sup>3</sup>/mois en 2014, et cela peut être expliqué par l'augmentation de la consommation en cours de route (celle du gouvernorat Kairouan) et du nombre des casses et de fuites sur le système d'adduction du Kairouan vu l'âge des conduites et le type de matériau utilisé.

D'ailleurs, le coût d'entretien de ce réseau a augmenté considérablement entre l'année 2012 et l'année 2014 avec un taux d'évolution pour le coût de fuites égale à 15 %, un taux d'évolution pour le coût de casses égale à 31% et un taux d'évolution pour le coût d'entretien égale à 7% (**figure 8**).



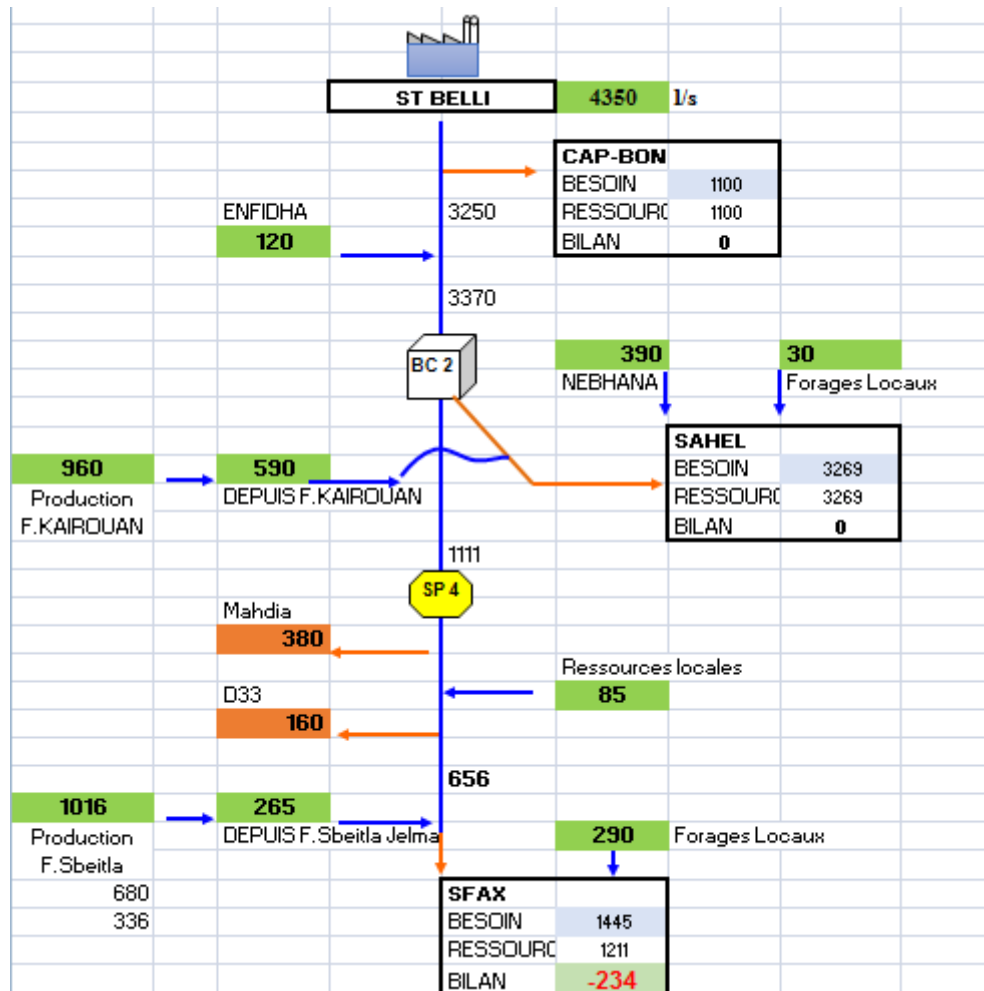
**Figure 8:** l'évolution de coût des fuites,des casses et d'entretien des conduites entre 2012 et 2014

En outre, toute action imprévue qu'elle soit les casses, les fuites, ou même la coupure d'électricité peut entraîner une défaillance dans le fonctionnement de réseau d'adduction des eaux du nord. Par exemple, une coupure d'électricité lors de l'été 2012 durant 1h30min a provoqué :

- ✓ Un déficit de 234 l/s dans le système d'adduction des eaux du Nord.
- ✓ Une perturbation du système de distribution qui a durée presque une semaine.

(Dammak, 2014)

La figure suivante est un bilan qui simule le déficit vécu en 2012 :



**Figure 9:** Réseau des eaux du Nord en 2012

Cette figure montre que l'eau du réseau des eaux du nord prend origine à la station de traitement Belli et alimente le Cap-Bon en premier lieu. L'eau qui reste s'ajoute aux eaux des forages d'Enfitha et le reste des forages du Kairouan pour satisfaire les besoins du Sahel qui est déjà alimenté par des forages locaux et des stations des eaux Nebhana.

L'eau est ensuite transférée pour alimenter Mahdia et d'autres localités.

Les eaux des forages Sbitla Jelma s'ajoutent aux restantes des eaux du nord pour alimenter Sfax. Chaque déficit au niveau de ce réseau touche surtout la région du Sfax puisque elle constitue la dernière station de ce réseau.

Ainsi un manque d'eau des forages de Kairouan suite à un problème peut présenter à la fois un problème d'AEP au niveau régional mais aussi national. Ainsi une étude au niveau



hydraulique et énergétique sur ce réseau s'avère nécessaire sur l'amélioration et éviter les problèmes.

#### **2.4. Conclusion partiel :**

Dans le reste de ce PFE, un diagnostic du réseau d'adduction Kairouan sera fait ainsi qu'un modèle hydraulique sera développé selon la méthodologie détaillée dans le prochain chapitre.

## Chapitre 3 : Méthodologie

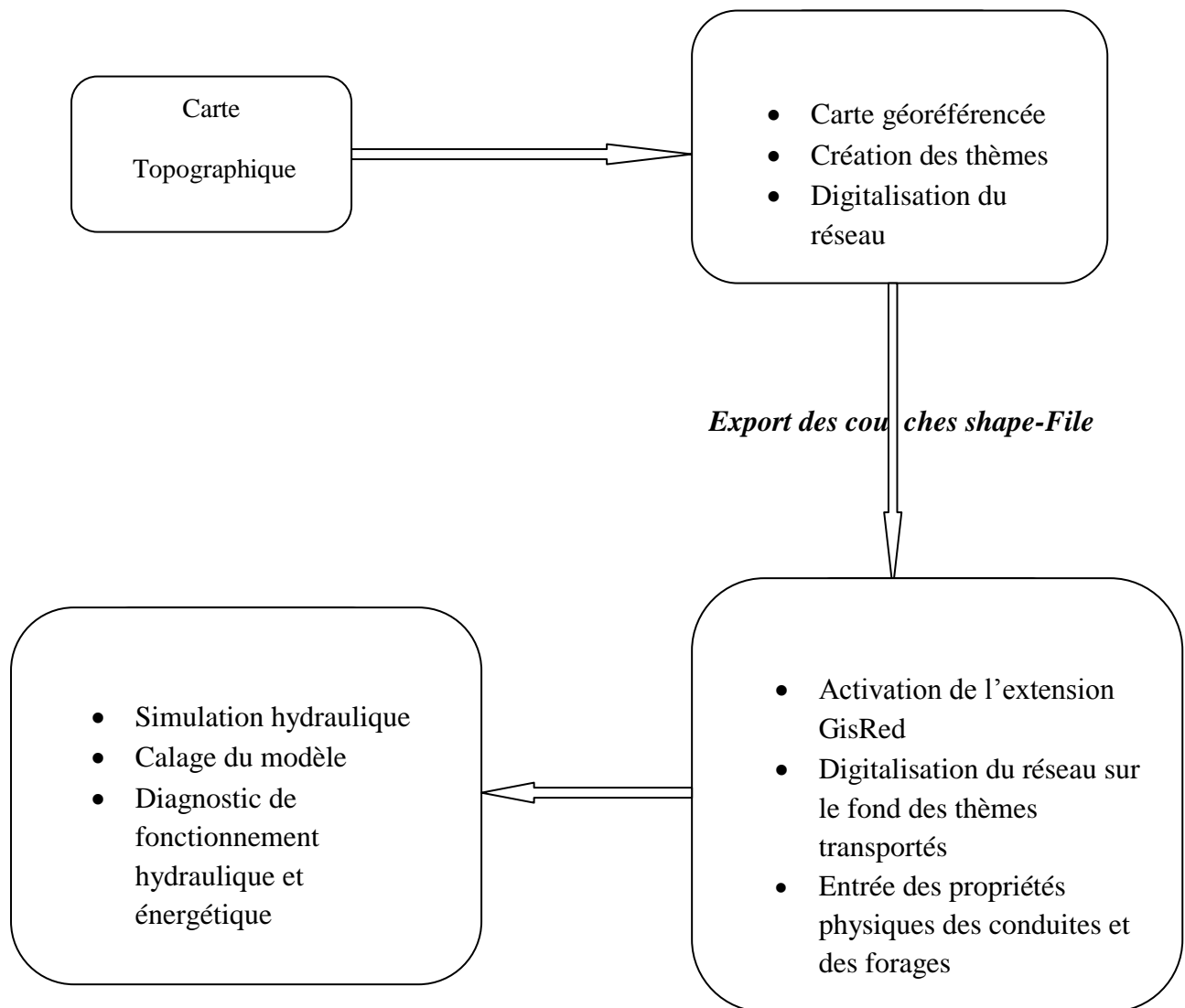
### 3.1. Introduction

A l'issue de la présentation de la zone d'étude, il est important de faire une étude hydraulique et énergétique du réseau d'adduction Kairouannais sur la base d'un historique de 2010 à 2014. Ce chapitre détaille les étapes du travail pour atteindre les objectifs de cette étude.

La méthodologie est axée sur les étapes suivantes :

- ❖ Collecte des données hydrauliques et énergétiques,
- ❖ Le calcul des paramètres tels que la production ( $m^3$ ), les débits (l/s), la consommation d'énergie (KWh), la consommation spécifique ( $KWh/m^3$ ), les rendements des forages (%) et les coûts de  $m^3$ /forage (millimes), etc.
- ❖ Elaboration d'une base de données géographique SIG :
  - ✓ Géoréférencement de carte topographique (1/4000) pour former le fond de la digitalisation du réseau par le logiciel ArcMap GIS 10.1
  - ✓ Numérisation du réseau sur ArcMap GIS pour l'ossature générale du réseau
  - ✓ Exportation de couches vectorielles vers ARCVIEW3.2
  - ✓ Numérisation sous l'extension GisRed
  - ✓ Exportation vers le logiciel de modélisation EPANET
- ❖ Simulation hydraulique, utilisant la base de données élaborée
- ❖ Calage hydraulique et énergétique du modèle
- ❖ Diagnostic de fonctionnement hydraulique et énergétique

Ces étapes sont illustrées dans l'organigramme ci-dessous :



**Figure 10:** Organigramme de la méthodologie adoptée

### 3.2. Les étapes d'élaboration de la base de données SIG et Interfaçage SIG-EPANET

#### 3.2.1. Création de la base de données géographique :

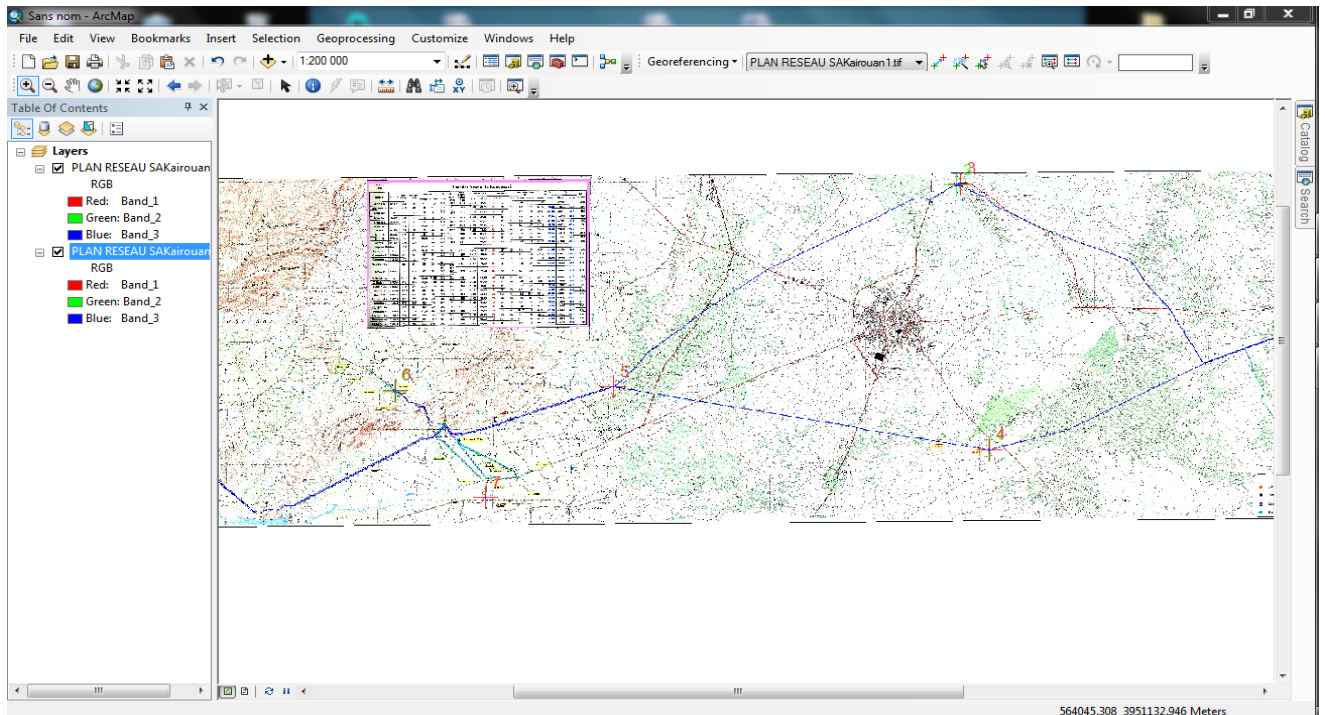
La création de la base de données géographique est effectuée par les systèmes d'information géographique(SIG) qui regroupent les différentes méthodes et techniques informatiques et qui permettent de modéliser afin de saisir sous forme numérique et de représenter des objets ou des

collections d'objets géographiques. Cette étape est la plus lourde pour un SIG, son implantation conditionne la qualité des analyses et des produits finaux.

### 3.2.1.1. Géoréférencement :

Le géoréférencement consiste à utiliser des coordonnées cartographiques pour affecter un emplacement spatial à des entités cartographiques. La description de l'emplacement et de la forme des entités nécessite une structure de coordonnées permettant de définir les emplacements réels. Dans notre cas, la zone d'étude est présentée sur une carte topographique à l'échelle (1/4000).

Comme la capacité de cette carte est assez importante due à la forte résolution, on a choisi le logiciel ArcMap 10.1, pour sa performance, pour la géoréférencer. Le système de projection adoptée est l'UTM (Carthage N32).



**Figure 11:** Carte d'Etat Major géoréférencée

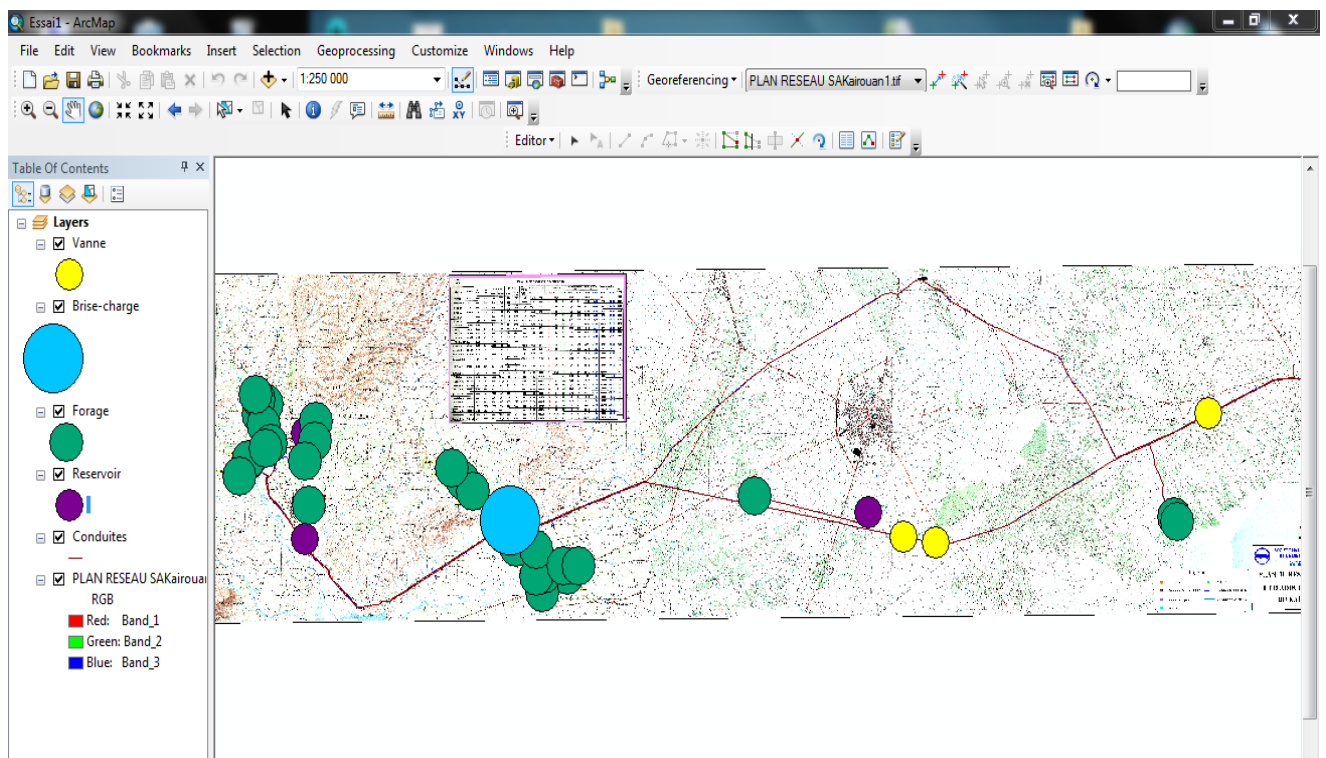
Le choix d'un nombre important des points augmente la précision à condition que leurs coordonnées soient bien déterminées.

### 3.2.1.2. Digitalisation du réseau d'adduction

Dans cette partie, on essaye de créer des thèmes, c'est-à-dire on se propose de construire des données vectorielles.

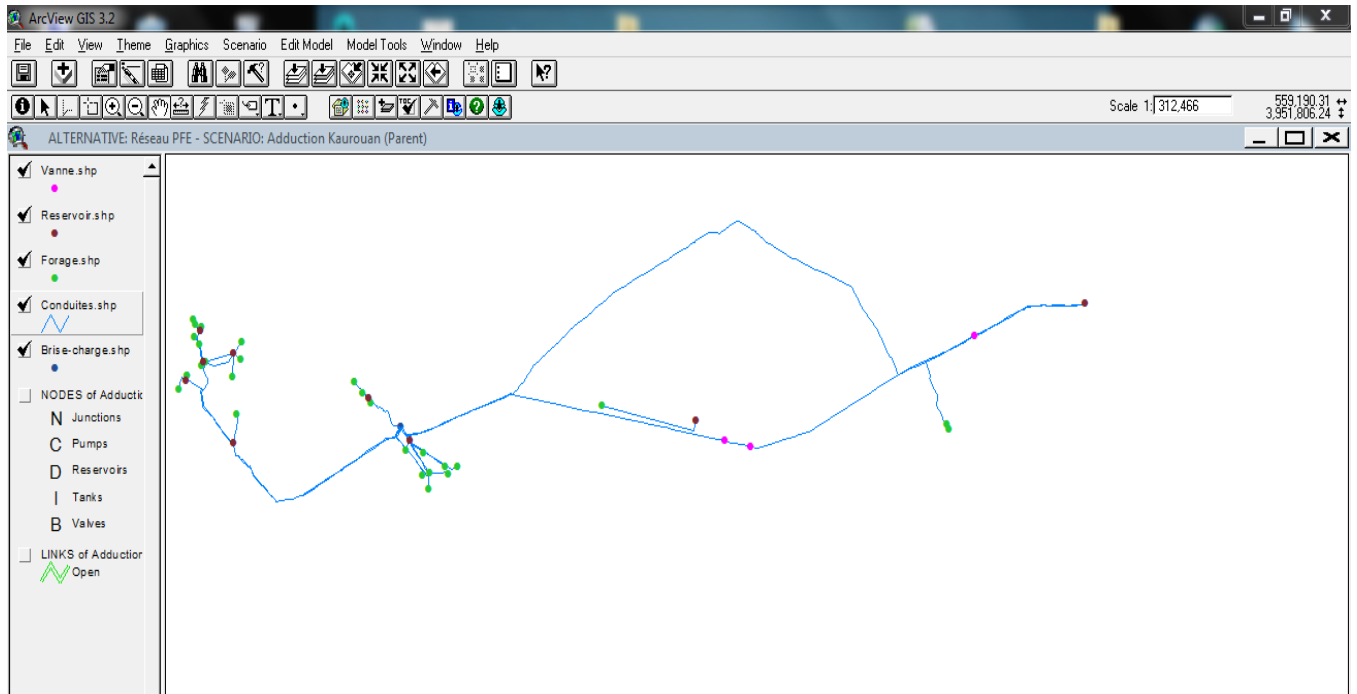
On a mis la carte comme fond et on a numérisé les thèmes suivants et on a associé à chaque thème les caractéristiques dans sa table attributaire :

- ✓ Les forages (entité ponctuel) : l'identifiant, le nom, la côte
- ✓ La brise charge (entité ponctuel) : l'identifiant, la côte
- ✓ Les vannes (entité ponctuel) : l'identifiant, les diamètres
- ✓ Les réservoirs (entité ponctuel) : l'identifiant, les noms, la capacité
- ✓ Les conduites (entité linéaire) : l'identifiant, la longueur, la nature, la date de pose



**Figure 12:** Digitalisation du Réseau d'adduction kairouannais par ArcGis10.1

Après cette étape, on déplace les couches vectrices vers l'Arcview puisque on va utiliser l'extension Gisred qui ne fonctionne que sur l'arcview.

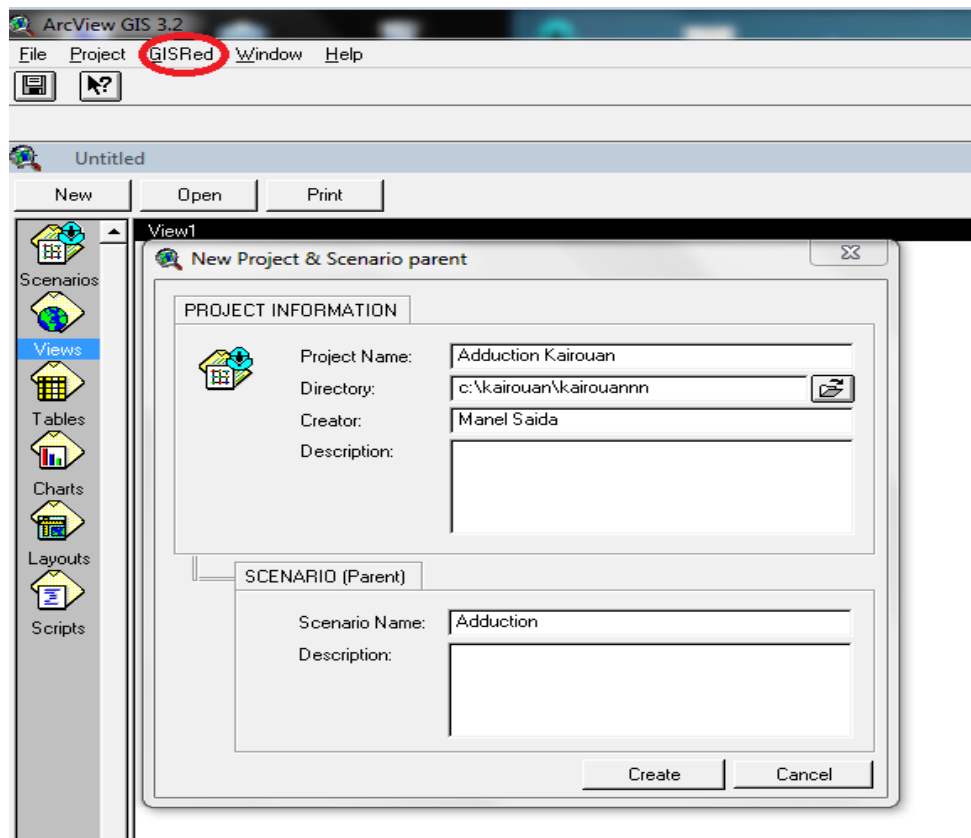


**Figure 13:** Export des couches shapefile vers ArcView (Capture écran)

### 3.2.1.3. Création d'un nouveau projet GisRed :

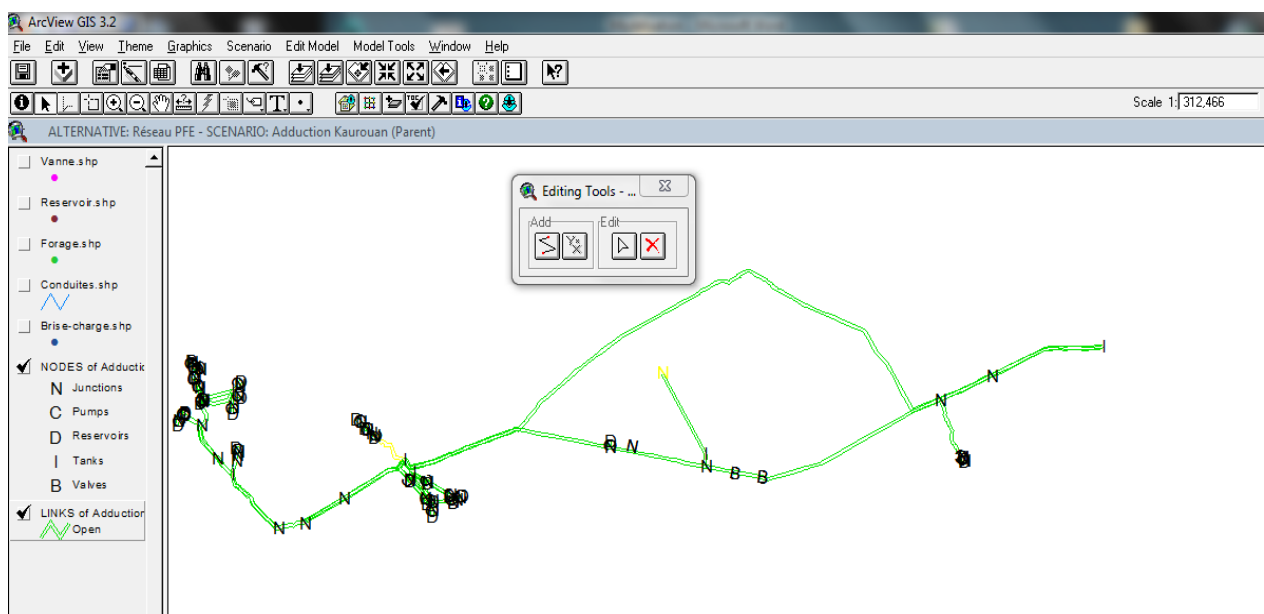
L'extension GISRed d'ArcView permet de résoudre les problèmes de type connexion entre nœud et tronçon et la possibilité de couplage (export et import) entre le logiciel de simulation hydraulique EPANET et les logiciels SIG (ArcView, ArcGis).

L'opération commence par l'activation de l'extension GISRed v 1.0 à partir du menu « File Extension ». Ainsi, un module Scenarios s'ajoute à la liste des 5 modules d'ArcView qui permettra de construire notre projet GISRed (**figure 14**).



**Figure 14:** Création d'un projet GISRed

Par la suite, on considère cette interface comme fond d'écran et on fait la numérisation sous l'extension GisRed après qu'elle soit active comme le montre la figure suivante.

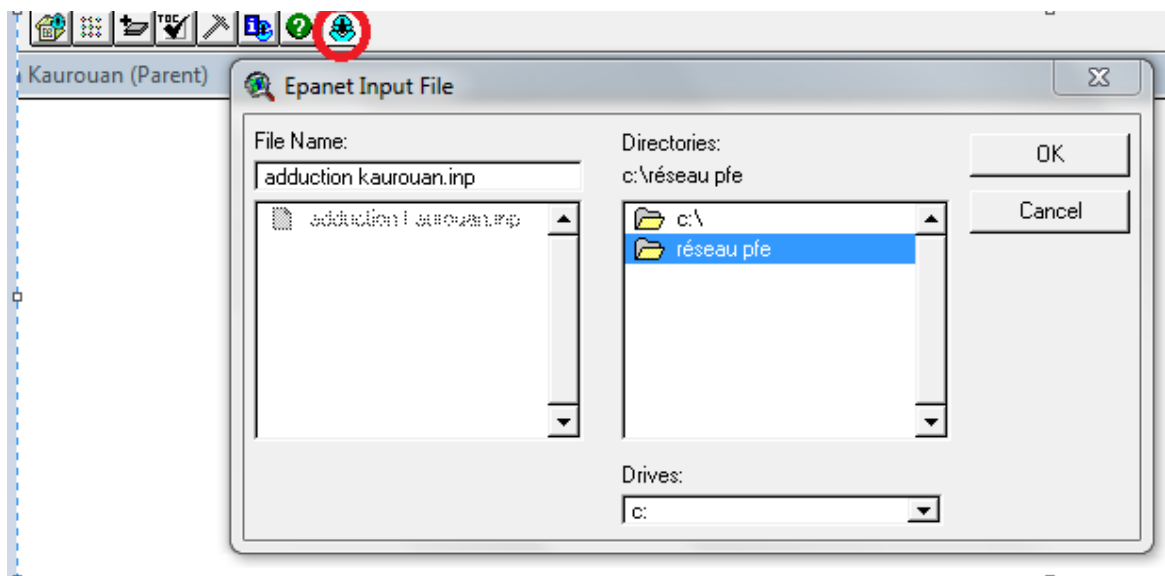


**Figure 15:** Digitalisation sous l'extension GisRed

### 3.2.1.4. Interfaçage SIG-Hydraulique :

Après avoir préparé la base de données, l'étape suivante consiste à développer le modèle hydraulique. L'extension GisRed activée dans ArcView permet d'exporter toutes les données nécessaires à la simulation hydraulique de la base de données SIG vers le logiciel EPANET.

Les couches sont transportées vers Epanet sous forme fichier (.inp). La tâche est montrée dans la figure ci-dessous:



**Figure 16** :Export ArcView-Epanet

Les données à déterminer pour la passation vers EPANET sont :

#### ❖ Les caractéristiques des forages :

Les nappes exploitées par les forages sont considérés comme des sources infinies. Les informations à déterminer sont :

- ✓ La côte ou l'élévation du chaque forage
- ✓ La hauteur d'eau (en mètre) qui est calculée comme suit :

$$Total\ head = TN - ND$$

Avec : TN : cote de terrain naturel de forage ; ND : le niveau dynamique de forage



**RESERVOIR PROPERTIES**

Reservoir: CH5

Reservoir Identification:

Reservoir: CH5 Tag: Elevation: 248 m

Description:

Hydraulic Features:

Total Head: 141.1 m Head Pattern:

Quality Model:

Initial Qual.: mg/l

Source Source Type:

Source Qual.: mg/l Pattern:

Exit

**Figure 17:** Détermination des caractéristiques des forages

❖ **Les caractéristiques des conduites :**

Les informations nécessaires pour les conduites sont : La longueur (en m), Le diamètre(en mm) la rugosité (K=136 pour le béton, fonte ou l'amiante cimente, K=146 pour le PEHD) et le matériel. De plus, il faut choisir la formule avec la quelle le logiciel va faire le calcul de perte de charge. Dans notre cas, on a fixé la formule de Hazen-Williams.

**PIPE PROPERTIES**

Pipe: P32

Pipe Identification:

Pipe: P32 From: J57 To: BC238

Description: Tag:

Hydraulic Features:

Length: 3250 m AutoLength.: 3695.28 m

Diameter: 300 mm Loss Coeff.: 0

Roughnes: 136 Headloss Formula: H-W

Material: Béton et Age (years): 0

Calibration Roughness Group

Quality Features:

Order Bulk Coeff. Order Wall Coeff.

