

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة
Année : 2019



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electronique

Thèse

Présentée En Vue de L'obtention du Diplôme De Doctorat 3^{ème} Cycle

Thème

**Contribution à l'étude de la sûreté de fonctionnement
d'un système d'alimentation en eau potable**

Option : Automatique

Présentée par : BOUMELITA Djamila

DEVANT LE JURY

DIRECTEUR DE THESE	: DEBBACHE Nasr Eddine	Pr	Université Annaba
CO-DIRECTEUR DE THESE	: OUERDACHI Lahbassi	Pr	Université Annaba
PRESIDENT	: ABBASSI Hadj Ahmed	Pr	Université Annaba
EXAMINATEURS	: LAKEL Rabah	Pr	Université Annaba
	: SOUFI Youcef	MCA	Université Tébessa

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Allah tout puissant pour le courage, la patience et la volonté qu'il m'a donnée pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur le Professeur **DEBBACHE Nasr Eddine**, pour avoir dirigé ce travail. Je le remercie pour ses précieux conseils et ses commentaires qui m'ont permis de surmonter mes difficultés et de progresser dans mes études. Qu'il soit remercié pour ses qualités humaines et scientifiques, et ses conseils judicieux sur différents points relatifs à mon projet de thèse. J'ai été honoré de travailler avec lui.

Je remercie mon Co-directeur de thèse Monsieur le Professeur **OUERDACHI Lhbassi**, qui a accepté d'encadrer cette thèse et qui m'a témoigné son soutien et sa confiance. Il a su me faire bénéficier de son expérience et de sa compétence. Je le remercie pour la confiance et la qualité de son encadrement.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur **ABBASSI Hadj Ahmed**, Professeur à l'université d'Annaba, d'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur **LAKEL Rabah**, Professeur à l'université d'Annaba d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse et d'être membre de mon jury de soutenance.

Je tiens à remercier aussi, Monsieur **SOUFI Youcef**, Maître de Conférences à l'université de Tebessa, de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail et d'être membre de jury de ma thèse de doctorat.

ملخص

ملخص: لا تزال الحاجة المستمرة الى موارد مياه الشرب تتزايد من سنة الى أخرى. من أجل ضمان توافر لها بشكل أفضل لمختلف المستخدمين، قمنا بإجراء دراسة حول فعالية سلامة شبكة إمدادات مياه الشرب. و لهذا قمنا بإجراء دراسة حالة على شبكة تزويد مياه الشرب لمدينة الحجار التي تقع شرق ولاية عنابة (شمال - شرق الجزائر). بدءا من نمذجة الموقع، اقترحنا حساب مؤشر درجة الخطورة الهيدروليكي من أجل ترتيب لأنابيب الشبكة وفقا لأهميتها. بمجرد حساب هذه المؤشرات، يتم تطبيق مخطط الموثوقية. الهدف من هذا المخطط هو دراسة وتحليل الشبكة الحالية من أجل قياس المشاكل المتعلقة بتوافر المياه ومحاولة تقديم حلول قابلة للتطبيق. قد يكون من الضروري اتخاذ إجراءات بشأن الجوانب الهيكلية والمادية من أجل ضمان توافر المياه على نحو أفضل وجعل النظام أكثر موثوقية. كما تم اقتراح النمذجة المكانية لتكون قادرة على متابعة النقاط المختلفة للشبكة بشكل وثيق حيث قد تظهر المشاكل.

الكلمات المفتاحية: سلامة التشغيل، النظام الهيدروليكي، مؤشر درجة الخطورة الهيدروليكي، مخطط كتلة الموثوقية، الاستيفاء المكاني.

Résumé

Résumé : Le besoin permanent en ressource d'eau potable ne cesse d'augmenter d'année en année. Dans le but d'assurer une meilleure disponibilité de cette ressource hydrique aux différents usagers, nous avons entrepris une étude de sûreté de fonctionnement d'un réseau d'alimentation en eau potable. Une étude de cas a été faite sur le réseau d'alimentation en eau potable de la ville El Hadjar qui est située à l'Est de la wilaya d'Annaba (Nord - Est d'Algérie). Partant d'une modélisation du site, on propose un calcul d'un indice de criticité hydraulique afin d'hiérarchiser les conduites selon leurs importance dans le réseau. Une fois les indices calculés, une modélisation par bloc diagramme de fiabilité est appliquée. L'objectif est d'étudier et d'analyser le réseau existant afin de mesurer les problèmes liés à la disponibilité de l'eau et d'essayer d'apporter des solutions viables. Une action sur l'aspect structurel et matériel peut être nécessaire afin de garantir une meilleure disponibilité d'eau et rendre le système plus fiable. Une modélisation spatiale est aussi proposée pour pouvoir suivre de près les différents points du réseau où les problèmes risquent d'apparaître.

Mots clés : *Sûreté de fonctionnement, Système hydraulique, Indice de criticité hydraulique, Bloc diagramme de fiabilité, Interpolation spatiale.*

Abstract

Abstract : The permanent need for drinking water resources continues to grow year by year. In the order to ensure better availability of this water resource to the different users, we undertook a dependability study of system for the drinking water supply network. A real case study was done on the drinking water supply network of the city El Hadjar which is located east of the region of Annaba (North - East of Algeria). Starting from the site modeling, this proposes a calculation of a hydraulic criticality index in order to prioritize their importance as pipes in the network. Once the indices are calculated, a modelling procedure of reliability block diagram is applied. The objective is to study and analyze the existing network to measure the water availability problems and try to provide viable solutions. An action on the structural aspect and hardware may be required in order to ensure better availability of water and make the system more reliable. Spatial modelling is also proposed to be able to monitor different parts of the network where problems may occur.

Keywords : *dependability, Hydraulic system, Hydraulic Criticality Index, Reliability block diagram, Spatial interpolation.*

Tables des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Système d'alimentation en eau potable - Problématique et contexte	
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation du réseau d'alimentation en eau potable	4
1.2.1 Etape ressource	5
1.2.2 Etape d'adduction	5
1.2.3 L'étape de traitement	5
1.2.4 L'étape de stockage	6
1.2.5 Structure du réseau	6
1.2.6 Structure du réseau de distribution	7
1.3 Modélisation des réseaux d'AEP	7
1.3.1 Intérêts de la modélisation des réseaux d'AEP	8
1.3.1.1 Du point de vue hydraulique	8
1.3.1.2 Du point de vue économique	8
1.3.1.3 Du point de vue sécurité	9
1.4 Problématique de l'indisponibilité de l'eau	9
1.4.1 Problèmes rencontrés dans un réseau d'AEP	9
1.4.2 Dysfonctionnement des réseaux d'eau	10
1.4.3 Vieillesse d'une conduite d'eau potable	10
1.4.4 La problématique des fuites	11
1.5 Fiabilité du système d'alimentation en eau potable	11
1.5.1 Fiabilité : définitions et concepts	12
1.5.2 Fiabilité du système de distribution	12
1.5.2.1 Fiabilité topologique	13
1.5.2.2 Fiabilité hydraulique	13
1.5.3 Les approches de la fiabilité hydraulique.....	13

1.5.3.1 Les méthodes de simulation	13
1.5.3.2 Les méthodes analytiques	14
1.5.4 Propositions de mesure de la fiabilité hydraulique.....	14
1.6 Ressource hydrique en Algérie	15
1.6.1 Problème de gestion des réseaux d’AEP en Algérie	16
1.7 Conclusion	16
Chapitre 2 : La Sûreté de Fonctionnement - analyses et concepts	
2.1 Introduction	18
2.2 Historique de la sûreté de fonctionnement	18
2.3 Quelques notions	19
2.3.1 La sûreté de fonctionnement	19
2.3.2 Fiabilité	20
2.3.3 Maintenabilité	21
2.3.4 Disponibilité	22
2.3.5 Sécurité	22
2.3.6 Défaillance	22
2.3.7 Reconfiguration	23
2.4 Les temps caractéristiques pour la Sûreté de Fonctionnement	23
2.5 Enjeu de la sûreté de fonctionnement.....	24
2.6 Quelques approches d’analyse	25
2.6.1 L’Analyse Fonctionnelle (AF)	25
2.6.2 L'Analyse préliminaire des risques	26
2.6.3 L’Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)	26
2.6.4 L’Arbre de Défaillance (AdD)	27
2.6.5 Le Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF)	28
2.6.6 Réseau de Pétri (RdP)	29
2.7 Les études de sûreté de fonctionnement	30
2.7.1 Étape par étape	31
2.7.2 Études périphériques	32
2.7.3 En pratique	32
2.8 La normalisation	33
2.8.1 ARP-4754	33

2.8.2 ARP-4761	33
2.8.3 CEI-61508 et ses dérivées	33
2.9 Conclusion	35
Chapitre 3 : Modèle du réseau d'AEP de la ville El Hadjar	
3.1 Introduction	36
3.2 Localisation du cas d'étude	36
3.2.1 Topographie de la commune d'El Hadjar	37
3.2.2 Situation climatique	37
3.3 Analyse démographique et socio-économique	37
3.4 Méthode d'évaluation démographique	38
3.4.1 La méthode graphique	38
3.4.2 La méthode comparative	38
3.4.3 Accroissement exponentiel	38
3.5 Présentation du réseau d'alimentation en eau potable d'El Hadjar	39
3.5.1 Situation hydraulique	39
3.5.2 Réservoir	40
3.5.3 Les pompes	41
3.6 Estimation des besoins	43
3.6.1 Les types des besoins	43
3.6.2 Les facteurs affectant la consommation	44
3.7 Evaluation des besoins unitaires actuels par catégorie de consommation	44
3.7.1 Besoins domestiques	44
3.7.2 Besoins industriels	45
3.7.3 Besoins collectifs	45
3.7.4 Besoins touristiques	46
3.8 Evaluation des besoins globaux	46
3.9 Estimation de la consommation en eau	47
3.9.1 La consommation domestique	47
3.9.1.1 Débit moyen journalier	47
3.9.1.2 Débit maximal journalier	48
3.9.1.3 Débit moyen horaire	49
3.9.1.4 Débit maximal horaire	49
3.9.1.5 Besoin global de la commune d'El Hadjar	50

3.9.1.6	La consommation avec le coefficient de variation horaire	51
3.9.1.7	Variation des débits horaires de la ville d'El Hadjar	51
3.10	Modélisation du réseau d'AEP de la ville El Hadjar	53
3.10.1	Présentation générale de la modélisation	54
3.10.2	La base de données	54
3.10.3	Les principales étapes de la modélisation	54
3.10.4	Présentation du logiciel de modélisation utilisé	55
3.10.4.1	Données physiques	56
3.10.4.2	Données à saisir	56
3.10.4.3	Profils de consommation	56
3.10.5	Simulation hydraulique	58
3.10.6	Résultats de la simulation	58
3.10.6.1	Le premier réseau (sans le nouveau château d'eau)	58
3.10.6.2	Le deuxième réseau (avec le nouveau château d'eau)	61
3.10.6.3	Analyse des résultats	63
3.11	Conclusion	64
 Chapitre 4 : Amélioration de la fiabilité et la disponibilité du réseau d'AEP		
4.1	Introduction	65
4.2	Matériels et méthodes	65
4.2.1	Modélisation hydraulique du cas d'étude	65
4.2.2	Calcul d'indice de criticité hydraulique	67
4.2.3	Présentation de l'outil FIAB	69
4.2.4	Fonctionnement de l'outil FIAB	70
4.2.4.1	L'interface graphique	70
4.2.4.2	Les fonctionnalités de l'outil FIAB	71
4.2.4.3	Propriétés du fichier	72
4.2.4.4	Définition des paramètres d'entrée	72
4.2.4.5	Calcul des indices de fiabilité	73
4.2.4.6	ICH du réseau actuel et futur	76
4.3	Modélisation par bloc diagramme de fiabilité	78
4.4	Modélisation spatiale	85
4.4.1	Méthode de pondération d'inverse des distances	85
4.4.2	Méthode Krigeage ordinaire	86

4.4.3 Validation croisée	86
4.5 ICH global	87
4.6 Conclusion	88
Conclusion générale	90
Bibliographie	92
Annexes	
Annexe A : Sectorisation du réseau d'AEP d'El Hadjar	
A.1 Sectorisation du réseau d'AEP d'El Hadjar	98
A.1.1 Le secteur HADJ 1 (El Hadjar 1)	99
A.1.1.1 Step 1	99
A.1.1.2 Caractéristique géométrique du secteur	99
A.1.2 Le secteur HADJ 2 (El Hadjar 2)	99
A.1.2.1 Step 1	99
A.1.2.2 Caractéristique géométrique du secteur	100
A.1.3 Le secteur HADJ 3 (El hadjar 3)	100
A.1.3.1 Step 1	100
A.1.3.2 Step 2	100
A.1.3.3 Step 3	100
A.1.3.4 Step 4	100
A.1.3.5 Step 5	101
A.1.3.6 Caractéristique géométrique du secteur	101
A.1.3.7 Liste des vannes de STEP	103
A.1.4 Secteur 300 Logements	103
A.1.4.1 Step 1	103
A.1.4.2 Caractéristique géométrique du secteur	103
A.1.5 Secteur Attoui	104
A.1.5.1 Step 1	104
A.1.5.2 Caractéristique géométrique du secteur	104
A.1.5.3 Liste des vannes du secteur	104
A.1.6 Type de matériel	105
Annexe B : Modélisation du réseau d'AEP par GRIF	
B.1 Les étapes de la modélisation par GRIF	107
B.1.1 Fenêtre principale du module Bloc diagramme de fiabilité	107

B.1.1.1 Barre d'outils verticale	108
B.1.2 Création d'un diagramme de fiabilité	109
B.1.2.1 Saisie du diagramme	109
B.2 Bloc diagramme de fiabilité de notre cas d'étude	111
B.2.1 Calcul de la fiabilité du système	111
B.2.2 Résultat de la simulation pour la fiabilité	113
B.2.3 Le calcul de la disponibilité du système	114
B.2.4 Résultat de la simulation pour la disponibilité	114
Annexe C : Résultats de la simulation par Epanet	
C.1 Propriétés des conduites	115
C.2 Propriétés des nœuds	117
C.3 Répartition des vitesses	119
C.4 Répartition des pressions	121
C.5 ICH dans l'état actuel, futur et avec redondance	123

Tables des figures

Figure 1.1 Système d'alimentation en eau potable	5
Figure 1.2 Schéma général d'un réseau de distribution	7
Figure 1.3 Vieillissement des canalisations	10
Figure 2.1 La sûreté de fonctionnement	20
Figure 2.2 Différentes formes de la fiabilité	21
Figure 2.3 Quelques indicateurs de la sûreté de fonctionnement	24
Figure 2.4 Méthodes d'analyse de la SdF	25
Figure 2.5 Les études de sûreté de fonctionnement	31
Figure 2.6 Analyse de la sûreté de fonctionnement	32
Figure 2.7 Norme CEI-61508 et ses dérivées	34
Figure 3.1 Emplacement de la zone d'étude	37
Figure 3.2 Evolution de la population au fil des années	39
Figure 3.3 Le réservoir surélevé d'El Hadjar	41
Figure 3.4 Courbes caractéristiques du GEP d'El Hadjar	42
Figure 3.5 Courbe caractéristique de la pompe du secteur 300 logements et Attoui	42
Figure 3.6 Diagramme de la variation de la consommation horaire	52
Figure 3.7 Profils de consommation	57
Figure 3.8 Le modèle du réseau étudié	57
Figure 3.9 Réseau de distribution sans le nouveau château d'eau	59
Figure 3.10 Répartition des vitesses dans les conduites sans le nouveau château d'eau	60
Figure 3.11 Répartition des pressions aux nœuds sans le nouveau château d'eau	60
Figure 3.12 Schéma du système d'adduction d'El Hadjar	61
Figure 3.13 Répartition des vitesses dans les conduites avec le nouveau château d'eau	62
Figure 3.14 Répartition des pressions aux nœuds avec le nouveau château d'eau	62
Figure 3.15 Récapitulatif comparatif des vitesses dans les conduites	63
Figure 3.16 Récapitulatif comparatif des pressions aux nœuds	63
Figure 4.1 La modélisation hydraulique du réseau étudié	66
Figure 4.2 Calcul d'ICH	69