1 0 1/day 1 0 m/day

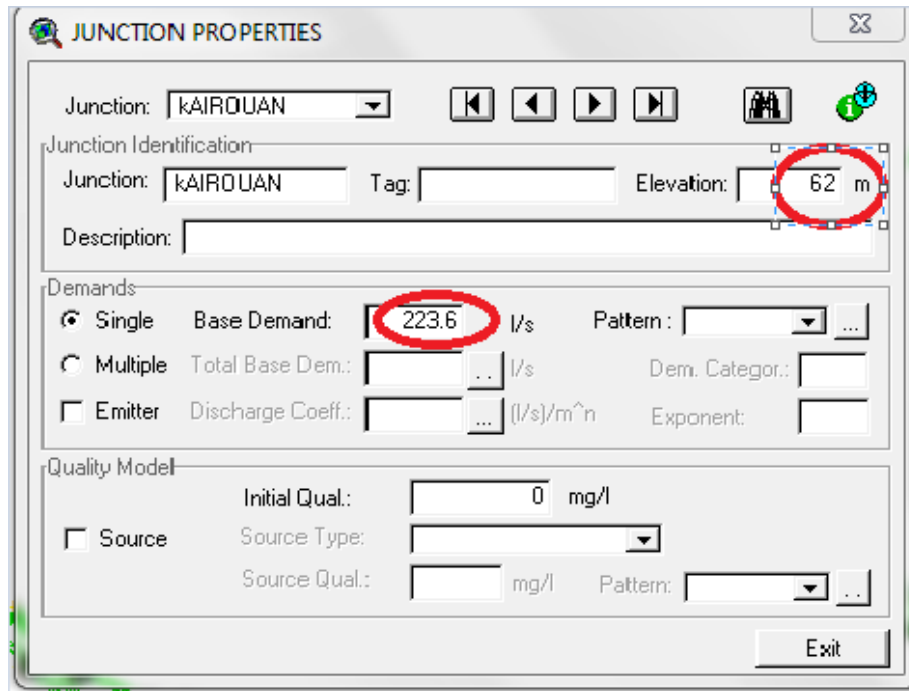
Initial Status: OPEN Controls

Exit

**Figure 18:** Détermination des caractéristiques des conduites

### ❖ Les caractéristiques des nœuds :

De même, il faut déterminer l'élévation des nœuds (m), et leurs demandes (l/s).



**Figure 19:** Détermination des caractéristiques des nœuds

### ❖ Les caractéristiques des vannes et de pompes :

Pour les caractéristiques des vannes, et les courbes de fonctionnement des pompes, on a déterminé après l'export vers l'EPANET pour éliminer le maximum possible des erreurs.

#### ✓ Les caractéristiques des vannes :

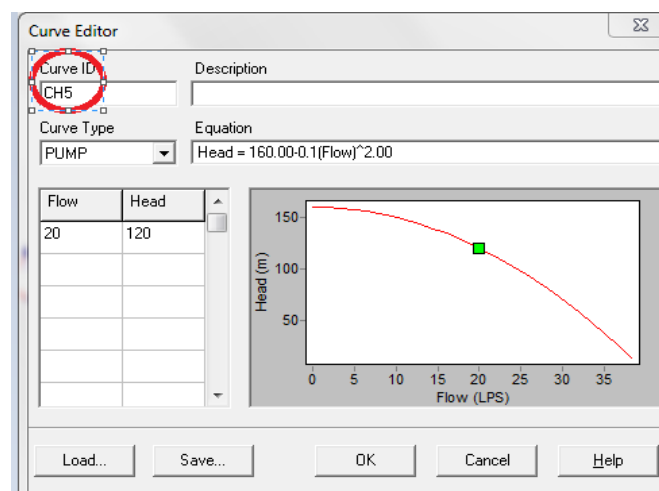
Les vannes qu'on a dans le réseau sont essentiellement des vannes de contrôle de débit (FCV). Le rôle de ces vannes est de limiter le débit. Les caractéristiques à déterminer sont : le diamètre qui doit être égale au diamètre de la conduite d'adduction, et la situation qui doit être ouverte pour fonctionner.

Property	Value
*Valve ID	47
*Start Node	10
*End Node	11
Description	
Tag	
Diameter	800
Type	PRV
*Setting	0
Loss Coeff.	0
Fixed Status	Open
Flow	241.41
Velocity	0.48
Headloss	0.00
Quality	0.00
Status	Open

**Figure 20:** Détermination des caractéristiques d'une vanne de contrôle de débit

✓ **Les caractéristiques des pompes :**

Les informations nécessaires pour les pompes sont celles qui déterminent les courbes de fonctionnements, c'est-à-dire la hauteur manométrique totale (Hmt) et le débit (Q), et le rendement de la dernière année ensuite donner le même identifiant pour la " curve pump" comme montre les figures ci-dessous.



**Figure 21:** détermination de la courbe de fonctionnement de pompe

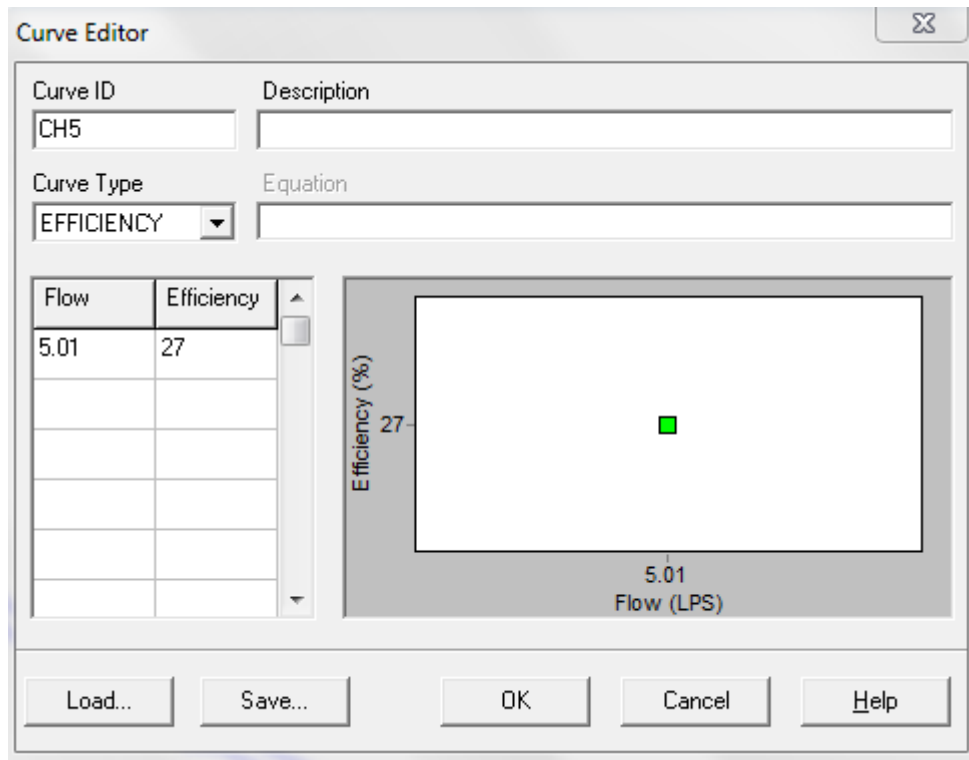


Figure 22: Détermination de la courbe d'efficacité de pompe

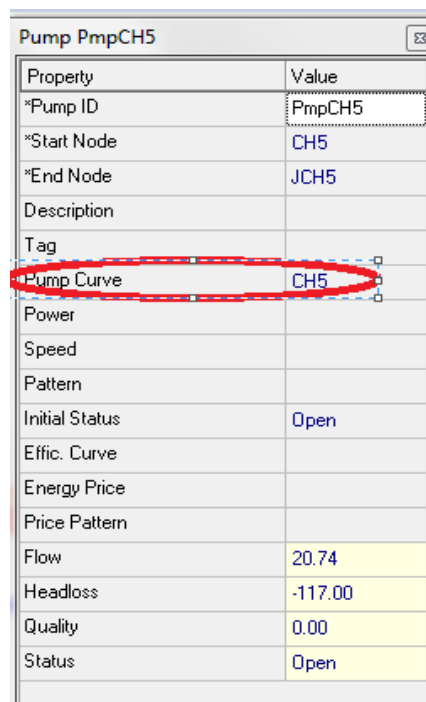
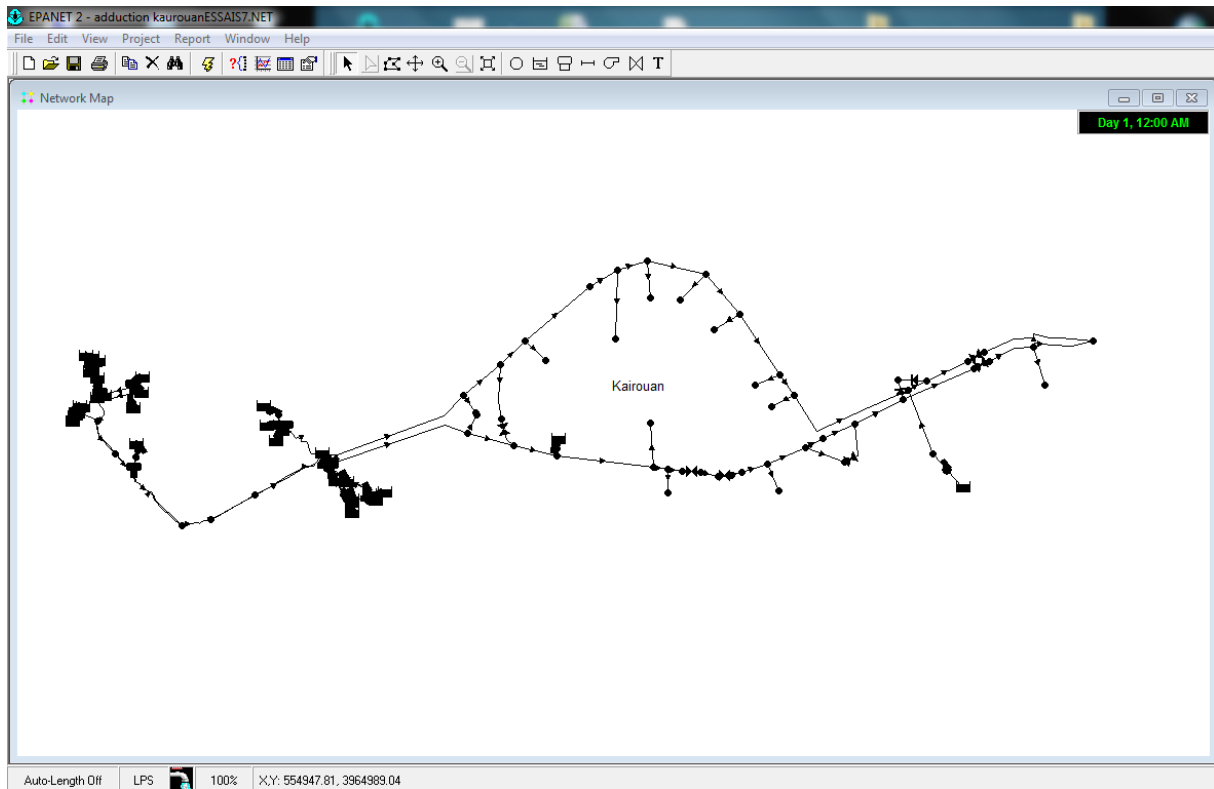


Figure 23: Détermination de l'identifiant de la courbe de pompe

Le résultat qu'on a obtenu après l'export, la correction de quelque erreur, et l'ajout des piquages de notre réseau est montré dans la figure suivante :



**Figure 24:** le réseau d'adduction kairouannais sur EPANET

## Chapitre 4 : Collecte et Analyse des données

### 4.1. Collecte de données :

Les données de modélisation ont été prises à partir de plusieurs documents de la SONEDE et de la DPS (la division de production Sahel) selon la nature de ces données :

- Les données physiques : les côtes des nœuds, les longueurs et les points de piquages sont prise à partir des profils en long.
- La nature des conduites et leurs longueurs ont été obtenues à partir de la DPS,
- Les valeurs des volumes : produits, distribués sont issues de la base de données de la DPS.
- Les valeurs de consommation énergétique, les débits, les hauteurs manométriques totales HMT, et les rendements énergétiques des groupes électropompes à partir les rapports énergétiques annuelles de la DPS.
- Le prix de KWh à partie des factures STEG de direction de maîtrise d'énergie

Toutes ces données ont servies à la création d'une base de données numérique pour 5 ans (2010 – 2014). Le **tableau 1** présente un exemple de données pour une année.

Tableau 1: Statistique de la production et de la consommation d'Energie électrique par les stations de la Division Production du Sahel

Stations	Ref STEG	Volume pompé en m <sup>3</sup>	HMT en m	Consommation énergie Kwh		Montant net à payer en DT	Wh/m <sup>3</sup> (sans pertes)	mill/m <sup>3</sup>	Prix unitaires		Cos O	Dépass en DT	Pénalité en DT	Bonific en DT	Rendement calculé (sans pertes)
				Facturée	sans pertes				mill/m <sup>3</sup> /m	Wh/m <sup>3</sup> /m sans pertes					
Gontass 2bis	680650	361 937	125	323 805	313 101	45 181	865	125	1.0	6.9	0.83	0	0	0	39%
Grine7ter	681100	1 010 044	108	639 841	622 236	83 760	616	83	0.8	5.7	0.93	0	0	1220	48%
Grine 2ter	681140	1 239 900	101	639 173	621 579	87 061	501	70	0.7	5.0	0.86	0	0	0	55%
Grine 5bis	681180	796 768	103	449 051	435 934	60 498	547	76	0.7	5.3	0.94	0	0	926	51%
Grine 4ter	681240	1 222 998	98	608 027	591 753	81 410	484	67	0.7	4.9	0.85	0	0	0	55%
Grine 8	681250	1 139 347	156	1 045 381	1 017 238	140 393	893	123	0.8	5.7	0.92	0	0	892	48%
Grine 11	681270	1 004 524	105	535 716	520 857	70 196	519	70	0.7	5.0	0.96	0	0	1 596	55%
Grine 10	681690	1 249 239	100	627 050	610 400	85 316	489	68	0.7	4.9	0.90	0	0	50	56%
Grine 9	681360	1 238 173	164	942 950	916 813	125 218	740	101	0.6	4.5	0.94	0	0	2129	60%
Repr EL Grine	681400	6 439 293	65	1 766 180	1 767 307	244 824	274	38	0.6	4.2	0.88	0	0	0	65%
Chrechira 1	681590	407 962	140	331 261	321 707	45 760	789	112	0.8	5.6	0.95	0	0	797	48%
Chrechira 5	681600	243 439	130	212 265	205 588	29 852	845	123	0.9	6.5	0.93	0	0	211	42%
Chrechira3+3bis	681610	340 652	78	175 344	168 848	24 105	496	71	0.9	6.4	0.98	0	0	774	43%
Haffouz 7	681630	317 518	64	106 522	102 550	15 100	323	48	0.7	5.1	0.87	11	0	17	54%
O,Msilah 1ter	681680	1 377 009	58	449 702	438 308	60 866	318	44	0.8	5.5	0.89	0	0	0	50%
O,Msilah 1	681690	1 355 453	48	393 688	382 910	52 848	282	39	0.8	5.9	0.92	0	0	494	46%
O,Msilah 2bis	681750	1 402 899	48	436 629	425 010	57 906	303	41	0.9	6.3	0.93	0	0	751	43%
Mselssel 1	682770	892 033	98	447 059	435 234	60 974	488	68	0.7	5.0	0.87	0	0	0	55%
Mselssel 2	682790	1 416 081	52	353 983	342 690	47 769	242	34	0.6	4.6	0.84	0	0	0	59%
Bouhafna 4bis	681760	1 769 437	54	505 297	492 329	68 456	278	39	0.7	5.2	0.9	13	0	216	53%
Bouhafna 8	681770	1 359 677	50	439 954	426 985	58 956	314	43	0.9	6.3	0.94	0	0	934	43%
Bouhafna 7ter	681780	1 470 569	47	433 128	420 283	58 640	286	40	0.8	6.0	0.83	0	0	0	45%
Bouhafna 9	681800	1 637 170	49	509 216	494 880	69 167	302	42	0.9	6.2	0.87	0	0	0	44%
Bouhafna 1bis	681810	1 655 137	69	639 340	622 450	84 304	376	51	0.7	5.4	0.96	0	0	1979	50%
Bouhafna 10	681820	1 645 312	65	599 465	582 653	80 564	354	49	0.8	5.5	0.87	0	0	0	50%
Bouhafna 3ter	681850	1 278 794	60	534 084	519 258	71 257	406	56	0.9	6.7	0.95	0	0	1425	40%
St Filt Hark	637450	331 669	37	59 511	50 698	10 013	153	30	0.8	4.1	0.98	0	0	218	66%
Rr Harkoussia	637370	--	--	23 819	21 941	3 528	--	--	--	--	1.0	0	0	135	--
Rr El Onk	532520	--	--	13 577	11 899	2 094	--	--	--	--	1.0	0	0	83	--
<b>Total</b>		<b>28163741</b>	<b>85</b>	<b>14241018</b>	<b>13883439</b>	<b>1926016</b>	<b>493</b>	<b>68</b>	<b>0.8</b>	<b>5.8</b>	<b>0.91</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>14847</b>	<b>47%</b>

## 4.2. Analyse de données :

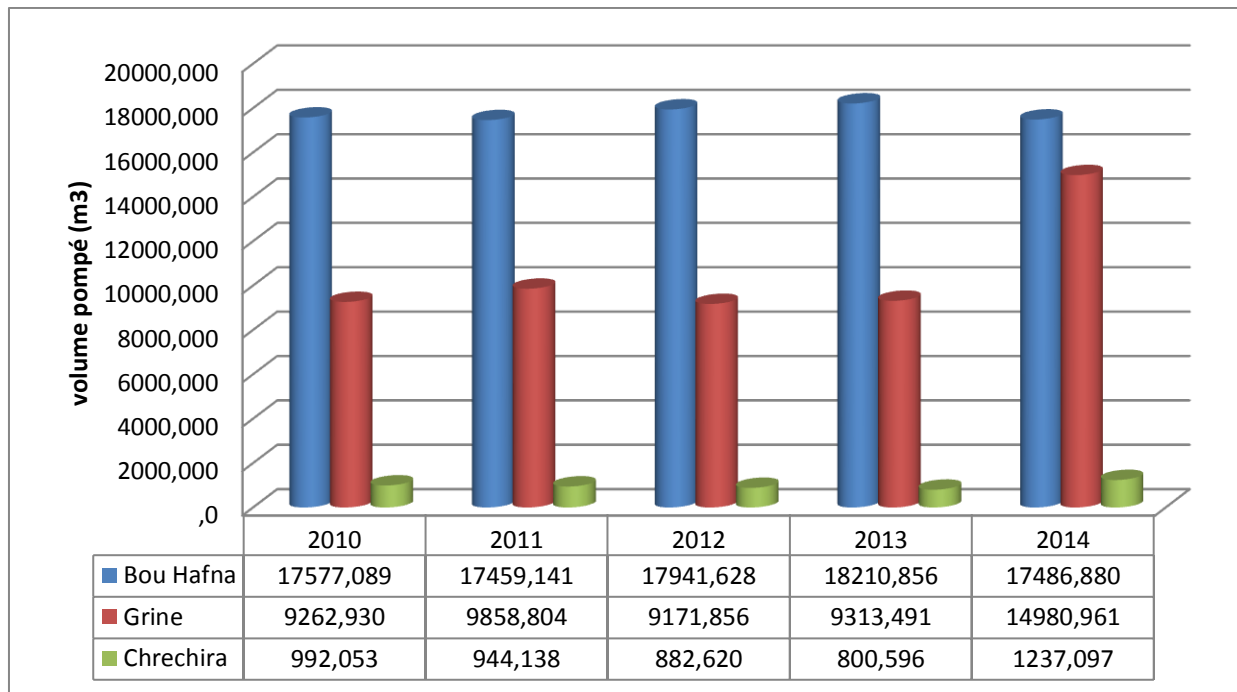
Pour évaluer les rendements des groupes électropompes, il faut d'abord déterminer les caractéristiques de la production et de la consommation d'énergie par champ. Le diagnostic technique et énergétique du système a été effectué sur la base des indicateurs de performances suivants :

- ✓ La production des forages : Volume pompé par forage
- ✓ La consommation énergétique des groupes motopompes des forages (KWh)
- ✓ La consommation spécifique KWh/m<sup>3</sup>
- ✓ La hauteur manométrique totale Hmt par forage
- ✓ La consommation spécifique par Hmt (KWh/m<sup>3</sup>/Hmt)
- ✓ Le rendement global des pompes
- ✓ Le coût en dinars de m<sup>3</sup> par forage

### 4.2.1. La production des forages Kairouannais :

Le champ BouHafna est constitué de 13 forages qui sont: Haffouz7, Oued Msileh1ter, OuedMsileh1, OuedMsileh 2bis, BouHafna 4 bis, BouHafna 8, BouHafna 7 ter, BouHafna 9, BouHafna 1bis, BouHafna 10 et BouHafna 3 ter, Msalsel1, Msalsel2, et Msalsel 3 qui est mise en fonctionnement en octobre 2013. Il existe deux autres forages qui sont Zardoub4 et Zardoub5 qui sont exploités essentiellement par le CRDA pour l'irrigation. Mais la SONEDE les exploite dans les mois de pointe (Juillet et Août) ou en temps du chômage du canal d'adduction du Nord (Janvier et Février). Avec ce nombre important de forages, le champ du Bou Hafna constitue la source principale des eaux du Kairouannais. En effet, il produit 65% de la production totale comme montre **la figure7**. D'ailleurs, il produit 63% (17 577 089 m<sup>3</sup>) de la production de 2010, 64% de la production de 2013 (18 210 856 m<sup>3</sup>) et 50% (17 486 880 m<sup>3</sup>) de la production de 2014.





**Figure 25:** Production des forages Kairouannais par champ

En deuxième lieu arrive le champ d'El Grine qui est formé de 8 forages (Gontass2bis, Grine7ter, Grine2ter, Grine4ter, Grine8, Grine9, Grine 10, Grine11) et une station de suppression. Il produit 33% ( de l'ordre de 9 300 000 m<sup>3</sup>) de la production totale en 2010 et 2013, et 44% (14 980 961 m<sup>3</sup>) en 2014 , suivi du champ Chrechira qui est constitué de 4 forages et qui sont Chrechira1, Chrechira5, Chrechira3, et Chrechira3bis. Ces deux derniers seront considérés en une seule police STEG à partir de 2013 puisque le forage de Chrechira ne devient plus rentable et la SONEDE a décidé de l'accoupler avec Chrechira3bis avec une production de 992 053 m<sup>3</sup> (3 %) en 2010, 800 596 m<sup>3</sup> (4%) en 2013, et 1 237 097 m<sup>3</sup> (3,6%) en 2014.

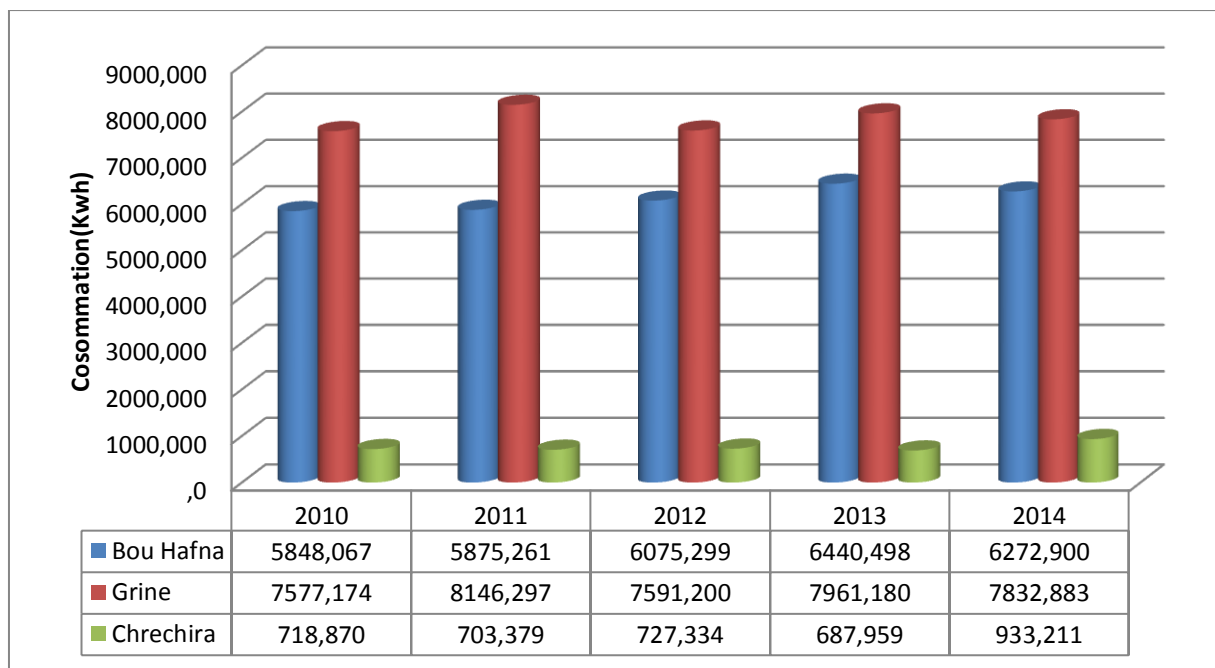
Cette quantité tirée chaque année a un impact sur le niveau statique des nappes et sur le niveau dynamique des forages.

#### 4.2.2. La consommation d'énergie électrique en KWh et la consommation spécifique en KWh/m<sup>3</sup> :

L'ordre d'importance de champ change lorsqu'on parle d'énergie. Le champ d'El Grine est le grand consommateur d'énergie avec un total de consommation en 2011 de l'ordre 8 146 297 KWh (55%) de la consommation totale (**Figure 27**) c'est-à-dire une consommation spécifique de 0,826 KWh/m<sup>3</sup> (**Figure 28**). En 2013, la consommation a atteint 7 961 180 KWh (53% de

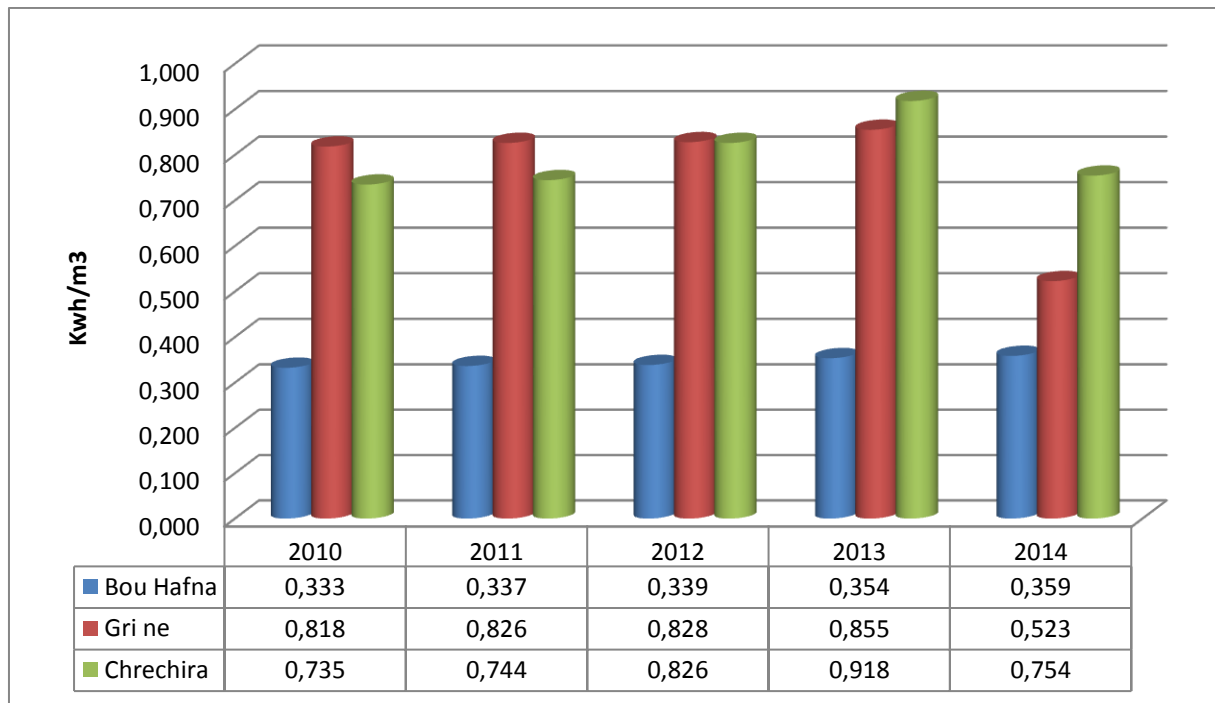
la consommation totale), et en 2014, elle atteint 7 832 883 KWh (52% de la consommation totale). Cela s'explique par le fait que les eaux des forages d'El Grine sont regroupées dans une station de pompage.

Cette importante consommation d'énergie et de consommation spécifique est expliquée par la chute de rendement d'équipement de plusieurs forages dans ce champ tel que le forage Grine 2 ter qui enregistre un rendement de l'ordre de 55% en 2011. L'augmentation de la consommation spécifique en 2013 est due à la dégradation du débit d'équipement. Aussi, les équipements des Grine 4 ter, Grine10, et Grine 11 enregistrent une légère diminution de l'ordre de 2% entre 2010 et 2014.



**Figure 26:** Consommation d'énergie électrique des forages Kairouannais par champ

En degré inférieur vient le champ de Bou Hafna avec une consommation de 6 075 299 KWh (42% de la consommation totale) en 2012 (**Figure 27**), correspondant à une consommation spécifique de 0,339 KWh/m<sup>3</sup> et de 6 440 498 KWh (43% de la consommation totale) avec une consommation spécifique de 0,354 KWh/m<sup>3</sup> en 2013 (**Figure28**). Puis, le champ de Chrechira avec une consommation de l'ordre de 727 334 KWh (5% de la consommation totale) en 2012 (**Figure27**), correspondant à une consommation spécifique de l'ordre de 0,826 KWh/m<sup>3</sup>(**Figure28**) et 933 211 KWh (6% de la consommation totale) en 2014 avec une consommation spécifique de l'ordre de 0,754 KWh/m<sup>3</sup>.

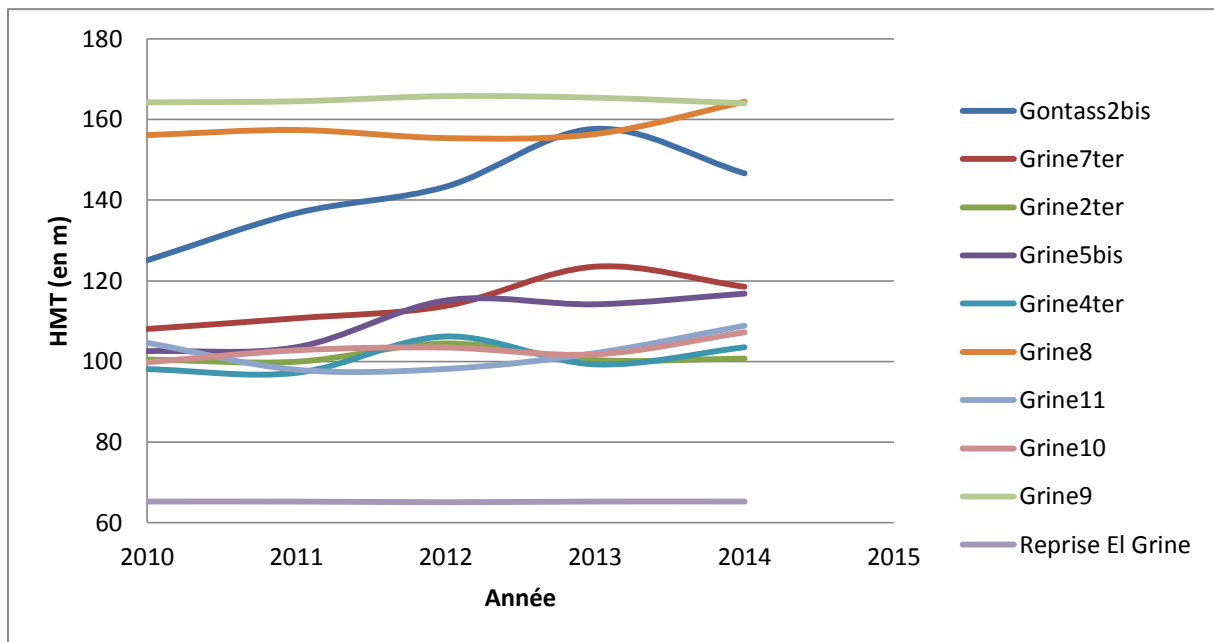


**Figure 27:** Consommation spécifique des forages Kairouannais par champ

Malgré que Chrechira soit le plus faible producteur d'eau et le plus faible consommateur d'énergie, sa consommation spécifique est assez forte avec  $0,918 \text{ KWh/m}^3$  en 2013, presque égale à celle du champ El Grine ( $0,855 \text{ KWh/m}^3$  en 2013) alors que ce derniers renferme une station de reprise, cela peut être expliqué par la diminution du niveau piézométrique de ces champs d'une part et la limitation de débit d'autre part et par la suite l'augmentation de la hauteur manométrique totale (Hmt) de leurs forages (**Figure 29**). Ainsi il est intéressant de présenter l'évolution de la hauteur manométrique totale Hmt par forage dans chaque champ.