Figure 4.3 Interface graphique de l’outil FIAB	71
Figure 4.4 Choix heure de calcul des paramètres aux conduites	74
Figure 4.5 Affichage paramètres instantanés aux conduites	74
Figure 4.6 Evolution indices d'une conduite spécifique	75
Figure 4.7 Les valeurs d’ICH de quelques conduites du réseau actuel et futur	77
Figure 4.8 Les valeurs d’ICH de quelques conduites du réseau avec population actuelle, future et avec redondance	78
Figure 4.9 Bloc Diagramme de Fiabilité du réseau sans redondance	80
Figure 4.10 Bloc Diagramme de Fiabilité du réseau avec redondance	81
Figure 4.11 Fiabilité du système.....	84
Figure 4.12 Disponibilité du système.....	84
Figure 4.13 ICH dans l'état actuel	87
Figure 4.14 ICH dans l'état futur	88
Figure 4.15 ICH en état avec redondance.....	88
Figure A.1 Sectorisation du réseau de distribution d'eau de la ville d’El Hadjar	98
Figure A.2 Schéma du réseau de distribution d’eau de la cité 300 logements.....	103
Figure A.3 Vue du secteur El Hadjar	106
Figure B.1 Fenêtre principale du module Bloc diagramme de fiabilité	108
Figure B.2 Les connecteurs sur GRIF	111
Figure B.3 Diagramme de fiabilité de notre cas d'étude sur GRIF	111
Figure B.4 Fenêtre des calculs	112
Figure B.5 Calcul de la fiabilité du système	113
Figure B.6 Courbe de fiabilité du système	113
Figure B.7 Calcul de la disponibilité du système	114
Figure B.8 Courbe de disponibilité du système	114

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Symboles des événements	28
Tableau 2.2 Symboles et signification	28
Tableau 3.1 Estimation de la population pour différents horizon d'El Hadjar.....	39
Tableau 3.2 Les différents réservoirs avec leurs caractéristiques	41
Tableau 3.3 Les caractéristiques des pompes	42
Tableau 3.4 Consommation moyenne journalière	47
Tableau 3.5 Consommation journalière après majoration	48
Tableau 3.6 Débit maximal journalier	49
Tableau 3.7 Débit moyen horaire	49
Tableau 3.8 Les différentes valeurs de β_{max} en fonction de nombre de population	50
Tableau 3.9 Débit moyen horaire	50
Tableau 3.10 Tableau récapitulatif des besoins	50
Tableau 3.11 Coefficient de variation horaire en fonction des horaires du jour	51
Tableau 3.12 Variation des débits horaires de consommation de la ville d'El Hadjar	52
Tableau 3.13 Variation journalière de niveau d'eau dans le réservoir principal	53
Tableau 4.1 Évolution des indices aux conduites sur la durée du MTTR	73
Tableau 4.2 ICH et IDN des conduites	76
Tableau 4.3 ICH des conduites du réseau actuel et futur	77
Tableau 4.4 Fiabilité et disponibilité du système (sans et avec redondance).....	82
Tableau 4.5 Comparaison entre IDW et Krigeage	87
Tableau A.1 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 1 Step1	99
Tableau A.2 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 2 Step 1	100
Tableau A.3 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step 1	101
Tableau A.4 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step2	101
Tableau A.5 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step3	102
Tableau A.6 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step4	102
Tableau A.7 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step 5	102
Tableau A.8 Liste des vannes de STEP	103

Tableau A.9 Caractéristique géométrique du secteur de la cité 300 logements	104
Tableau A.10 Caractéristique géométrique du secteur de la cité Attoui	104
Tableau A.11 Liste des vannes du secteur	105
Tableau A.12 Type de matériel	105
Tableau B.1 Barre d'outils verticale	109
Tableau C.1 Les paramètres des conduites	115
Tableau C.2 Les paramètres des nœuds	117
Tableau C.3 Répartition des vitesses dans les conduites sans et avec le nouveau château d'eau ...	119
Tableau C.4 Répartition des pressions dans les conduites sans et avec le nouveau château d'eau..	121
Tableau C.5 ICH des conduites du réseau actuel, futur et avec redondance	123

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Un réseau d’Alimentation en Eau Potable (AEP) est composé d’un ensemble d’étapes successives allant de la source jusqu’à l’eau du robinet. Le défaut de répondre aux besoins en eau potable pour les abonnés est un problème aigu.

Malgré la disponibilité hydrologique, l’Algérie souffre de l’indisponibilité de l’eau potable à cause de la forte demande qui se traduit par l’augmentation du niveau du confort de la population et la croissance démographique. La projection des réseaux d’AEP, l’application des méthodes inadéquates et la plupart du temps les études effectuées localement et non globalement, conduisent à un dysfonctionnement de l’ensemble. Plusieurs facteurs peuvent être la cause à ce dysfonctionnement parmi lesquelles nous citons l’agrandissement de la zone urbaine avec le maintien de la même infrastructure des conduites, bâches à eau et accessoires des pressions.

Nous nous sommes proposé d’étudier une méthodologie à appliquer dans le cas de déficience d’un réseau d’AEP. Nous avons entrepris une application sur un cas réel dont nous disposons des données suffisantes : cas de la ville d’El Hadjar. Le réseau d’AEP de la ville El Hadjar est très complexe. Pour l’analyse de ce problème, nous essayons de l’aborder avec un cas d’étude assez simple mais représentative du mode de fonctionnement de l’ensemble du réseau. La zone d’étude en question concerne l’alimentation en eau potable du secteur 300 logements, cité attenante de la ville d’El Hadjar.

Le calcul des Indices de Criticité Hydraulique (ICH) et des Indices de Déficience aux Nœuds (IDN) de chaque conduite du site sont fondamentaux pour mesurer l’impact d’une indisponibilité d’une conduite donnée sur le fonctionnement globale du réseau. De ce fait, un modèle hydraulique du site a été créé à l’aide d’outil Epanet (version 2), qui permet la

simulation du comportement hydraulique du réseau et d'effectuer toutes les mesures de débit et de pression envisagées, quelque soit l'heure à laquelle nous nous positionnons.

Les méthodes classiques de la sûreté de fonctionnement (SdF) prennent vite leurs limites face à la complexité des systèmes. Les méthodes combinatoires (arbres de défaillance, arbres d'événements, diagrammes de fiabilité) permettent exclusivement de retrouver et d'apprécier les combinaisons des événements conduisant à l'occurrence d'une défaillance.

Selon les méthodes de la SdF, notre choix s'est orienté vers la modélisation par bloc diagramme de fiabilité car cette méthode est très largement utilisée dans ce domaine. Elle permet de modéliser les différents composants du système d'AEP auquel on s'intéresse afin de calculer leurs fiabilités et disponibilités. Partons de cette modélisation, nous nous proposons alors d'apporter des améliorations structurelles et matérielles pour assurer une meilleure disponibilité d'eau et rendre le système plus fiable.

Pour prédire les valeurs inconnues pour n'importe quel type de données géographiques, une interpolation spatiale est utilisée. Des mesures d'ICH ont été effectuées à l'aide de Système d'Information Géographique (SIG) afin de modéliser une cartographie, qui donne la possibilité de suivre de près les différents points où les problèmes risquent d'apparaître. L'objectif de la modélisation spatiale est donc de localiser les zones qui posent des problèmes tels que : une forte pression, une baisse de pression, une faible vitesse d'écoulement et l'ICH à forte valeurs; ce qui est traité dans le cadre de cette thèse.

Aussi, le travail de cette thèse est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre aborde en premier lieu la problématique des réseaux d'alimentation en eau potable en termes de configuration matérielles. Il s'étale ensuite sur le modèle du réseau et les problèmes liés à l'indisponibilité de l'eau chez les abonnés ainsi que l'évaluation de la fiabilité hydraulique du système d'AEP. Il est fait état des différents problèmes liés au non satisfaction des consommateurs.

Le deuxième chapitre traite l'état de l'art de la sûreté de fonctionnement ainsi que les différentes notions et méthodes, afin de traiter l'aspect de sûreté de fonctionnement des systèmes d'AEP. Dans un premier temps, nous avons présenté les différents éléments de la SdF tels que : la fiabilité avec ses différentes formes, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité, ainsi que les indicateurs définissant les différents temps de la SdF. Dans un

deuxième temps, nous avons présenté un cadre générique sur les principales méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement.

Le troisième chapitre s'attache à la mise en place d'un modèle du réseau d'AEP. Pour la zone d'étude concernée, en passant en revue les différentes étapes nécessaire à une modélisation. Pour ce faire, une analyse de l'architecture du réseau est défini, ainsi que l'ensemble des composants, de leurs natures et de leurs fonctionnalité : les réservoirs, les stations de pompage et leurs équipements, les conduites, etc ... Le modèle est conforté par des données précises et réelles du réseau à savoir les conduites, longueurs, diamètres, les nœuds, les pompes ainsi que le besoin actuel et prévisionnel en eau potable. Des résultats de simulation de ce réseau avec les paramètres hydrauliques sont présentés, discutés et analysés.

Le quatrième chapitre propose une étude méthodologique à appliquer dans le cas de déficience du réseau concerné. Une analyse quantitative pour l'étude de la sûreté de fonctionnement est proposée. Après une modélisation hydraulique du réseau concerné sous l'outil "Epanet", on calcule l'indice de criticité hydraulique ainsi que l'indice de déficience aux nœuds de chaque conduite du réseau pour mesurer l'impact de l'indisponibilité d'une conduite donnée sur le fonctionnement du réseau. Pour ce faire, il est proposé d'améliorer les indices de criticité par de nouvelles dispositions structurelles et matérielles en cas de carence d'un réseau. Grâce à l'interpolation spatiale, il devient possible de localiser des zones qui posent problèmes.

Une conclusion générale montrant les différents résultats proposés par ce travail clôture la rédaction de cette thèse.

CHAPITRE 1
SYSTEME D'ALIMENTATION EN EAU
POTABLE :
PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE

Chapitre 1

Système d'alimentation en eau potable : Problématique et contexte

1.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter les définitions nécessaires que l'on rencontrera au cours de cette étude, telles que la notion du réseau d'alimentation en eau potable, la modélisation, la problématique liée à l'indisponibilité de l'eau aux abonnés et l'évaluation de la fiabilité hydraulique du système d'alimentation en eau potable.

Il donnera en conséquence les différentes problématiques liées à la-non satisfaction en eau en quantité suffisante.

1.2 Présentation du réseau d'alimentation en eau potable

Le réseau d'alimentation en eau potable est un assemblage de conduites et d'organes sous pression, dont la mission est la desserte des utilisateurs. La satisfaction des abonnés est mesurée par la qualité et la quantité de l'eau acheminée. Les différentes étapes d'un système d'AEP sont décrites sur le schéma de la figure 1.1 :

- **Le Captage** : Il permet de recueillir les eaux souterraines ou de surfaces de la source.
- **L'adduction** : elle permet de transférer l'eau de la zone de captage jusqu'à la zone de traitement, selon deux types d'adduction : gravitaire ou par refoulement.
- **Le traitement** : permet de transformer l'eau brute en eau potable.

- **Le stockage** : Une fois traitée, l'eau est stockée dans des réservoirs de deux types : les bâches au sol ou semi-enterrées et les réservoirs sur tour, appelés également château d'eau. Le choix dépend de la localisation du réservoir.
- **La distribution** : le transport de l'eau potable aux consommateurs se fait grâce au réseau de distribution qui peut être un réseau maillé, ramifié, étagé, combiné ou réseau à alimentation distincte.

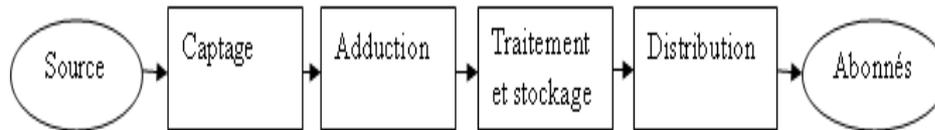


Figure 1 .1 Système d'alimentation en eau potable.

1.2.1 Etape ressource

La source qui peut éventuellement être un forage équipé d'un système de pompage (cas le plus fréquent), un cours d'eau naturel ou un plan d'eau. La prise d'eau se fait habituellement par un captage d'eau de surface (rivière, lac, barrage, etc.). En l'absence d'une telle source, ou lorsque l'eau de surface est trop polluée, on procède au captage d'eau souterraine (forage, puits, galeries, sources, ...).

1.2.2 Etape d'adduction

Il existe deux types d'adduction :

- **L'adduction gravitaire**, où l'écoulement de l'eau à des pressions importantes est causé par la différence des niveaux hydrauliques : l'altitude de la source est supérieure à l'altitude du point de consommation, et se déplace donc grâce à la force de gravitation d'où son nom. C'est le principe du château d'eau ;
- **L'adduction par refoulement** où la pression sur le réseau et l'acheminement de l'eau se fait à l'aide de pompes à l'intérieur de stations de pompage.

1.2.3 L'étape de traitement

Le traitement de l'eau brute se passe généralement en trois étapes :

- La clarification : il s'agit de débarrasser l'eau des particules colloïdales en utilisant un massif filtrant.
- La stérilisation : son objectif est de rendre l'eau bactériologiquement pure. Pour ceci, on utilise des oxydants tel que le chlore.

- L'affinage : permet d'éliminer les micropolluants (corps dissous).

1.2.4 L'étape de stockage

Le réservoir de stockage est un bassin qui se remplit au cours des faibles consommations et qui se vide pendant les périodes de fortes consommations journalières [3]. Le réservoir présente deux utilités (technique et économique) par les multiples fonctions qu'il remplit :

- Fonctions techniques :
 - La régulation du débit pour tous les ouvrages qui se situent en amont et en aval.
 - La régulation de la pression dans le réseau de distribution.
 - L'assurance de la continuité de l'approvisionnement en cas de panne dans les ouvrages situés dans la partie amont.
 - La participation au traitement (utilisation de réactifs).
- Fonctions économiques :
 - La réduction des investissements sur tous les autres ouvrages du réseau d'AEP.
 - La réduction des coûts de l'énergie.

La capacité d'un réservoir dépend du mode d'exploitation des ouvrages de la partie amont et de la variabilité de la demande. Pour l'emplacement d'un réservoir, selon que l'agglomération est située en plaine ou en terrain accidenté, il peut être soit enterré, soit semi-enterré, soit surélevé [2].

1.2.5 Structure du réseau

La structure du réseau dépend de la configuration de l'agglomération. Deux géométries de réseau sont possibles : réseau ramifié ou réseau maillé, selon le schéma de la figure 1.2.

- Le réseau ramifié : il est appelé ainsi car il possède topologiquement une structure d'arbre. Pour ce type de réseau, à partir d'une conduite centrale, on met en relation plusieurs canalisations secondaires jusqu'à chaque compteur individuel. Un tel système présente un grave défaut ; dans une conduite donnée, l'eau circule toujours dans le même sens. Donc, une panne dans la conduite entraîne la perte de service pour tous les usagers situés en aval [7].
- Le réseau maillé : ce type de réseau est constitué de boucles. Le sens de l'écoulement varie fréquemment selon la demande de certaines conduites. En effet, le nombre d'abonnés non desservis en cas de panne ou de réparation est réduit au maximum

puisque l'eau peut atteindre un même point par plusieurs chemins. L'autre intérêt est que la vitesse d'écoulement de l'eau est rarement nulle, ce qui offre l'avantage de maintenir la bonne qualité de l'eau distribuée [9].

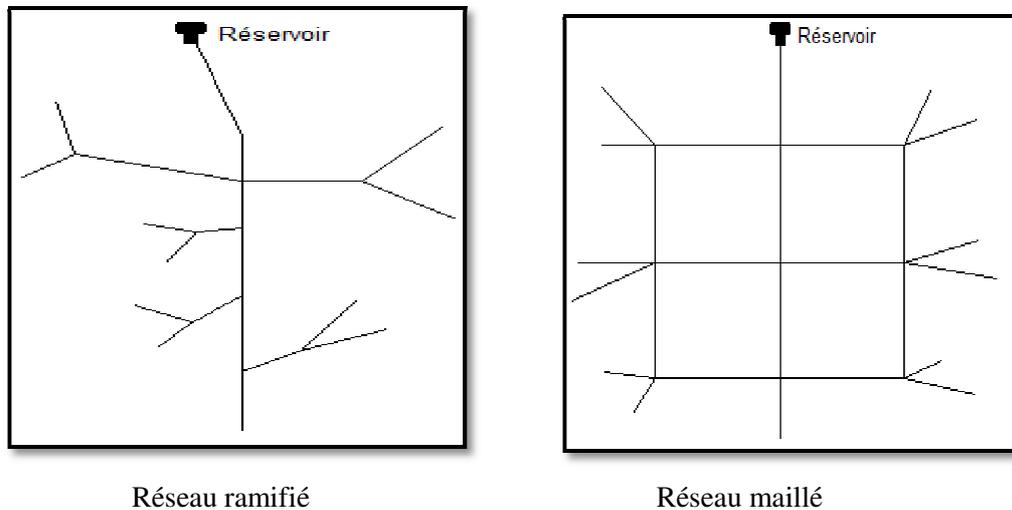


Figure 1.2 Schéma général d'un réseau de distribution.

1.2.6 Structure du réseau de distribution

La structure du réseau de distribution d'eau dépend de la localisation des abonnés, de leur importance et du niveau de demande à assurer. La structure traduit les dimensions des conduites, la capacité des réservoirs, le nombre de pompes et la puissance fournie. Elle tient compte d'éléments géographiques tels que : la dispersion des abonnés, la présence d'obstacles naturels, la présence de routes, chemin de fer, jardins, d'autres réseaux enterrés. Tous ces éléments vont permettre au service de l'eau de définir des caractéristiques propres à chaque composant du réseau afin d'assurer son bon fonctionnement [1] [7].

1.8.3 Modélisation des réseaux d'AEP

La modélisation est une représentation logique et mathématique du comportement du système réel dans un contexte donnée et une problématique donnée. Le modèle prend dans la majorité des cas la forme d'une série d'hypothèse concernant le fonctionnement du système et qui sont exprimés à l'aide de relation mathématique, logique ou symbolique entre les entités [2]. Ces modèles sont dits analytiques.

Lorsque le système est assez complexe à modéliser de manière analytique, les praticiens utilisent un modèle descriptif qui détaille les différents évènements et actions décrivant son comportement. [3]

Lorsqu'elle est menée dans de bonnes conditions, la modélisation permet :

- Dans le cadre d'une étude diagnostique, de connaître le fonctionnement hydraulique du réseau en situation actuelle et prochaine, afin de déterminer ses points faibles et de planifier les renforcements nécessaires à court terme selon deux points :
 - Du point de vue de l'exploitation, d'étudier les situations critiques liées à l'indisponibilité d'une ressource, d'ouvrages de pompage ou de stockage, ou d'une canalisation maîtresse ou de rechercher les dispositions les mieux adaptées pour parvenir à un contrôle adéquat de la pression de distribution tout en réduisant les coûts d'exploitation.
 - D'autre part, de concevoir, dimensionner et planifier les aménagements rendus nécessaires par l'évolution des consommations ou de la réglementation en matière de sécurité [4].

1.3.1 Intérêts de la modélisation des réseaux d'AEP

La modélisation des données est une étape fondamentale dans la conception des bases de données qui seront utiles pour la gestion du réseau d'eau potable elle permet de traduire le monde réel par toute sa complexité et par des structures de données.

Elle a pour objet d'abstraire la réalité en mettant l'emphase sur les phénomènes d'intérêt et en éliminant ce qui ne concerne pas l'objectif poursuivi, ce qui permet :

1.3.1.1 Du point de vue hydraulique

- Connaître le fonctionnement hydraulique du réseau sur les différents horizons actuels et futurs et aussi d'estimer les besoins en renforcement et en extension du réseau entre les infrastructures [1].
- D'obtenir une vision du fonctionnement du réseau en toute condition au degré de précision désiré.
- De déterminer les défaillances et les points noirs non apparents sur le réseau qui serait la base pour l'établissement des plannings de gestion et de renforcement à court et à long termes [8].

1.3.1.2 Du point de vue économique

Coté exploitation, elle permet d'étudier les situations critiques liées à l'indisponibilité des ressources, d'ouvrages de stockages, de pompes, d'une canalisation maitresse ou de rechercher les dispositions les mieux adaptées pour les coûts d'exploitation [5].

La modélisation constitue alors un outil d'aide à la décision pour l'établissement des programmes de développement durable et des projets de mobilisation à l'échelle sectorielle.

1.3.1.3 Du point de vue sécurité

Un modèle de réseau bien défini et suffisamment renseigné permet d'intervenir plus rapidement et limiter les dégâts qui peuvent être rencontrés en cas d'incendie ou de contamination, car on saura bien situer l'endroit et les causes de l'incident.

Elle permet aussi de classer, d'identifier les zones selon leurs degrés de risque et de planifier les méthodes d'intervention à l'avance.

D'autre part, de concevoir, dimensionner et planifier les aménagements rendus nécessaires par l'évolution des consommations ou de réglementation en matière de sécurité [8].

1.4 Problématique de l'indisponibilité de l'eau

La disponibilité en eau est relative à la quantité d'eau renouvelable et à la pression exercée par le nombre d'habitants. La disponibilité signifie aussi que l'eau est présente :

- Dans le temps (au moment souhaité ou bien au lieu souhaité);
- De qualité acceptable (salubre).

1.4.1 Problèmes rencontrés dans un réseau d'AEP

Plusieurs problèmes de différentes origines peuvent survenir dans un réseau d'AEP; des fuites, les branchements illicites, les erreurs de compteurs, les problèmes environnementaux, pénétration de contaminants, chute de pression, des ruptures ou casses sur les conduites et leurs accessoires, les interruptions. A ces problèmes s'ajoutent des problèmes de gestion du réseau [6]. Ces différents problèmes causent le mécontentement des consommateurs qui réagissent en déposant des plaintes sur les différents services (quantité insuffisante, qualité médiocre, interruption de l'alimentation, etc.) au niveau des services concernés. Les différents problèmes survenant dans un réseau d'alimentation en eau potable peuvent être classés en trois grandes catégories [2] :

- Problèmes induisant les ruptures et les casses.
- Problèmes induisant les fuites.

- Problèmes induisant la dégradation de la qualité de l'eau.

1.4.2 Dysfonctionnement des réseaux d'eau

Le rôle d'un gestionnaire du réseau d'eau potable c'est fournir aux usagers l'eau en quantité suffisante et de meilleure qualité possible. Pour cela, il dispose d'installations visibles en surface ; comme les stations de traitement, les réservoirs ainsi que des réseaux de canalisations qui sont enfouis dans le sol. Ces installations, une fois construites font l'objet de dégradations dues au temps ou à la corrosion et doivent être surveillées, contrôlées et entretenues. Le temps et l'action des différents phénomènes (le sol corrosif, contrainte mécanique, surpression, etc.) contribuent à la dégradation des canalisations d'un réseau et de ces accessoires. Une combinaison de ces phénomènes va accélérer la détérioration des conduites. L'augmentation du nombre des interventions, des casses observées sur le réseau, ainsi qu'une dégradation de la qualité de l'eau transportée représente des indicateurs du vieillissement du réseau [9].

1.4.3 Vieillissement d'une conduite d'eau potable

Le vieillissement d'une conduite correspond à sa dégradation dans le temps. Celle-ci donnant lieu, soit à certains dommages, soit au mauvais fonctionnement hydraulique du réseau [10], selon le schéma de la figure 1.3.



Figure 1.3 Vieillissement des canalisations. [1]

Le mauvais fonctionnement hydraulique du réseau engendré par le vieillissement d'une conduite à travers :

- *La chute de pression* : Une conduite en service aura un diamètre diminué à cause de l'entartrage ou des protubérances dues à la corrosion.

- *Les fuites diffuses* : Dues aux détériorations des joints ou à la corrosion des tuyaux. Une forte augmentation de leur nombre peut avoir une incidence directe sur le réseau et diminuer le rendement.
- *Les ruptures* : Dues à l'action combinées de la corrosion sur la conduite et du mouvement de sol (vibration, séisme, travaux divers). Une rupture peut entraîner une intervention sur le réseau de plusieurs heures, pendant laquelle les abonnés sont éventuellement privés d'eau ou bien subissent une chute de pression.

Chacune de ces détériorations engendre en outre certains dommages qui sont [11] :

- Des pertes d'eau, d'où une augmentation de la production ;
- Des pertes en énergie (augmentation du temps de pompage) ;
- Des interventions sur le réseau.

1.4.4 La problématique des fuites

Les fuites engendrent des pertes qui peuvent être de deux types: [11]

- Les pertes au niveau d'adduction qui surviennent dans le cas où il y a des transferts d'eau très importants, entre la production et la mise en distribution. L'absence de comptage tant à l'amont qu'à l'aval ne permet pas d'évaluer ces pertes.
- Les pertes en distribution qui correspondent à la différence entre le volume d'eau distribué et le volume d'eau consommé.

Elles sont due aux :

- Fuites au niveau des joints,
- Fuites aux différentes prises de branchement,
- Fuites sur branchements ;
- Cassures des conduites ;
- Erreurs de comptage ;
- Eaux piratées (branchements illicites).

1.5 Fiabilité du système d'alimentation en eau potable

L'évaluation de la fiabilité hydraulique du système d'alimentation en eau potable dépend de la défaillance des organes hydrauliques (casses des conduites, arrêt des pompes, fuites dans le réseau), de la diminution de la capacité hydraulique du réseau en raison de la détérioration de

conduites (dépôts sur les parois, augmentation de la rugosité) et de la variation de la demande et son évolution dans temps qui peuvent remettre en cause le dimensionnement du réseau et donc sa performance [12].

Le problème de fiabilité hydraulique d'un système d'alimentation en eau potable se résume au problème général de fiabilité du réseau. Les évènements qui réduisent la fiabilité initiale du réseau d'AEP sont les ruptures de conduites, les défaillances d'organes hydrauliques (tels que les pompes, vannes, clapets...), les obstructions de conduites, les variations des consommations etc [13].

Cependant, les défaillances des conduites sont en général, les évènements à être plus étudiés car ils restent les principaux évènements entrant dans cette réduction de la fiabilité.

1.5.1 Fiabilité : définitions et concepts

Bien que l'intérêt porté sur l'évaluation de la fiabilité d'un réseau croisse de manière sensible, aucune définition ni mesure exacte pour la quantification de cette caractéristique n'ont été universellement acceptées. Nous admettons que la fiabilité d'un réseau d'alimentation en eau potable est sa capacité à remplir les conditions de demandes des usagers. Cette demande étant donnée en termes de : débits à desservir aux nœuds et de niveaux de pressions avec lesquels ces débits doivent être délivrés [13].

La fiabilité d'un réseau d'eau potable peut être examinée sur deux plans selon que la défaillance soit de nature mécanique ou hydraulique :

- 1) La défaillance mécanique est généralement due à une casse sur conduite, à un arrêt brutal d'une pompe, ou à une panne électrique ;
- 2) La défaillance hydraulique concerne quant à elle, la non satisfaction des conditions de débit et de pression aux nœuds de consommation.

1.5.2 Fiabilité du système de distribution

Un système d'AEP se divisant en deux grandes parties dissociables, il est possible de s'intéresser à la fiabilité des deux sous-systèmes (approvisionnement et distribution) ou seulement à celle de l'un des deux. L'approche la plus fréquemment abordée est l'étude de la fiabilité sur systèmes de distribution.

L'évaluation de la fiabilité du système de distribution d'eau, peut être classée en deux catégories : topologique et hydraulique [14].

1.5.2.1 Fiabilité topologique

La fiabilité topologique fait référence à la probabilité que les composantes hydrauliques du réseau soient opérationnelles sur toute la durée de fonctionnement du réseau [13]. L'évaluation de la fiabilité du réseau définit par deux notions : la première est l'atteignabilité qui traduit la probabilité qu'un nœud donné soit connecté à un minimum de nœuds sources et la deuxième est la connectivité qui traduit la probabilité que l'ensemble des nœuds soient connectés à un nœud source au minimum [15] [16].

1.5.2.2 Fiabilité hydraulique

La fiabilité hydraulique est la probabilité qu'un système de distribution puisse satisfaire la demande des consommateurs en quantité et à pression suffisantes à tout moment de la journée [13]. Afin d'accroître la fiabilité, il est nécessaire d'assurer une pression suffisante dans le réseau supérieure à la pression minimale nécessaire à la desserte des abonnés. L'étude de la fiabilité hydraulique se traduit par la mesure de l'indice de criticité hydraulique "ICH" qui traduit l'importance d'une conduite donnée du réseau dans la desserte en eau.

1.5.3 Les approches de la fiabilité hydraulique

Bien qu'il existe plusieurs approches utilisant le concept de fiabilité : nombre total de casses, les fonctions pertes économiques et redondance forcée du réseau par ajout de conduites au réseau, il n'existe aucune définition ni mesure de la fiabilité qui ait été universellement acceptée. Néanmoins, les approches d'évaluation de la fiabilité hydraulique du réseau peuvent être regroupées dans deux catégories différentes. Wagner [15], [16] et Hobbs [18], [19] définissent la fiabilité hydraulique par : les approches par les méthodes de simulation et les approches par les méthodes analytiques.

1.5.3.1 Les méthodes de simulation

La détermination de la fiabilité par des modèles de simulation est généralement effectuée au cas par cas ou sur la base de scénarii. Les scénarii correspondant aux défaillances des composantes ainsi que les effets de ces défaillances sont alors analysés [13]. Dans ce type d'approches, il est nécessaire de générer des séries temporelles, de modéliser et de simuler la performance hydraulique du réseau pour chaque scénarii sur ces séries.

Le réseau est ensuite modélisé pour chaque configuration correspondant à une défaillance, une simulation est alors lancée afin de déterminer les débits et pressions obtenues dans le réseau suite à un cas particulier de défaillance.

Dans l'évaluation de la fiabilité, l'aspect défaillance d'une composante du réseau peut être manipulé à travers des modifications dans la configuration initiale du réseau, la défaillance sur une conduite est traduite par son élimination ainsi que celle des conduites avoisinantes isolées selon la configuration des vannes [17].

1.5.3.2 Les méthodes analytiques

Ce sont des méthodes déterministes qui permettent, à partir d'un certain nombre d'équations, de déterminer de manière unique la fiabilité du système étudié. Dans l'étude de Wagner, [15], les auteurs utilisent cette méthode et définissent deux indices particuliers d'atteignabilité et de connectivité, où l'atteignabilité est la probabilité qu'un nœud spécifique de demande soit connecté à un minimum d'un nœud source et la connectivité est la probabilité que chaque nœud de demande soit connecté à un nœud source. D'autre part, l'avantage que présente l'approche analytique est qu'elle considère le réseau dans sa totalité; elle ne permet cependant pas une interprétation simpliste des mesures de fiabilité.

1.5.4 Propositions de mesure de la fiabilité hydraulique

Les mesures de la fiabilité hydraulique peuvent changer selon la méthode de simulation. Wagner et al. [16] ont listé vingt mesures différentes de la fiabilité obtenues suite à différentes simulations.

a) Pour les conduites

- le taux de casses,
- le pourcentage de la durée de casse de chaque pompe,
- le pourcentage de la durée de défaillance de chaque conduite,
- le nombre de défaillances sur les pompes,
- la durée totale des défaillances sur chaque pompe.

b) Pour le réseau

- la consommation totale,
- le nombre total de défaillances,
- le nombre maximum de casses par scénario.

c) Pour les nœuds

- la demande totale durant la période de la simulation,
- le déficit (charge, débit),
- la charge moyenne,
- le nombre de services réduits,

- la durée du service réduit,
- le nombre d'évènement de casses,
- la durée de l'évènement casse.

d) Pour les évènements

- le type d'évènement,
- le nombre total d'évènements durant la simulation et l'état du système durant chaque évènement,
- le temps entre eux défaillance ainsi que le temps d'intervention (de réparation).