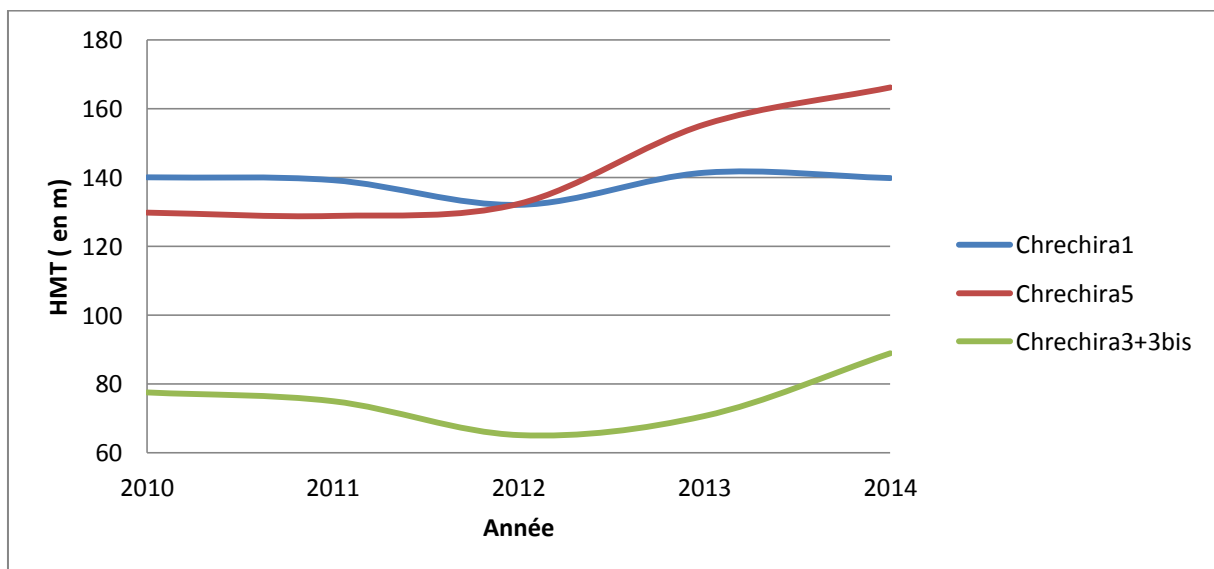
#### 4.2.3. L'évolution de la hauteur manométrique totale (Hmt) :

La HMT a passé au forage El Gontass 2 bis de 125 m en 2010 à 158 m en 2013, c'est à dire un rabattement de 33 mètres en 3 ans, soit une moyenne de 11 m de rabattement chaque année. De même pour le forage El Grine 7 ter qui passe de 108 m en 2010 à 124 m en 2013. Aussi pour le forage de Grine 5 bis qui a passé de 103 m en 2010 à 115 m en 2012. Pour les autres forages tels qu'El Grine 4 ter, Grine 8, Grine 10, et Grine 9, ils ne subissent qu'une faible variation de 1 m ou 2 m en 4 ans (**figure 30**).



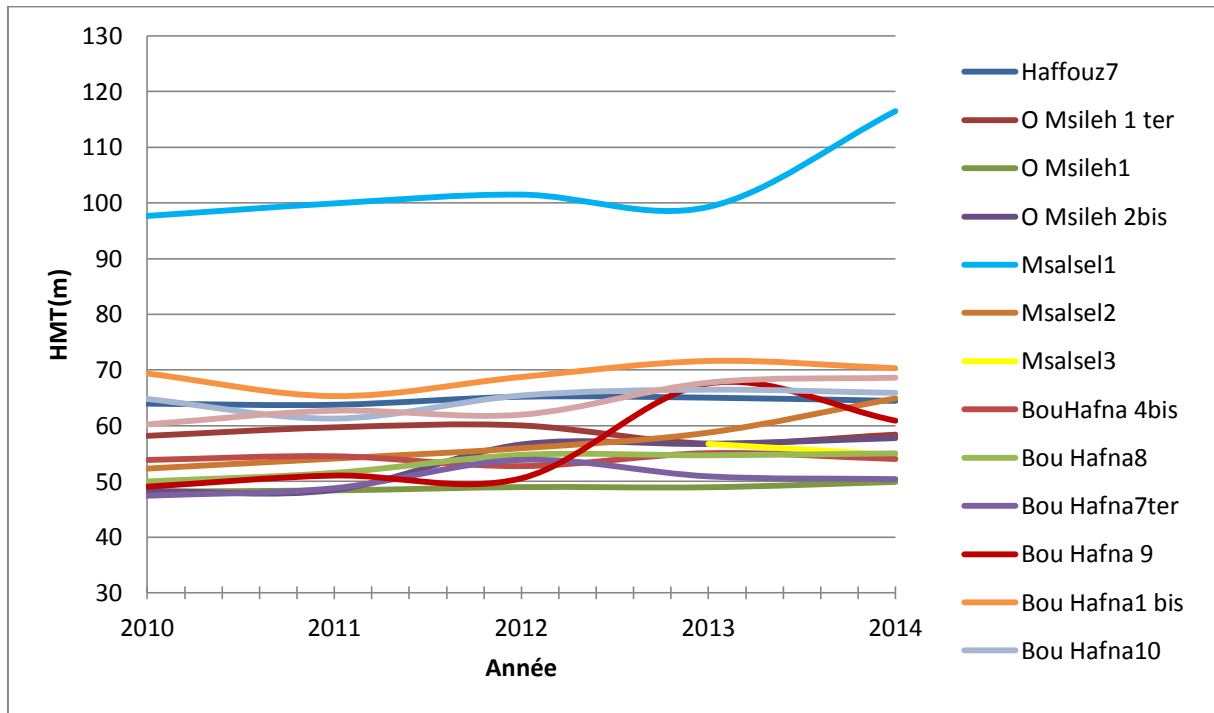
**Figure 28:** Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages El Grine

Le cas est de même pour le champ de Chrechira, car des mesures de la **figure 32** montrent que la Hmt a bien augmenté. En effet, la Hmt de Chrechira 5 a passé de 130 m en 2010 vers 166 m en 2014 et la Hmt de forage3+3bis a passé de 78 m en 2010 vers 65 m en 2012, cette chute est causé par l'arrêt du groupe immergé au niveau de Chrechira 3 bis en juillet 2011 suite à une pause. Pour le forage de Chrechira1, il subit une faible variation de l'ordre de 1 m en passant de 140 m à 141 m entre 2010 et 2014.



**Figure 29:** Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages Chrechira

Pour les forages de Bou Hafna, la HMT est presque stable, ne subit qu'une faible diminution de l'ordre de 1 m entre 2010 et 2014 pour la plupart de ses forages, ce qui explique la productivité élevée du champ Bou Hafna. Juste au niveau du Msalsel 1 où la Hmt passe de 98 m en 2010 vers 116 m en 2014 (**Figure 33**).



**Figure 30:** Le suivi de la hauteur manométrique totale Hmt des forages Bou Hafna

#### 4.2.4. La consommation spécifique par Hmt:

Ce paramètre est très important pour évaluer la performance des groupes de pompage. En effet, en 2010, la valeur moyenne de ce paramètre est de l'ordre de  $0,005342 \text{ KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt. La plupart des forages Kairouannais ont des valeurs sous cette valeur sauf Gontass 2 bis avec une valeur égale à  $0,0069 \text{ KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt, Chrechira 5 avec une valeur égale à  $0,0065 \text{ KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt, Oued Msileh 2 bis avec une valeur égale à  $0,0062$ , Bou Hafna 8, BouHafna 7 ter, BouHafna 9, et BouHafna 3 ter ont des valeurs élevés (**Figure31**).

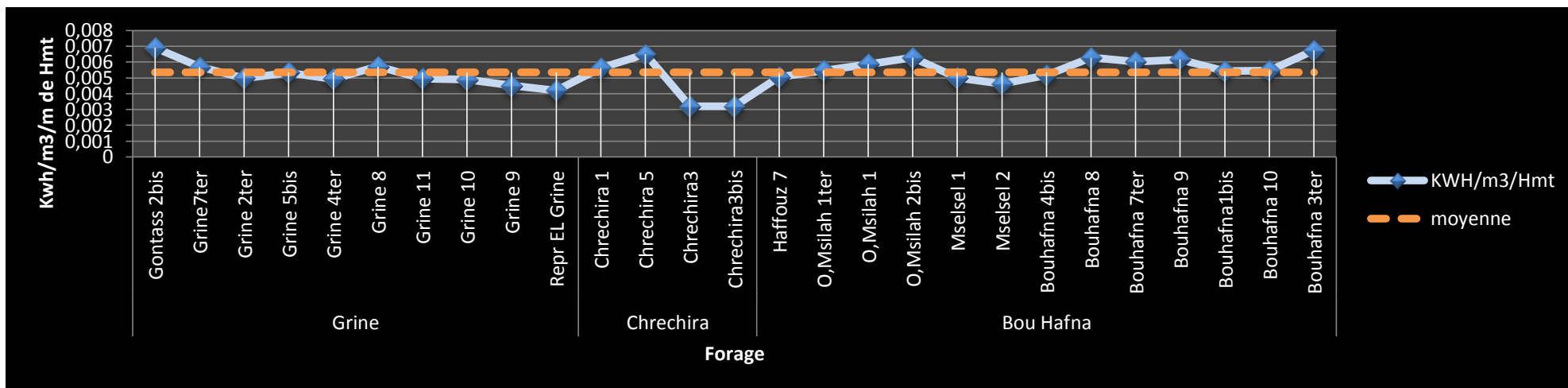


Figure 31: L'évolution de KWh/m3/m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2010

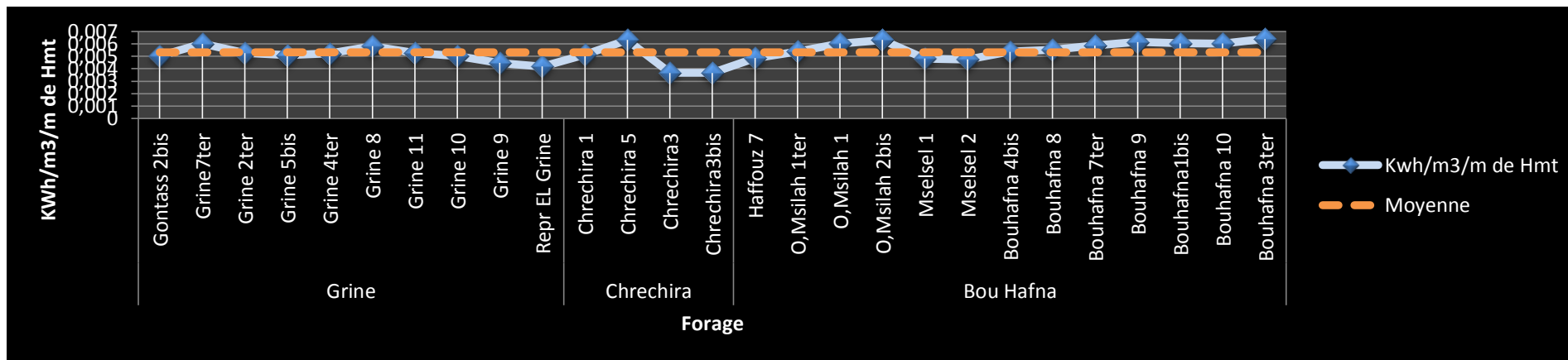


Figure 32: L'évolution de KWh/m3/m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2011

Un problème apparaisse en 2012 au niveau du champ Chrechira : la valeur de  $\text{KWh/m}^3/\text{m}$  Hmt est presque égale le double de la valeur moyenne au niveau de Chrechira 3 et Chrechira 3 bis (**figure 32**), cela est due à l'arrêt du groupe immergé dans le forage chrechira 3 bis qui arrête en juillet 2011, de plus l'abaissement de la colonne d'eau au niveau de Chrechira 5 et l'étranglement de la vanne de refoulement, ce qui provoque une chute importante du rendement.

Les forages de Bou Hafna enregistrent une amélioration au niveau de ce paramètre puisque la plupart de forage se rapproche de la valeur moyenne. Par exemple, la valeur de  $\text{KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt de Bou Hafna 8 diminue d'une façon remarquable pour atteindre une valeur égale à 0,0049 due principalement au changement du groupe immergé.

En 2013 (**Figure 33**), le problème est assez grave pour le forage Chrechira 5, ou la valeur de  $\text{KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt est très élevé égale à 0,01. C'est parce que la consommation spécifique augmente énormément suite à la limitation de débit et par conséquent la chute de rendement.

En 2014 (**Figure34**), la courbe d'évolution de  $\text{KWh/m}^3/\text{m}$  de Hmt montre quatre pics importantes pour les forages suivantes : Grine 7 ter, Chrechira 5, Mselsel 3, et Bou Hafna 1bis. Le pic au niveau Chrechira 5 est dû à la limitation de débit, le pic au niveau de Mselsel 3 est expliqué par la chute de débit qui est du à l'arrivée massive des argiles rouges et ce qui provoque l'arrêt de ce forage durant 3 mois. Le pic au niveau de Bou Hafna 1bis est dû à l'étranglement de la vanne et pour le pic de Grine 7 ter est causé par un problème au niveau de l'équipement.

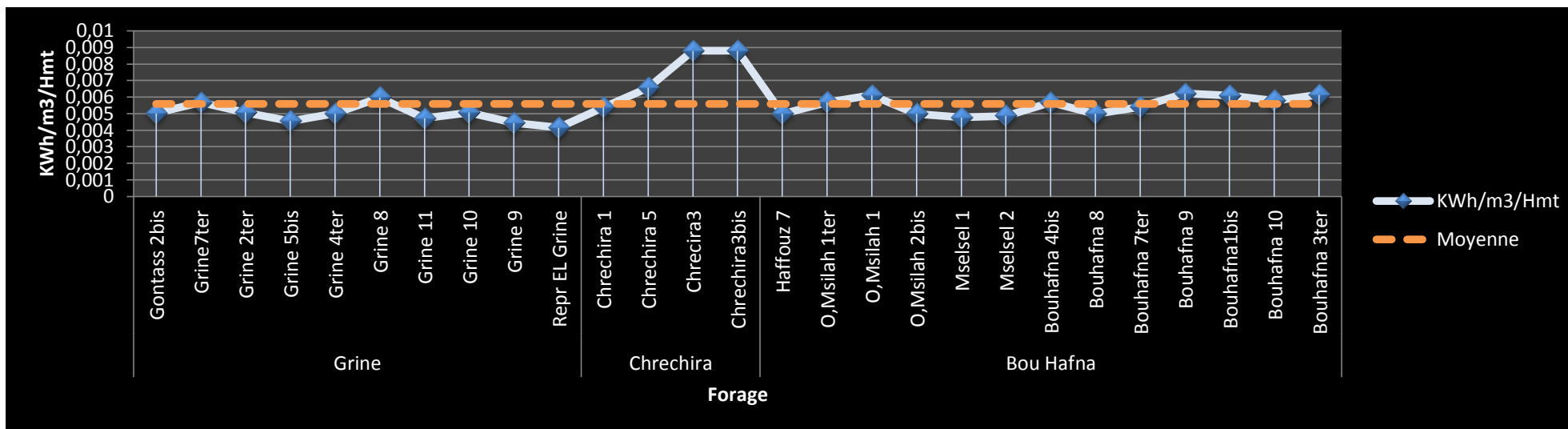


Figure 33: L'évolution de KWh/m3/m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2012

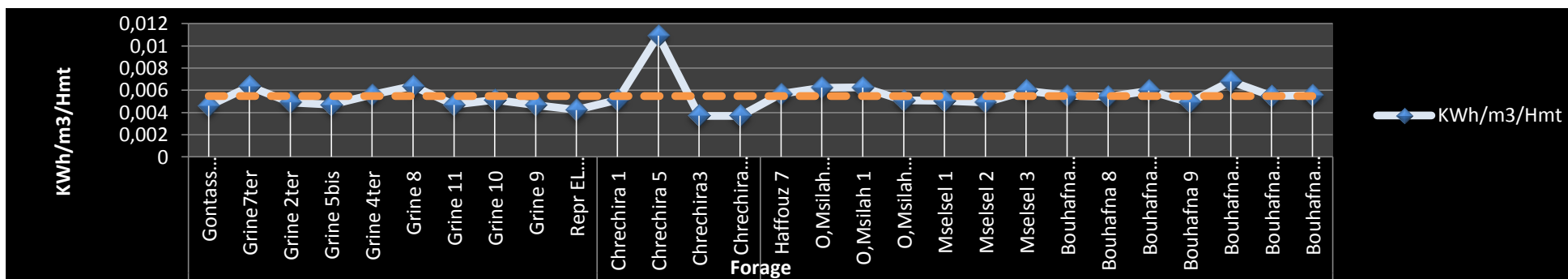


Figure 34: L'évolution de KWh/m3/m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2013



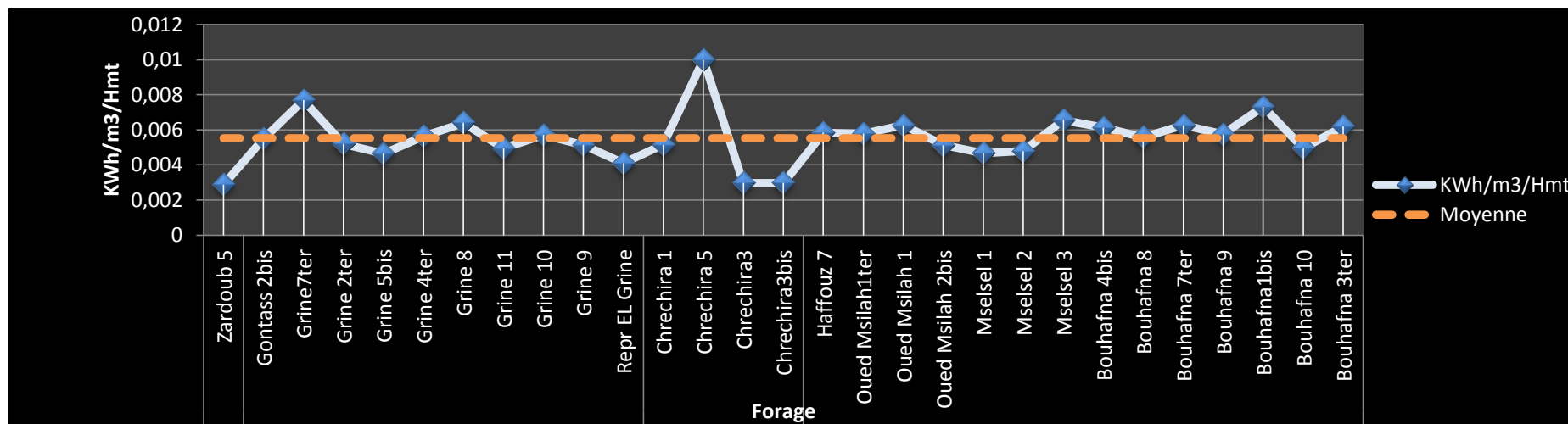
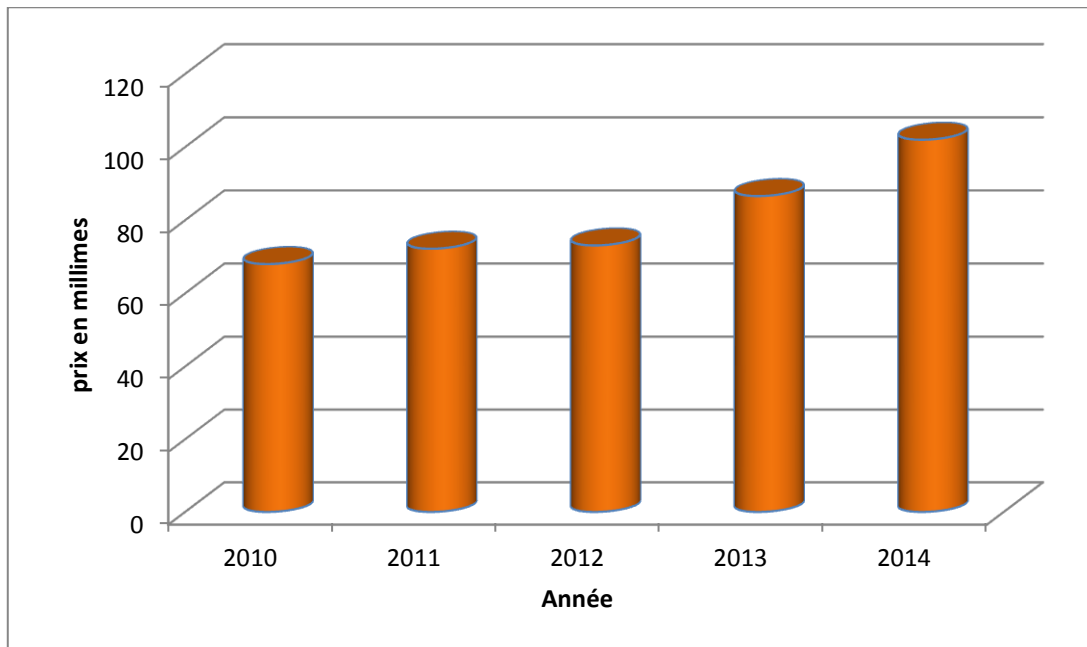


Figure 35: L'évolution de KWh/m3/m de Hmt pour les forages Kairouannais en 2014

#### 4.2.5. L'évolution du coût du m<sup>3</sup> d'eau potable :

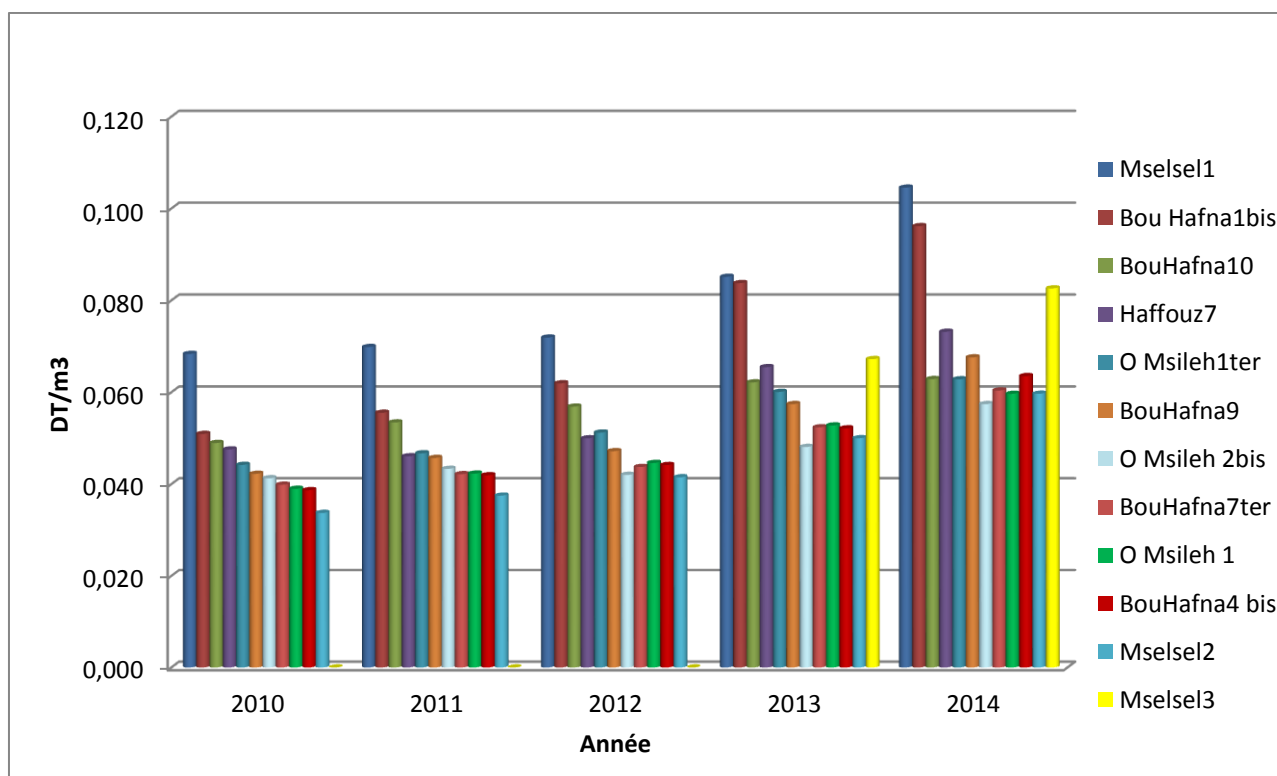
La consommation d'énergie qui est influencée par la variation de Hmt, a un effet direct sur le coût de pompage du m<sup>3</sup> d'eau. La figure suivante montre l'évolution du coût de pompage du m<sup>3</sup> qui a passé de 68 millimes en 2010 vers 102 millimes en 2014 avec un taux d'évolution égale à 50%.



**Figure 36:** l'évolution du coût de m<sup>3</sup> d'eau en millimes entre 2010 et 2014

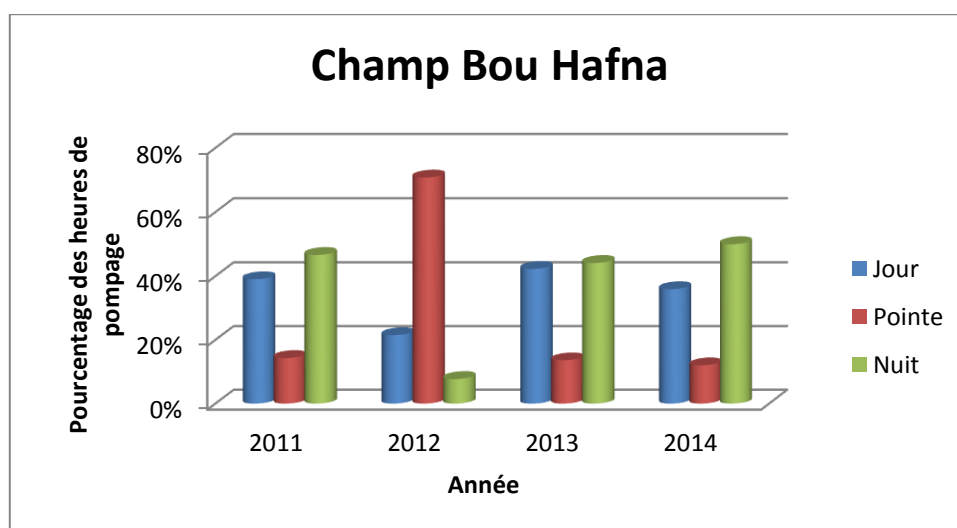
En effet, on a fait présenter la variation du coût de pompage pour chaque champ par forage (**Figures 37, 39 et 41**).

La **figure 41** qui présente la variation du coût du m<sup>3</sup> des forages du champ Bou Hafna, montre une évolution importante du coût entre 2010 et 2014, cela est du à l'augmentation du tarif STEG.



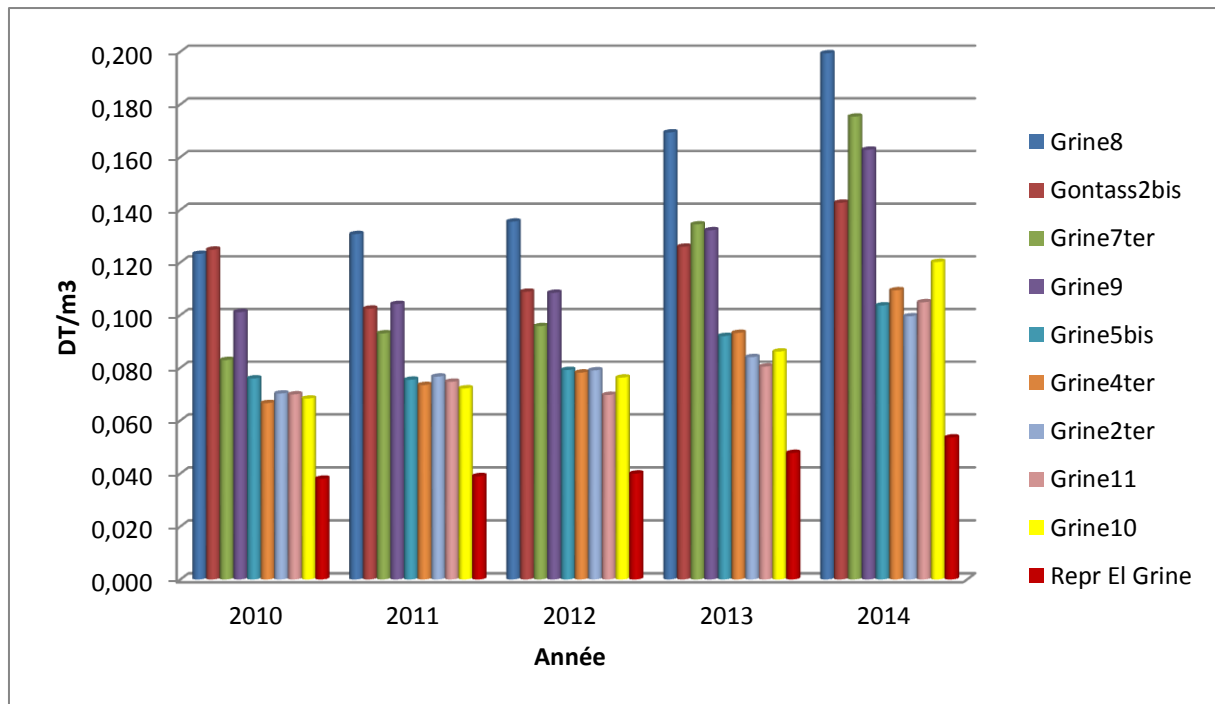
**Figure 37:** Variation du coût du m<sup>3</sup> d'eau des forages du champ Bou Hafna

Le m<sup>3</sup> d'eau dans le forage du Msalsel 1 est plus couteux. En effet, il passe de 0,068 DT en 2010 vers 0,101 DT en 2014, ensuite le forage de Bou Hafna 1 bis, le coût de m<sup>3</sup> passe de 0,051DT en 2010 vers 0,096DT en 2014. D'après les factures STEG de 2014, la moyenne de la consommation est de l'ordre de 35% en jour, 37% en nuit et 28% en pointe comme montre la **figure 38**. Il est noté que la tarification STEG est plus élevée dans les heures de pointe.



**Figure 38:** les pourcentages des heures de pompage du champ Bou Hafna

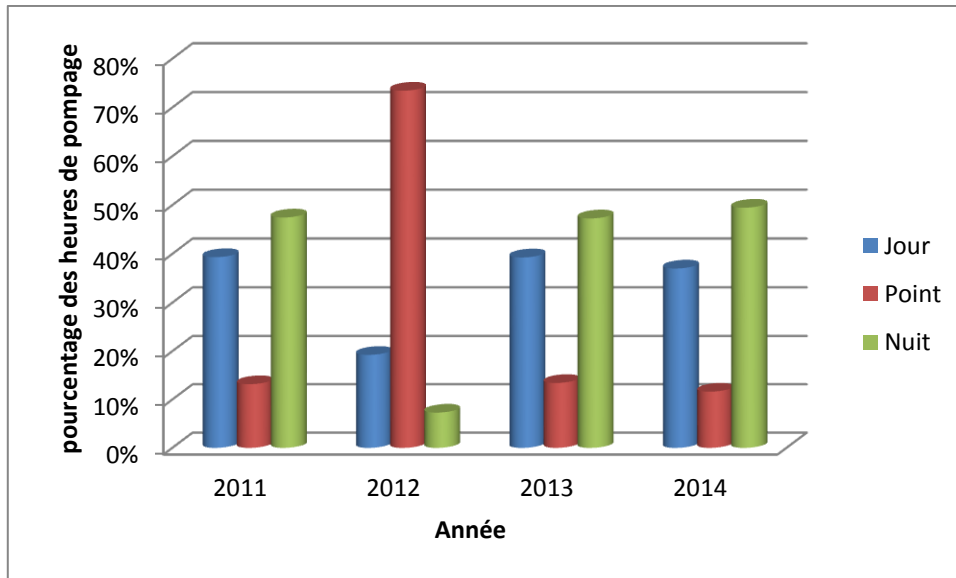
Pour les forages d'El Grine, la Hmt subit aussi une augmentation et comme résultat directe on observe l'augmentation du coût du pompage du m<sup>3</sup> d'eau (**figure43**).