Ces différentes mesures prouvent encore qu'il n'existe pas de définition précise ou de méthode proposée pour l'évaluation de la fiabilité du réseau de distribution d'eau potable. Les résultats obtenus dépendront forcément du type de mesure de fiabilité que l'on emploie et de la manière dont on l'exploite.

1.6 Ressource hydrique en Algérie

Malgré la disponibilité hydrologique, l'Algérie souffre de l'indisponibilité de l'eau potable à cause de la forte demande en eau qui se traduit par l'augmentation du niveau du confort de la population et la croissance démographique [20].

La problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins des générations actuelles sans hypothéquer, par des effets peu ou non réversible, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs [21].

Il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m³ par an, en réservant 70% à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus 5 milliards de m³ d'eau par an (Conseil National Economique et Social, 2004) [20].

L'eau n'est pas uniquement une matière première renouvelée mais finie et irrégulière; elle n'est pas non plus un don de ciel inépuisable et éternellement pure. Les risques d'appauvrissement des ressources en eau imputables à d'éventuels changements climatiques sont à prendre sérieusement en compte, d'autant que la pression exercée sur ces ressources ne cessera de s'amplifier sous les effets conjugués de la croissance démographique et des politiques appliquées vis-à-vis des activités consommatrices d'eau, notamment l'agriculture, l'industrie et le tourisme.

Le début du 21^{ème} siècle s'annonce donc sous le signe d'une aggravation des pénuries d'eau, particulièrement dans les régions Ouest du pays en dépit du recours à d'autres formes de mobilisation de l'eau envisagée. Les pollutions des eaux et la pression démographique influent négativement sur la disponibilité en eau déjà faible. L'érosion importante qui affecte les plaines septentrionales diminue à la fois le potentiel agricole et les capacités de mobilisation des ressources en eau du pays [22].

Par ailleurs, les pertes totales dans les réseaux d'irrigation sont estimées globalement à 40% des prélèvements; elles dépasseraient 50% dans les villes et fluctuent généralement entre 30% et 70%. Ce phénomène, tellement répandu au point de devenir banal, a fini par donner l'impression qu'il relevait d'une fatalité naturelle [21].

Dés lors, la question qu'il conviendrait légitimement de poser n'est-elle pas de savoir si les actions préconisées sont suffisamment pertinentes car les populations sont exposées aux maladies parce qu'elles sont alimentées en eau par citernes ou parce qu'elles stockent de l'eau. Les volumes d'eau non facturés au niveau des établissements de l'eau atteint 50%. [20]

1.6.1 Problème de gestion des réseaux d'AEP en Algérie

Les problèmes de gestion des réseaux algériens sont très divers :

- Méconnaissance des besoins en eau des populations.
- Entretien quasi-nul des canalisations et de leurs accessoires.
- Coupures d'eau fréquentes.
- Fuites non répertoriées.
- Interventions trop lentes sur les fuites.
- Personnel insuffisant et non qualifié.
- Inexistence de pompes de secours au niveau des stations de pompage [20].

1.7 Conclusion

Le but de ce chapitre est d'identifier la problématique liée aux dysfonctionnements d'un réseau d'alimentation en eau potable ainsi que l'évaluation de la fiabilité hydraulique qui dépend de la défaillance des organes hydrauliques, de la diminution de la capacité hydraulique du réseau en raison de la détérioration de conduites, de la variation de la demande et son évolution dans temps qui peuvent remettre en cause le dimensionnement du réseau et donc sa performance.

Aussi, ce chapitre a passé en revue la présentation de la modélisation du réseau d'AEP afin d'obtenir une vision du fonctionnement du réseau qui permet d'étudier les situations critiques et déterminer les défaillances sur le réseau.

CHAPITRE 2
LA SURETE DE FONCTIONNEMENT :
ANALYSES ET CONCEPTS

Chapitre 2

La Sûreté de Fonctionnement : analyses et concepts

2.1 Introduction

La Sûreté de Fonctionnement s'est développée principalement à cause de l'évolution des systèmes critiques industriels et se caractérise par l'analyse des défaillances et de leurs conséquences. Cela passe par une analyse exhaustive du fonctionnement du système ainsi que des exigences que le système doit vérifier.

Au cours de ce chapitre, il est fait état de l'art de la sûreté de fonctionnement ainsi que les différentes notions et méthodes en vue de traiter l'aspect de sûreté de fonctionnement des systèmes d'AEP. Dans un premier temps, différents éléments de la SdF sont présentés tels que la fiabilité avec ses différentes formes, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité ainsi que indicateurs définissant les différents temps de la SdF. Dans un deuxième temps, un cadre générique sur les principales méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement est présenté.

2.2 Historique de la sûreté de fonctionnement

Les problèmes de Sûreté de Fonctionnement existent depuis très longtemps, dès qu'un système a pu défaillir ou tomber en panne [23] [27], [28]. A partir des années 1930, l'analyse intuitive, la durée de vie et les taux de défaillance sont exploités dans plusieurs domaines tels que les systèmes mécaniques, l'électricité, le transport aérien et les grandes catastrophes [26] [25]. Dans les années 1940-1950, la théorie de la fiabilité est née [30]. L'ingénieur s'appuiera sur l'amélioration de la qualité dans le domaine de l'aéronautique et l'électronique militaires,

où les techniques de fiabilité commencèrent à se développer à travers la fiabilité prévisionnelle [23].

Dans les années 1960, le concept de maintenance fait son apparition [31]. H. A. Watson des laboratoires Bell [32] met au point la méthode dite des arbres de défauts qui permet de décrire les aléas du fonctionnement de systèmes complexes [25].

En 1962, l'Académie des Sciences accueille le mot "fiabilité" dans sa terminologie [25]. Ensuite, dans les années 1970-1980, les premiers travaux sur la fiabilité des logiciels [23] [33] commencent et de nombreuses études sont menées dans le domaine du nucléaire.

La décennie 80 voit l'approfondissement dans plusieurs directions :

- collecte de données de fiabilité,
- mise au point de nouvelles méthodes d'analyse de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes (par exemple les réseaux de Pétri),
- méthodes de prise en compte du facteur humain (méthode HCR : "Human Cognitive Response technique", méthode HEART: "Human Error Assessment and Reduction Technique", ...etc).

Par la suite, les techniques de sûreté de fonctionnement vont convenablement se diffuser et se prolonger dans d'autres domaines tels que la chimie, la pétrochimie, le transport ferroviaire, l'automobile, le traitement et l'épuration de l'eau et l'ensemble des grands secteurs industriels [25].

La finalité de tout cet effort est d'aboutir à des systèmes et des équipements sûrs et efficaces pour les fabricants afin de minimiser les temps d'arrêt et assurer une disponibilité maximale de leurs équipements.

2.3 Quelques notions

2.3.1 La sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement (notée SdF) est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données, elle est définie par Villemeur [34] comme la science des défaillances [37].

Au sens de la norme CEI 50 (191) [23] [35], la sûreté de fonctionnement recouvre les concepts de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (ou FMD). L'équivalent Anglo-Saxons est

le terme dependability, (reliability, maintainability, availability) souvent désigné par l'acronyme RAM. La sécurité est souvent traitée à part. Cependant, l'acronyme RAMS (FMDS en français) est utilisé pour désigner l'ensemble des activités liées à ces quatre concepts présenté dans la figure 2.1.



Figure 2.1 La sûreté de fonctionnement.

2.3.2 Fiabilité

Villemeur [34] exprime que la fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps déterminé. Cette aptitude se mesure par la probabilité qu'une entité réalise une fonction requise dans des conditions données pendant une période de temps donnée [36] [23].

A l'instant t , la fiabilité se mesure par la probabilité que l'entité E accomplisse une fonction requise dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0, t]$ [24]. Ainsi,

$$R(t) = P[E \text{ soit non défailante sur } [0, t]] \quad (2.1)$$

Ou

$$R(t) = P[E \text{ soit non défailante sur } [t_1, t_2]] \quad (2.2)$$

L'aptitude contraire est la probabilité de défaillance de l'entité, quelque fois appelée défiabilité. On écrit :

$$\bar{R}(t) = 1 - R(t) \quad (2.3)$$

Un équipement est fiable s'il subit peu d'arrêts pour pannes. La notion de fiabilité s'applique :

- Au système réparable => équipement industriel ou domestique.
- A des systèmes non réparables => lampes, composants donc jetables.

La fiabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs tel que montré sur le schéma de la figure 2.2 :

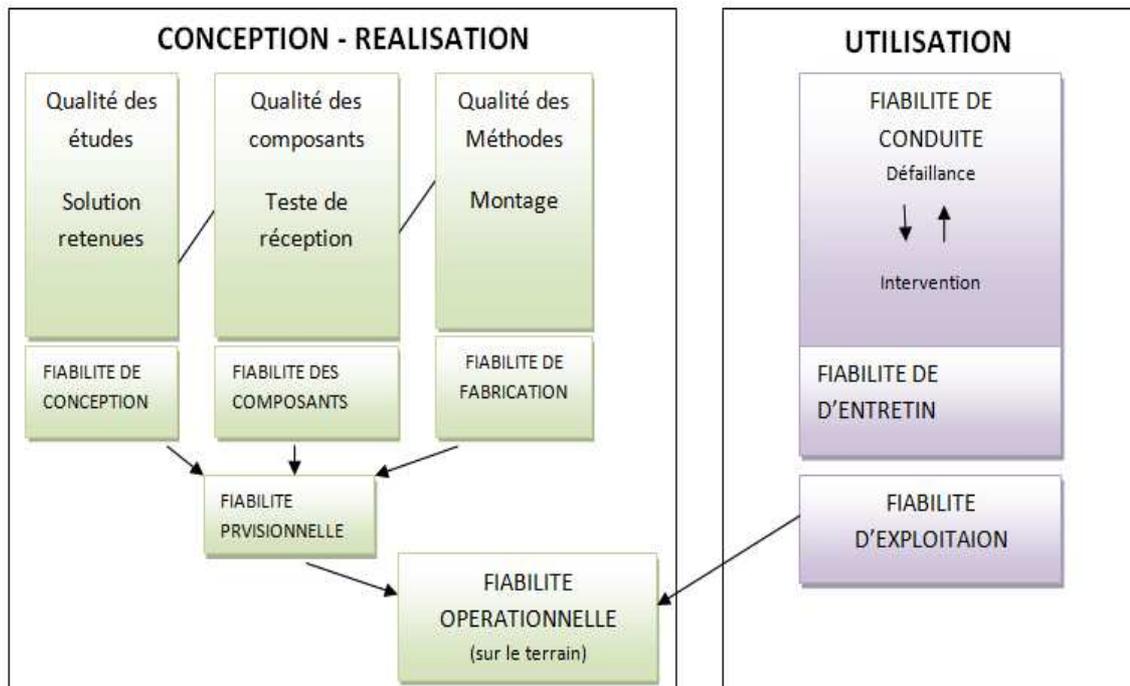


Figure 2.2 Différentes formes de la fiabilité.

On distingue plusieurs types de fiabilité (termes spécifiques) :

- La fiabilité opérationnelle (observée ou estimée) déduite de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelles à partir de l'exploitation d'un retour d'expérience.
- La fiabilité prévisionnelle (prédite) correspondant à la fiabilité future d'un système et établie par son analyse, connaissant les fiabilités de ses composants.
- La fiabilité extrapolée déduite de la fiabilité opérationnelle par exploitation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes.
- La fiabilité intrinsèque ou inhérente correspondant à la fiabilité de chaque dispositif qui peut être évaluée séparément dans des conditions d'exploitation idéales.

2.3.3 Maintenabilité

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits [34] [23].

Elle est généralement mesurée par la probabilité que la maintenance d'une entité E , soit achevée au temps t , sachant que l'entité est défaillante au temps $t = 0$.

L'évaluation de cette probabilité est liée à la manière dont est effectuée la remise en état de fonctionnement de l'entité.

$$M(t) = P[E \text{ est réparé sur } [0, t]] \quad (2.4)$$

2.3.4 Disponibilité

C'est l'aptitude d'un système à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, à un instant donné [34] [24]. Elle est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à l'instant t .

$$A(t) = P [E \text{ non défaillante à l'instant } t] \quad (2.5)$$

Cette caractéristique est appelée disponibilité instantanée. L'aptitude contraire sera dénommée indisponibilité ; sa mesure est notée $\bar{A}(t)$:

$$\bar{A}(t) = 1 - A(t) \quad (2.6)$$

2.3.5 Sécurité

C'est l'aptitude d'un système à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [34] [24]. En fait, le concept de sécurité est probablement le plus difficile à définir et à évaluer, car il englobe des aspects très divers. Cependant, la norme EN 292 – 1 [38] sur la sécurité des machines donne cette définition :

"C'est l'aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue, démontée et mise au rebut dans les conditions d'utilisation normales spécifiées dans la notice d'instructions, sans causer de lésions ou d'atteinte à la santé."

2.3.6 Défaillance

Selon Villemeur [34], une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. La défaillance d'une entité résulte de causes qui peuvent dépendre des circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance. Enfin, le mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée.

Le taux de défaillance peut être rapproché de la probabilité pour que le composant soit défaillant à l'instant $t+dt$ sachant qu'il n'est pas défaillant à l'instant t . On le note λ et il s'exprime à partir de la fiabilité selon la relation suivante :

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt}(\log R(t)) \quad (2.7)$$

2.3.7 Reconfiguration

C'est l'action de modifier la structure d'un système qui a défailli, de telle sorte que les composants non-défaillants permettent de délivrer un service acceptable, bien que dégradé. [40].

2.5 Les temps caractéristiques pour la Sûreté de Fonctionnement

Les différents temps caractérisant la SdF se définissent en fonction de leur état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance, entre défaillance et réparation, etc. Ces temps dépendent des probabilités d'occurrences des divers événements comme les défaillances et les réparations des composants. Ce sont des variables aléatoires que l'on cherche à caractériser par leurs espérances mathématiques [26].

Certains indicateurs vont caractériser le fonctionnement prévu du système, tels que le MTTF, le MDT et le MUT.

- Le MTTF (Mean Time To [first] Failure) est la durée moyenne de fonctionnement avant défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance [26]. L'expression du MTTF est :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.8)$$

- Le MDT est le temps moyen séparant la survenance d'une panne et la remise en état opérationnel du système. Il se décompose en plusieurs phases lesquelles sont présentées par la figure 2.3 :
 - durée de détection de la panne (1);
 - durée de diagnostic de la panne (2);
 - durée d'intervention jusqu'au début de la réparation (3);
 - durée de la réparation (4);
 - durée de remise en service du système (5).
- Le MUT est le temps moyen qui sépare une remise en service opérationnelle du système de la survenance de la panne suivante.

Ces deux derniers indicateurs ne sont pertinents que dans le cas de systèmes réparables. Leur somme $MUT+MDT$ représente le temps moyen qui sépare deux pannes consécutives du système. On le note MTBF, comme Mean Time Between Failures.

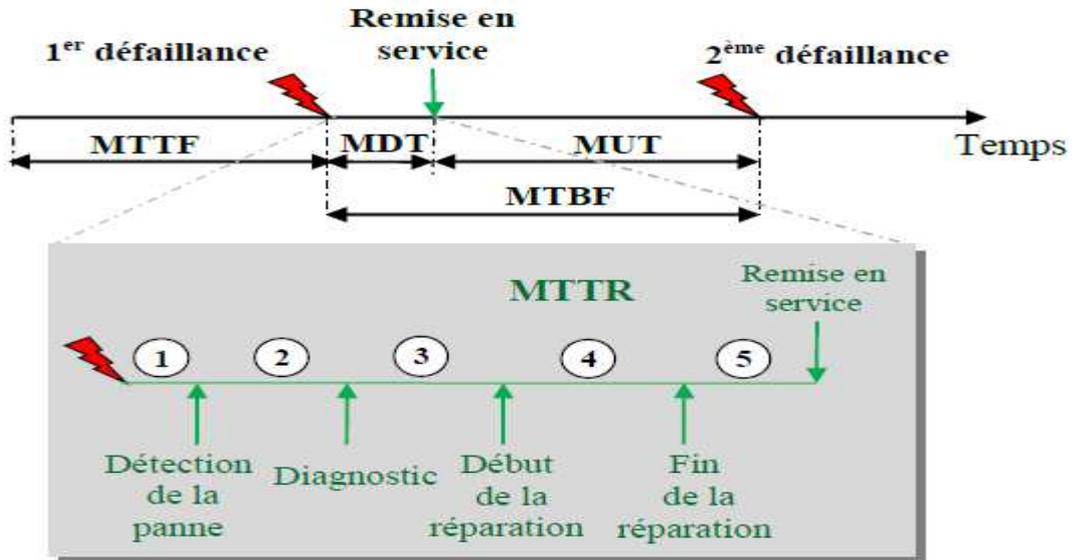


Figure 2.3 Quelques indicateurs de la sûreté de fonctionnement.

2.5 Enjeu de la sûreté de fonctionnement

L'enjeu de la sûreté de fonctionnement est d'identifier les risques au plus tôt dans la phase de développement du produit. Plus une erreur de conception est découverte tardivement, plus le risque technique induit peut être lourd et entraîner des surcoûts et des retards considérables pour le projet. L'apparition du risque peut notamment conduire à la mise en cause de la sécurité des personnes et des biens, à la dégradation de l'environnement, à la perte de fonctions.

La sûreté de fonctionnement est une activité d'ingénierie système. Elle peut être qualitative ou quantitative. La part qualitative correspond à l'optimisation des études et elle représente environ 70% de l'activité totale. Les 30% restants représentent la partie quantitative consacrée à la maîtrise des risques avant fabrication à partir des architectures déjà élaborées. C'est donc une phase d'optimisation des architectures des systèmes et de leur mise en œuvre de façon à maximiser, à moindre coût, leur robustesse aux aléas.

En résumé, l'analyse de la sûreté de fonctionnement est une action de réduction des risques et donc du coût à l'achèvement. Elle s'exerce essentiellement pendant les premières phases des projets, jusqu'à la mise en production [37].

2.6 Quelques approches d'analyse

D'après la figure 2.4, les principales méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement sont les suivantes :

- L'Analyse Fonctionnelle (AF).
- L'Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC).
- L'arbre de défaillance (AdD),
- Le réseau de pétri (RdP),
- Le Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF).
-

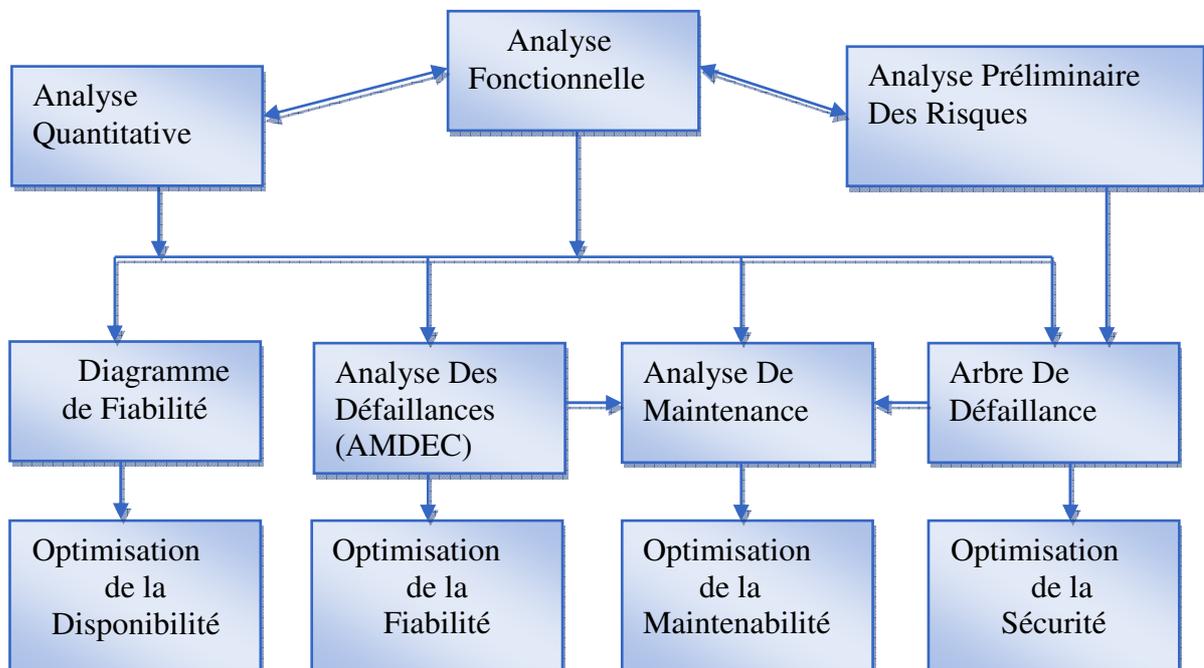


Figure 2.4 Méthodes d'analyse de la SdF.

2.7.3 L'Analyse Fonctionnelle (AF)

L'analyse fonctionnelle est une étape qui s'utilise au début d'un projet pour créer ou améliorer un produit ou un service. Pour analyser les défaillances d'un système, il est nécessaire auparavant de bien identifier à quoi doit servir ce système : c'est à dire de bien identifier toutes les fonctions que le système doit remplir durant sa vie de fonctionnement et de stockage [28].

D'après la norme (AFNOR NF X 50-151), l'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et / ou valoriser les fonctions du produit (matériel, logiciel, processus, service) attendues par l'utilisateur. Une analyse fonctionnelle, précède donc une étude de sûreté de fonctionnement. Une première analyse fonctionnelle dite externe permet de définir avec précision les limites matérielles du système étudié, les différentes fonctions et opérations réalisées par le système ainsi que les diverses configurations d'exploitation. L'analyse fonctionnelle interne permet de réaliser une décomposition arborescente et hiérarchique du système en éléments matériels et/ou fonctionnels. Elle décrit également des fonctions dans le système [28].

2.6.2 L'Analyse préliminaire des risques

Selon la norme CEI-300-3-9 (CEI 300-3-9, 1995), l'**Analyse Préliminaire des Risques (APR)** « est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité ». Elle est réalisée après l'analyse fonctionnelle. Elle a pour but d'établir une liste aussi exhaustive que possible des incidents ou accidents pouvant avoir des conséquences sur la sécurité du personnel ou du matériel. Un autre objectif de l'APR est d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et les accidents potentiels [28].

La méthode permet de recenser les dangers et déduire ensuite tous les moyens et toutes les actions correctrices permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels. Il est recommandé de commencer l'APR dès les premières phases de la conception. Cette analyse sera vérifiée et complétée au fur et à mesure de l'avancement dans la réalisation de système. L'APR permet de mettre en évidence les événements redoutés critiques qui devront être analysés en détail dans la suite de l'étude de sûreté de fonctionnement, en particulier par la méthode des arbres de défaillances [29].

2.6.3 L'Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)

L'AMDEC a été développée initialement par l'armée américaine. La référence Militaire MIL-P-1629, intitulé "Procédures pour l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités", date du 9 Novembre 1949. C'est une extension de l'analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE). [34]

Cette méthode était employée comme une technique d'évaluation des défaillances afin de déterminer la fiabilité d'un équipement et d'un système. L'AMDEC a été employée pour la première fois dans les années 1960 dans le domaine de l'aéronautique pour l'analyse de la sécurité des avions. La mise en œuvre s'est longtemps limitée à l'utilisation dans le cadre d'études de fiabilité du matériel. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités telles que l'industrie chimique, pétrolière ou le nucléaire. De fait, elle est essentiellement adaptée à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi bien à des systèmes de technologies différents (systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques...) qu'à des systèmes alliant plusieurs techniques [36].

L'AMDEC est une démarche inductive. Donc c'est une identification prédictive des causes de problèmes.

Cause (fait particulier)  Effet (conclusion générale)

Cependant, cette méthode a des limites qui sont :

- n'est pas une méthode de résolution de problèmes,
- ne permet pas l'étude des combinaisons de défaillances (plutôt réservée aux Arbres de Défaillances, Graphe de Markov,...),
- ne peut pas garantir l'exhaustivité de l'étude,

2.6.4 L'Arbre de Défaillance (AdD)

L'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'événement. L'arbre de défaillance est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un **Evénement Redouté (ER)**. L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductif. Elle permet de remonter de causes en causes jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté [35].

Ainsi, l'analyse par arbre des défaillances permet d'identifier les successions et les combinaisons d'événements qui conduisent des événements de base jusqu'à l'événement indésirable retenu. Les liens entre les différents événements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type « ET » et « OU » par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente. A l'aide de régies mathématiques et statistiques, il est alors théoriquement

possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement final à partir des probabilités des événements de base identifiés [34]. L'analyse par arbre des défaillances d'un événement redouté peut se décomposer en trois étapes successives :

- Définition de l'événement redouté (ER) étudié.
- Elaboration de l'arbre.
- Exploitation de l'arbre.

Il existe d'autre type d'événements défini par la norme; leurs symboles ainsi que leurs significations sont répertoriés dans le tableau 2.1 :

Symbole	Nom	Signification
	Rectangle	Événement redouté ou événement intermédiaire
	Cercle	Événement intermédiaire
	Losange	Événement élémentaire non développé
	Double losange	Événement élémentaire dont le développement est à faire ultérieurement
	Maison	Événement de base survenant normalement pour le fonctionnement du système

Tableau 2.1 Symboles des événements.

Il existe pour les arbres de défaillances une symbolique normalisée qui permet de faire référence à des parties de l'arbre qui se répète de manière identique ou de manière semblable pour éviter de les redéfinir, le tableau 2.2 montre ses symboles avec la signification :

Symbole	Nom	Signification
	Triangle	La partie de l'arbre qui suit le premier symbole se retrouve identique , sans être répétée, à l'endroit indiqué par le second symbole.
	Triangle inversé	La partie de l'arbre qui suit le premier symbole se retrouve semblable mais non identique à l'endroit indiqué par le second symbole.

Tableau 2.2 Symboles et signification.

2.6.5 Le Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF)

Le bloc diagramme de fiabilité est une représentation graphique sous la forme de boîte ou de blocs. Il représente une démarche d'analyse par décomposition fonctionnelle du système en sous fonction ou mission [37].

Le bloc diagramme de fiabilité est construit en recherchant la mission de chaque sous ensemble qui permet d'atteindre la mission globale du système, les boîtes peuvent représenter des fonctions ou des composants.

Les intérêts généraux du bloc diagramme de fiabilité sont :

- Identifier aisément les composants critiques,
- Calculer la fiabilité et mettre en évidence les évolutions défavorables et les dégradations,
- Fournir une aide à la maintenance préventive pour la détermination de périodes optimales entre interventions,
- Quantifier les gains de fiabilité à la suite d'un remplacement ou d'une modification.

Les limites de la méthode BDF sont :

- C'est un modèle reposant sur la logique et non pas sur les états,
- Modèle Statique : pas de représentation du temps ni de l'ordre entre des événements successifs,
- Hypothèse d'indépendance des pannes des différents composants [36].

2.6.6 Réseau de Pétri (RdP)

Les réseaux de Pétri constituent un outil graphique et mathématique qui permet de simuler et modéliser des systèmes dans lesquels la notion d'événements et d'évolution sont importants [39]. Ces réseaux présentent des caractéristiques intéressantes telles que la modélisation et la visualisation de comportements parallèles, de la synchronisation et partage de ressources.

Un réseau de Pétri est composé :

- d'un ensemble de place
- d'un ensemble de transitions
- d'un ensemble d'arcs qui associent les places (d'entrée) aux transitions et les transitions aux places (de sortie)
- de poids (entiers) associés aux arcs

L'état d'un réseau est défini par son marquage. Un marquage associe à chaque place un nombre entier positif, que l'on représente graphiquement par des jetons. Il existe différents types de réseaux de Pétri : temporisés, interprétés, stochastiques, colorés, continus et

hybrides. C'est un outil assez général pour modéliser des phénomènes très variés [41]. Il permet notamment :

- la modélisation des systèmes informatiques,
- l'évaluation des performances des systèmes discrets, des interfaces homme-machine,
- la commande des ateliers de fabrication,
- la conception de systèmes temps réel,
- la modélisation des protocoles de communication,
- la modélisation des chaînes de production (de fabrication).

2.7 Les études de sûreté de fonctionnement

L'étude de la sûreté de fonctionnement constitue une étape préalable indispensable à la conception d'un système sûr [31] et permet d'aider à la prise de décision en (figure 2.5) :

- comprenant et identifiant les risques ;
- optimisant l'architecture et comparant des solutions différentes ;
- optimisant les moyens de soutien en comparant des solutions ;
- justifiant les choix de façon rationnelle et démontrée ;
- vérifiant la bonne atteinte des objectifs de sûreté de fonctionnement.

Elles peuvent aussi aider à l'optimisation en :

- diminuant le nombre de pannes qui seront observées durant la vie du système;
- optimisant économiquement la conception par le dimensionnement des équipements et des architectures au "juste nécessaire";
- rendant la maintenance plus ciblée et plus efficace;
- dimensionnant au plus juste les moyens de soutien nécessaires (stocks de pièces de rechange par exemple).

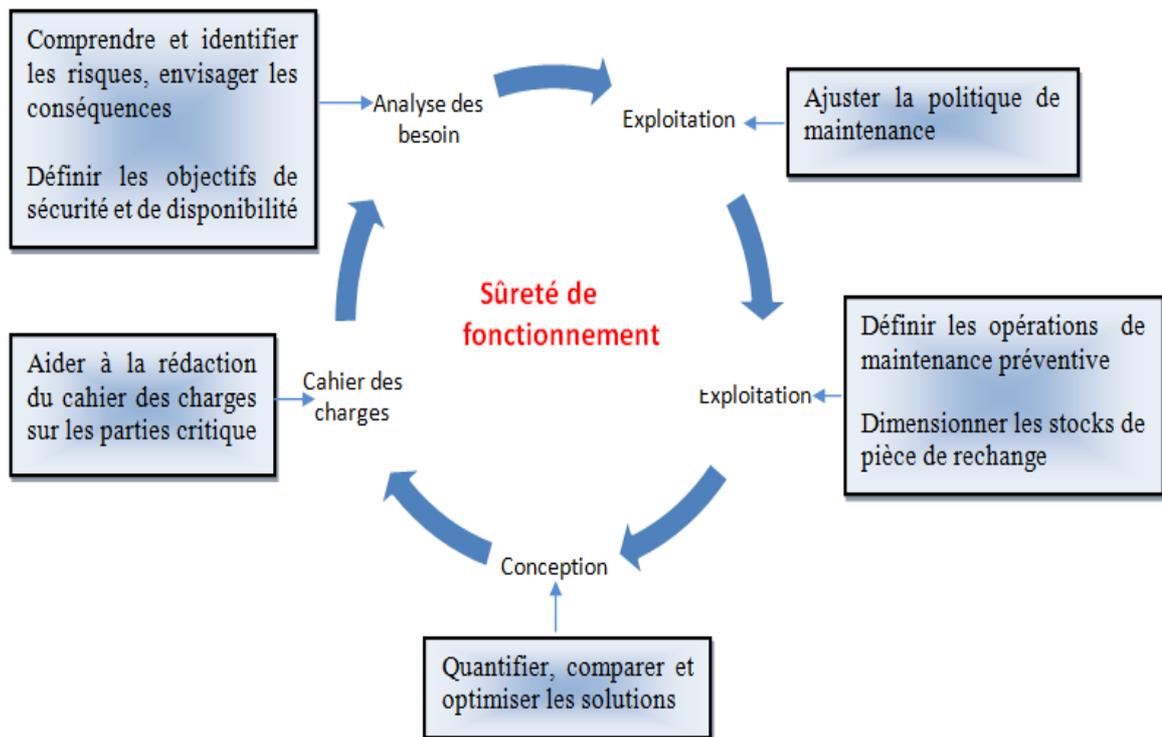


Figure 2.5 Les études de sûreté de fonctionnement. [39]

2.7.1 Étape par étape

La première étape consiste à analyser rigoureusement le besoin pour comprendre et identifier l'ensemble des risques, et envisager leurs conséquences. Ensuite, des niveaux d'acceptabilité sont attribués pour ces risques (on parle d'objectifs de F, M, D et/ou S selon les systèmes).