**Figure 39:** Variation du coût de m<sup>3</sup> d'eau des forages du champ El Grine

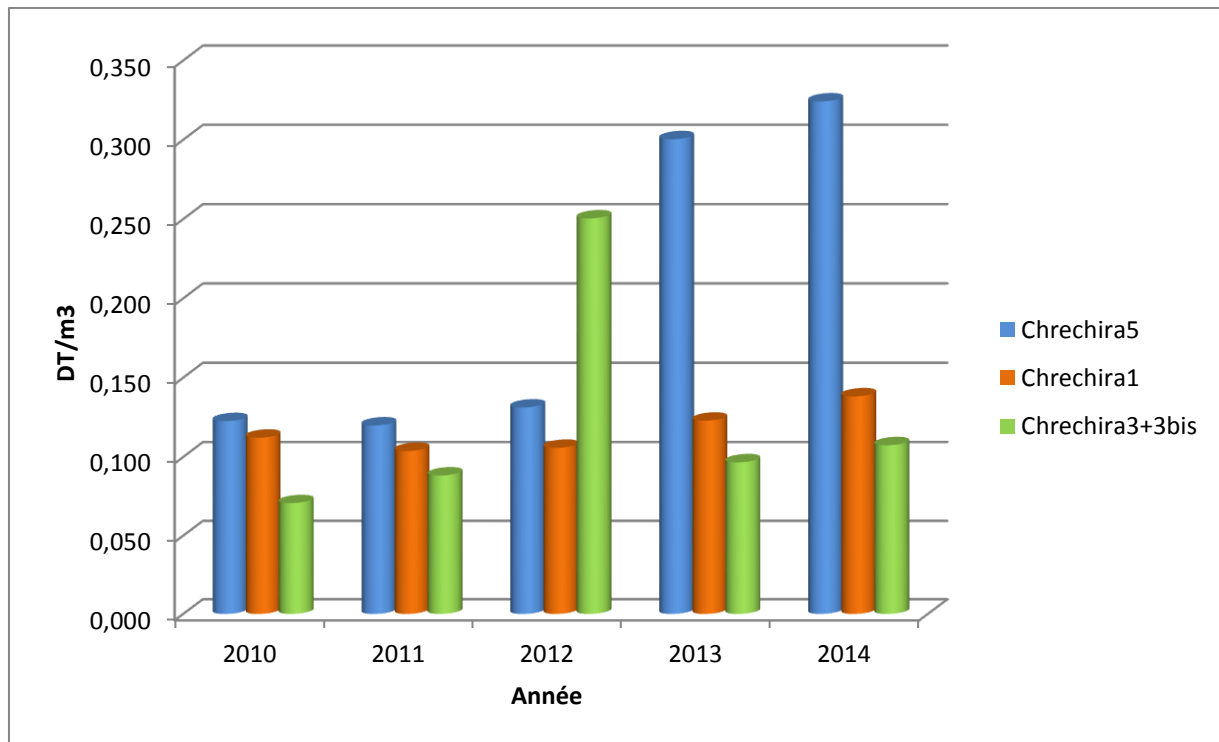
D'après la **figure 39** le pompage d'un m<sup>3</sup> d'eau à partir du forage Grine 8 est plus couteux que les autres avec 0,0199 DT le m<sup>3</sup>. Mais, de point de vue évolution le graphique montre que l'évolution la plus importante se fait au niveau du forage Grine 7 ter. En effet, le coût du m<sup>3</sup> passe de 0,083 DT en 2010 à 0,175 DT en 2014. Puis Grine 8 avec une évolution de l'ordre de 0,076 DT entre 2010 et 2014 en passant de 0,123 DT vers 0,199 DT. Ensuite, Grine 10 avec une évolution de l'ordre de 0,052 DT en passant de 0,068 DT vers 0,052 DT. Cependant les coûts du m<sup>3</sup> aux niveaux des restes des forages ne subissent que de faibles évolutions.

La **figure 40** représente les pourcentages de la consommation d'énergie en jour, nuit et pointe. Cette consommation est presque invariable : par exemple, en 2011, 39% de la consommation se fait le jour, 47% la nuit, et 14% en pointe. De même, en 2013, 42% de la consommation se fait le jour, 14% la nuit et 44% en pointe. Le problème est claire en 2012, où 71% de la consommation se fait dans les heures de pointe et cela explique peut-être le problème de coupure d'électricité et les dégâts qu'il provoque en 2012.



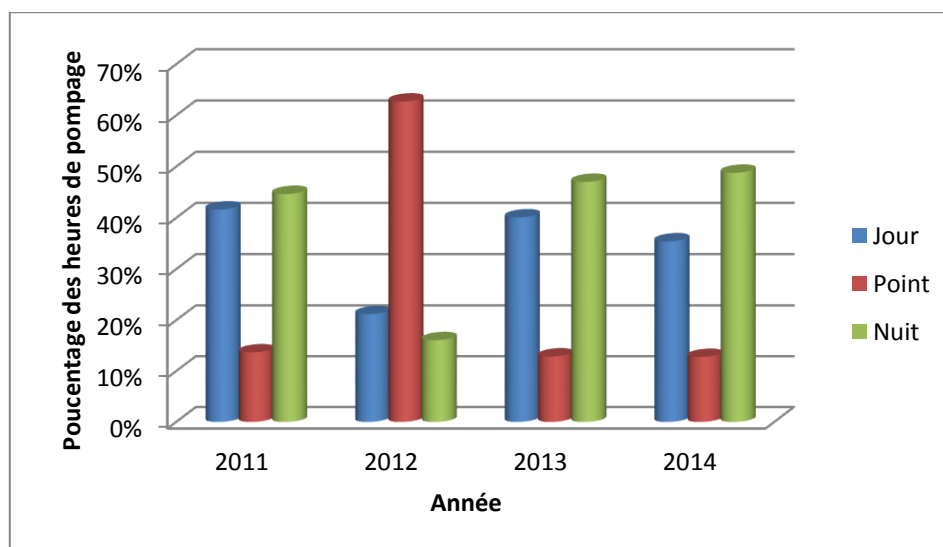
**Figure 40:** les pourcentages des heures de pompage du champ El Grine

Pour le champ de Chrechira, le coût du m<sup>3</sup> le plus élevé est enregistré en 2014, il est égale à 0,324 DT au niveau de forage Chrechira 5, ensuite Chrechira 1 par un coût égale à 0,138DT par m<sup>3</sup>, par suite Chrechira 3+3bis avec un coût égale à 0,107 DT. Cet ordre est presque invariable, l'exception se fait seulement en 2012 où le coût le plus élevé est enregistré chez Chrechira3+3bis avec un coût égale à 0,250 DT puisque à la fin de 2011 l'équipement de Chrechira 3bis sera à faible rendement (**Figure 41**).



**Figure 41:** Variation du coût de m3 d'eau des forages du champ Chrechira

Concernant le pourcentage de la consommation en jour, nuit et pointe du champ Chrechira (**figure 42**), ce champ ne montre pas une variation par rapport aux autres. Le pourcentage de pompage le plus élevé se fait en jour et nuit ou la tarification de STEG est plus basse. Le pourcentage le plus faible est en heures de pointe. Le problème de 2012 apparaît aussi pour ce champ, ou 63% de pompage se réalise dans les heures de pointe.



**Figure 42:** les pourcentages des heures de pompage du champ Chrechira

Ainsi le coût du m<sup>3</sup> d'eau augmente progressivement de 2010 vers 2014. Et pour conclure, on a présenté le coût d'un m<sup>3</sup> en millimes par forage dans la **figure 43** pour faire la comparaison entre les champs de production d'eau potable Kairouannais.

Le coût le plus faible est égal à 34 millimes enregistré au niveau de Mselsel 2 en 2010, par contre le coût la plus élevé est enregistré au niveau de Chrechira 5 en 2014 et il égale à 324 millimes.

En effet, en comparant le coût du m<sup>3</sup> par champ en basant sur la **figure 43**, on remarque que la production de m<sup>3</sup> d'eau la plus coûteuse se fait au niveau du champ Chrechira. Le coût par ordre décroissant est comme suit : Chrechira 5, Chrechira1, puis Chrechira3+3bis.

En deuxième degré, la production au niveau du champ El Grine, où le m<sup>3</sup> d'eau le plus couteux est au niveau du forage Grine 8 (199 millimes en 2014), puis Grine 9(163 millimes en 2014), Gontass 2bis (143 millimes en 2014), en degré inférieur on trouve Grine 7 ter, Grine 4 ter, Grine 5bis, Grine 2 ter, Grine 10, Grine 11, enfin la reprise d'El Grine par un coût égal à 54 millimes pour le m<sup>3</sup> en 2014.

En troisième degré, la production du m<sup>3</sup> d'eau au niveau du champ Bou Hafna est le moins coûteuse par rapport aux autres. Dans ce champ, le m<sup>3</sup> d'eau à partir du forage Mselsel 1 le plus coûteux (105 millimes en 2014), puis BouHafna 1bis (96 millimes en 2014), Mselsel 3 (83millimes en 2014), puis BouHafna3ter, Haffouz 7, BouHafna 9, BouHafna 4 bis, ensuite dans le même ordre BouHafna10 et Mselsel 2 par un coût égale à 63 millimes en 2014, en degré plus bas devient le coût de la production d'un m<sup>3</sup> au niveau Mselsel1 ou Oued Msileh1 (60 millimes pour les deux forages en 2014). Le coût le plus bas est enregistré au niveau Oued Msileh 2 bis (57 millimes en 2014).

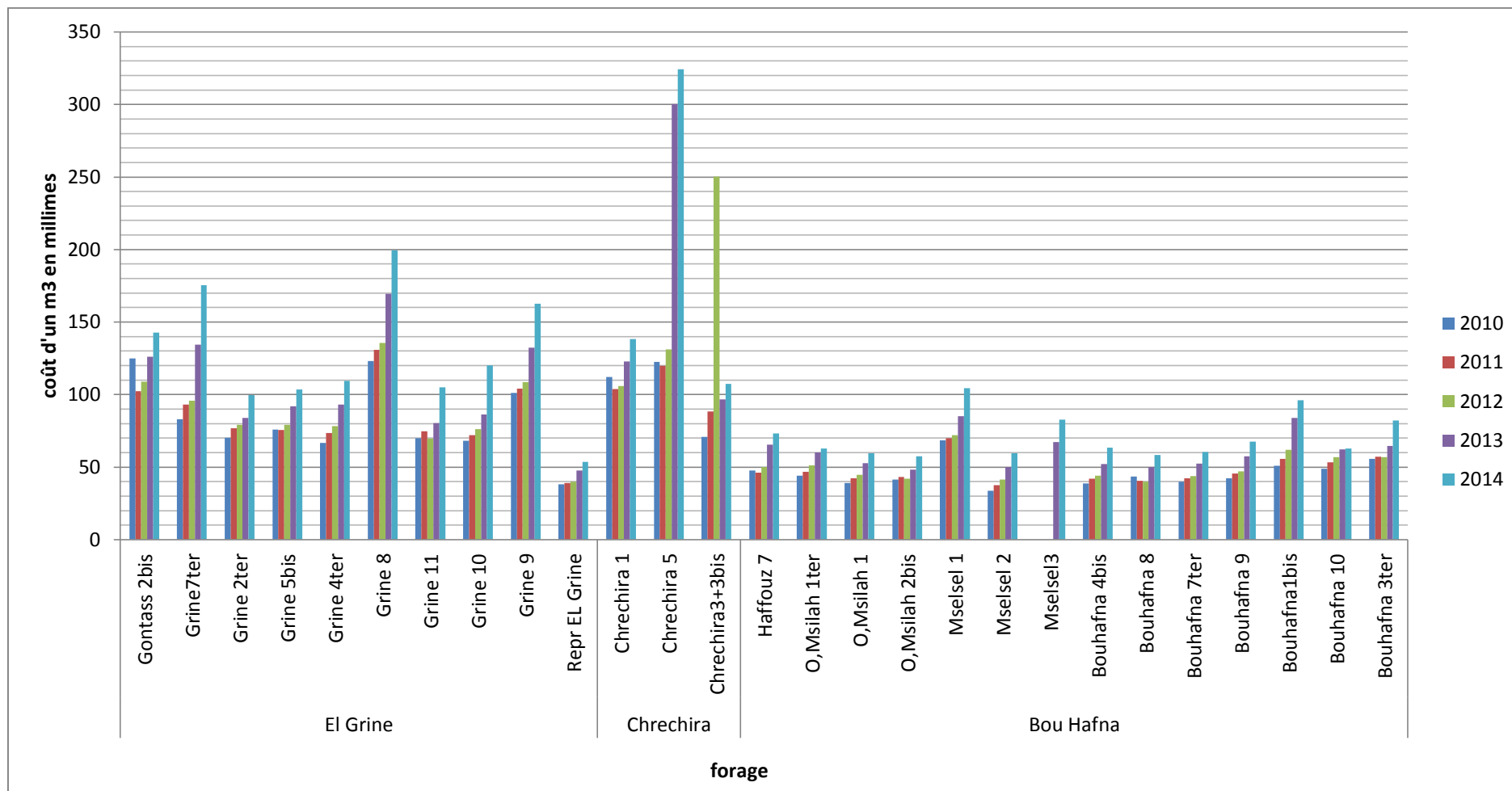


Figure 43: Le coût du m3 d'eau en millimes par forage et par champ



#### 4.2.6. Les rendements du groupe électropompe :

Le rendement d'un groupe électropompe est un indicateur qui permet d'évaluer le fonctionnement d'un groupe moto-pompe sur le réseau bien donné :

$$R(\%) = \frac{V_p * HMT * 0.002725}{nKWh} * 100$$

Avec :

- V<sub>p</sub> : volume pompé en m<sup>3</sup>
- HMT : hauteur manométrique totale de la pompe
- nKWh : le nombre de KWh consommé par forage

La **figure 44** représente les valeurs calculées de rendement des groupes motopompes à partir de la formule précédente et les données disponibles.

D'après ce qui précède, une représentation de la quantité d'eau par forage ainsi que le nombre de KWh consommé par forage sera utile pour avoir une idée sur le rendement.

En effet, selon la **figure 44**, le meilleur rendement des forages est obtenu pour le champ d'El Grine et plus exactement la reprise d'El Grine avec un rendement égale à 66% en 2014, suivi de champ Bou Hafna où les valeurs de rendement sont aux alentours de 50% et dépasse ce pourcentage pour quelques forages. Cependant, les valeurs de rendements du champ de Chrechira sont assez faibles avec une moyenne de 42% en 2014, ce qui peut s'expliquer en partie par le vieillissement des équipements des forages de ce champ.

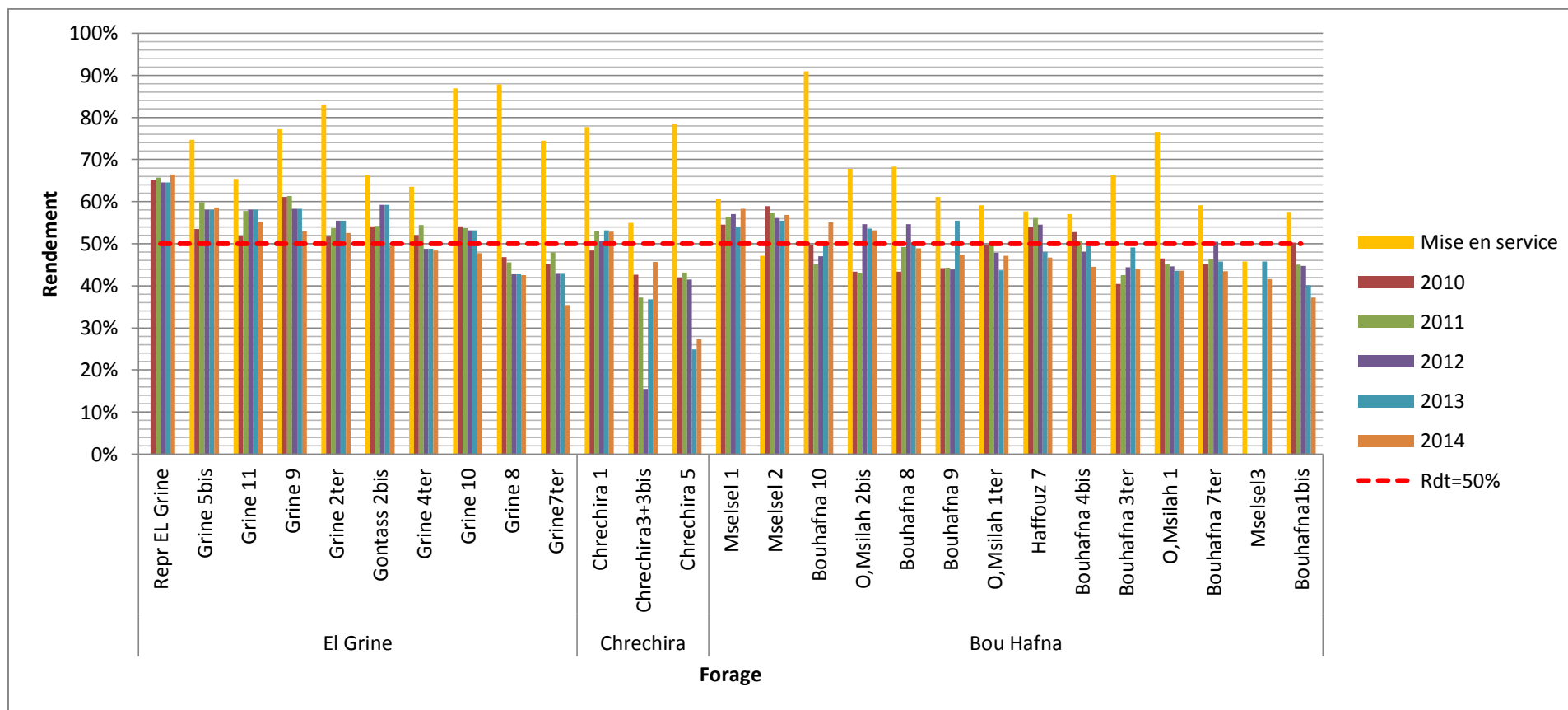


Figure 44: Les rendements du groupe électropompe par forage et par champ

## **Chapitre 5 : Modélisation et calage hydraulique et énergétique du réseau d'adduction Kairouan**

Ce chapitre est divisé en deux parties : partie A s'intéresse de modélisation et le calage hydraulique de notre réseau d'étude et la partie B qui s'intéresse au volet énergétique.

### **Partie A : Modélisation et calage hydraulique**

#### **5.1. Présentation général du logiciel EPANET :**

Le logiciel Epanet 2.0 est un logiciel développé par l'agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis (U.S. Environnement Protection Agency, U.S.E.P.A.).(Lewis.A, 2000).

Ce logiciel permet d'effectuer la simulation du comportement hydraulique de l'eau dans les réseaux sous pression pour des longues durées.

EPANET calcule le débit dans chaque conduite, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans chaque réservoir, et même la concentration en substances chimiques dans différentes parties du réseau, au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes.

En effet, l'utilisation de ce logiciel a un objectif bien précis qui est une meilleure compréhension du fonctionnement hydraulique des réseaux pour une meilleure gestion de l'eau dans le système à traiter quel que soit adduction ou distribution.

Il offre la possibilité de calcul la perte de charge par trois formules différentes :

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

Parmi les multiples avantages de EPANET : la gratuité, la capacité importante, le calcul de l'énergie consommé et les coûts, la différenciation illimitée des catégories des demandes aux

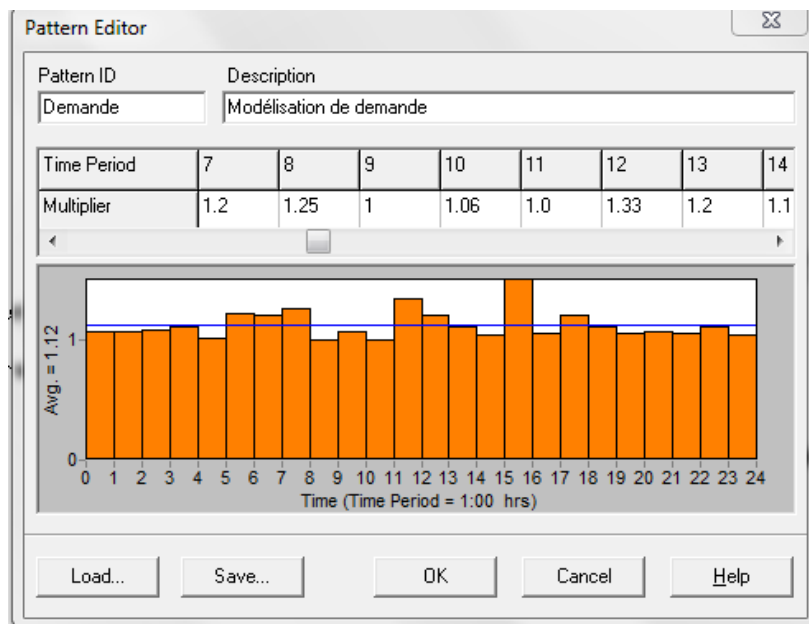
nœuds, la modélisation des consommations dépendantes de la pression, et simulation de la conception d'une substance et dispersion de celle-ci dans le réseau avec le choix de la formule.

Les résultats de la simulation de fonctionnement hydraulique du réseau par EPANET sont :

- ✓ Les pressions et les charges aux nœuds
- ✓ Les débits, les vitesses, les pertes de charge dans les tronçons
- ✓ Le sens de circulation de l'eau

## 5.2. La modélisation hydraulique du réseau d'adduction kairouannais :

Avant de simuler le modèle, il faut attribuer les coefficients de la consommation horaire, pour obtenir des résultats de demande le plus proche possible de la consommation réelle.

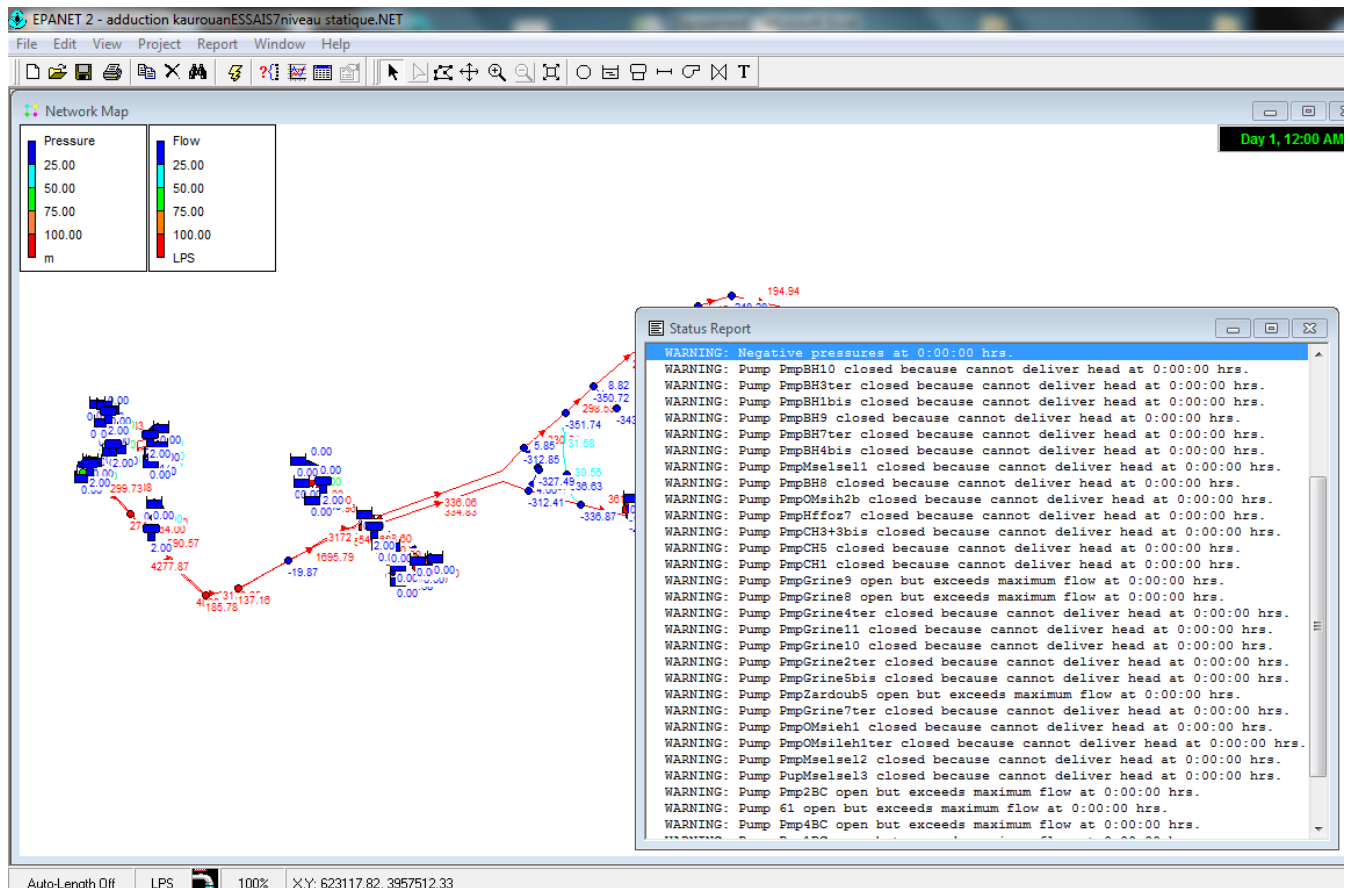


**Figure 45:** coefficient de la modélisation horaire

On a fait une série de simulation successive pour comparer entre les différentes situations.

- **1<sup>ère</sup> simulation : sur la base de niveau statique**

Le modèle sur la base des niveaux statiques pour les forages a montré que la mise en place de certaines pompes est inutile, comme montre la **figure 46**.



**Figure 46:** Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais. Epanet a généré des erreurs qu'eau niveau des pompes. Cela s'explique par le niveau élevé de la nappe. Ainsi il s'avère plus judicieux de modéliser le réseau sur la base du niveau dynamique des forages afin d'avoir une simulation la plus proche possible du fonctionnement réel du réseau.

- 2<sup>ème</sup> simulation : sur la base de la profondeur d'eau

Le résultat de la simulation est montré dans les figures ci-dessous :

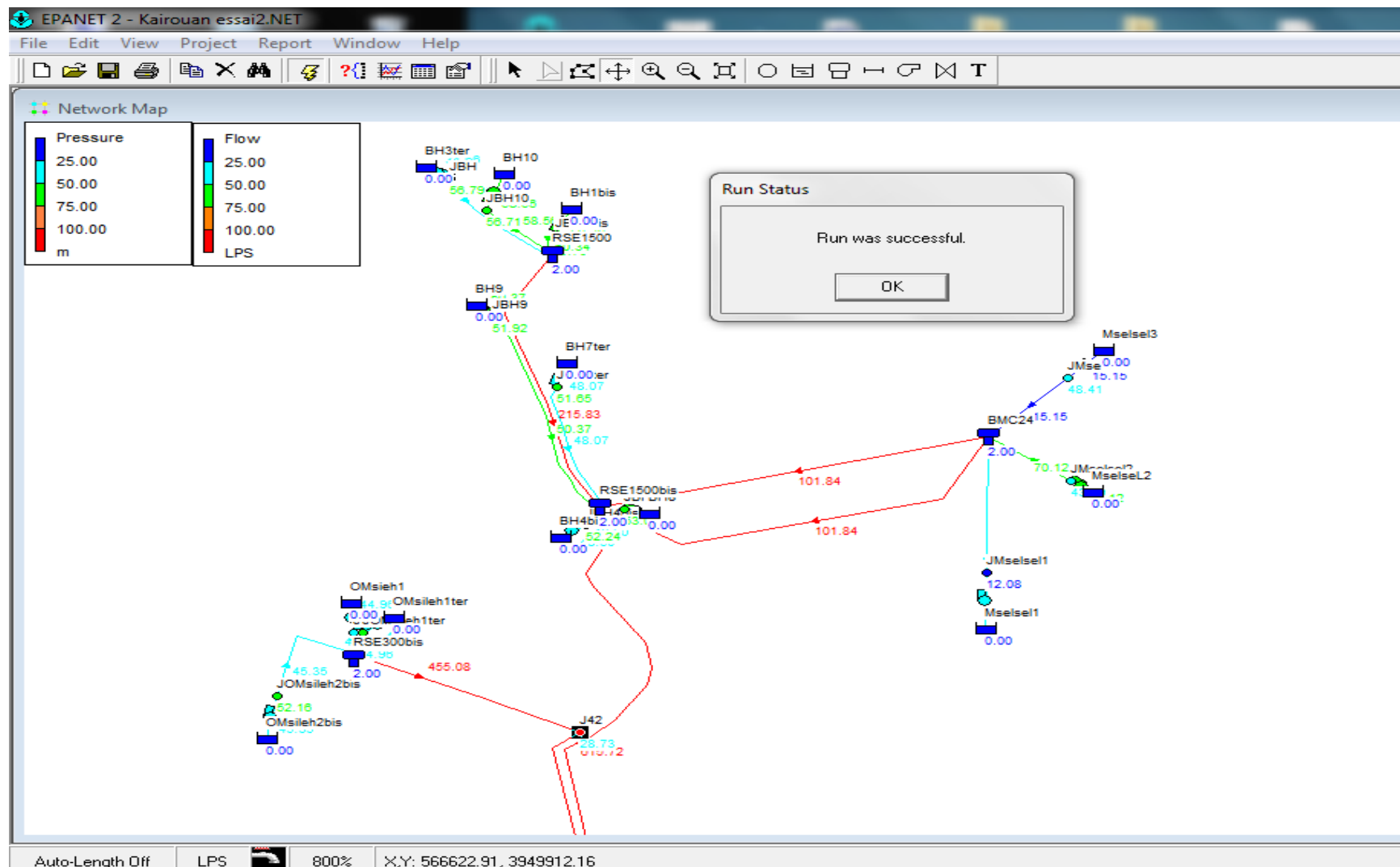


Figure 47: Résultat de simulation hydraulique dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014

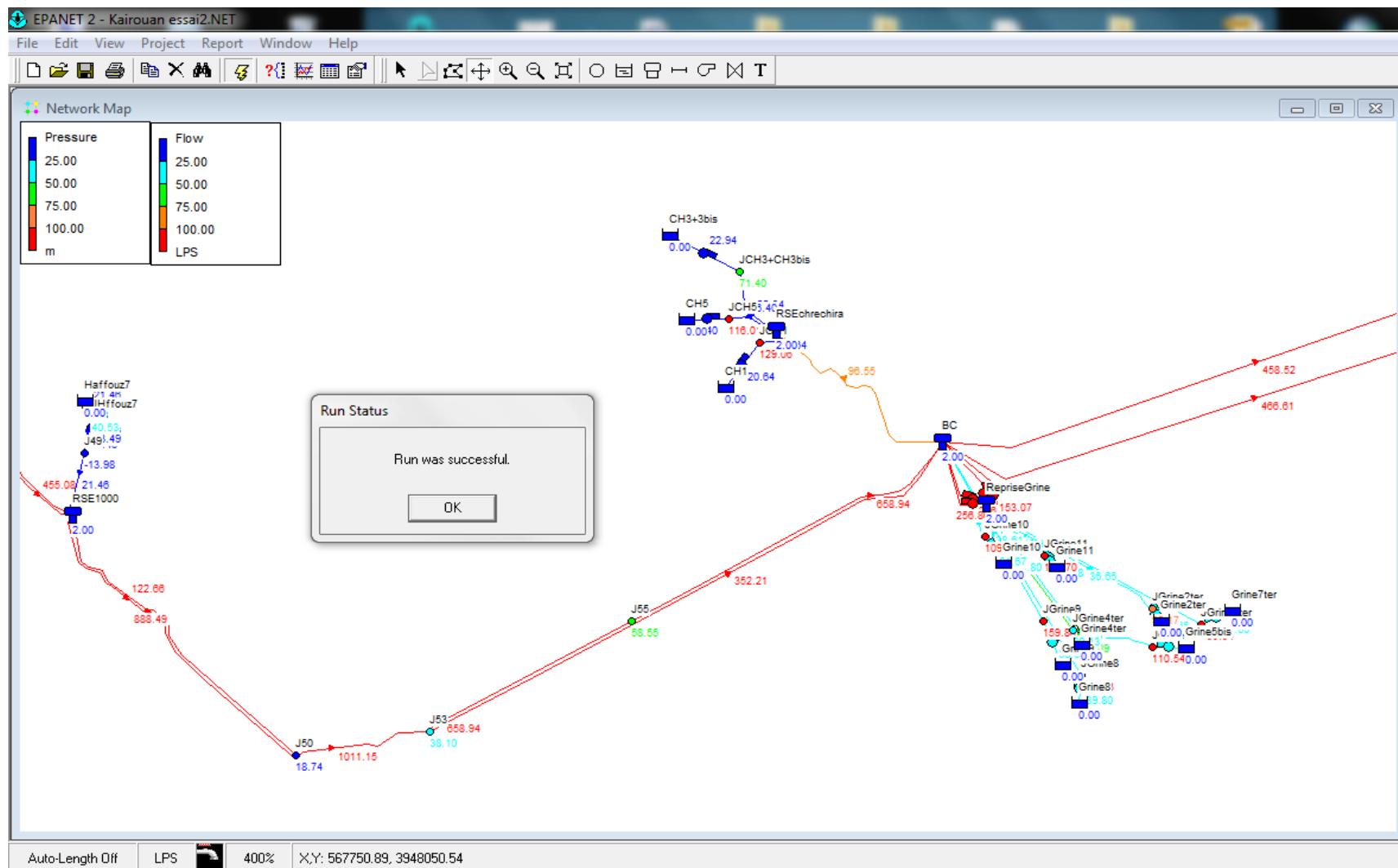


Figure 48: Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014

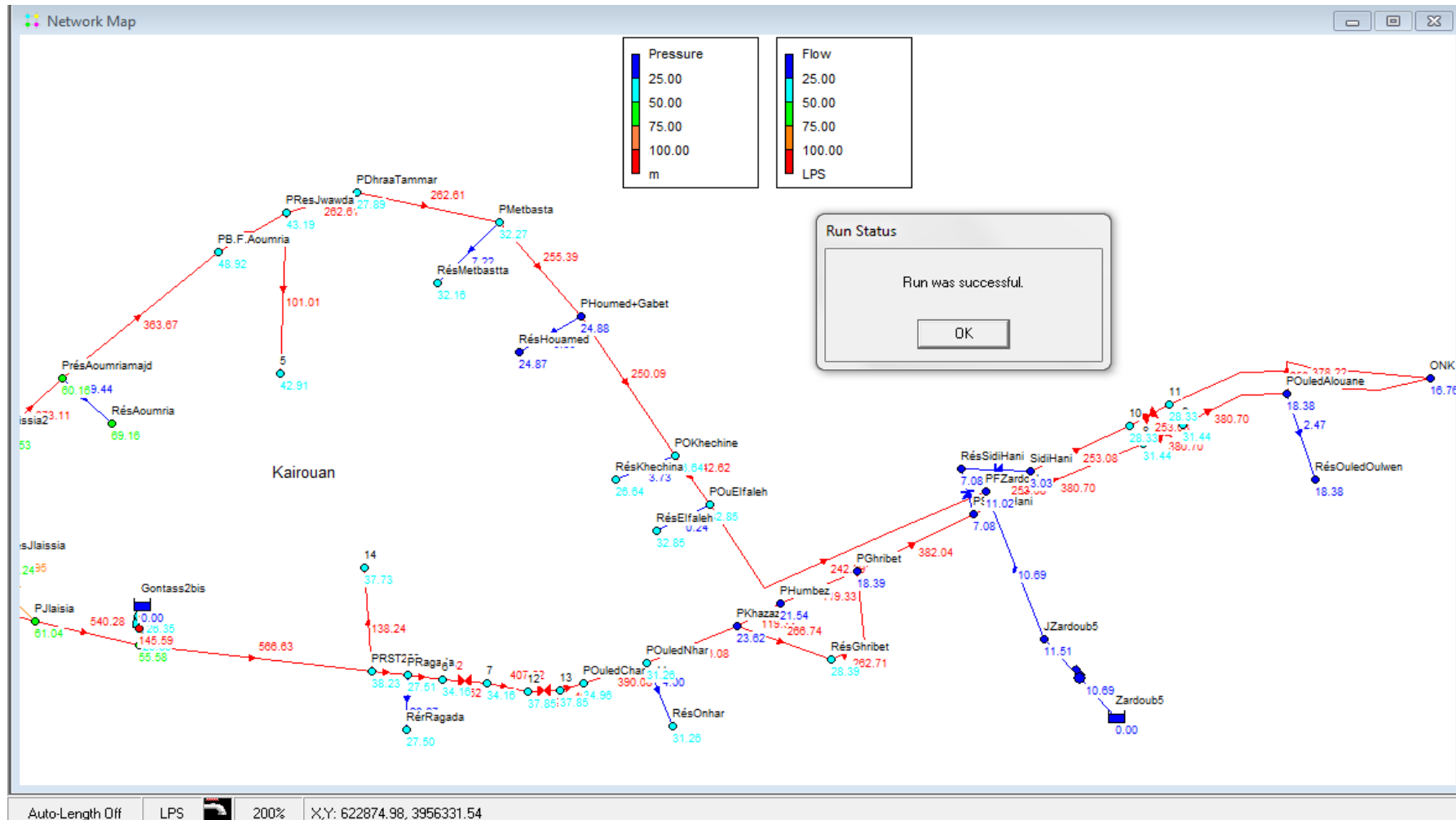


Figure 49: Résultat de simulation de l'écoulement dans le réseau d'adduction Kairouannais en 2014



Pour la simulation, on s'est basé sur les données des mois de pointe c'est-à-dire Juillet et Août. L'examen de cette carte montre que :

- 42% du réseau avec une pression inférieure à 20 m
- 32% du réseau à une pression variant de 20 et 50 m
- 26% du réseau où la pression est supérieure à 50 m

Suite à la simulation de ce réseau pour le mois de pointe Août de l'année 2014, on remarque qu'il fonctionne parfaitement et cela est appliquée pour les trois champs de forage, sauf au niveau de quelques piquages où la pression ne dépasse pas 20 m, malgré que cette pression reste toujours acceptable. D'autre part, il existe des pressions dépassent les 50m et ce qui est expliqué par les faibles débits soutirés et donc des faibles pertes de charge.