L'identification précise de ces risques va aider à la rédaction du cahier des charges du système, précisément sur ses parties critiques. Il faudra alors imaginer des solutions techniques, des architectures adaptées qui, toutes, seront quantifiées d'un point de vue sûreté de fonctionnement, comparées entre elles et, si nécessaire, optimisées. Une fois la solution retenue, il sera nécessaire de préciser les conditions d'une exploitation la plus efficace possible en :

- définissant les opérations de maintenance préventive nécessaires pour maintenir les caractéristiques de sûreté de fonctionnement au niveau voulu, sans dégradation des équipements préjudiciable à l'une des quatre composantes;
- dimensionnant les stocks de pièces de rechange au plus juste, sans dégrader la disponibilité du système.

2.7.2 Études périphériques

Cette partie, s'intéresse à la recherche d'une méthodologie d'approche globale, complémentaire aux études de sûreté de fonctionnement dans les milieux industriels. Par exemple la recherche de l'optimisation des tailles de stocks de pièces de rechange a fait l'objet d'études particulières où ce souci d'optimisation est couplé avec une démarche analogue sur :

- la maintenance des équipements;
- l'ordonnancement des transports de pièces.

2.7.3 En pratique

L'étude de sûreté de fonctionnement comporte deux volets complémentaires représentés par la figure 2.6.

- une analyse fonctionnelle qui va détailler la manière dont le système va opérer dans toutes ses phases de vie ainsi que les autres systèmes avec lesquels il va pouvoir interagir,
- une analyse dysfonctionnelle qui vise à imaginer l'ensemble des défaillances pouvant survenir n'importe où dans le système, seules ou combinées entre elles et à analyser l'impact de ces pannes.

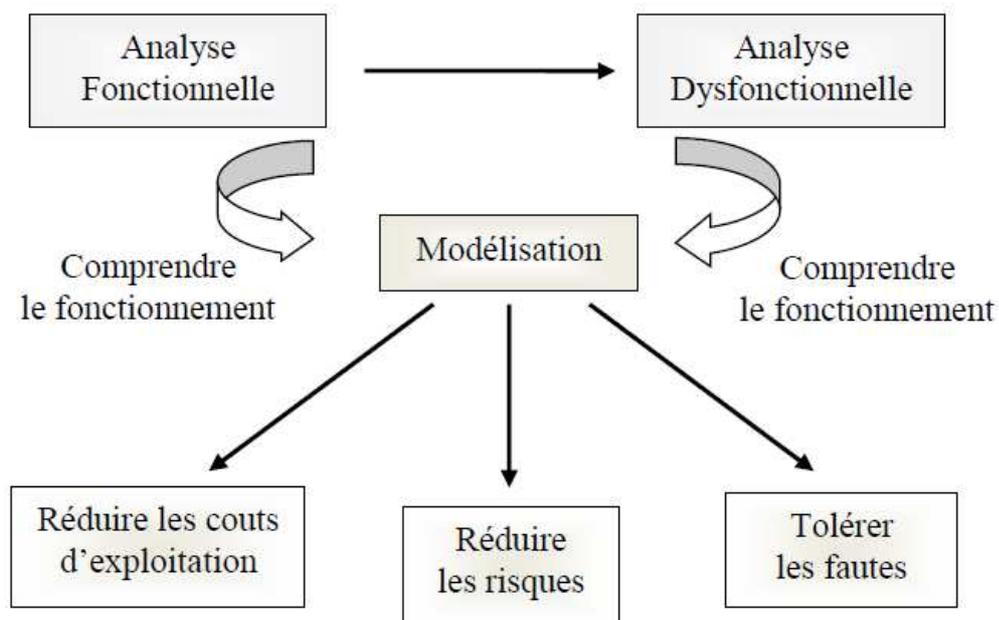


Figure 2.6 Analyse de la sûreté de fonctionnement. [39]

2.8 La normalisation

Dans cette section, on évoquera quelques normes génériques pour la sûreté de fonctionnement [42].

2.8.1 ARP-4754

La norme de sûreté ARP-4754 [43], dont l'intitulé est « Certification Considerations for Highly-Integrated or Complex Aircraft Systems » et dont une nouvelle version est sortie en décembre 2010, est un standard de la Society of Automotive Engineers (SAE). Elle traite de processus de développement de systèmes aéronautiques en se focalisant sur les aspects de sûreté.

La norme fait référence à d'autres standards bien connus, comme le DO-178B «Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification» [44], pour le développement de logiciel dans le domaine aéronautique, ou encore le DO-254 «Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification» [45], pour le développement de matériel. Pour beaucoup de techniques d'ingénierie pour la sûreté, l'ARP-4754 [43], fait aussi référence à un autre standard l'ARP-4761 présenté dans la section suivante.

2.8.2 ARP-4761

L'ARP-4761 «Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment » [46], il est destiné à être utilisé conjointement avec l'ARP-4754 pour démontrer la conformité du système en court de conception.

2.8.3 CEI-61508 et ses dérivées

La norme CEI-61508 [47], est une norme générique de sûreté de fonctionnement du CEI (International Electrotechnical Commission), elle est utilisée comme référentiel par tous les grands secteurs industriels. Elle traite de la sécurité fonctionnelle des systèmes Electriques/Electroniques et Electroniques Programmables (E/E/PE).

En fait, cette norme a révolutionné le monde de la sûreté de fonctionnement, car elle a su amener des nouveautés dans la façon d'intégrer et de réaliser les activités de sûreté de fonctionnement dans le cycle de développement d'un système E/E/PE. Entre autres, la norme

a permis de définir des niveaux d'intégrité pour des systèmes E/E/PE qui prennent en compte aussi bien les aspects quantitatifs que qualitatifs dans la gestion du risque.

Par son aspect générique, la norme CEI 61508 reste brève sur la description des outils, méthodes et les techniques à mettre en œuvre. Mais depuis sa création, plusieurs dérivés de cette norme ont vu le jour dans le but de la rendre applicable pour les différents secteurs concernés (figure 2.7) [42].

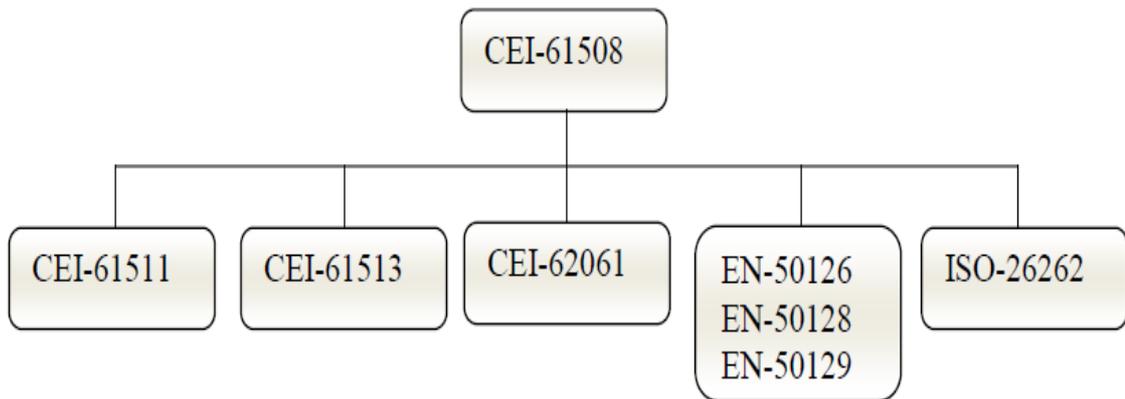


Figure 2.7 Norme CEI-61508 et ses dérivées.

Ces normes dérivées sont les suivantes :

- La norme CEI 61511, créée en 2003, est adaptée pour les procédés industriels.
- La norme CEI 61513, créée en 2001, est adaptée pour le secteur du nucléaire.
- La norme CEI 62061, créée en 2005, est adaptée pour la sécurité des machines.
- Les normes EN 50126/EN 50128/EN 50129, créées respectivement pour les dernières versions, en 1999/2001/2003, sont adaptées pour le secteur du ferroviaire.
- La norme ISO 26262, qui devrait être publiée en tant que standard en 2011, sera adaptée pour le secteur de l'automobile [48].

Cette dernière section a permis de conclure que les normes de sûreté aident énormément à comprendre quels sont les objectifs et les activités pour obtenir un système sûrs. Par exemple, l'ARP-4754 fournit une très bonne vision des activités de sûreté de fonctionnement. Mais en soit, ces normes ne définissent pas une approche globale et unifiée avec les activités de conception nominales. Il était nécessaire de définir une approche globale pour la prise en compte de la sûreté de fonctionnement.

2.9 Conclusion

Après un historique de la sûreté de fonctionnement, nous avons passé en revue dans ce chapitre les principales méthodes d'analyse et outils de la sûreté de fonctionnement.

L'étude de la sûreté de fonctionnement d'un système vise, d'une part à déterminer ses modes de défaillance, les scénarios susceptibles de conduire aux défaillances et les conséquences associées. D'autre part, elle vise à évaluer quantitativement les probabilités d'occurrence des différents événements indésirables et des scénarios associés.

Le rôle de la sûreté de fonctionnement dans le réseau d'AEP est d'évaluer la fiabilité d'un système hydraulique et d'assurer la disponibilité de l'eau en quantité suffisante chez les consommateurs, le prochain chapitre s'attache sur la modélisation hydraulique du réseau d'étude (cas de la ville d'El Hadjar) qui permet de la simulation de son fonctionnement hydraulique pour déterminer les meilleures solutions pour améliorer la desserte des abonnées.

CHAPITRE 3
MODELE DU RESEAU D'AEP DE LA VILLE
EL HADJAR

Chapitre 3

Modèle du réseau d'AEP de la ville El Hadjar

3.1 Introduction

Le modèle hydraulique permet la simulation du comportement hydraulique d'un réseau d'eau potable afin de prévoir les comportements futurs du réseau. La collecte des données décrivant l'architecture du réseau et les mesures des débits et des pressions envisagées qui sont nécessaires au calage précis du modèle est une étape essentielle pour l'étude des situations critiques. Ces situations sont liées à l'indisponibilité d'une ressource, d'ouvrages de pompage ou de stockage, d'une canalisation et de rechercher les dispositions les mieux adaptées pour parvenir à un contrôle adéquat de la pression de distribution. Aussi, ce chapitre présente une modélisation établie par touches progressives du réseau d'alimentation en eau potable de la ville El Hadjar.

3.2 Localisation du cas d'étude

La commune d'El Hadjar est située à l'Est de la wilaya d'Annaba (Nord - Est d'Algérie); elle est la quatrième commune la plus peuplée de la wilaya (figure 3.1). Selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2013, la population de la commune d'El Hadjar est évaluée à 41 941 habitants contre 37 364 en 2008. Elle s'étend sur 63 km², pour une densité de 593,08 habitants par km².

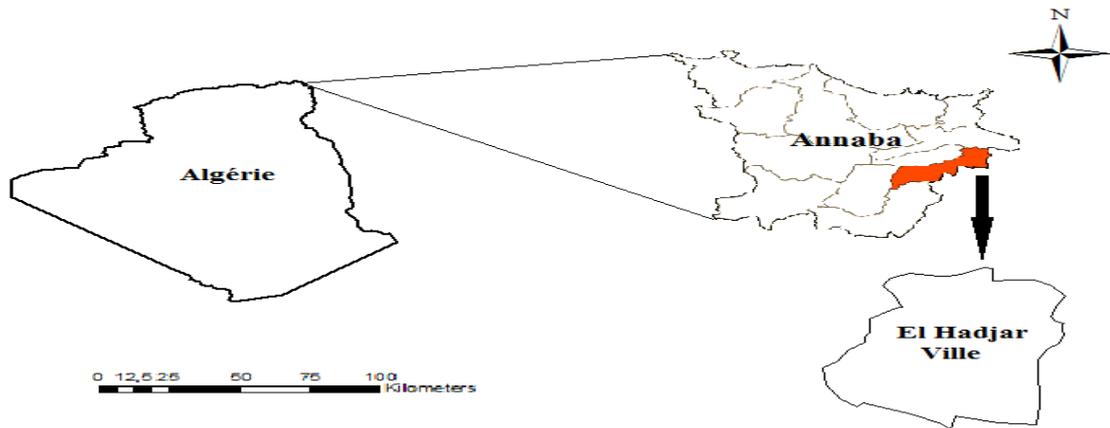


Figure 3.1 Emplacement de la zone d'étude.

3.2.1 Topographie de la commune d'El Hadjar

La commune d'El Hadjar est caractérisée par une topographie généralement plate avec des courbes de niveau qui varie de 7 m d'altitude au Nord et 8 m au niveau de l'agglomération.

3.2.2 Situation climatique

Le climat de la commune d'El Hadjar comme celle du Wilaya d'Annaba est de type méditerranéen, humide en Hiver, chaud en été.

3.3 Analyse démographique et socio-économique

En générale, l'évolution démographique est estimée à partir d'un taux d'accroissement constaté que l'on peut extrapoler selon les diverses hypothèses sur la base du dénombrement effectué lors de différents recensements, qui constitue la base primordiale pour l'estimation des différents besoins futurs d'une population donnée [49].

Cependant, les tendances socio-économiques devront être définies du point de vue développement et orientation pour évaluer l'ampleur de la demande en eau et l'évolution des débits d'eau rejetés [50].

La demande en eau est donc en relation directe avec la population desservie, à travers la dotation journalière par secteur en fonction de l'année de calcul [51].

Il s'agit en outre des besoins domestiques auxquels il faut ajouter ceux des organismes collectifs nécessaires à la vie des agglomérations et ceux du tissu micro-économique associé (commerce, bureaux, artisanats,...) [52].

Ces besoins se déterminent à partir des facteurs suivants :

- la population à desservir (actuelle et future),
- la dotation journalière,
- le taux d'accroissement.

3.4 Méthode d'évaluation démographique

Pour tenir compte de l'évolution démographique, on peut s'appuyer sur des prévisions à court (5 à 10 ans) et à moyen terme (10 à 50 ans). Remarquons que l'incertitude augmente avec les années de prévisions. Les sources d'information utiles sont à rechercher dans :

- les recensements nationaux (annuaires statistiques fédéraux),
- les statistiques d'immigration et d'émigration,
- les statistiques de naissances et décès,
- office national des statistiques (ONS),
- les plans d'affectations,
- etc...

Parmi les méthodes de l'évaluation démographique, nous rappelons les suivantes :

3.4.1 La méthode graphique

Elle consiste à tracer au jugé, une extrapolation de la courbe de croissance de la population en tenant compte des évènements qui ont affecté sa variation au cours du temps [53].

3.4.2 La méthode comparative

Elle procède par comparaisons avec d'autres agglomérations ayant des évolutions similaires [54].

3.4.3 Accroissement exponentiel

Cette formule est appliquée généralement dans les pays en voie de développement où le taux de natalité est très élevé (c'est le cas de notre étude). On peut calculer le nombre de la population future à partir de la formule suivante [51] :

$$P_f = P_0 (1+t)^n \quad (3.1)$$

Avec :

P_f : population future.

P_0 : population actuelle.

t : taux d'accroissement annuel de la population (t 1,4% : Donnée approuvées par la Direction Général de la Société de l'Eau et de l'Assainissement d'Annaba et d'El Tarf (SEATA), le 22.07.2010.).

n : nombre d'années projetées (entre l'année de recensement ou de « donnée » et l'année de projection).

La projection est à l'horizon 2025 (n = 8 ans).

D'après l'Office Nationale de la Statistique (ONS), le nombre de la population d'El Hadjar en 2013 est 41941 habitants. L'estimation de la population pour différents horizons est indiquée dans le tableau 3.1 et montrée sur la figure 3.2.