### **5.3. Calage du modèle :**

Le modèle, une fois construit, ne peut donner de résultats satisfaisants sans adaptation des caractéristiques hydrauliques de ses tronçons à la réalité. En effet, l'usure des conduites avec le temps diminue leurs capacités hydrauliques. Il convient donc de procéder à un calage des pressions à partir des données de terrain. En effet, l'étape de calage est une étape cruciale dans la construction et l'utilisation d'un modèle mathématique. Elle détermine la pertinence des résultats issus des simulations.

Dans notre cas, on a fait le calage de pression.

EPANET 2.0 prend les valeurs des pressions mesurées à travers un document texte comme montre la figure ci-dessous :

Point de mesure

Pression mesurée

localisation	date	valeurs
J42	00:00	29.31
	01:00	27.41
	02:00	27.01
	03:00	27.31
	04:00	27.47
	05:00	27.50
	06:00	30.22
	07:00	29.22
	08:00	29.2
	09:00	30.07
	10:00	30.30
	11:00	28.63
	12:00	33.30
	13:00	33.41
14:00	33.11	
15:00	33.00	
16:00	33.00	
17:00	33.10	
18:00	33.3	
19:00	33.00	
20:00	33.00	
21:00	33.20	
22:00	33.15	
23:00	33.00	
24:00	32.08	
JONK	00:00	25.61
	01:00	29.41

Figure 50 : Forme générale de fichier de calage

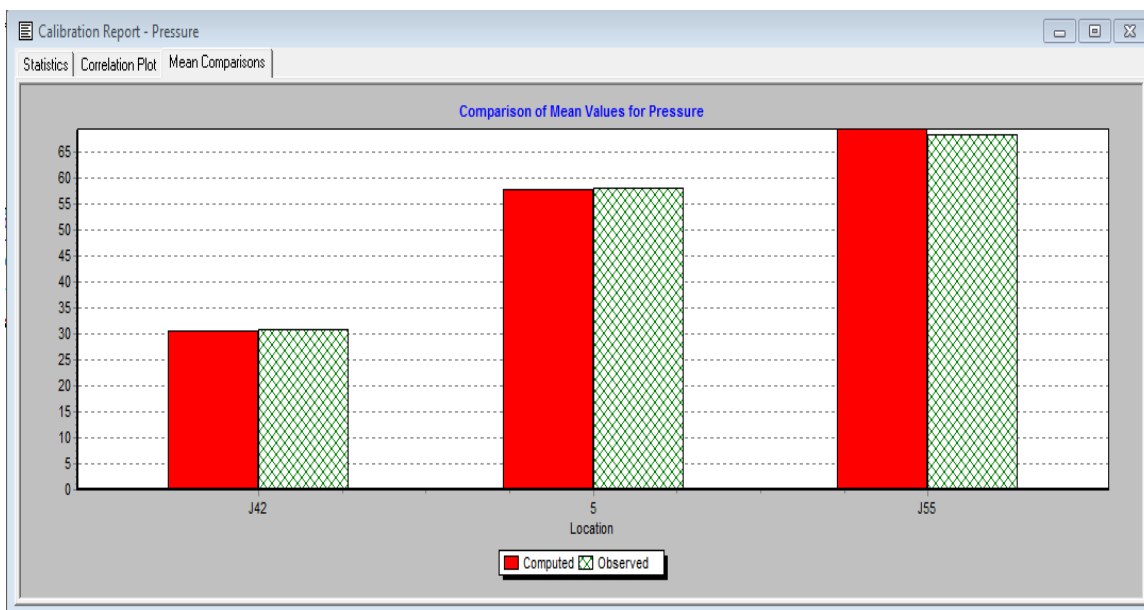


Figure 51: résultat de calage de pression par EPANET

D'après ce graphique, on constate que le diagramme des points représentant les valeurs moyenne mesurées et celles calculées sont proches. Ceci montre une bonne estimation du modèle et par suite une bonne qualité de calage du modèle.

## **Partie B : Modélisation et calage énergétique du réseau d'adduction du Kairouan**

Dans le chapitre 4, on a fait le calcul des différents paramètres d'énergie. A cette étape, on essaie alors de faire la comparaison les valeurs calculées et celle de la simulation par Epanet, c'est-à-dire de faire un diagnostic de la compatibilité entre le modèle hydraulique et les données du réseau de point de vue énergétique.

L'étude est basée sur 3 critères d'évaluation :

- Les débits de pompage (l/s)
- La consommation spécifique (KWh/m<sup>3</sup>)
- Le coût de pompage de chaque forage (Dt/ KWh)

### **5.4. Débit de pompage :**

La comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs simulées des débits pompés montre des écarts plus au moins importants. (**Figure 52**)

La figure donne des résultats divergents car pour certains forages les valeurs simulées sont trop proches de ceux réels alors que pour d'autres, est le contraire. D'où la nécessité de s'approfondir plus avec le calcul de l'erreur relative.

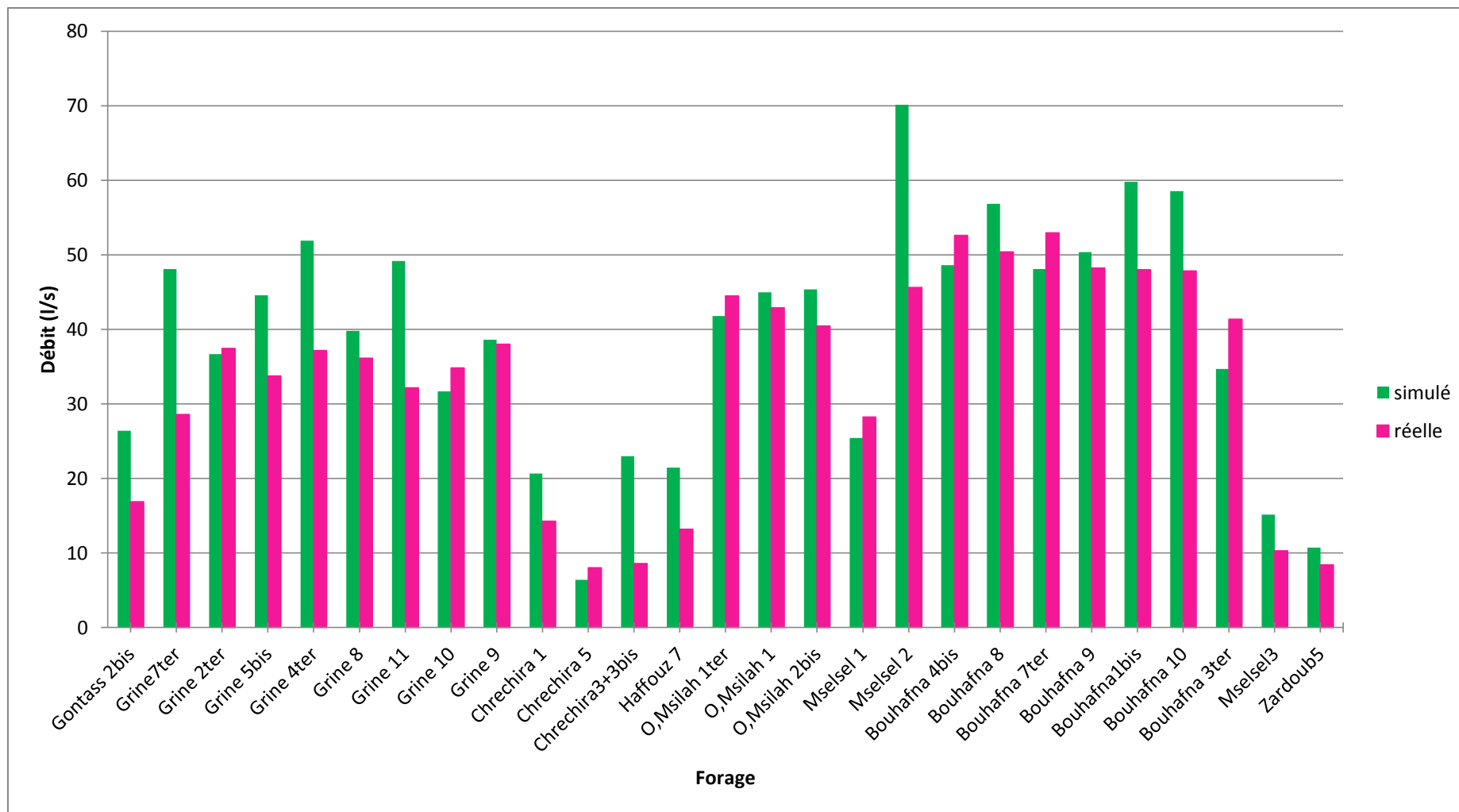


Figure 52: Comparaison entre les valeurs de débit réelle et simulé

On a calculé les erreurs relatives moyennes entre les valeurs réelle et simulé en utilisant la formule suivante :

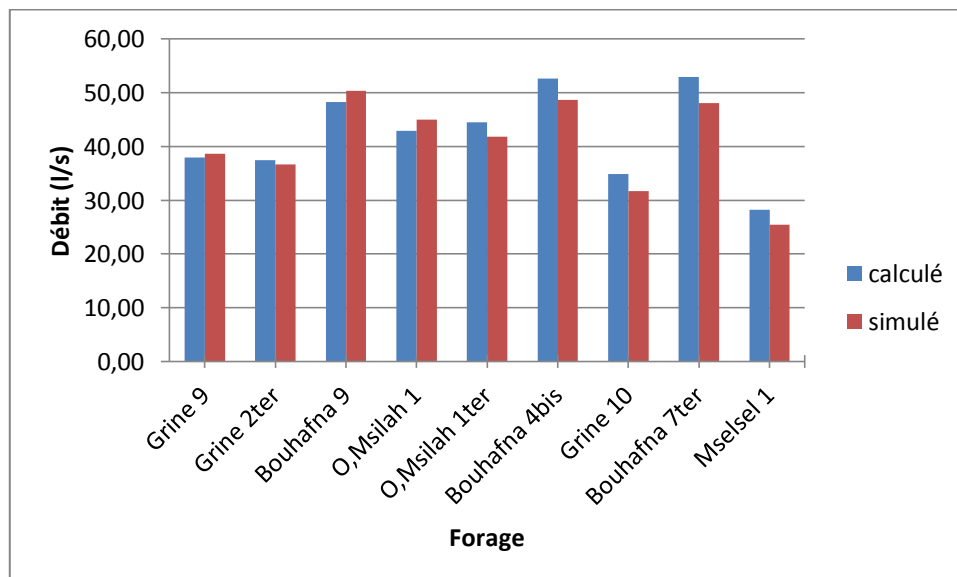
$$\text{Erreur relative(en\%)} = \frac{V_{\text{estimé}} - V_{\text{réelle}}}{V_{\text{réelle}}} * 100$$

Avec : V estimée : la valeur simulé par EPANET

V réelle : la valeur calculée

On peut diviser les forages en quatre groupes :

- Groupe1 : des forages avec erreur relative inférieur à 10 % (**figure 53**)
- Groupe2 : des forages avec erreur relative compris entre 10% et 20 % (**figure 54**)
- Groupe3 : des forages avec erreur relative supérieur à 20% et 50 % (**figure 55**)
- Groupe4 : des forages avec erreur relative supérieur à 50% (**figure 56**)



**Figure 53:** forages du groupe 1

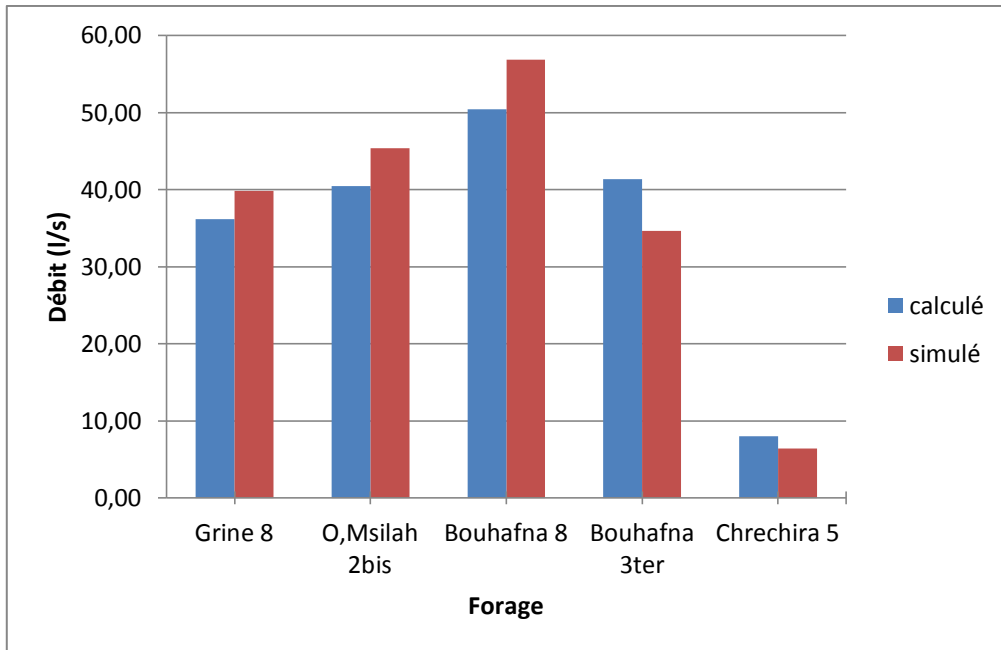


Figure 54: forages du groupe 2

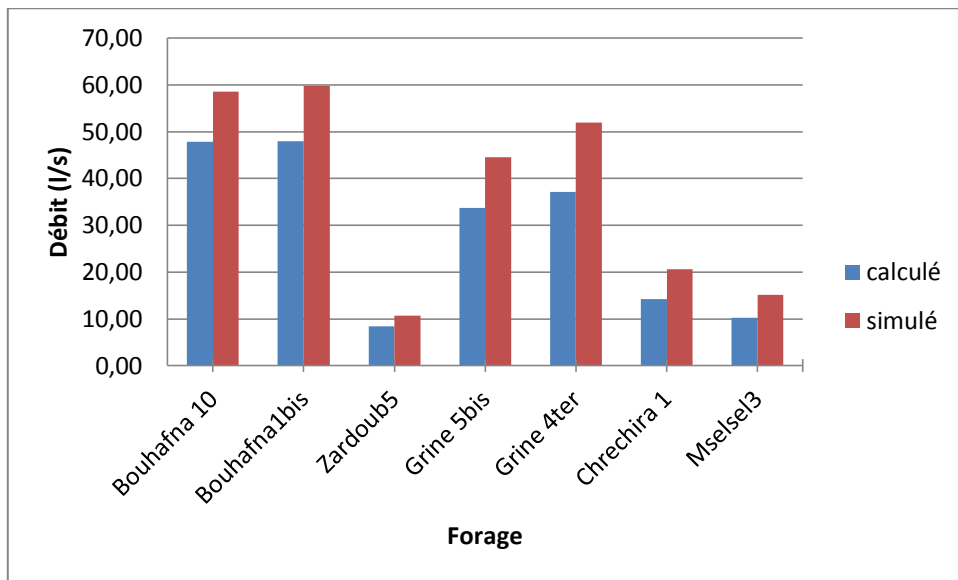
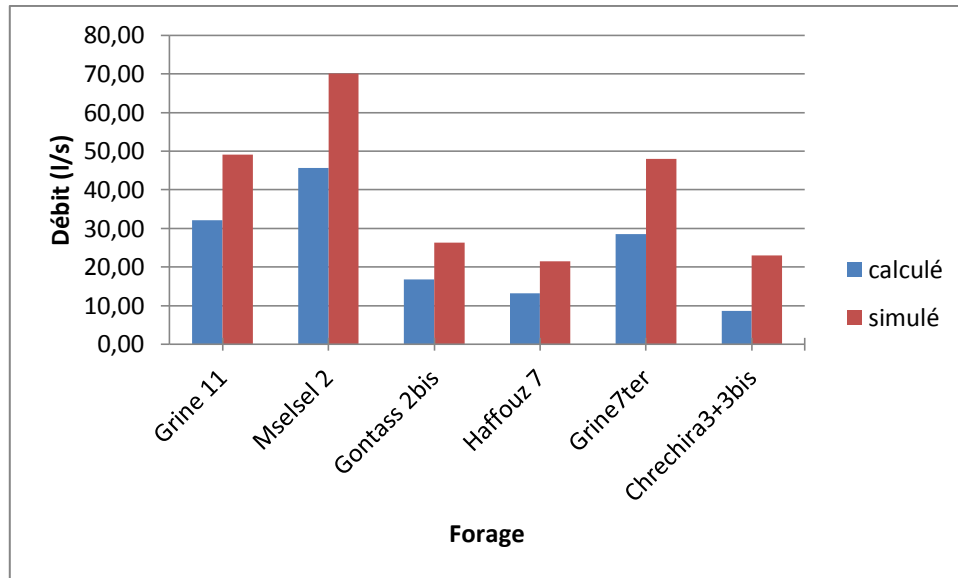


Figure 55: forages du groupe 3



**Figure 56:** forages du groupe 4

#### 5.4.1. Interprétation :

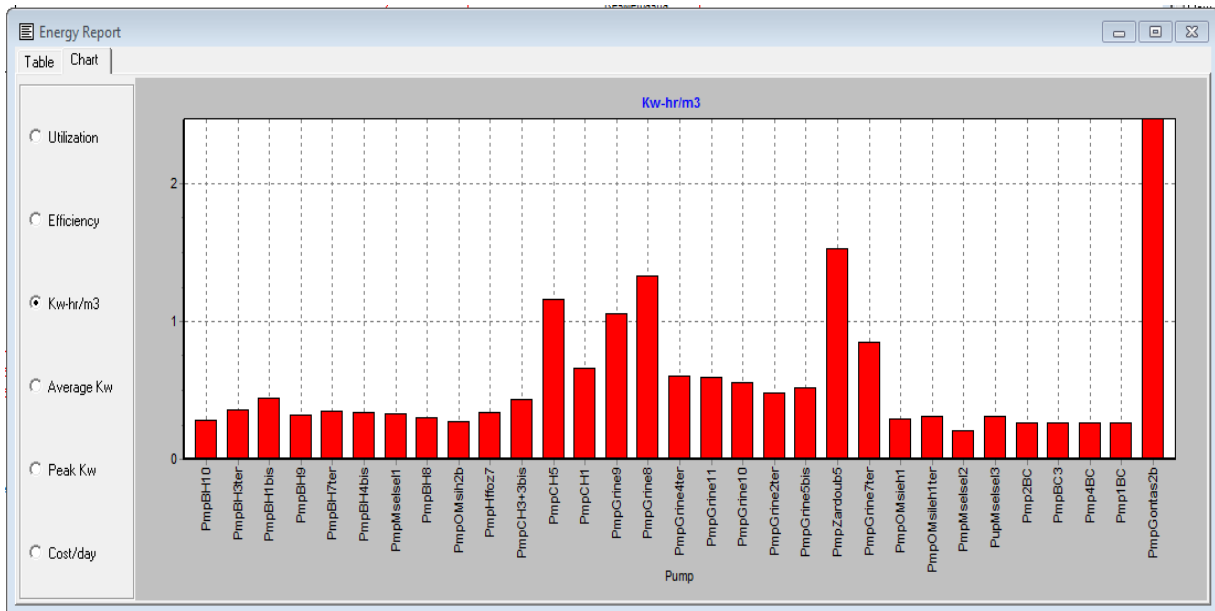
On constate que l'écartement entre les valeurs calculés et estimés sont plus au moins acceptable puisque 54% des forages ayant des valeurs de débit avec une erreur relative moyenne au dessous de 20%, alors que les 46% qui restent au dessus de cette valeur.

Ainsi le calage donne des résultats acceptables.

#### 5.5. La consommation spécifique :

On a calculé cet indicateur en détail dans le 4<sup>ème</sup> chapitre. Il est très utile pour évaluer le taux de la consommation d'énergie entre un nombre important de forages pour faire la comparaison entre eux. Epanet nous permet d'observer cet indicateur sous forme de graphique (**Figure 57**).





**Figure 57:** la consommation spécifique simulée par Epanet

La **figure 58** montre la différence entre les valeurs calculées et estimées de cet indicateur.

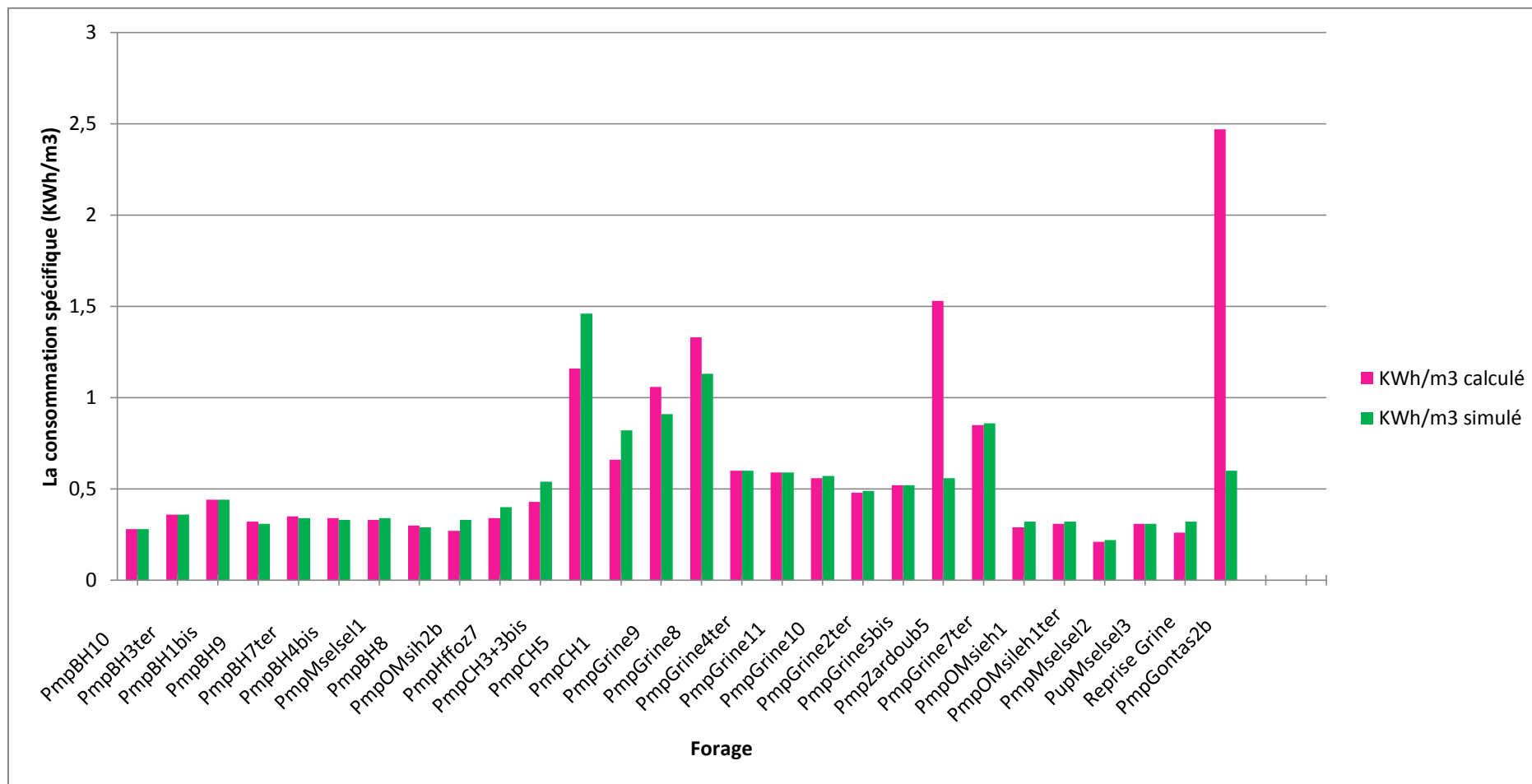


Figure 58: Comparaison entre les valeurs de la consommation spécifique réelle et simulé

### 5.5.1. Interprétation :

D'après ce graphique, on remarque que :

- ✓ L'écart entre les valeurs calculées et réelles n'est pas assez importante.
- ✓ La valeur réelle de coût de pompage en termes d'énergie est plus importante que celle estimée par l'EPANET, à l'exception de quelques forages qui sont : le champ de Chrechira, et les forages d'El Msileh.

La valeur de l'erreur relative moyenne est important pour les quatre forages suivantes: Chrechira1, Grine4ter, Grine7ter, Gontass2bis laisse nous penser de l'existence d'autres postes de consommation d'énergie, et que la consommation totale enregistrée n'est pas seulement due au pompage d'eau potable par la SONEDE, mais peut être par d'autres forages illicites. D'ailleurs, d'après la DGRE, 15000 puits illicites et 8000 forages illicites en 2014.

Les pourcentages des écarts entre les valeurs calculées et les valeurs estimés par le modèle varient entre à 0 % et 75 %. D'après ce résultat, on peut diviser nos forages en 4 groupes en basant sur les écarts.

- Groupe 1' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés sont nulles.
- Groupes 2' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés sont entre 1% et 5%.
- Groupe 3' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés sont compris entre 10% et 25%.
- Groupe 4' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés dépassent 50%.

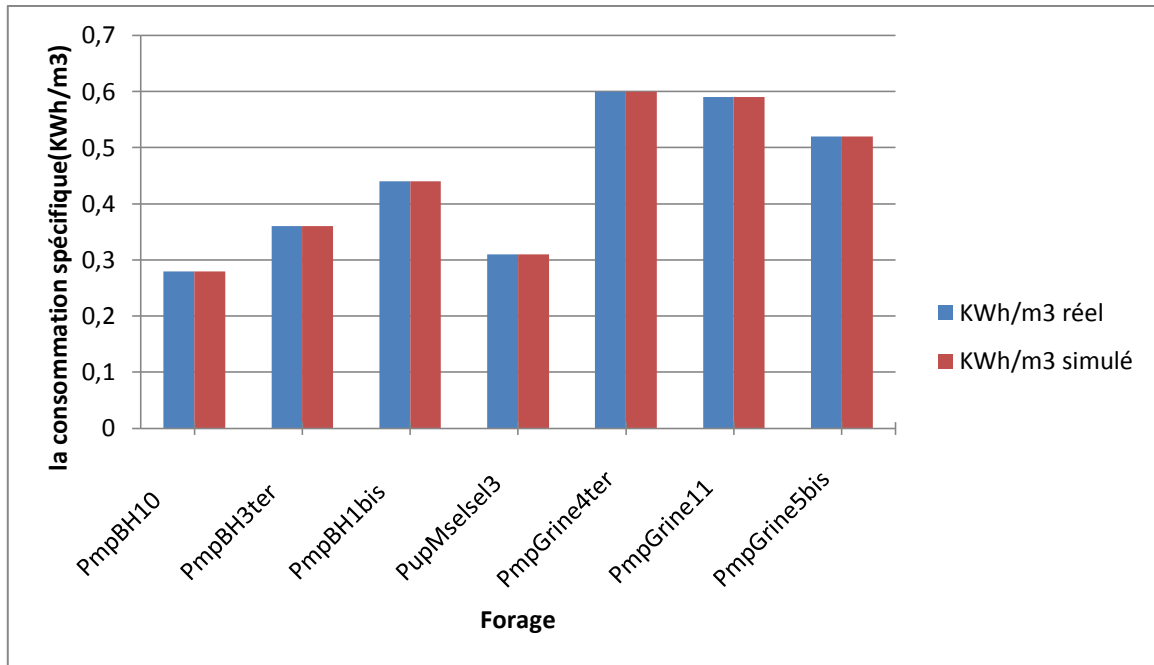


Figure 59: forages du groupe 1'

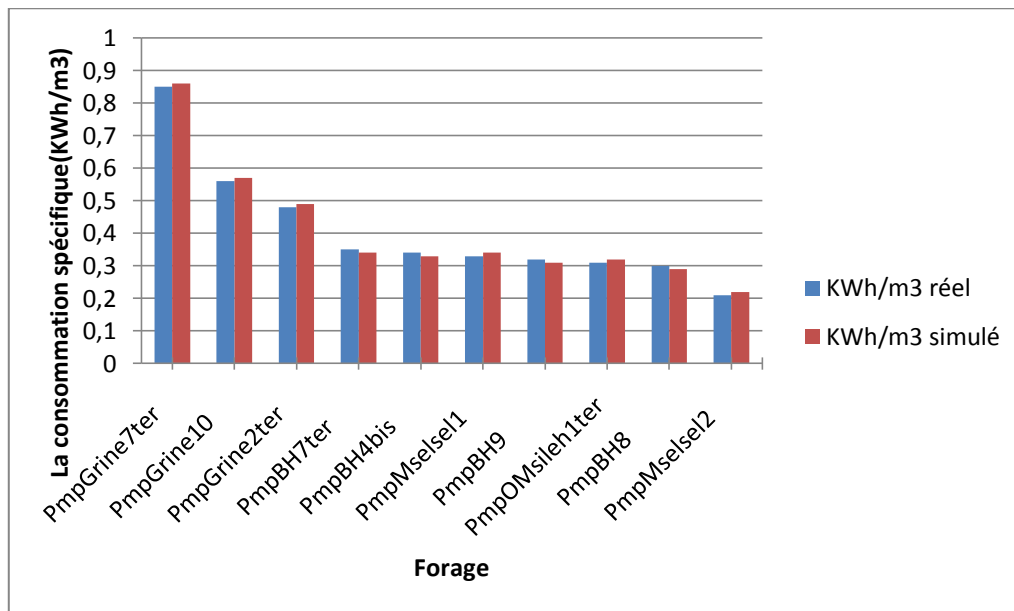


Figure 60: forages du groupe 2'

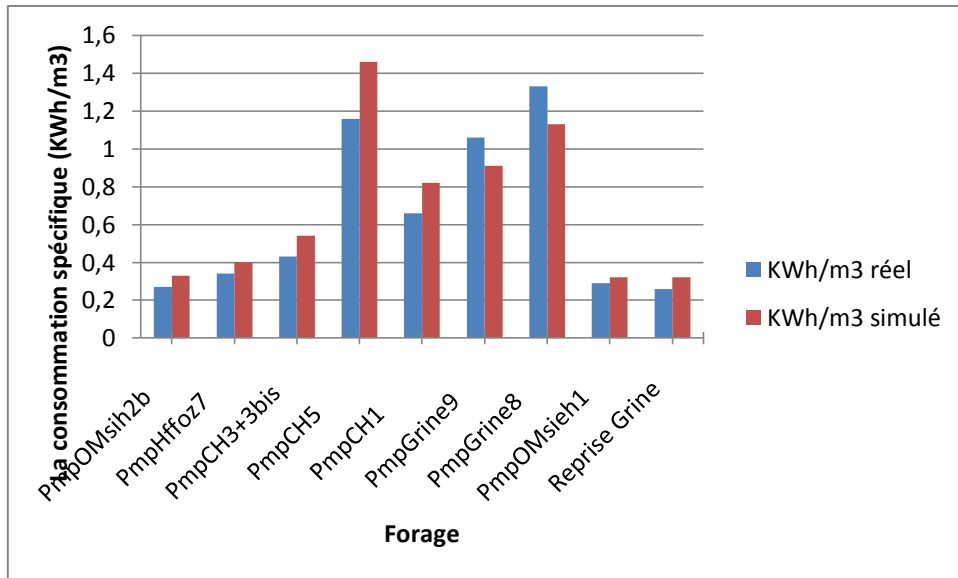


Figure 61: forages du groupe 3'

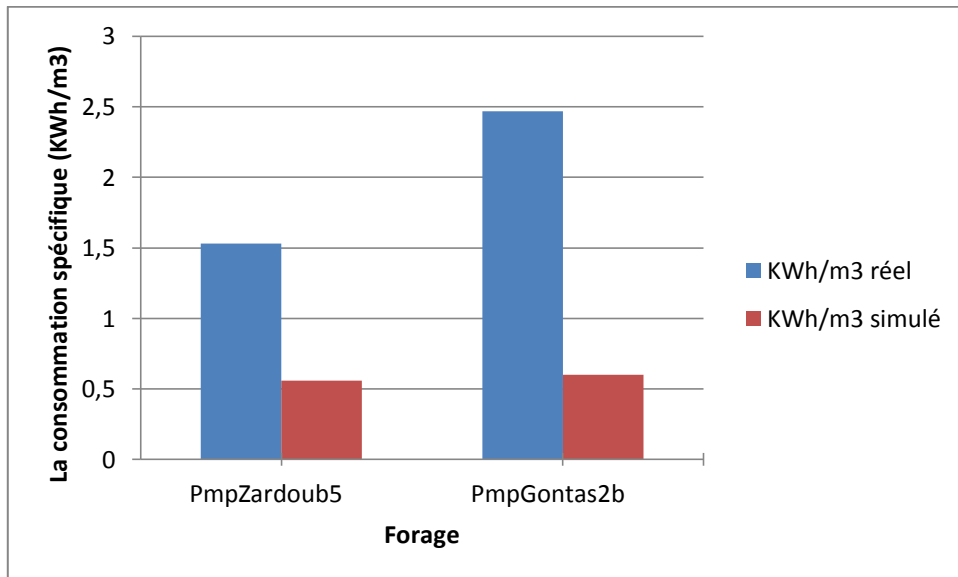


Figure 62: forages du groupe 4'

5.5.2. Interprétation :

Les forages de groupe1' : le résultat de la simulation est satisfait.

Les forages de groupe2'et de groupe3' : les résultats sont plus au moins acceptables, mais il faut faire de contrôle.

Les forages de groupe4' : il existe un problème au niveau des équipements de deux forages Zardoub5 et Gontass 2bis.

### **5.6. Le coût du KWh en dinars (Dt/KWh) :**

Cet indicateur aussi est nécessaire, s'ajoute à la consommation spécifique afin de faire une comparaison entre les forages et par suite diminuer le coût du pompage.

Et pour cette raison, on a fait la représentation du Dt/KWh simulé et réel dans la **figure 66**.

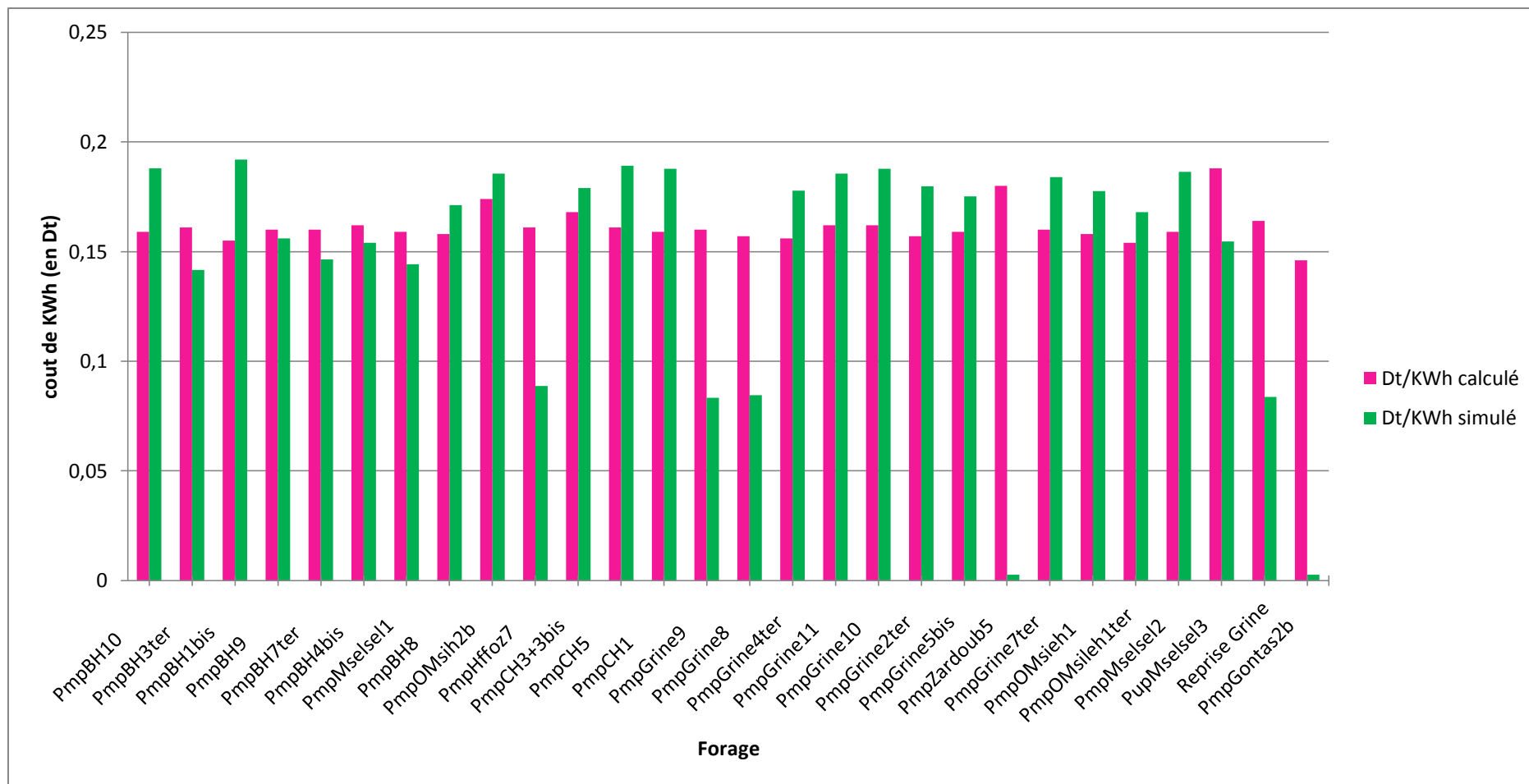


Figure 63 : Comparaison entre les valeurs réel et simulé du coût du KWh en Dt

Les valeurs des erreurs relatives moyennes de cet indicateurs varie entre 2,48% pour le forage BouHafna9 jusqu'à 98.5% pour Zardoub5 et 98.2% pour Gontass 2bis. Cet écart important nous laisse de diviser les forages en quatre groupes.

- Groupe 1'' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés sont inférieur de 10%.
- Groupe 2'' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés sont compris entre 10% et 20%.
- Groupe 3'' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelles et celle simulés dépassent 20 et 50%.
- Groupe 4'' : les forages dont les écarts entre les valeurs réelle et celle simulés dépassent 90%.

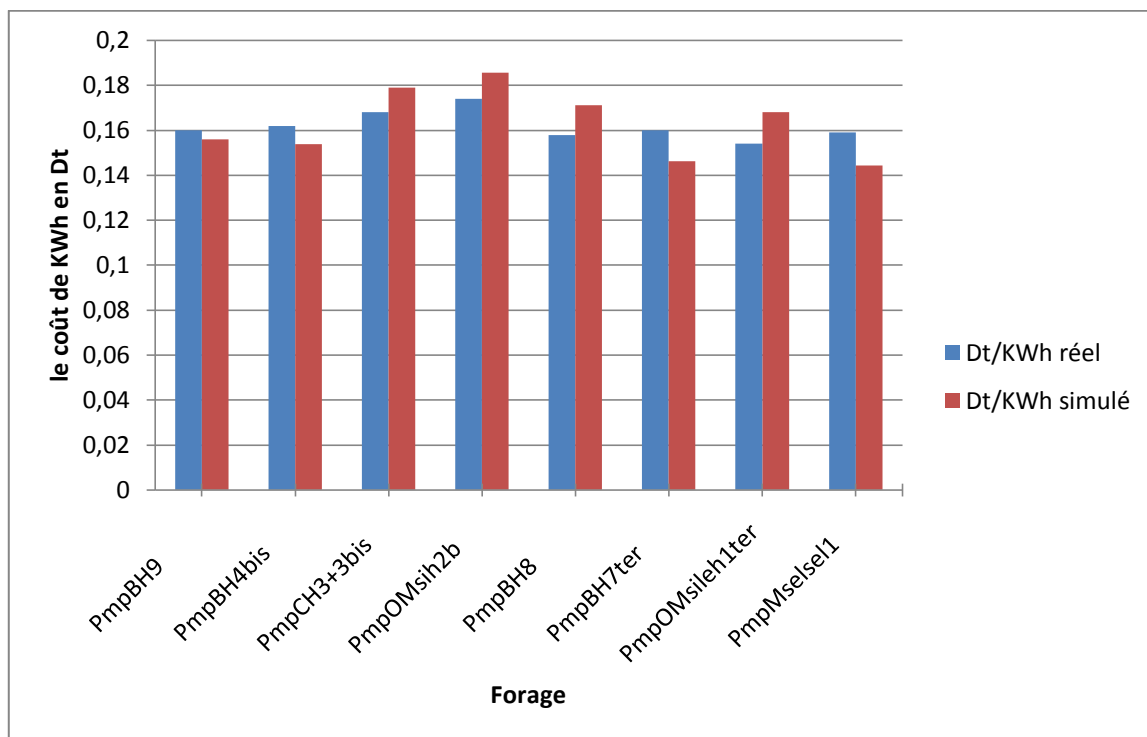


Figure 64: forages du groupe 1''



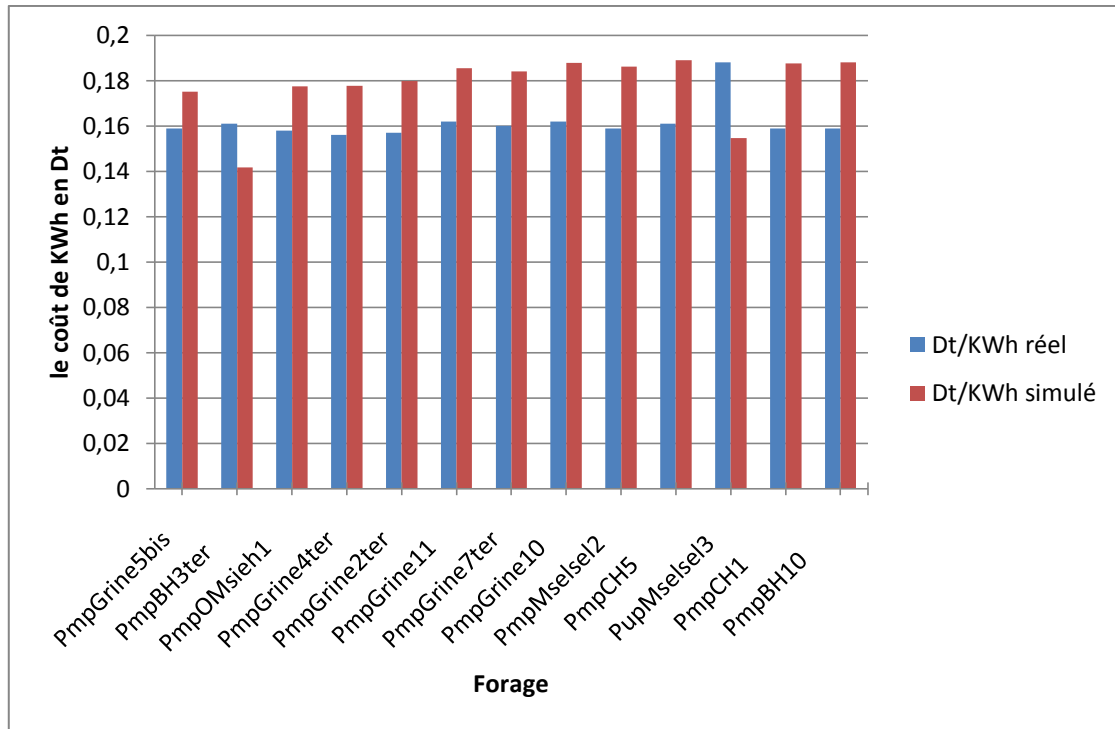


Figure 65: forages du groupe 2''

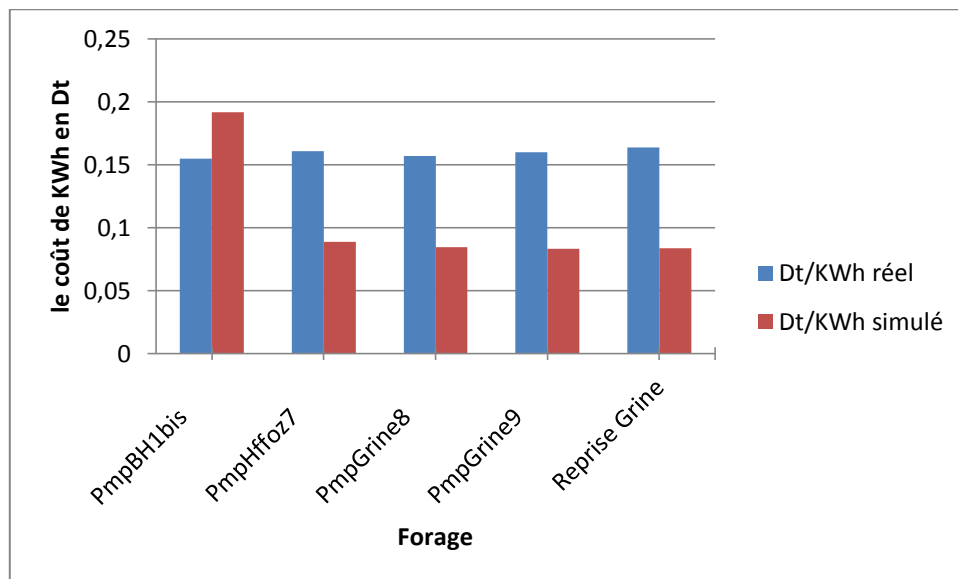
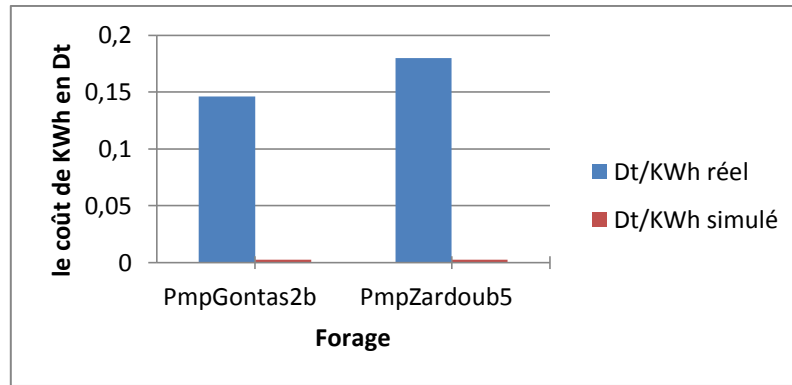


Figure 66: forages du groupe 3''



**Figure 637:** forages du groupe 4''

### 5.6.1. Interprétation :

Les forages de groupe1'' et de groupe2'' : les résultats de la simulation sont satisfaisants.

Les forages de groupe3'' : les écarts sont assez importants, donc il faut faire un contrôle pour les équipements de ces forages.

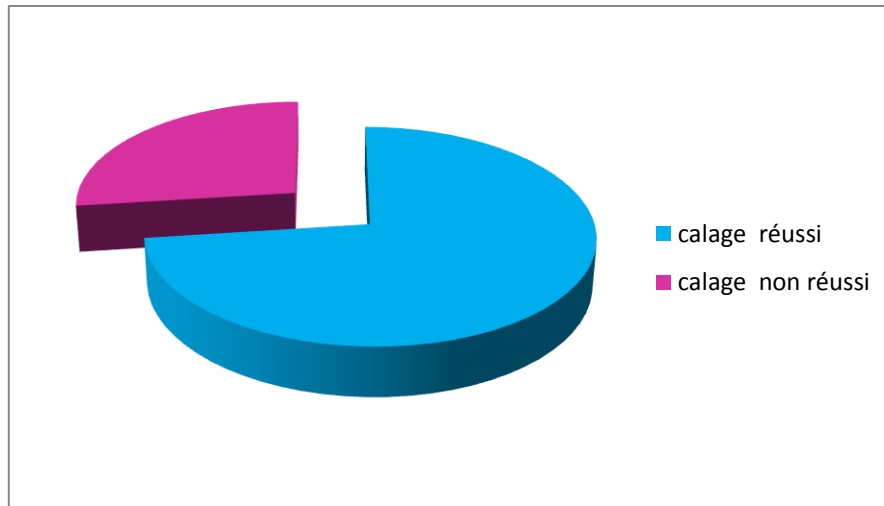
Les forages de groupe4'' : les résultats de calage sont inacceptable, il faut faire un contrôle pour ces deux forages et faire le changement des équipements si le résultat est prouvé.

### 5.6.2. Discussion :

Les résultats de comparaison entre les valeurs du modèle EPANET et les valeurs réelles ont permis de faire la différence entre les forages Kairouannais et de les différencier en trois groupes.

- ✓ Groupe I : composé des forages pour lesquels les valeurs simulées et les valeurs réelles sont proches.
- ✓ Groupe II : composé des forages pour lesquels les écarts entre les valeurs simulées et les valeurs réelles sont importantes

En pourcentage, le groupe I regroupe le plus nombre de forages (73%), alors que le groupe II regroupe le 27% restantes.



**Figure 68:** Pourcentage de réussite du calage énergétique

L'importance des valeurs des erreurs relatives moyennes calculées à partir des écarts entre les valeurs réelles ou calculées à partir des données disponibles et les valeurs estimées ou simulées par le logiciel de modélisation EPANET, surtout pour quelques forages tel que Zardoub 5 et Gontass 2 bis, montre qu'il existe d'autres postes de consommation d'énergie tels que des puits ou des sondages illicites. La consommation énergétique de ces derniers est payée par la SONEDE, pourtant qu'elles n'exploitent plus.

La solution la plus légitime est que la SONEDE met ses propres compteurs à l'entrée et la sortie de chaque groupe de motopompes pour bien vérifier la consommation d'énergie, et faire la comparaison avec celle enregistrées dans les factures STEG, afin de contrôler le fonctionnement de ces stations de pompage d'une part et d'estimer le coût de pompage et de comparer avec les factures de STEG d'une autre part.

### **5.7. Conclusion partiel :**

D'après ce qui précède et le calcul fait dans le chapitre 3, on peut en déduire le tableau suivant qui montre la répartition de l'ordre des forages qu'on peut tenir compte pour la mise en fonctionnement des forages, surtout dans les heures de pointe. On a fait une combinaison entre le coût le moins cher et le rendement le plus important pour satisfaire les besoins d'une part et minimiser les pertes d'autre part.

**Tableau 2:** Répartition de l'ordre des forages selon le coût

<b>Forage</b>	<b>Ordre</b>
Reprise Grine	1
OMsileh 2 bis	2
OMsileh 1	3
OMsileh2	4
Msel1	5
BouHafna1	6
BouHafna2	7
BouHafna4bis	8
BouHafna9	9
Haffouz7	10
BouHafna3ter	11
Msel3	12
BouHafna 1 bis	13
Grine2ter	14
Grine5bis	15
Msel1	16
Chrechira3+3bis	17
Grine4ter	18
Grine10	19
Chrechira1	20
Gontass2bis	21
Grine11	22
Grine9	23
Grine7ter	24
Grine8	25
Zardoub5	26
Chrechira5	27

## **Chapitre 6 : Satisfaction des besoins 2015-2040 et choix de la variante optimale**

### **6.1. Satisfaction des besoins 2015-2020 et Affectation des ressources 2020-2050**

En vue de satisfaire la demande accrue en eau potable et de sécuriser l'alimentation du Kairouan jusqu'à l'horizon 2040, il est nécessaire, avant tout, d'étudier le bilan actuel besoins-ressources de notre réseau au niveau régionale ou même national (du fait de forte relation avec le système Belli Cap-Bon Sahel Sfax) et le bilan futur à l'horizon qu'on cherche.

#### **6.1.1. Bilan actuel besoins-ressources en eau jusqu'à 2014 :**

Le bilan des cinq dernières années est détaillé dans le tableau suivant :

**Tableau 3:** Bilan besoins-ressources 2010-2014 (Qpj)

	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
<b>Ressources (l/s)</b>	976.5	930.5	960.3	1013	992
<b>Consommation (l/s)</b>					
ouledAlouene	1.59	1.07	2.29	1.62	2.31
sidi Elhani	19.64	16.95	23.11	21.39	23.39
OuledKhechine	2.64	2.50	6.09	4.43	3.50
ouled Chamekh	7.72	10.20	12.76	11.72	16.31
Ouled Elfaleh	1.09	0.14	0.30	0.48	0.22
chbika	6.72	6.76	8.13	9.16	9.85
AoumriaMajdoub	3.50	5.46	6.40	8.17	8.83
PB.F.Aoumria	0.05	0.07	0.13	0.12	0.05
Pjouawda	97.38	112.89	113.65	125.38	94.40
Dhraa Tammar	0.11	0.17	0.17	0.07	0.32
Metbasta	4.77	6.68	10.44	7.53	6.75
Houmed+Gabet	3.94	3.69	5.88	5.41	4.96
RAGADA	76.42	78.02	101.98	94.72	148.79
Ouled Nhar	3.53	2.98	4.44	4.16	3.75
Ghribet+Hambez+Khazazia	3.37	2.98	4.99	3.99	3.78
Jlaissia	0.88	0.73	1.07	1.21	1.13
ONK	679.80	662.00	658.60	649.80	589.00
<b>Total du bassin (l/s)</b>	913.14	913.30	960.45	949.37	917.34
<b>Bilan (l/s)</b>	63.36	17.20	-0.15	63.63	74.66

Le résultat de bilan besoins-ressources du réseau Kairouannais de l'année 2012 est négatif. En effet, lors de l'été de l'année 2012, il y a des perturbations d'approvisionnement en eau.

### 6.1.2. Bilan futur besoins-ressources (2015-2040):

Le bilan prévisionnel à partir de 2015 et jusqu'à l'horizon 2040 évoluera par localité (ou piquage) comme c'est développé dans le tableau suivant, en supposant que les ressources seront constant et égale à ceux de 2014.

Il faut tout d'abord fixer un taux d'évolutions des besoins. En effet, sur la base des observations, le taux d'évolution de la consommation est de 3%. Cependant, la SONEDE, dans une étude stratégique pour le système d'AEP de l'axe Belli-Sahel-Sfax a utilisé un taux de 4%.Ce qui est confirmé par le tableau ci-dessous.

**Tableau 4:** volume consommés facturés et Evolution annuelle du Kairouan

Année	Volume consommé facturé du Kairouan (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Evolution annuelle (en %)
2001	7.1	-
2002	3.9	-6
2003	3.8	5.3
2004	3.9	3.4
2005	4.4	5.2
2006	4.5	3.6
2007	4.8	3.1
2008	5.1	5.5
2009	5.2	4.1
2010	6	2.6

Ainsi les hypothèses de projection sont :

- ✓ L'année 2015 est l'année de départ de la projection.
- ✓ Les ressources sont supposés constantes depuis 2014.
- ✓ Le taux d'évolution de la consommation est de 4%.

Le tableau 5 présente le bilan future besoin-ressources pour notre cas d'étude.

Tableau 5: Bilan futur besoins-ressources2010-2040

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	
Réssources(l/s)	976.5	930.5	960.3	1013	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	
Consommation(l/s)																																
ouledAlouene	1.59	1.07	2.29	1.62	2.31	2.41	2.50	2.60	2.71	2.82	2.93	3.05	3.17	3.29	3.43	3.56	3.71	3.85	4.01	4.17	4.34	4.51	4.69	4.88	5.07	5.27	5.49	5.71	5.93	6.17	6.42	
sidi Elhani	19.64	16.95	23.11	21.39	23.39	24.33	25.30	26.31	27.37	28.46	29.60	30.78	32.01	33.30	34.63	36.01	37.45	38.95	40.51	42.13	43.81	45.57	47.39	49.28	51.26	53.31	55.44	57.66	59.96	62.36	64.86	
OuledKhechine	2.64	2.50	6.09	4.43	3.50	3.64	3.78	3.94	4.09	4.26	4.43	4.60	4.79	4.98	5.18	5.39	5.60	5.83	6.06	6.30	6.55	6.81	7.09	7.37	7.67	7.97	8.29	8.62	8.97	9.33	9.70	
ouled Chamekh	7.72	10.20	12.76	11.72	16.31	16.96	17.64	18.35	19.08	19.84	20.64	21.46	22.32	23.21	24.14	25.11	26.11	27.16	28.24	29.37	30.55	31.77	33.04	34.36	35.74	37.17	38.65	40.20	41.81	43.48	45.22	
Ouled Elfaleh	1.09	0.14	0.30	0.48	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39	0.40	0.42	0.44	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55	0.57	0.60	0.62	
chbika	6.72	6.76	8.13	9.16	9.85	10.25	10.65	11.08	11.52	11.99	12.46	12.96	13.48	14.02	14.58	15.17	15.77	16.40	17.06	17.74	18.45	19.19	19.96	20.75	21.58	22.45	23.35	24.28	25.25	26.26	27.31	
AoumriaMajdoub	3.50	5.46	6.40	8.17	8.83	9.18	9.55	9.93	10.33	10.74	11.17	11.61	12.08	12.56	13.07	13.59	14.13	14.70	15.28	15.90	16.53	17.19	17.88	18.60	19.34	20.11	20.92	21.75	22.62	23.53	24.47	
PB.F.Aoumria	0.05	0.07	0.13	0.12	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	
Pjouawda	97.38	112.89	113.65	125.38	94.40	98.18	102.11	106.19	110.44	114.85	119.45	124.23	129.20	134.36	139.74	145.33	151.14	157.19	163.47	170.01	176.81	183.89	191.24	198.89	206.85	215.12	223.73	232.67	241.98	251.66	261.73	
Dhrra Tammar	0.11	0.17	0.17	0.07	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39	0.40	0.42	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59	0.62	0.64	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.81	0.85	0.88	
Metbasta	4.77	6.68	10.44	7.53	6.75	7.02	7.30	7.59	7.90	8.21	8.54	8.88	9.24	9.61	9.99	10.39	10.81	11.24	11.69	12.16	12.65	13.15	13.68	14.22	14.79	15.39	16.00	16.64	17.31	18.00	18.72	
Houmed+Gabet	3.94	3.69	5.88	5.41	4.96	5.15	5.36	5.57	5.80	6.03	6.27	6.52	6.78	7.05	7.33	7.63	7.93	8.25	8.58	8.92	9.28	9.65	10.04	10.44	10.86	11.29	11.74	12.21	12.70	13.21	13.74	
RAGADA	76.42	78.02	101.98	94.72	148.79	154.74	160.93	167.37	174.06	181.02	188.26	195.79	203.63	211.77	220.24	229.05	238.21	247.74	257.65	267.96	278.68	289.82	301.42	313.47	326.01	339.05	352.61	366.72	381.39	396.64	412.51	
Ouled Nhar	3.53	2.98	4.44	4.16	3.75	3.90	4.05	4.21	4.38	4.56	4.74	4.93	5.13	5.33	5.54	5.77	6.00	6.24	6.49	6.75	7.02	7.30	7.59	7.89	8.21	8.54	8.88	9.23	9.60	9.99	10.38	
Ghribet+Hambez+Khazazia	3.37	2.98	4.99	3.99	3.78	3.93	4.09	4.25	4.42	4.60	4.78	4.97	5.17	5.38	5.59	5.82	6.05	6.29	6.54	6.80	7.08	7.36	7.65	7.96	8.28	8.61	8.95	9.31	9.68	10.07	10.47	
Jlaissia	0.88	0.73	1.07	1.21	1.13	1.18	1.23	1.27	1.33	1.38	1.43	1.49	1.55	1.61	1.68	1.74	1.81	1.89	1.96	2.04	2.12	2.21	2.29	2.39	2.48	2.58	2.68	2.79	2.90	3.02	3.14	
ONK	679.80	662.00	658.60	649.80	589.00	612.56	637.06	662.54	689.05	716.61	745.27	775.08	806.09	838.33	871.86	906.74	943.01	980.73	1019.96	1060.76	1103.19	1147.31	1193.21	1240.93	1290.57	1342.19	1395.88	1451.72	1509.79	1570.18	1632.98	
Total de la consommation(l/s)	913.14	913.30	960.45	949.37	917.34	954.03	992.19	1031.88	1073.15	1116.08	1160.72	1207.15	1255.44	1305.66	1357.88	1412.20	1468.69	1527.43	1588.53	1652.07	1718.15	1786.88	1858.36	1932.69	2010.00	2090.40	2174.01	2260.97	2351.41	2445.47	2543.29	
Bilan(l/s)	63.36	17.20	-0.15	63.63	74.66	37.97	-0.19	-39.88	-81.15	-124.08	-168.72	-215.15	-263.44	-313.66	-365.88	-420.20	-476.69	-535.43	-596.53	-660.07	-726.15	-794.88	-866.36	-940.69	-1018.00	-1098.40	-1182.01	-1268.97	-1359.41	-1453.47	-1551.29	

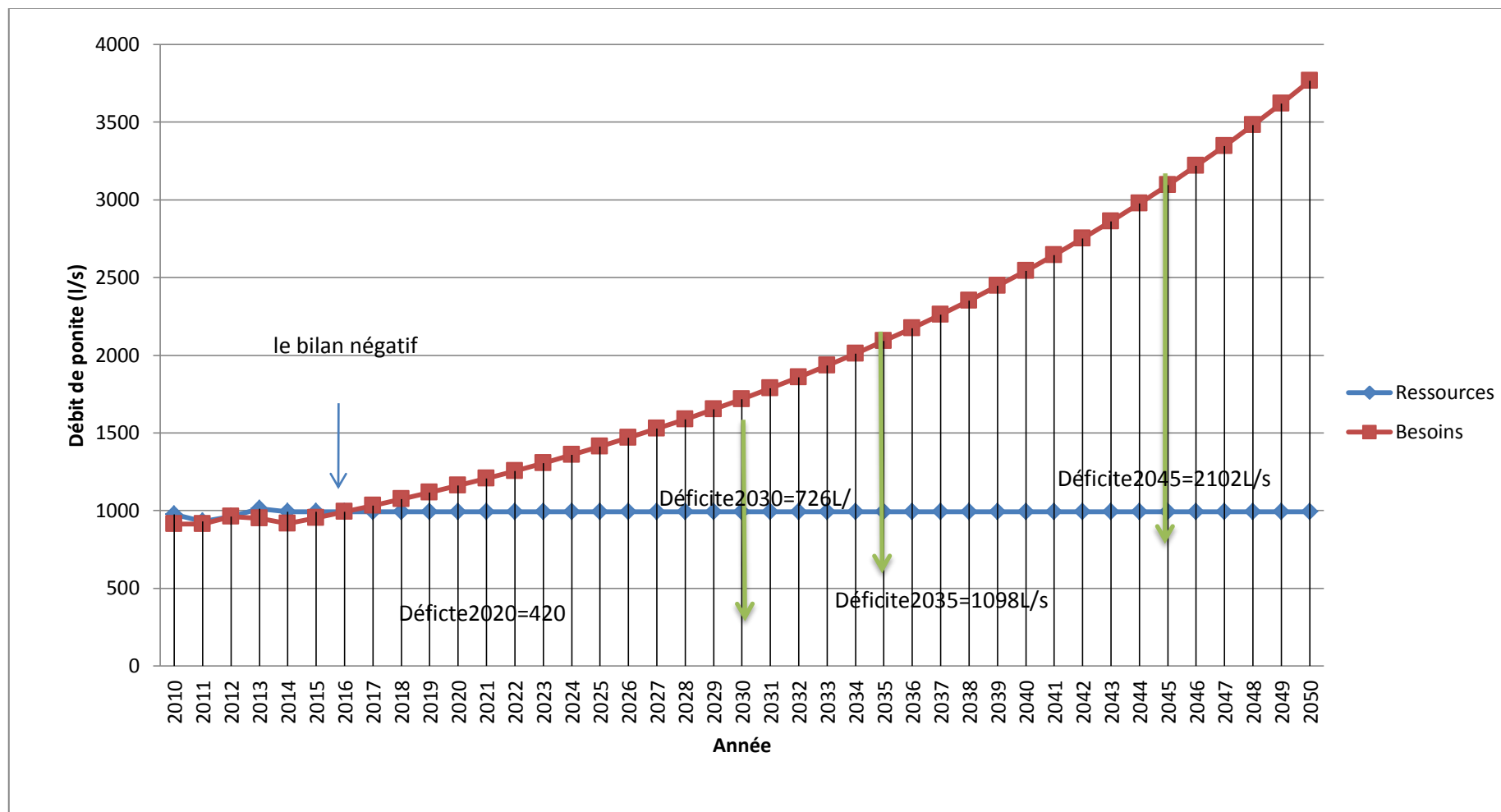


Figure 69: Bilan futur besoins-ressources 2010-2050 (Qpj)



### 6.1.2.1. Interprétation:

Il ressort du présent bilan besoins-ressources, qu'en cas de non renforcement des ressources dans la zone de l'étude :

- ✓ La reproduction du scénario de perturbation de l'année 2012
- ✓ Le bilan commence d'être négatif à partir de 2016.
- ✓ Le déficit augmente progressivement à partir de 2017, atteint 726 l/s en 2030, 1098 l/s et 1551 l/s en 2040.