Année	2013	2017	2025
Nombre d'habitants	41941	44339	49555

Tableau 3.1 Estimation de la population pour différents horizon d'El Hadjar.

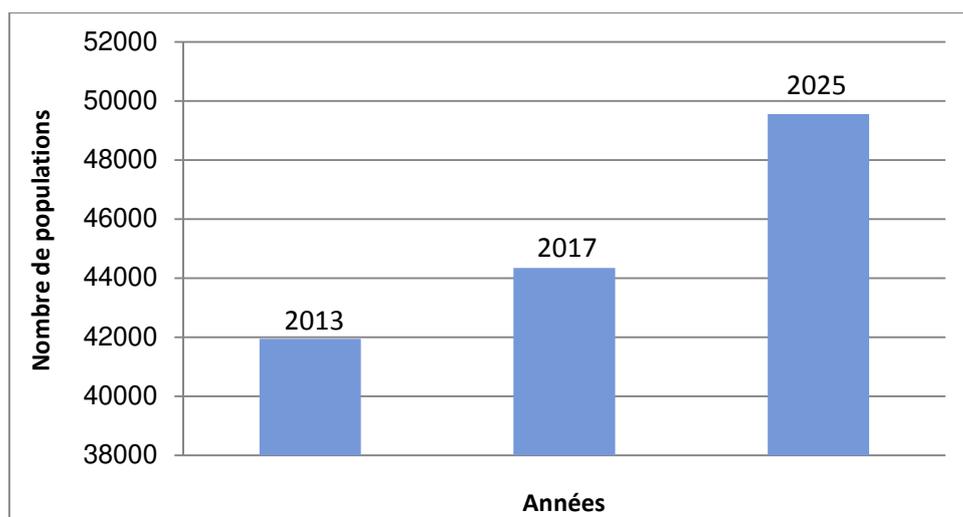


Figure 3.2 Evolution de la population au fil des années.

3.5 Présentation du réseau d'alimentation en eau potable d'El Hadjar

3.5.1 Situation hydraulique

L'alimentation en eau potable de la commune d'El Hadjar est assurée directement par la station de traitement d'eau potable de CHAIBA. L'adduction est assurée à partir du réservoir 5000 m³, par une conduite de diamètre 500 mm en Fonte et qui se divise au niveau d'El Hadjar en deux conduites, l'une part vers le Sider (zone industrielle) et l'autre de diamètre 300 mm, en PEHD, d'une longueur totale de 4,23 km, vers les réservoirs R1 et R2 d'une capacité de 1000 m³ chacun. Le réseau de distribution est un réseau maillé. Le système de

distribution d'eau est composé par des conduites des différents matériaux (fonte ductile, acier, PEHD et PVC), de différents diamètres et d'un château d'eau plus deux réservoirs semi-enterrés, d'une capacité de 1000 m³ chacun et de deux bâches à eau de 200 m³ chacun, qui alimentent les suppresseurs. La capacité totale de stockage est de 3400 m³. Etant donné qu'un nouveau réservoir surélevé d'une capacité de 1000 m³ est en cours de réalisation, le volume de stockage d'eau « d'El Hadjar » passera à 4400 m³.

3.5.2 Réservoir

Un réservoir est un ouvrage qui permet de stocker de l'eau. Dans la grande majorité des cas, chaque réseau possède un réservoir principal, dit réservoir de tête. Il est alimenté en eau potable en débit constant et assure la distribution. Lorsque le débit distribué est supérieur au débit entrant, le niveau du réservoir baisse. Le volume d'eau stocké doit être suffisant pour que le réservoir ne se vide pas complètement [51]. Dans le cas de la ville El Hadjar, on a deux réservoirs de stockage qui alimentent un troisième réservoir surélevé (c'est le réservoir principal) pour assurer l'alimentation en eau potable de cette ville avec une pression suffisante.

La plus grande partie de la zone urbaine d'El Hadjar est alimentée par le château d'eau « R1000_HADJAR3 » qui est présenté dans la figure 3.3 et situé au plus haut et peut ainsi assurer les pressions minimums dans la zone desservie. Le réservoir « R1000_HADJAR3 » sera soit directement alimenté par la conduite d'adduction de diamètre nominale DN 500 mm soit alimenté en eau provenant des réservoirs « notés R1000_HADJAR 1 et 2 » par le biais de station de pompage « SP_El Hadjar ». Le réservoir « noté R1000_HADJAR3 » alimente le grand secteur central "El Hadjar Centre".

Afin d'approvisionner le secteur El Hadjar Centre exclusivement avec le réservoir «R1000_HADJAR3 », une vanne de contrôle devra être fermée afin de séparer le Secteur El Hadjar Centre de deux autres secteurs (cités Attoui et trois cent logements). Au Nord, le Secteur El Hadjar Nord est alimenté par la bache à eau « notée B_300L » par la station de pompage SP_300L. Au Sud, le Secteur El Hadjar Sud est alimenté par la bache à eau « notée B_ATTOUNI » à travers la station de pompage SP_ATTOUNI.

En outre, la capacité de nombreuses sections de conduite devra être augmentée afin d'empêcher des fortes pertes de pression lors de la consommation maximum d'eau, au moment de la période horaire de pointe et ainsi assurer la pression minimale exigée. Cela peut

se faire soit par l'échange des conduites actuelles par une conduite à plus gros diamètre, soit par l'installation d'une deuxième conduite parallèle à la première. Le tableau 3.2 suivant montre les caractéristiques des différents réservoirs.

Réservoirs	R1000_ HADJAR 1	R1000_ HADJAR 2	R1000_ HADJAR 3	B_300L	B_ATTOUNI
Volume (m ³)	1000	1000	1000	200	200
Hmin (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hmax (m)	4,03	4,03	5,35	2,1	3,5

Tableau 3.2 Les différents réservoirs avec leurs caractéristiques.

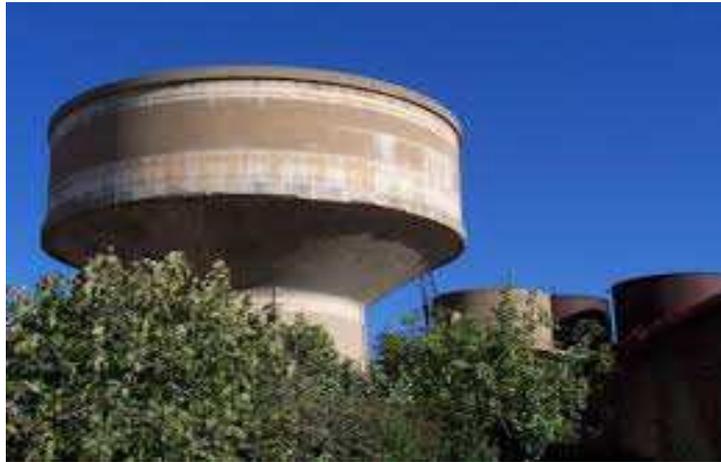


Figure 3.3 Le réservoir surélevé d'El Hadjar.

3.5.3 Les pompes

Les réservoirs « R1 et R2 » sont semi-enterrés, destinés pour le stockage afin d'alimenter le réservoir surélevé « R3 » (château d'eau) par deux pompes « HADJAR1 et HADJAR2». Le réservoir « R3 » à son tour alimente une bache à eau B_300L qui alimente le secteur 300 logements par une station de pompage 300L et une autre bache à eau B_Attoui qui alimente le secteur Attoui par une station de pompage ATTOUI.

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale, cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement. Ses caractéristiques sont exprimées par la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction du débit(Q) montré dans les figure 3.4 et la figure 3.5. Le tableau 3.3 montre les caractéristiques des Groupes Electro Pompe (GEP) pour assurer l'alimentation du réservoir principale et des bâches à eau.

Station de pompage	"SP_El Hadjar"		"SP_300L"		"SP_ATTOUI"	
Nom de la pompe	HADJAR1	HADJAR2	300L1	300L2	ATTOUI1	ATTOUI2
La hauteur manométrique totale (m)	100	80	60	60	60	60
Débit (l/s)	1,38	1,25	0,69	0,69	0,69	0,69

Tableau 3.3 Les caractéristiques des pompes.

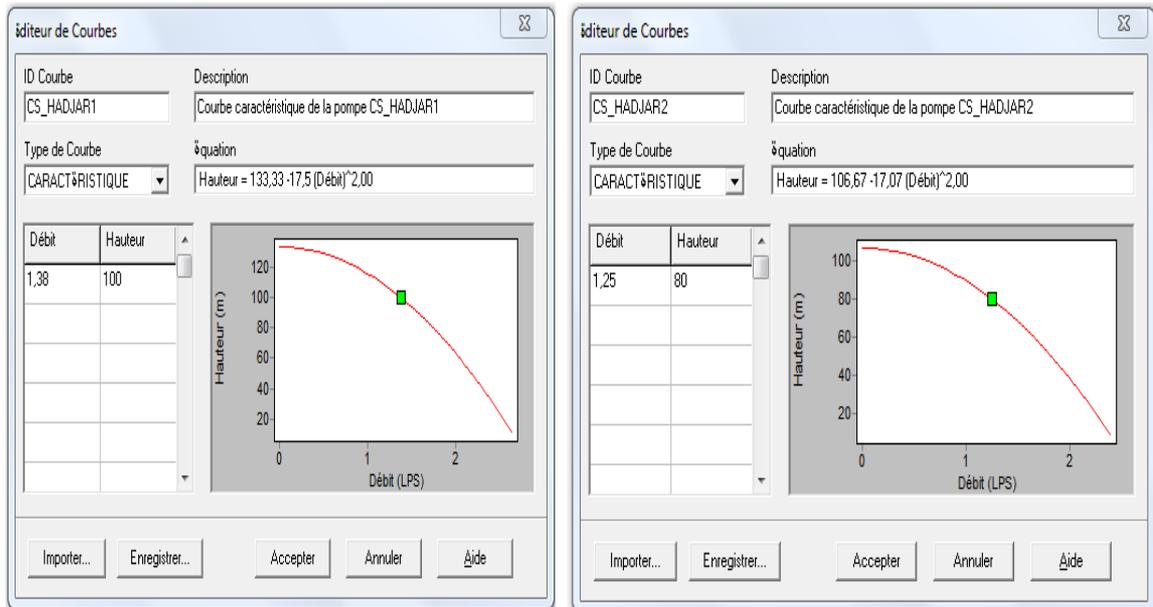


Figure 3.4 Courbes caractéristiques du GEP d'El Hadjar.

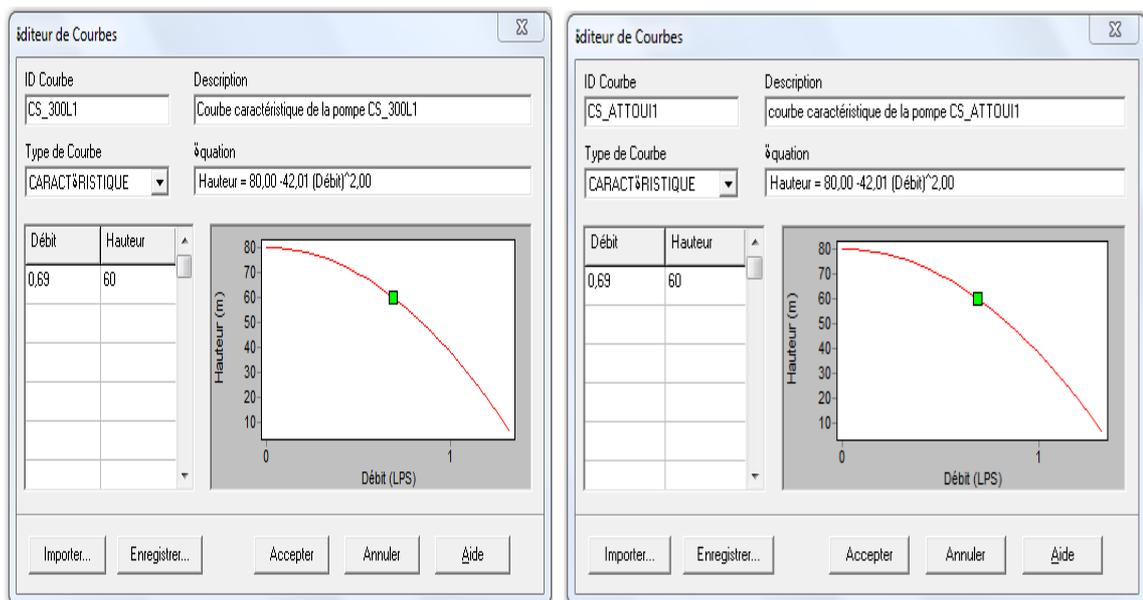


Figure 3.5 Courbe caractéristique de la pompe du secteur 300 logements et Attoui.

3.6 Estimation des besoins

L'évaluation des quantités d'eau nécessaires d'une agglomération urbaine ou rurale n'est jamais faite avec certitude car chaque catégorie de besoins en eau dépend de nombreux paramètres dont l'évolution dans le temps est très difficile à cerner. En général, les besoins en eau potable à satisfaire sont évalués en deux phases :

Phase 1 :

- Appréciation des besoins unitaires actuels relatifs à chaque catégorie de consommation.
- Évaluation des besoins globaux actuels du périmètre d'aménagement.

Phase 2 :

- Prévion des besoins en eau pour le futur et ce pour différents horizons.

Notons que l'étude des prévisions doit tenir compte d'une double augmentation :

- Celle des besoins unitaires.
- Celle du nombre d'habitant.

3.6.1 Les types des besoins

L'alimentation en eau potable consiste donc à satisfaire la demande en eau potable d'une agglomération. Ces demandes varient selon les types d'agglomération et leurs besoins. Il s'agit principalement de :

- Les logements collectifs et individuels.
- Etablissements scolaires : écoles, collèges, lycées.
- Equipements sportifs : stades, aires de jeux, salle omnisport, terrain de foot, terrain matico.
- Etablissements sanitaires : centres de santé, salles de soins, polycliniques.
- Equipement touristique et de loisirs : hôtel, Park d'attraction, cinéma.
- Bâtiments administrative : APC, DAIRA, tribunaux, sureté de la daïra, garde communale, gendarmerie, centre administrative, EPEA, SUC, protection civile, EDGA, hôtel de finance, caisse sécurité sociale, centre de rééducation, direction ORLAIT.

- Etablissements publics : mosquée, Park, réserves d'équipements, maison de jeune, jardin d'enfant, cimetière, équipement de consommation, stock de légume, SILOS, O.A.I.C.
- Etablissements commerciaux : sonelgaz, banque, centres commerciaux, PTT, station, boutique, d'essence, station électrique, Park ENGOA, central à béton, projet relai routier.

3.6.2 Les facteurs affectant la consommation

- Pertes dans le réseau et gaspillage,
- Installation de compteurs d'eau,
- Pression disponible,
- Types d'industries installées sur le territoire de la localité,
- Qualité de l'eau,
- Coût,
- Importance de la ville,
- Richesse de la population (niveau de vie),
- Climat,
- Branché ou non branché.

3.7 Évaluations des besoins unitaires actuels par catégorie de consommation

3.7.1 Besoins domestiques

Ce sont les consommations en eau de la population branchée au réseau et non branchée mais qui profite des bornes fontaines pour s'alimenter en eau. Il s'agit donc de l'eau utilisée pour les besoins personnels d'alimentation et d'hygiène et autres utilisations moins essentielles comme le lavage de biens et l'arrosage. La consommation domestique moyenne est rapportée au nombre d'habitants, elle est alors exprimée en l/j/hab. D'autre part, elle évolue en fonction du temps en liaison avec l'évolution du niveau de vie. Les besoins domestiques d'une agglomération sont estimés sur la base :

- Des données statistiques qui concernent la consommation moyenne et son évolution annuelle ainsi que le nombre total d'habitants et le taux annuel d'accroissement de la

population. Ceci n'est possible que pour une agglomération qui est déjà alimentée en eau potable.

- En comparaison avec d'autres agglomérations qui sont jugées comparables, surtout en ce qui concerne le niveau de vie et le climat pour lesquelles les données statistiques sont disponibles. Une petite enquête permet alors de connaître le nombre d'habitants.