### 6.1.3. Satisfaction des besoins futurs :

Afin de bien choisir la solution optimale, il faut mettre en considération les points suivants :

- ✓ Coût de réalisation et d'exploitation de système
- ✓ Qualité des eaux brutes dont la salinité est très inégale d'une ressource à l'autre, tout en respectant le seuil de 1.5 g/l pour les eaux distribuées.
- ✓ Sécurité de l'alimentation en eau fonction de la diversification
- ✓ Flexibilité de programmation en vue d'adopter la progressivité des investissements à l'évolution réelle des besoins.

Les solutions qu'on va traiter sont basées essentiellement sur :

- Transférer le maximum d'eaux du nord traitées à Belli vers les régions du Cap-Bon, Sahel et Sfax , compte tenu de la disponibilité d'une importante ressource en eau de surface dans le nord de pays, afin de diminuer les prélèvements à partir des nappes de la Tunisie centrale (Kairouannais, jelma, Sbeitla , Ouled Asker, Hajeb Layoun) longtemps sollicitées et parfois surexploitées.
- Mettre au repos partiel les nappes de la Tunisie centrale (surtout la nappe kairouannais) afin de reconstituer leurs réserves et de constitué un potentiel de sécurisation de l'approvisionnement en eau, facteur essentiel du développement socio-économique de la région.
- Procéder au dessalement d'eau de mer.
- Mise en place des retenus.

### 6.1.3.1. Satisfaction des besoins 2016 :

L'examen de bilan besoins-ressources 2015-2050 (tableau n°) fait apparaître un déficit à partir de 2016 mais d'une valeur peu négligeable (-0.19 l/s). Pratiquement le bilan devient négatif à partir de 2017.

A cet effet, il faut que nous engagions une phase prioritaire consistant en un programme urgent de renforcement des ressources permettant de dégager un débit additionnel total de l'ordre de 134 l/s afin de faire face au déficit de l'année 2017. Ces ressources supplémentaires pour la satisfaction de la demande en eau en période de pointe des années 2016 à 2019 consistent essentiellement à :

- l'électrification d'un forage existant fonctionnant par gazoil (Zardoub 4) qui est exploité par la SONEDE juste dans les heures de pointe afin qu'il soit exploitable par cette dernière d'une façon permanente.
- la mobilisation des eaux souterraines par la réalisation d'un nombre bien déterminé des nouveaux forages (Zardoub6, Haffouz7bis, et Mselsel4) déjà programmés.

Ces projets urgents vont être répartis comme suit :

**Tableau 6:** Répartition des projets de la phase urgente 2016-2019

Forage	Q <sub>exp</sub> (l/s)	Année de projet
Zardoub4	34	2015
Zardoub6	30	2016
Haffouz 7 bis	30	
Mselsel 4	40	
<b>Total</b>	140	2016

Le tableau 7 montre l'évolution après application et mise en marche de ces projets urgents.

Tableau 7 : Bilan futur besoin-ressource en cas de réalisation des projets urgents (nouveaux forages locaux)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Réssources existant(l/s)	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992
Zardoub4	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
renforcements des ressources souterraines		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ressources totales après les projets	1026	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126
Consommation(l/s)																										
ouledAlouene	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.9	4.0	4.2	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	6.2	6.4
sidi Elhani	24.3	25.3	26.3	27.4	28.5	29.6	30.8	32.0	33.3	34.6	36.0	37.5	39.0	40.5	42.1	43.8	45.6	47.4	49.3	51.3	53.3	55.4	57.7	60.0	62.4	64.9
OuledKhechine	3.6	3.8	3.9	4.1	4.3	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.1	6.3	6.6	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.6	9.0	9.3	9.7
ouled Chamekh	17.0	17.6	18.3	19.1	19.8	20.6	21.5	22.3	23.2	24.1	25.1	26.1	27.2	28.2	29.4	30.5	31.8	33.0	34.4	35.7	37.2	38.7	40.2	41.8	43.5	45.2
Ouled Elfaleh	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
chbika	10.2	10.7	11.1	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.6	15.2	15.8	16.4	17.1	17.7	18.5	19.2	20.0	20.8	21.6	22.4	23.3	24.3	25.3	26.3	27.3
AoumiaMajdoub	9.2	9.5	9.9	10.3	10.7	11.2	11.6	12.1	12.6	13.1	13.6	14.1	14.7	15.3	15.9	16.5	17.2	17.9	18.6	19.3	20.1	20.9	21.8	22.6	23.5	24.5
PB.F.Aoumia	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pjouawda	98.2	102.1	106.2	110.4	114.9	119.4	124.2	129.2	134.4	139.7	145.3	151.1	157.2	163.5	170.0	176.8	183.9	191.2	198.9	206.8	215.1	223.7	232.7	242.0	251.7	261.7
Dhrra Tammar	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
Metbasta	7.0	7.3	7.6	7.9	8.2	8.5	8.9	9.2	9.6	10.0	10.4	10.8	11.2	11.7	12.2	12.6	13.2	13.7	14.2	14.8	15.4	16.0	16.6	17.3	18.0	18.7
Houmed+Gabet	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.3	6.5	6.8	7.1	7.3	7.6	7.9	8.3	8.6	8.9	9.3	9.7	10.0	10.4	10.9	11.3	11.7	12.2	12.7	13.2	13.7
RAGADA	154.7	160.9	167.4	174.1	181.0	188.3	195.8	203.6	211.8	220.2	229.1	238.2	247.7	257.7	268.0	278.7	289.8	301.4	313.5	326.0	339.1	352.6	366.7	381.4	396.6	412.5
Ouled Nhar	3.9	4.1	4.2	4.4	4.6	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.8	6.0	6.2	6.5	6.7	7.0	7.3	7.6	7.9	8.2	8.5	8.9	9.2	9.6	10.0	10.4
Ghribet+Hambez+Khazazia	3.9	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.3	6.5	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.6	9.0	9.3	9.7	10.1	10.5
Jlaissia	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1
ONK	612.6	637.1	662.5	689.0	716.6	745.3	775.1	806.1	838.3	871.9	906.7	943.0	980.7	1020.0	1060.8	1103.2	1147.3	1193.2	1240.9	1290.6	1342.2	1395.9	1451.7	1509.8	1570.2	1633.0
Total de La consommation(l/s)	954.0	992.2	1031.9	1073.2	1116.1	1160.7	1207.2	1255.4	1305.7	1357.9	1412.2	1468.7	1527.4	1588.5	1652.1	1718.2	1786.9	1858.4	1932.7	2010.0	2090.4	2174.0	2261.0	2351.4	2445.5	2543.3
Bilan(l/s)	72.0	133.8	94.1	52.8	9.9	-34.7	-81.2	-129.4	-179.7	-231.9	-286.2	-342.7	-401.4	-462.5	-526.1	-592.2	-660.9	-732.4	-806.7	-884.0	-964.4	-1048.0	-1135.0	-1225.4	-1319.5	-1417.3

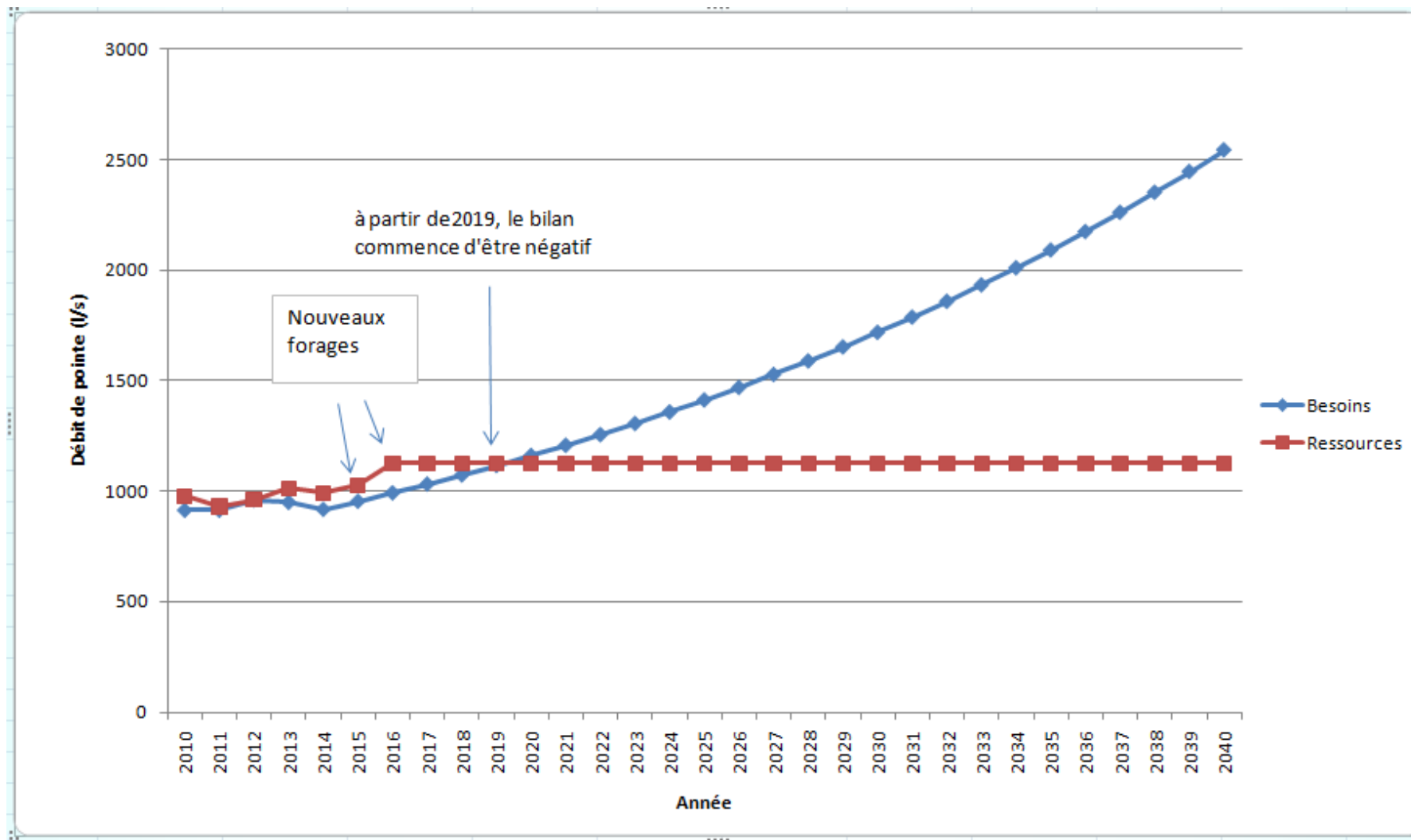


Figure 64: Bilan futur besoin-ressource en cas de réalisation des nouveaux forages locaux en 2016

D'après les deux tableaux précédentes et le graphique, on constate bien que les projets urgents en 2015 et 2016 peuvent équilibrer le bilan jusqu'à 2019.

Suite à l'électrification de forage Zardoub4 :

- ✓ Le bilan en 2015 passe de 37,97 l/s vers 72 l/s

Le bilan devient positif en 2016 après qu'il était négatif sans projet

Suite au renforcement des ressources souterraines :

- ✓ Le bilan Kairouannais devient positif de 2017 jusqu'à 2019

A partir de 2019, il faut mettre en place des projets plus efficaces à long terme.

#### **6.1.4. Description générale et affectation des ressources 2019-2040**

En vu de satisfaire les besoins en période de pointe de notre réseau à partir de l'année 2019 et jusqu'à l'horizon 2040. On va étudier l'effet des projets programmé au niveau de système CapBon-Sfax sur notre réseau Kairouannais.

En effet, l'eau à partir de Belli, après l'alimentation du tout le Cap-Bon, passe vers le Sahel qui prend une partie importante des eaux Kairouannais à partir de réservoir El ONK, le surplus du Sahel passe pour bonifier l'alimentation la ville de Sfax.

Donc, pour mieux conserver un bilan positif au niveau du Kairouan, il faut renforcer plus les ressources de système d'adduction du Nord pour minimiser le plus possible les besoins du Sahel à partir du l'adduction Kairouannais.

D'après les études du SONEDE, les systèmes existants d'alimentation en eau potable doivent être renforcés par la réalisation des aménagements projetés suivants permettant la mobilisation de ressources additionnelles conventionnelles et non conventionnelles (Mesbahi H, 2013) :

- Une nouvelle station de traitement à Belli
- Une station de traitement au niveau de barrage Lebna
- Retenu Saida qui est soutenu par un système de transfert des eaux de Nord à partir du canal Medjerda au niveau du Grand Tunis
- Retenu Sahel et infrastructures y afférentes de traitement et de séparation des systèmes de transfert (ouvrages et adduction)
- Station de dessalement d'eau de mer

- Renforcer les ressources dans le gouvernorat de Sfax, Sahel, CapBon et Kairouan par le recours aux eaux non conventionnelles produites par le dessalement d'eau de mer à long terme.

#### **6.1.4.1. Aménagements projetés :**

Les aménagements projetés sont détaillés ci –après :

##### **❖ Une nouvelle station de traitement Belli :**

Le renforcement de la capacité de réserve et de traitement des Eaux du Nord par une nouvelle station à Belli puisque les eaux traitées dans le complexe de Belli assurant tout au long de l'année l'alimentation des régions du Cap-Bon, du Sahel, et de Sfax.

La capacité de cette station est de 400 l/s, la SONEDE commence la réalisation de ce projet d'après 2014. Mais la mise en fonction vient de débuter en fin de 2015.

##### **❖ Consistance du projet de la retenue de Saida :**

Exécution de la retenue de Saida de capacité 45Millions m<sup>3</sup> environ

Réalisation du système de transfert et de pompage de la prise d'eau du canal Medjerda au niveau de Bejaoua jusqu'à la retenue Saida

- ✓ 03 stations de pompages (Q=4m<sup>3</sup>/s-HMT=54m ; Q=2m<sup>3</sup>/s-HMT=125m ; Q=2m<sup>3</sup>/s-HMT=80m)
- ✓ Liaison entre la prise d'eau Bejaoua et la retenue Saida : 2 km DN 1800 mm fonte +11 km DN 1400 mm et 1800 mm béton.
- ✓ 01 RSE 5000m<sup>3</sup> (bassin de mise en charge)
- ✓ Réalisation du système de transfert et de pompage de la retenue Saida jusqu'à la station de pompage El Khouine au pied du complexe Belli
- ✓ Environ 60 km de conduites de gros diamètres
- ✓ 02 stations de pompage (Q=2m<sup>3</sup>/s-HMT=100m)-02 stations de pompage (Q=2m<sup>3</sup>/s-HMT=100m)

##### **❖ Consistance du projet de la retenue du Sahel :**

Ce projet joue deux rôles principaux :

Un rôle de régulation saisonnière qui sera à long terme de plus en plus déterminant pour combler le déficit en ressources attendu dans les gouvernorats du Sahel et de Sfax. La retenue permettra de stocker des quantités d'eaux importantes et de les restituer au réseau après traitement en période de forte demande.

Un rôle de sécurisation de l'approvisionnement en eau potable de la région du Sahel et en partie de Sfax en cas de problème au niveau du canal Medjerda, d'interruption accidentelle de la production dans la station de traitement de Belli ou d'arrêt du transfert des eaux traitées suite à un éventuel incident sur l'adduction des Eaux du Nord.

La capacité de cette retenue est de l'ordre de 28 Millions m<sup>3</sup>

Elle nécessite la réalisation des infrastructures de traitement et de pompage :

- ✓ Station de traitement des eaux brutes de capacité finale 4m<sup>3</sup>/s
- ✓ Station de pompage vers la retenue de capacité 2m<sup>3</sup>/s
- ✓ Station de pompage vers la brise-charge projeté (Eznatir NBC2) de capacité 4m<sup>3</sup>/s

#### ❖ Station de dessalement d'eau de mer :

Les stations de dessalements d'eau de mer sont la dernière solution que choisie par la SONEDE pour éviter les problèmes de manque d'eau, parce qu'elles se contentent très chères. Mais, en réalité au futur, on se trouve obligé de choisir ces solutions si la demande reste augmenter d'une façon progressive avec le manque des ressources.

Les stations de dessalement d'eau de mer nécessitent des infrastructures y afférentes (réservoirs de mélange, prise d'eau de mer, rejet de saumure, etc...) et les réseaux de liaison aux différents pôles de distribution sont projetés.

Les stations qu'on doit réaliser afin de satisfaire le déficit de notre bilan jusqu'à 2040 sont comme suit selon l'ordre chronologique :

- ✓ Une station de dessalement au Sfax
- ✓ Une station de dessalement au Sahel
- ✓ Une station de dessalement au CapBon
- ✓ Une station de dessalement au Sousse mais à production pour Kairouan

#### 6.1.5. Conclusion partiel :

Tous ces projets doivent être réalisés selon la priorité de point de vue de satisfaire des besoins et de coût, de plus il faut respecter la marge du temps entre deux projets successifs.

Parmi ces projets, il y a ceux qui sont urgents tel que la station de dessalement de Sfax.

Dans la partie suivante, on va proposer ces projets à différents intervalles de temps, on va le comparer et choisir la variante optimale qui nous assure un bilan positif à minimum de coût.

## **6.2. Scenarii pour la satisfaction de la demande en eau et Choix de la variante optimale :**

### **6.2.1. Etude des variantes :**

Les variantes 1, 2, et 3 étudiées sont définies selon l'année d'entrée en exploitation des différents aménagements projetés.

#### **6.2.1.1. Etude de la variante 1 :**

Les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 1 sont données par le tableau suivant :



**Tableau 8** : les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 1

<b>Etape</b>	<b>Projet</b>	<b>Année d'introduction dans le bilan</b>	<b>Bilan Axe d'adduction Nord</b>	<b>Bilan Kairouan</b>
E1	-Une nouvelle station de traitement à Belli - Renforcement de la station de traitement Lebna	2015	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (159 l/s) après qu'il soit négatif (-81 l/s)	-la situation de Bilan Kairouannais devient mieux après les projets (de 72 →231 l/s)
E2	-Nouveau forages locaux à Cap-Bon (75 l/s)  -Nouveau forages locaux à Sahel (150 l/s)	2016	- Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (55 l/s) après qu'il soit négatif (-185 l/s)	
E3	-Première tranche de la station de dessalement de Sfax (1157 l/s)	2020	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (748 l/s) après qu'il soit négatif (-649 l/s)	-le bilan Kairouannais =711 l/s
E4	-Première tranche de Retenu Saida à Cap-Bon (60 l/s)  -Première tranche de Retenu Sahel (2000l/s)	2023	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (405 l/s)après qu'il soit négatif (-1052 l/s)	-le bilan Kairouannais =225 l/s
E5	-Deuxième tranche de station de dessalement Sfax (2315 l/s)	2024	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1417 l/s)après qu'il soit négatif (-1198 l/s)	-le débit Kairouannais =640 l/s

E6	-Deuxième tranche de Retenu Saida (120 l/s)	2028	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (787 l/s) après qu'il soit négatif (-1848 l/s)	-le débit Kairouannais =325 l/s
E7	-Deuxième tranche de Retenu Sahel	2029	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (607 l/s) après qu'il soit négatif (-2028 l/s)	-le débit Kairouannais =81 l/s
E8	-Première tranche de la station de dessalement de Sahel (800 l/s)	2030	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1319 l/s) après qu'il soit négatif (-2216 l/s)	-le débit Kairouannais =511 l/s
E9	-troisième tranche de la station de dessalement de Sfax (3000 l/s) -Première tranche de la station de dessalement du Sousse vers Kairouan (250 l/s)	2034	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1461 l/s) après qu'il soit négatif (-827 l/s)	-le débit Kairouannais =827 l/s
E10	- Première tranche de la station de dessalement de CapBon (1000 l/s)	2035	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2228 l/s) après qu'il soit négatif (-3285 l/s)	-le débit Kairouannais =628 l/s
E11	-Deuxième tranche de la station de dessalement du Sousse vers Kairouan (700 l/s) -Deuxième tranche de la	2037	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1734 l/s) après qu'il soit négatif (-3779 l/s)	-le débit Kairouannais = 1017l/s

	station de dessalement de Sahel (3500 l/s)			
E12	-Deuxième tranche de la station de dessalement de CapBon (1000 l/s)	2038	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1471 l/s) après qu'il soit négatif (-4042 l/s)	-le débit Kairouannais = 945 l/s

Tableau 8 : Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 1

	Année	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040		
CAP-BON	Ressources Cap-Bon (existant)	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	
	Projet de nouvelle station de Belli	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	Projet de la station de traitement à Lebna	40	40	40	40	40	40	100	100	100	100	100	100	100	100	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Nouveau Forages		75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	Retenu Saïda										60	60	60	60	60	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Station dessalement Capbon																						1000	1000	1000	2000	2000	2000	
	Total ressources Cap-Bon	5464	5539	5539	5539	5539	5539	5599	5599	5659	5659	5659	5659	5659	5659	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	6739	6739	6739	7739	7739	7739	
CAP-BON	Besoins CapBon	1691	1755	1822	1891	1963	2038	2115	2195	2279	2365	2455	2549	2645	2746	2850	2959	3071	3188	3309	3435	3565	3701	3841	3987	4139	4296		
Sahel	Ressources Sahel (existant)	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	
	Des nouveaux forages locaux	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
	Des nouveaux forages locaux		150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
	Retenu Sahel										2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5500	
	Station dessalement Sahel																800	800	800	1250	1250	1250	1250	3500	3500	3500	3500		
	Total ressources Sahel	4815	4965	4965	4965	4965	4965	4965	4965	6965	6965	6965	6965	6965	6965	8965	9865	9865	9865	10315	11315	11315	11315	13565	13565	13565	14065		
Sahel	Besoins Sahel	3974	4117	4265	4419	4578	4743	4914	5090	5274	5464	5660	5864	6075	6294	6520	6755	6998	7250	7511	7782	8062	8352	8653	8964	9287	9621		
Sfax	Ressources Sfax (existant)	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	
	Nouveaux forages	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	
	Station dessalement Sfax						1157	1157	1157	1157	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	3000	3000	3000	3000	3000	3000		
	Total ressources Sfax	2584	2584	2584	2584	2584	3741	3741	3741	3741	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	5584	5584	5584	5584	5584	5584		
	Besoins Sfax	2425	2529	2638	2751	2870	2993	3122	3256	3396	3542	3694	3853	4019	4192	4372	4560	4756	4961	5174	5396	5629	5871	6123	6386	6661	6947		
	Bilan Axe Belli-Sahel- Sfax	159	55	-54	-167	-286	748	679	545	405	1417	1265	1106	940	787	607	1319	1123	918	1155	1461	2228	1986	1734	1471	1196	1110		
Kairouan	Ressources Existantes (1)	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	
	Ressources (après projet urgent)(1')	1026	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	
	Station de désalement au Sousse vers Kairouan(1'')																					250	250	250	700	700	700		
	Besoin sans les volumes vers el Onk(2)	341	355	369	384	399	415	432	449	467	486	505	526	547	569	591	615	640	665	692	719	748	778	809	842	875	910		
	Besoin el onk sans projets (3)	613	637	663	689	717	745	775	806	838	872	907	943	981	1020	1061	1103	1147	1193	1241	1291	1342	1396	1452	1510	1570	1633		
	Besoin el onk avec projets (3')	454	582	663	689	717	0	96	261	433	0	0	0	41	233	454	0	24	275	86	-170	0	0	0	39	374	523		
	Bilan sans projets(1- (2+3))	72	134	94	-81	-124	-169	-215	-263	-314	-366	-420	-477	-535	-597	-660	-726	-795	-866	-941	-992	-1098	-1182	-1269	-1359	-1453	-1551		
	Bilan avec projets (1'+1''-(2+3'))	231	189	94	53	10	711	598	415	225	640	621	600	539	325	81	511	462	186	348	827	628	598	1017	945	577	392		

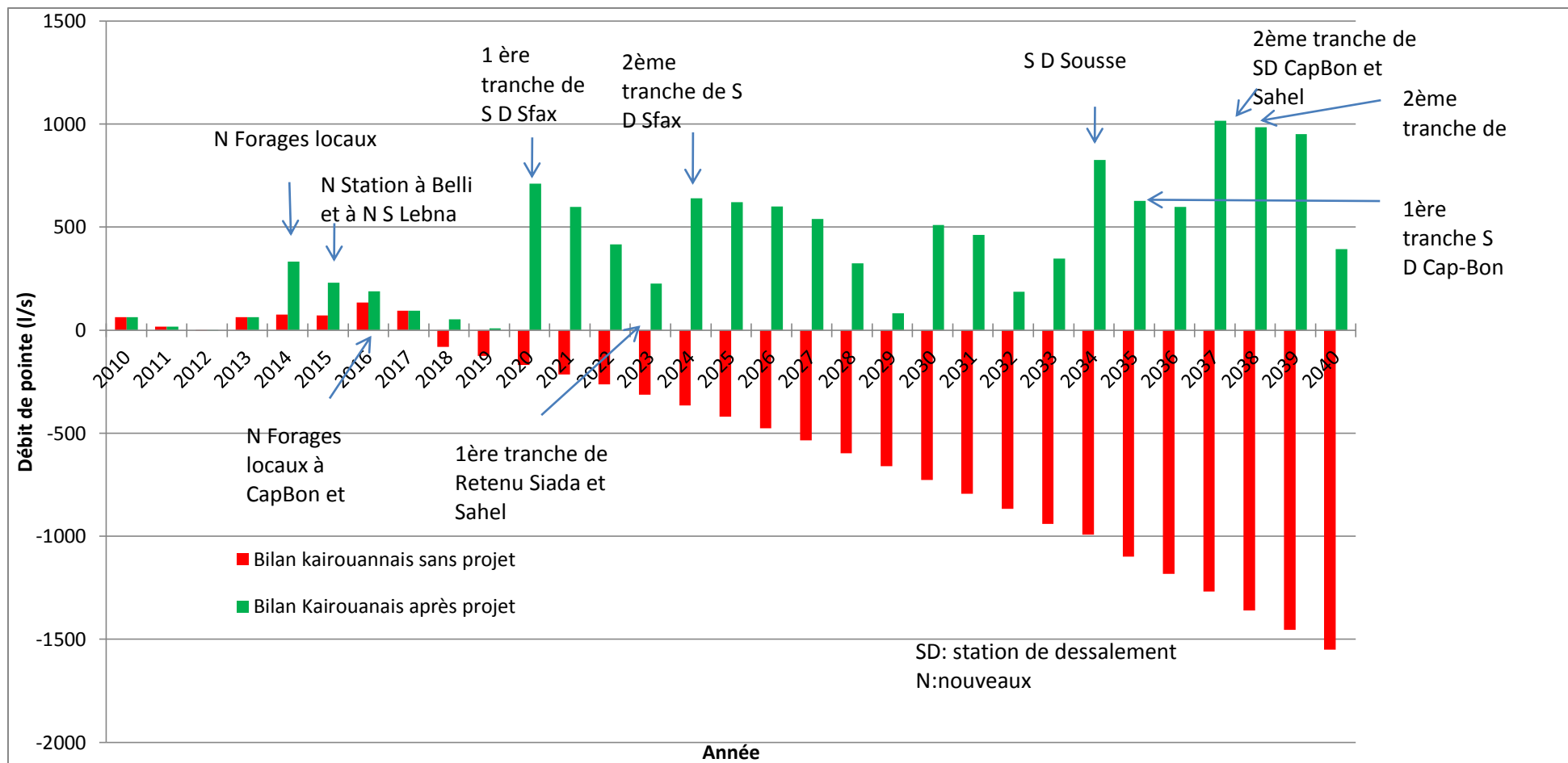


Figure 65: Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V1)

**6.2.1.2. Etude de la variante 2 :**

Cette variante se différenciera à l'échelonnement de réalisation des aménagements sur les années par rapport à la variante 1 à partir d'E7 comme montre le tableau suivant :

**Tableau 9:** les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 2

<b>Etape</b>	<b>Projet</b>	<b>Année d'introduction dans le bilan</b>	<b>Bilan Axe d'adduction Nord</b>	<b>Bilan Kairouan</b>
E1	-Une nouvelle station de traitement à Belli - Renforcement de la station de traitement Lebna	2015	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (159l/s) après qu'il soit négatif (-81 l/s)	-la situation de Bilan Kairouannais devient mieux après les projets (de 72 → 231 l/s)
E2	-Nouveau forages locaux à Cap-Bon (75 l/s)  -Nouveau forages locaux à Sahel (150 l/s)	2016	- Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (55 l/s) après qu'il soit négatif (-185 l/s)	-Le débit Kairouannais = 189l/s
E3	-Première tranche de la station de dessalement de Sfax (1157 l/s)	2020	- Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (748 l/s) après qu'il soit négatif (-649 l/s)	-Le débit Kairouannais = 711 l/s

E4	-Première tranche de Retenu Saida à Cap-Bon (60 l/s)  -Première tranche de Retenu Sahel (2000l/s)	2023	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (405 l/s)après qu'il soit négatif (-1052 l/s)	-le débit Kairouannais =225 l/s
E5	-Deuxième tranche de station de dessalement Sfax (2315 l/s)	2024	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1417 l/s)après qu'il soit négatif (-1198 l/s)	-le débit Kairouannais =640 l/s
E6	-Deuxième tranche de Retenu Saida (120 l/s)	2028	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (787 l/s)après qu'il soit négatif (-1848 l/s)	-le débit Kairouannais = 325 l/s
E7	-Deuxième tranche de Retenu Sahel	2029	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (607 l/s)après qu'il soit négatif (-2028 l/s)	-le débit Kairouannais =81 l/s
E8	-Première tranche de la station de dessalement Cap-Bon (1000 l/s)	2030	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1519 l/s)après qu'il soit négatif (-2216 l/s)	-le débit Kairouannais =511 l/s
E9	-Deuxième tranche de la station de dessalement de CapBon (1000 l/s)	2033	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1905 l/s)après qu'il soit négatif (-2830 l/s)	-le débit Kairouannais =434 l/s

E10	-Troisième tranche de la station de dessalement de Sfax (3000 l/s)	2034	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2211 l/s) après qu'il soit négatif (-3052 l/s)	-le débit Kairouannais =407 l/s
E11	-Première tranche de la station de dessalement de Sahel (800 l/s)	2035	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (3228 l/s) après qu'il soit négatif (-3285 l/s)	-le débit Kairouannais =378 l/s
E12	-Deuxième tranche de la station de dessalement de Sahel (1250 l/s)	2038	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2471 l/s) après qu'il soit négatif (-4042 l/s)	-le débit Kairouannais =284 l/s

Le bilan futur en cas de l'application de V2 devient :



Tableau 10: Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 2

	Année	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
CAP-BON	Ressources Cap-Bon (existant)	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024
	Projet de nouvelle station de Belli	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	Projet de station de traitement à Lebna	40	40	40	40	40	40	100	100	100	100	100	100	100	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Nouveau Forages		75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	Retenu Saida										60	60	60	60	60	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Station dessalement Capbon																	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Total ressources Cap-Bon	5464	5539	5539	5539	5539	5539	5599	5599	5659	5659	5659	5659	5659	5739	5739	6739	6739	6739	7739	7739	7739	7739	7739	7739	7739	7739
	Besoins CapBon	1691	1755	1822	1891	1963	2038	2115	2195	2279	2365	2455	2549	2645	2746	2850	2959	3071	3188	3309	3435	3565	3701	3841	3987	4139	4296
	Ressources Sahel (existant)	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790
	Des nouveaux forages locaux	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Des nouveaux forages locaux		150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
Retenu Sahel										2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	5000	5000	5000	5000	5000	5500	
Station dessalement Sahel																						800	800	800	1250	1250	1250
Total ressources Sahel	4815	4965	4965	4965	4965	4965	4965	4965	6965	6965	6965	6965	6965	6965	8965	9065	9065	9065	9065	10065	10865	10865	10865	11315	11315	11815	
Besoins Sahel	3974	4117	4265	4419	4578	4743	4914	5090	5274	5464	5660	5864	6075	6294	6520	6755	6998	7250	7511	7782	8062	8352	8653	8964	9287	9621	
Sfax	Ressources Sfax (existant)	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	
	Nouveaux forages	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	
	Station dessalement Sfax						1157	1157	1157	1157	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	Total ressources Sfax	2584	2584	2584	2584	2584	3741	3741	3741	3741	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	5584	5584	5584	5584	5584	5584	5584
	Besoins Sfax	2425	2529	2638	2751	2870	2993	3122	3256	3396	3542	3694	3853	4019	4192	4372	4560	4756	4961	5174	5396	5629	5871	6123	6386	6661	6947
Bilan Axe Belli-Sahel- Sfax		159	55	-54	-167	-286	748	679	545	405	1417	1265	1106	940	787	607	1519	1323	1118	1905	2211	3228	2986	2734	2471	2196	1910
Kairouan	Ressources Existantes (1)	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	
	Ressources (après projet urgent)(1')	1026	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	
	Station de dessalement au Souss vers Kairouan																										
	Besoin sans les volumes vers el Onk(2)	341	355	369	384	399	415	432	449	467	486	505	526	547	569	591	615	640	665	692	719	748	778	809	842	875	910
	Besoin el onk sans projets (3)	613	637	663	689	717	745	775	806	838	872	907	943	981	1020	1061	1103	1147	1193	1241	1291	1342	1396	1452	1510	1570	1633
	Besoin el onk avec projets (3')	454	582	663	689	717	0	96	261	433	0	0	0	41	233	454	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bilan sans projets(1-2+3)	38	0	-40	-81	-124	-169	-215	-263	-314	-366	-420	-477	-535	-597	-660	-726	-795	-866	-941	-992	-1098	-1182	-1269	-1359	-1453	-1551
	Bilan avec projets (1'+1''-2+3'')	231	189	94	53	10	711	598	415	225	640	621	600	539	325	81	511	486	386	434	407	378	348	317	284	251	216

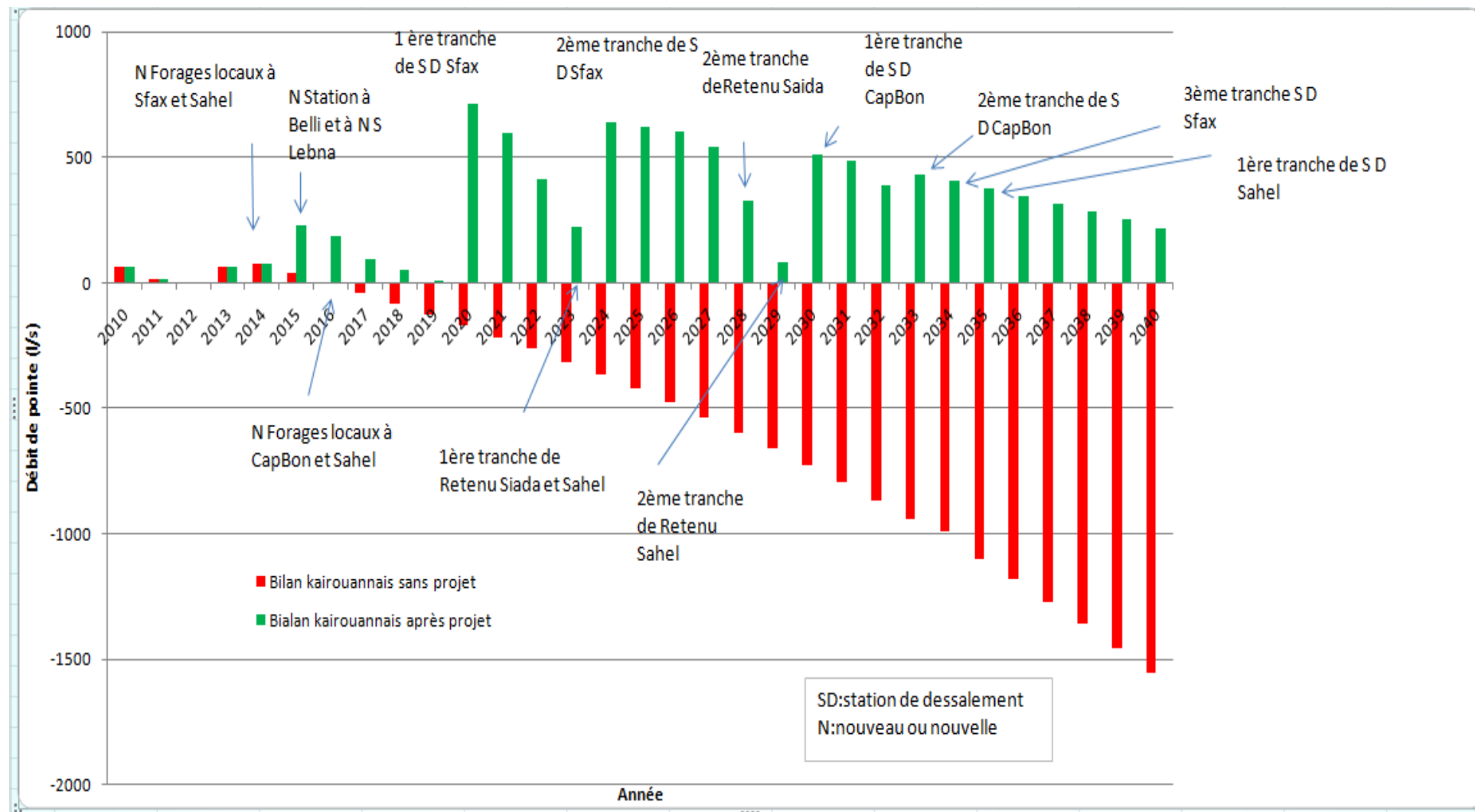


Figure 66 : Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V2)

**6.2.1.3. Etude de la variante 3 :**

Les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 3 sont données par le tableau suivant :

**Tableau 11** : les étapes de mobilisation des ressources pour la variante 3

<b>Etape</b>	<b>Projet</b>	<b>Année d'introduction dans le bilan</b>	<b>Bilan Axe d'adduction Nord</b>	<b>Bilan Kairouan</b>
E1	-Une nouvelle station de traitement à Belli - Renforcement de la station de traitement Lebna	2015	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (159l/s)après qu'il soit négatif (-81 l/s)	-la situation de Bilan Kairouannais devient mieux après les projets (de 72 →231 l/s)
E2	-Nouveaux forages locaux à Cap-Bon (75 l/s)  -Nouveaux forages locaux à Sahel (150 l/s)	2016	- Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (55 l/s) après qu'il soit négatif (-185 l/s)	-Le débit Kairouannais =284 l/s
E3	-Première tranche de la station de dessalement de Sfax (1157 l/s)	2020	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (748 l/s) après qu'il soit négatif (-649 l/s)	-Le débit Kairouannais =711 l/s
E4	-Première tranche de Retenu Saida à Cap-Bon (60 l/s)  -Première tranche de	2023	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (405 l/s)après qu'il soit négatif (-1052 l/s)	-Le débit Kairouannais =225 l/s
<b>Manel Saida</b>	Retenu Sahel (2000l/s)	<b>109</b>		<b>Juin 2015</b>

E5	-Deuxième tranche de station de dessalement Sfax (2315 l/s)	2024	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1417 l/s) après qu'il soit négatif (-1198 l/s)	-Le débit Kairouannais =640 l/s
E6	-Première tranche de la station de dessalement de Sahel (800 l/s)	2025	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2065 l/s) après qu'il soit négatif (-1350 l/s)	-Le débit Kairouannais =621 l/s
E7	-Deuxième tranche de la station de dessalement Sahel (1250)  -Deuxième tranche de Retenu Saida (120 l/s)	2028	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2037 l/s) après qu'il soit négatif (-1848 l/s)	-Le débit Kairouannais =557 l/s
E8	-Deuxième tranche de Retenu Sahel (2000 l/s)	2029	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (1857 l/s) après qu'il soit négatif (-2028 l/s)	-Le débit Kairouannais =535 l/s
E9	- Troisième tranche de la station de dessalement Sahel (3500)	2032	-Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (3618 l/s) après qu'il soit négatif (-2617 l/s)	-Le débit Kairouannais = 461 l/s

E10	-Troisième tranche de Retenu Sahel (5000 l/s)	2034	Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (3961 l/s) après qu'il soit négatif (-3052 l/s)	-Le débit Kairouannais =407 l/s
E11	-Première tranche de la station de dessalement Cap-Bon (2000 l/s)	2038	Le bilan de l'axe Belli-Sahel-Sfax devient positif (2471 l/s) après qu'il soit négatif (-4042 l/s)	-Le débit Kairouannais =284 l/s

Le bilan futur en cas d'application de V3 devient :

Tableau 12: Bilan futur de l'axe CapBon-Sahel-Sfax et du réseau Kairouannais sans et avec projet de la variante 3

	Année	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040		
CAP-BON	Ressources Cap-Bon (existant)	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	5024	
	Projet de nouvelle station de Belli	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	Projet de station de traitement à Lebna	40	40	40	40	40	40	100	100	100	100	100	100	100	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Nouveau Forages		75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	Retenu Saida										60	60	60	60	60	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	Station dessalement Capbon																									2000	2000	2000	
	Total ressources Cap-Bon	5464	5539	5539	5539	5539	5539	5599	5599	5659	5659	5659	5659	5659	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	7739	7739	7739
	Besoins CapBon	1691	1755	1822	1891	1963	2038	2115	2195	2279	2365	2455	2549	2645	2746	2850	2959	3071	3188	3309	3435	3565	3701	3841	3987	4139	4296		
	Ressources Sahel (existant)	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790	4790
	Des nouveaux forages locaux		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Des nouveaux forages locaux		150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
Retenu Sahel										2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	
Station dessalement Sahel											800	800	800	1250	1250	1250	1250	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	
Total ressources Sahel	4815	4965	4965	4965	4965	4965	4965	4965	6965	6965	7765	7765	7765	8215	10215	10315	10315	12565	12565	13565	13565	13565	13565	13565	13565	13565	13565	13565	
Besoins Sahel	3974	4117	4265	4419	4578	4743	4914	5090	5274	5464	5660	5864	6075	6294	6520	6755	6998	7250	7511	7782	8062	8352	8653	8964	9287	9621			
Ressources Sfax (existant)	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	2344	
Nouveaux forages		240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	
Station dessalement Sfax							1157	1157	1157	1157	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	2315	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000		
Total ressources Sfax	2584	2584	2584	2584	2584	3741	3741	3741	3741	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	4899	5584	5584	5584	5584	5584	5584	5584		
Besoins Sfax	2425	2529	2638	2751	2870	2993	3122	3256	3396	3542	3694	3853	4019	4192	4372	4560	4756	4961	5174	5396	5629	5871	6123	6386	6661	6947			
<b>Bilan Axe Belli-Sahel- Sfax</b>	159	55	-54	-167	-286	748	679	545	405	1417	2065	1906	1740	2037	1857	1769	1573	3618	3405	3961	2728	2486	2234	2471	2196	1910			
Ressources Existantes (1)	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	
Ressources (après projet urgent)(1')	1026	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126	1126		
Station de désalement au Sousse vers Kairouan																													
Besoin sans les volumes vers el Onk(2)	341	355	369	384	399	415	432	449	467	486	505	526	547	569	591	615	640	665	692	719	748	778	809	842	875	910			
Besoin el onk sans projets (3)	613	637	663	689	717	745	775	806	838	872	907	943	981	1020	1061	1103	1147	1193	1241	1291	1342	1396	1452	1510	1570	1633			
Besoin el onk avec projets (3')	454	582	663	689	717	0	96	261	433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Bilan sans projets(1.-2+3))	38	0	-40	-81	-124	-169	-215	-263	-314	-366	-420	-477	-535	-597	-660	-726	-795	-866	-941	-992	-1098	-1182	-1269	-1359	-1453	-1551			
Bilan avec projets (1'+1'-.2+3'))	231	189	94	53	10	711	598	415	225	640	621	600	579	557	535	511	486	461	434	407	378	348	317	284	251	216			

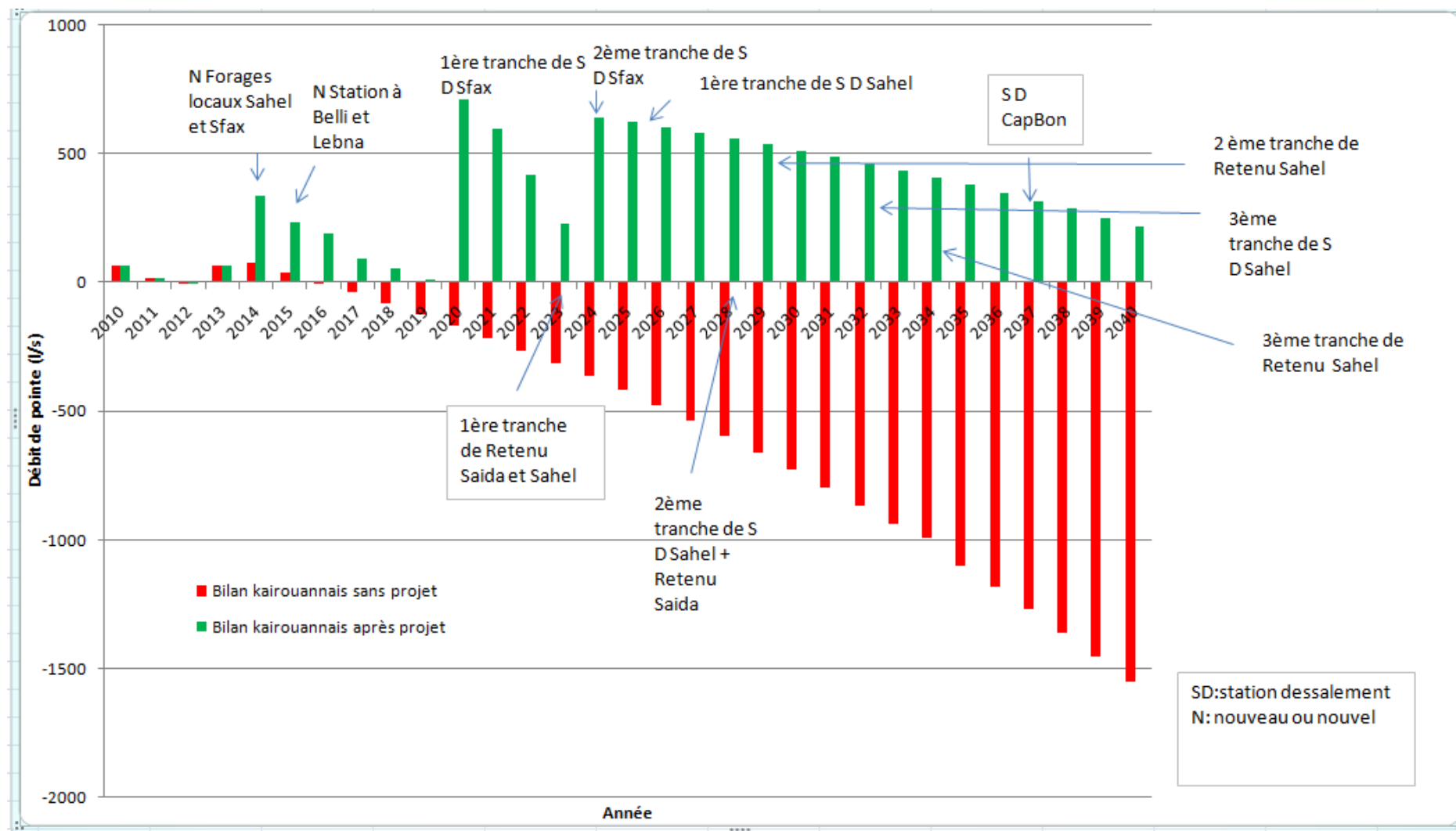


Figure 67: Bilan futur du réseau Kairouannais sans et après projet 2010-2040 (V3)

Les débits disponibles en 2040 pour chaque variante, par ordre croissant, sont comme suit :

**Tableau 13:** les débits disponibles en 2040

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Axe Belli-Sahel-Sfax	1110	1910	1910
Al ONK	392	216	216

### 6.3. Echelonnement et coûts des aménagements projetés

Le choix de la combinaison optimale comme solution dépend de plusieurs paramètres :

- ✓ Coût d'exécution le moins cher
- ✓ Importance de volume d'eau disponible en 2040
- ✓ Durée d'exécution de l'ouvrage
- ✓ Importance de l'intervalle du temps entre les renforcements du même ouvrage ou l'exécution d'un autre nouveau

#### 6.3.1. Echelonnement

L'échelonnement de réalisation des aménagements est résumé dans le tableau suivant :



Tableau 14: Echelonnement des projets

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040		
<b>Variante 1</b>																												
Nouvelle station Belli	35000m3/j																											
Nouvelle station Lebna	3500m3/j					8000m3/j								10000m3/j														
Nouveaux forages locaux à CapBon et Sahel	20000m3/j																											
Retenu Saida									2 m3/s				4m3/s															
Retenu Sahel									2m2/s				4m2/s															
S D Sfax						100000m3/j								200000 m3/j								300000m3/j						
S D Sahel																70000m3/j			100000m3/j			300000m3/j						
S D CapBon																					100000m3/j			200000m3/j				
S D Sousse vers Kairouan																								20000m3/j		70000m3/j		
<b>Variante 2</b>																												
Nouvelle station Belli	35000m3/j																											
Nouvelle station Lebna	3500m3/j					8000m3/j								10000m3/j														
Nouveaux forages locaux à CapBon et Sahel	20000m3/j																											
Retenu Saida									2 m3/s				4m3/s															
Retenu Sahel									2m2/s				4m2/s															
S D Sfax						100000m3/j								200000 m3/j								300000m3/j						
S D Sahel																70000m3/j			100000m3/j									
S D CapBon											100000m3/j					200000m3/j												
S D Sousse vers Kairouan																												
<b>Variante 3</b>																												
Nouvelle station Belli	35000m3/j																											
Nouvelle station Lebna	3500m3/j					8000m3/j								10000m3/j														
Nouveaux forages locaux à CapBon et Sahel	20000m3/j																											
Retenu Saida									2 m3/s				4m3/s															
Retenu Sahel									2m2/s				4m2/s															
S D Sfax						100000m3/j								200000 m3/j								300000m3/j						
S D Sahel											70000m3/j			100000m3/j					300000m3/j									
S D CapBon																								200000m3/j				
S D Sousse vers Kairouan																												

D'après le tableau, on remarque que l'espacement entre les aménagements projetés varie d'une variante à une autre.

En effet, pour la variante 1, l'intervalle de temps pour la réalisation des nouvelles ouvrages est espacé au minimum d'un an et maximum de 10 ans jusqu'au 2034.

Pour la variante 2, l'intervalle de temps pour la réalisation des nouvelles ouvrages est espacé minimum d'un an et maximum de 15 ans jusqu'au 2035.

Pour la variante 3, l'intervalle de temps pour la réalisation des nouvelles ouvrages se montre espacé minimum d'un an et maximum de 13 ans jusqu'au 2039.

Mais aussi, il existe quelques projets sont réalisées à la même année tels que les nouveaux stations de traitement à Belli et à Lebna (pour les trois variantes).

Pour les variantes 2 et 3, on n'a pas eu reçus au projet la station de dessalement à Sousse vers Kairouan et on a eu un bilan positif pour notre zone d'étude, mais à condition d'avancer d'autres projets.

### **6.3.2. Coûts d'investissement :**

Les coûts hors taxes (Millions DT hors droits de douane et hors TVA) d'investissements pour la réalisation des aménagements projetés pour les différentes variantes sont consignés dans le tableau suivant. Pour le calcul aux prix courants, un taux d'inflation moyen annuel de 5,7% est pris en compte selon la BCT et l'INS, ce taux se maintient constant à ce niveau dès 2015.

Les hypothèses de calcul des prix considérés sont :

- Les coûts de réalisation des retenus sont basés sur des estimations de la SONEDE :
  - Un retenu de 25 Mm<sup>3</sup> au Sahel coutera 37,5 MDT
  - Un retenu de 25 Mm<sup>3</sup> ca CapBon (Saida) coutera 67,5 MDT
- Le coût de réalisation de la station de dessalement des eaux de mer est basé sur des estimations d'une équipe de JICA
  - Une station de dessalement de 100000m<sup>3</sup>/j coutera 360 MDT

Les détails des coûts annuels sont présentés par le tableau suivant :

Tableau 15: coût d'investissement (en MDT hors taxes)

Variante 1	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	Coût total MDT
Nouvelle station Belli	8.7																										
Nouvelle station Lebna	0.87						1.1							0.49													
Retenu Saida									67.5																		
Retenu Sahel									37.5																		
S D Sfax						360				360											360						
S D Sahel																252			140				360				
S D CapBon																					360			360			
S D Sousse vers Kairouan																							72	180			
<b>Total en MDT</b>	9.57					360	1.1		105	360				0.49		252			140	432	360		540	360			<b>2920</b>
<b>Total en MDT+Taux d'inflation</b>	9.57					381	1.163		111	380.5				0.518		266.4			148	457	380.5		571	380.5			<b>3086</b>
<b>Variante 2</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>2035</b>	<b>2036</b>	<b>2037</b>	<b>2038</b>	<b>2039</b>	<b>2040</b>	
Nouvelle station Belli	8.7																										
Nouvelle station Lebna	0.87						1.1							0.49													
Retenu Saida									67.5																		
Retenu Sahel									37.5																		
S D Sfax						360				360													360				
S D Sahel																						252		140			
S D CapBon																360			360								
S D Sousse vers Kairouan																											
<b>Total en MDT</b>	9.57					360	1.1		105	360				0.49		360			360	360	252			140			<b>2308</b>
<b>Total en MDT+Taux d'inflation</b>	9.57					381	1.163		111	380.5				0.518		380.5			381	381	266.4			148			<b>2439</b>
<b>Variante 3</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>2035</b>	<b>2036</b>	<b>2037</b>	<b>2038</b>	<b>2039</b>	<b>2040</b>	
Nouvelle station Belli	8.7																										
Nouvelle station Lebna	0.87						1.1							0.49													
Retenu Saida									67.5																		
Retenu Sahel									37.5																		
S D Sfax						360				360													360				
S D Sahel											252		140														
S D CapBon																								360			
S D Sousse vers Kairouan																											
<b>Total en MDT</b>	9.57					360	1.1		105	360	252		140.5						720	360				360			<b>2668</b>
<b>Total en MDT+Taux d'inflation</b>	9.57					381	1.163		111	380.5	266.4		148.5						761	381				380.5			<b>2820</b>

#### 6.4. Choix de la variante optimale :

Pour assurer le bon choix de la variante on doit analyses les différents résultats obtenus à l'aide d'un tableau comparatif :

**Tableau 16:** choix de la variante

Variante	Débit disponible fin de bilan (l/s)	Coût total d'aménagements projetés (MDT)	Echelonnement des aménagements	Avantages	Inconvénients	Résultats
V1	392	3086	1<E<10	Le débit disponible plus important que V2 et V3	Le coût le plus élevé	à éliminer
V2	216	2439	1<E<15	.Le coût le plus faible .Débit important .L'échelonnement le plus important		à prendre
V3	216	2820	1<E<13	Débit important	Coût élevé	à éliminer

La variante 1 est la variante la plus chère avec une différence de l'ordre de 647 MDT avec la variante 2. Cette variante ne diffère pas des autres pour les cinq premiers projets qui sont : la nouvelle station de traitement à Belli et Lebna, les deux retenus de Saida et Sahel, de plus elle montre l'importance de renforcement de la station de dessalement à Sfax le plus tôt possible. La différence apparaît surtout au niveau de la date de renforcement de deux stations de dessalement de CapBon et Sahel. De plus, pour conserver, un bilan futur positif, cette variante montre la nécessité d'un autre projet non existant pour les deux autres variantes V2 et V3 à Sousse mais avec production pour le réseau Kairouannais.

Même si cette variante 1 réservée dispose de débit disponible à la fin de l'an 2040 assez important mais le coût d'investissement est élevé → cette variante est à éliminer.

Les deux variantes 2 et 3 ont le même débit disponible en 2040. La différence entre ces deux variantes est le coût d'investissement qui est lié directement à la date de réalisation de chaque projet. Donc on a choisi la variante la moins coûteuse qui est la variante 2.

### **6.5. Conclusion partiel**

Au vu de ce qui précède, on propose de retenir la variante 2, assurant la sécurisation de l'AEP pas seulement du gouvernorat du Kairouan, mais aussi de toute l'axe d'adduction Nord Belli-Sahel-Sfax avec un coût total s'élevant à 2493 MDT hors taxes.

## **Conclusion générale :**

Les réseaux d'eau potable se comportent comme une structure interconnectée qui doit satisfaire la demande des abonnés à tout instant avec un minimum des dépenses qui peuvent être d'origine hydrauliques (casses, fuites,...) et d'autres énergétiques (pompage...).

De nos jours, l'objectif principal du gestionnaire du réseau est de réaliser un équilibre entre la consommation d'énergie et la consommation d'eau, c'est-à-dire satisfaire la demande de consommation tout en optimisant les heures de pompage.

L'évaluation de stations de pompage se fait par le calcul des quelques paramètres énergétiques spécifiques.

On a choisit de travailler sur ce thème en traitant le système d'adduction de Kairouan, contrôler les différents stations de pompage et trouver des solutions pour améliorer leur performance, surtout que ce système joue un rôle important dans l'équilibre de système d'adduction du Nord.

La longueur totale des conduites est de l'ordre de 226 Km et de diamètres qui varient entre 200 et 800 mm.

Selon cette étude pouvons dire que :

- ❖ Le champ de captage BouHafna est le champ le plus productif avec une part de 50% du volume total produit (la moyenne de 5 ans d'étude). Il ne présente pas d'anomalie de fonctionnement, les rendements de ses forages sont plus au moins acceptables puisque 4 forages uniquement parmi 13 dépassent les 50%, les autres sont au dessous de cette moyenne. Pour la consommation d'énergie, les forages de ces champs sont les meilleurs puisqu'ils consomment moins d'énergie parmi tous les forages Kairouannais, sauf pour le forage de Bou Hafna 1 bis qui consomme plus d'énergie que les autres forages de ce champ.
- ❖ Le champ de captage El Grine, est classé en deuxième lieu du point de vue volume de production avec une part de 35% du volume total produit (la moyenne de 5 ans d'étude). Ce champ aussi ne présente pas des problèmes de fonctionnement mais un

coût de pompage plus au moins élevé qui atteint 0,917KWh/m<sup>3</sup> pour Grine7ter et 0,807 KWh/m<sup>3</sup> pour Gontass2bis.

- ❖ Le champ de captage Chrechira, est classé le troisième c'est-à-dire le dernier champ de point du vue ordre de volume produit avec une part de 15%. Ce champ présente des problèmes de fonctionnement à cause de vieillissement de l'équipement de Chrechira3. Ce qui provoque un faible rendement pour le groupe électropompe puisque un seul forage parmi trois dépasse les 50%. Ainsi une consommation d'énergie importante atteint 1,66 KWh/m<sup>3</sup> pour Chrechira5.
- ❖ L'étude hydraulique de réseau d'adduction Kairouannais montre qu'un déficit aura lieu à partir de 2016, donc la SONEDE commence déjà de mettre en place de quelques projets urgents tels que des nouveaux forages locaux. Mais, selon l'étude de bilan besoins ressources de notre zone, ces derniers résoudront le problème jusqu'à l'année 2019. A ce niveau, on met la proposition des quelques projets nationaux qui ont un effet direct sur le système adduction Nord puisque Kairouan joue un rôle important dans l'équilibre de ce système. Par suite, on a choisit la variante la moins chère selon l'étude de coût.

Cette étude n'est qu'un début d'étude plus avancé visant l'amélioration du rendement des différents équipements pour qu'ils fonctionnent dans le niveau optimal de rendement.

## Références bibliographiques :

Chaabane Nour El Houda., 2014. L'eau en Tunisie : Une crise occultée. Nawat - Environnement .p24

Dammak Hamdi., 2014.PFE(INAT) du cycle ingénieur : Diagnostic et réhabilitation de la conduite d'adduction Sbeitla Jelma Sfax.

Degrémont, 1978. Mémento technique de l'eau ,8<sup>ème</sup> édition.

DGEBBI Mohamed., 2012.Cours ouvrage et travaux hydrauliques, chapitre4 « Ouvrages d'adduction »

DINEPA : direction nationale de l'eau et d'assainissement d'Haïti, 2013. Réalisation d'une modélisation hydraulique d'un réseau d'eau potable.

DGRE : Direction générale des ressources en eaux

DPS : Division production Sahel

Frelin Marcel., 2002. Coups de bélier. Techniques de l'ingénieur.

Jabbari Fouzia., 2010.PFE(INAT) du cycle ingénieur : plan directeur d'AEP de la ville de Jbeniana.p15

INS : institut nationale de statistique (recensement 2014)

Jaglin, S., 2001. L'eau potable dans les villes en développement: les modèles marchands face à la pauvreté. Revue Tiers Monde, 275-303.

K.H.V. Durga Rao., 2005.Landscape and Urban Plnning 71 : Multi-criteria spatial decision analysis for forecasting urban water requirements : a case study of Dehradun city,India,633-643

Margat J., 1992. L'eau dans le bassin méditerranéen. p60.

Mesbah Hayfa., 2013.PFE di cycle ingénieur : Diagnostic et Réhabilitation de système d'adduction Nord. Chapitre 4 et 5.



Nouiri Issam., 2009.la consommation d'énergie par le pompage de l'eau. Diagnostic, prévision de la demande, et optimisation de pompage .p7-9.

ONU : Organisation internationale des Nations Unies

SONEDE, 2009 : District Bardo de Gouvernorat de Tunis

## Référence des sites consultés

1) [http://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc\\_singu.htm](http://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc_singu.htm)

Date de publication : 2003-2004

Mise à jour : le 24/03/2015

2) Le Monde, 2014. 20 % de l'eau potable gaspillée à cause des fuites en France. [En ligne] disponible sur <[http://www.lemonde.fr/societe/article/2014/11/20/20-de-l-eau-potable-gaspillee-a-cause-des-fuites\\_4526164\\_3224.html](http://www.lemonde.fr/societe/article/2014/11/20/20-de-l-eau-potable-gaspillee-a-cause-des-fuites_4526164_3224.html)> (mise à jour : 24/03/2015)

3) Sudouest., 2014.A cause de fuite 20% de l'eau potable est perdue chaque année. [En ligne] disponible sur < <http://www.sudouest.fr/2014/11/20/a-cause-des-fuites-20-de-l-eau-potable-est-perdue-chaque-annee-1742125-706.php>>

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est la modélisation hydraulique et énergétique avec la proposition des solutions pour la réhabilitation du système d'adduction Kairouannais. Le présent travail consiste d'abord à faire une collecte des données sur le réseau d'étude. Ensuite la création d'une base des données numérique à l'aide de l'outil SIG. Un diagnostic technique et énergétique sur l'état actuel du réseau est élaboré en utilisant des indicateurs de performance.

Hydrauliquement, notre réseau a une importance régionale dans l'alimentation de différentes localités Kairouannais, mais aussi une importance nationale puisqu'il joue un rôle essentiel dans l'équilibre de système adduction Nord. Par la suite, la construction d'un modèle hydraulique sur EPANET, aura lieu, a permis d'analyser le fonctionnement hydraulique de ce complexe réseau.

Les résultats de la simulation ont montré que notre réseau transporte un débit important de l'ordre de 1000 l/s au cours de route pour atteindre les 640l/s au point d'arrivée qui est le réservoir El ONK pour passer par la suite vers le Sahel.

Pour tout le système, la consommation énergétique moyenne s'élève à 0,54 KWh/m<sup>3</sup>, avec une valeur maximale d'environ 1,6 KWh/m<sup>3</sup> pour Chrechira5 appartenant au champ de Captage Chrechira et de 0,91KWh/m<sup>3</sup> pour le Grine7ter appartenant au champ de captage, El Grine. Les valeurs maximales de la consommation d'énergie sont expliquées par les grandes valeurs de Hmt surtout pour le champ de Chrechira et El Grine.

Les solutions de réhabilitation proposées consistent en quelques nouveaux projets concernant le Kairouan, des nouveaux projets concernant le système d'adduction Nord pour équilibrer le bilan, et d'installer des compteurs spécifiques à l'entrée et à la sortie de chaque groupe de motopompe et de changement de quelques équipements pour des autres.

**Mots clés :** Réseau d'adduction, eau potable, rendement, énergie, modélisation.