Dans ce contexte on définit :

- Dotation de la population branché = consommation de la population branchée/population branché. On peut admettre une dotation de 40 à 65 l/j/hab dans le milieu rural et 80 à 180 l/j/hab en milieu urbain.
- Dotation de la population non branchée = consommation des bornes fontaines/population non branchée. On peut admettre une dotation de 20 à 40 l/j/hab.

3.7.2 Besoins industriels

Pour la plupart des industries, l'eau est un facteur de production. Elle peut être utilisée comme matière première et être incorporée au produit fini ou intervenir comme auxiliaire au cours de processus de fabrication. Les utilisations industrielles de l'eau sont extrêmement diversifiées et dépendent du type d'industrie et des procédés de fabrication utilisés. En général, cette consommation est difficile à évaluer car il existe une grande variation de consommation selon le type d'industrie. Les entreprises du secteur agroalimentaire, par exemple, sont considérées comme de grosses consommatrices d'eau. Parfois, lorsque la demande en eau de certains industries, par exemples pour les pâtes et papiers, sont trop importantes, la production d'eau pour le procédé industriel est prise en charge par l'industrie elle-même (puits, forages...). En général, on ne tient compte que des besoins des petites industries, qui consomment de l'eau potable et branchées sur le réseau de la ville. Les grandes industries sont généralement situées dans des zones industrielles isolées de la ville et alimentées par des réseaux indépendants.

3.7.3 Besoins collectifs

Cet usage englobe la consommation des administrations, des établissements d'enseignements et médicaux, des municipalités (bouches d'incendies, lavage des rues, fontaines,...)... Nous citons ci-dessous, quelques exemples des besoins publics :

- Nettoyage des rues et arrosage des jardins : 3 à 5 l/j/m².
- Hôpitaux : 300 à 600 l/j/lit.
- Administration : 100 à 200 l/j/employé.
- Ecole primaire : 10 à 20 l/j/élève.
- Lycée : 20 à 30 l/j/unité.
- Mosquée : 5 à 10 m³/j/unité.

3.7.4 Besoins touristiques

Il existe une différence de consommation entre les différentes catégories d'équipements touristiques :

- Grands hôtels : 500 à 700 l/j/lit.
- Hôtels moyens : 300 l/j/lit.

3.8 Evaluation des besoins globaux

Pour évaluer avec précision les besoins en eau potable d'une agglomération quelconque, un recensement précis et complet de l'ensemble des équipements socio-économiques qui caractérisent l'agglomération est nécessaire. Ce recensement est complété par une étude qui porte sur :

- Les données démographiques et urbanistiques (population, taux d'accroissement, plan d'aménagement de la zone, type d'habitat,...).
- Les données économiques (agriculture, élevage, commerce, industrie, infrastructure existantes,...).
- Les équipements socio-économiques (enseignement, santé, équipement sportifs, services administratifs,...)

La consommation totale $C(n)$ relative à l'année « n » d'une agglomération peut être évaluée en connaissant :

- Le taux de branchement (%)
- La population totale.
- La dotation de la population branchée
- La dotation de la population non branchée.
- La consommation collective.
- La consommation industrielle.

- La consommation touristique.
- La consommation des divers.

3.9 Estimation de la consommation en eau

Une fois les besoins unitaires (dotations) par usage sont évalués, le calcul des besoins globaux actuels et leur répartition dans l'espace sera fait sur la base du plan d'aménagement et de la répartition de la population actuelle entre les différents tissus urbains. Or, les besoins et le nombre des usagers augmentent dans le temps alors que la durée de vie d'un réseau d'AEP est de l'ordre de 40 ans pour les canalisations et de 25 ans pour les pièces spéciales (raccords, joints, coudes) et la robinetterie. Si on dimensionne un réseau d'AEP pour les besoins actuels, il sera saturé après quelques années de mise en service, alors il faut le dimensionner pour un futur proche ou lointain. Avant de projeter un réseau d'AEP, on est amené à étudier l'évolution de la population et d'analyser le développement urbain et socio-économique pour pouvoir finalement effectuer un choix en matière de satisfaction des besoins à court, moyen et long terme.

3.9.1 La consommation domestique

3.9.1.1 Débit moyen journalier

La consommation journalière moyenne totale (Q_{moyj}) du projet de toute agglomération, est alors déterminée par [51] :

$$Q_{moyj} = P_f * N / 1000 \quad (3.2)$$

Avec :

Q_{moyj} : Débit moyen journalier (en m^3/j).

P_f : Population à l'horizon de calcul.

N : dotation journalière, c'est la consommation moyenne journalière par habitant.

La dotation est de 180 l/j/hab.

Le tableau 3.4 explique la consommation moyenne journalière actuelle (année 2017) et future (année 2025) :

Horizon	Nombre d'habitants	Dotation (l/j/hab)	Consommation Moyenne journalière (m^3 /j)
2017	44339	180	7981,02
2025	49555	180	8919,9

Tableau 3.4 Consommation moyenne journalière.

Remarque : on raison des pertes et des fuites d'eau dans le réseau dues au raccordement et accidents, la consommation journalière est majorée de 20% pour donner les consommations à différents horizons donc, on obtient le tableau 3.5 le suivant :

Besoins domestique	Consommation (m ³ /j)	Majoration 20%	Consommation après majoration (m ³ /j)
Horizon 2017	7981,02	1596,20	9577,22
Horizon 2025	8919,9	1783,98	10703,88

Tableau 3.5 Consommation journalière après majoration.

3.9.1.2 Débit maximal journalier

Les dimensions des ouvrages et des installations, les nombres et puissances des pompes, la capacité des réservoirs, la hauteur et la capacité des châteaux d'eau, les diamètres des tuyaux sont déterminés selon la quantité d'eau à livrer et le régime de leur fonctionnement [55].

Le régime de la consommation d'eau dépend du confort des bâtiments, du programme de travail des entreprises et des établissements [56] et varie avec les saisons de l'année, des jours de la semaine et des horaires.

Actuellement, les régimes de la consommation d'eau pour les agglomérations sont élaborés en fonction du nombre d'habitants et pour les différents établissements en fonction de leur type. Avec cela, l'expérience du travail des systèmes de distribution d'eau en cours est prise en compte. Le coefficient de variation de la consommation journalière (K_{jmax}) permet de déterminer la valeur maximale de débit journalier domestique [51]. Le débit maximal journalier est donné par la relation suivante :

$$Q_{maxj} = Q_{moyj} * K_{maxj} \quad (3.3)$$

Avec :

Q_{maxj} : Débit maximal journalier (volume consommé pendant la journée la plus chargée de l'année, généralement enregistré en Juillet ou en Août, ou bien pendant l'AID EL KEBIR).

Q_{moyj} : somme des besoins journaliers.

K_{maxj} : coefficient de variation journalière maximale (ou facteur de pointe journalier).

La valeur de ce facteur est déterminée à partir des statistiques sur la variation journalière de la consommation, sur 365 jours de l'année, donc c'est le rapport du volume moyen des trois journées successives les plus chargées de l'année sur le volume moyen annuel.

Ce coefficient varie de 1,3 à 1,9 selon le climat et les activités estivales de l'agglomération.

On prend alors $K_{\max j} = 1,6$. Le tableau 3.6 illustre le débit maximal journalier de l'année 2017 et de l'année projetée.

Année	2017	2025
Débit maximal journalier $Q_{\max j}$ (m ³ /j)	15323,55	17126,2

Tableau 3.6 Débit maximal journalier.

3.9.1.3 Débit moyen horaire

Le débit moyen horaire est donné par la formule suivante :

$$Q_{\text{moyh}} = Q_{\text{maxj}} / 24 \quad (3.4)$$

Avec :

Q_{moyh} : débit moyen horaire en m³/h.

Q_{maxj} : débit maximum journalier en m³/j.

Le débit moyen horaire de l'année 2017 et de l'année projetée est présenté dans le tableau 3.7 le suivant :

Année	2017	2025
Débit moyen horaire Q_{moyh} (m ³ /h)	638,48	713,59

Tableau 3.7 Débit moyen horaire.

3.9.1.4 Débit maximal horaire

Le système de distribution doit assurer en tout temps l'alimentation des usagers, sachant que la demande varie en fonction des saisons, des jours, du temps, ...

Les ouvrages de distribution d'eau (réseaux, réservoirs, ...) doivent être dimensionnés pour fournir la demande horaire maximale (pointe horaire), de la journée de pointe, de l'année du projet. Ce débit correspond à un débit de consommation pendant l'heure la plus chargée, il est donné par la formule suivante :

$$Q_{\text{maxh}} = Q_{\text{moyh}} * K_{\text{maxh}} \quad (3.5)$$

Où : Q_{maxh} : est le volume maximal horaire consommé au cours de la journée la plus chargée de l'année.

Q_{moyh} : est la consommation horaire moyenne pendant la même journée.

K_{maxh} : est le coefficient de variation horaire maximale (ou facteur de pointe horaire appelé aussi coefficient de pointe horaire). Donc c'est le rapport du volume moyen de l'heure la plus chargée d'une journée par le volume moyen de cette journée.

L'analyse de l'inégalité de la consommation d'eau permet de déterminer le coefficient de variation de la consommation d'eau (K_{maxh}) par la relation suivante [43] :

$$K_{maxh} = \alpha_{max} * B_{max} \quad (3.6)$$

Avec :

α_{max} : coefficient tenant compte du niveau de confort et des équipements de l'agglomération qui est compris entre 1,2 et 1,6 (nous prenons $\alpha_{max}=1,5$).

B_{max} : coefficient tenant compte du nombre d'habitant de l'agglomération, qui est représenté dans le tableau 3.8 suivant [43] :

Nombre d'habitants par 1000	1	1,5	2,5	4	6	20	50	100	300	>1Mi
B_{max}	2	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,15	1,05	1

Tableau 3.8 Les différentes valeurs de B_{max} en fonction de nombre de population.

D'après les données du tableau 3.8, pour une population de 44339 habitants (année 2017) et de 49555 pour l'année de projection 2025 on a :

$B_{max} = 1,2$ donc :

$K_{maxh} = 1,5 * 1,2 = 1,8$.

On obtient alors :

Année	2017	2025
Débit maximal horaire Q_{maxh} (m ³ /h)	1149,26	1284,46

Tableau 3.9 Débit moyen horaire.

3.9.1.5 *Besoin global de la commune d'El Hadjar*

La commune d'El Hadjar est une grande agglomération qui s'étend sur plusieurs kilomètres carrés. Elle englobe des cités attenantes en pleine expansion. Ainsi que des édifices publics, scolaire, sanitaire, sportifs, administratifs qui demandent un besoin vital en eau potable. Aussi, se basant sur une étude développée dans le cadre d'une thèse [76], les besoins exprimés par les différents secteurs sont représentés selon le tableau récapitulatif suivant :

Désignation	domestique	scolaire	sportif	sanitaire	touristique	administrative	public	commercial	total
Besoins (m ³ /h)	1149,26	2,97	1,73	0,33	1,79	6,24	4,95	5,87	1173,14

Tableau 3.10 Tableau récapitulatif des besoins.

D'où, les besoins totaux en eau de l'agglomération sont : $Q_{total} = 1173,14 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.9.1.5 La consommation avec le coefficient de variation horaire

Le débit horaire d'une agglomération est variable tout au long du jour selon l'importance de cette dernière. Cette variation est déterminée en fonction du facteur de variation de débit qui est aussi appelé coefficient de variation horaire (kh) [43], (voir le tableau 3.11 ci-dessous).

Heures Du jour	Consommation par les agglomérations avec le coefficient de variation de débit horaire										
	1,2	1,25	1,30	1,35	1,4	1,45	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0
0-1	3,50	3,35	3,20	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00	0,90	0,85	0,75
1-2	3,15	3,25	3,25	3,20	2,65	2,10	1,50	1,00	0,90	0,85	0,75
2-3	3,45	3,30	2,90	2,50	2,20	1,85	1,50	1,00	0,90	0,85	1,00
3-4	3,40	3,20	2,90	2,60	2,25	1,90	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00
4-5	3,40	3,25	3,35	3,50	3,20	2,85	2,50	2,00	1,35	2,70	3,00
5-6	3,55	3,40	3,75	4,10	3,90	3,70	3,50	3,00	3,85	4,70	5,50
6-7	4,00	3,85	4,15	4,50	4,50	4,50	4,50	5,00	5,20	5,35	5,50
7-8	4,40	4,45	4,65	4,90	5,10	5,30	5,50	6,50	6,20	5,85	5,50
8-9	5,00	5,20	5,05	4,90	5,35	5,80	5,50	6,50	5,50	4,50	3,50
9-10	4,80	5,05	5,00	5,60	5,85	5,05	6,25	5,50	5,85	4,20	3,50
10-11	4,70	4,85	4,85	4,90	5,35	5,80	6,25	4,50	5,00	5,50	6,00
11-12	4,55	4,50	4,50	4,70	5,25	5,70	6,25	5,50	6,50	7,50	8,50
12-13	4,55	4,60	4,50	4,40	4,60	4,80	6,25	7,00	7,50	7,80	8,50
13-14	4,45	4,55	4,30	4,10	4,40	4,70	5,00	7,00	6,70	6,35	6,00
14-15	4,60	4,75	4,40	4,10	4,60	5,05	5,00	5,50	5,35	5,20	5,00
15-16	4,60	4,70	4,55	4,40	4,60	5,30	5,50	4,50	4,65	4,80	5,00
16-17	4,60	4,65	4,50	4,30	4,90	5,45	6,00	5,00	4,50	4,00	3,50
17-18	4,30	4,35	4,25	4,10	4,60	5,05	6,00	6,50	5,50	4,50	3,50
18-19	4,35	4,40	4,45	4,50	4,70	4,85	5,50	6,50	6,30	5,20	5,00
19-20	4,25	4,30	4,40	4,50	4,50	4,50	5,00	5,00	5,35	5,70	6,00
20-21	4,25	4,30	4,40	4,50	4,40	4,20	4,50	4,50	5,00	5,50	6,00
21-22	4,15	4,20	4,50	4,80	4,20	3,60	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00
22-23	3,90	3,75	4,20	4,60	3,70	2,85	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
23-24	3,80	3,70	3,50	3,30	2,70	2,10	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00
total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 3.11 Coefficient de variation horaire en fonction des horaires du jour.

3.9.1.6 Variation des débits horaires de la ville d'El Hadjar

La variation des débits horaires (tableau 3.11) est exprimée en pourcentage (%) par rapport au débit maximal journalier de l'agglomération.

Pour notre cas on choisie la colonne de $K_{maxh} = 1,8$ habitants (pour l'horizon 2017 et 2025). La variation des débits horaires pour l'année 2017 et 2025 est montrée dans le tableau 3.12 et la figure 3.6 les suivants :

Heures (h)	Régime de consommation (%)	Année 2017	Année 2025
		Consommation totale $Q_{\max} = 15323,22 \text{ m}^3/\text{j}$	Consommation totale $Q_{\max} = 17126,2 \text{ m}^3/\text{j}$
		Volume (m^3)	Volume (m^3)
0-1	0,90	137,90	154,13
1-2	0,90	137,90	154,13
2-3	0,90	137,90	154,13
3-4	1,00	153,23	171,26
4-5	1,35	206,86	231,20
5-6	3,85	589,94	659,35
6-7	5,20	796,80	890,56
7-8	6,20	950,03	1061,82
8-9	5,50	842,77	941,94
9-10	5,85	896,40	1001,88
10-11	5,00	766,16	856,31
11-12	6,50	996,00	1113,20
12-13	7,50	1149,24	1284,46
13-14	6,70	1026,65	1147,45
14-15	5,35	819,79	916,25
15-16	4,65	712,52	796,36
16-17	4,50	689,54	770,67
17-18	5,50	842,77	941,94
18-19	6,30	965,36	1078,95
19-20	5,35	819,79	916,25
20-21	5,00	766,16	856,31
21-22	3,00	459,69	513,78
22-23	2,00	306,46	342,52
23-24	1,00	153,23	171,26

Tableau 3.12 Variation des débits horaires de consommation de la ville d'El Hadjar.

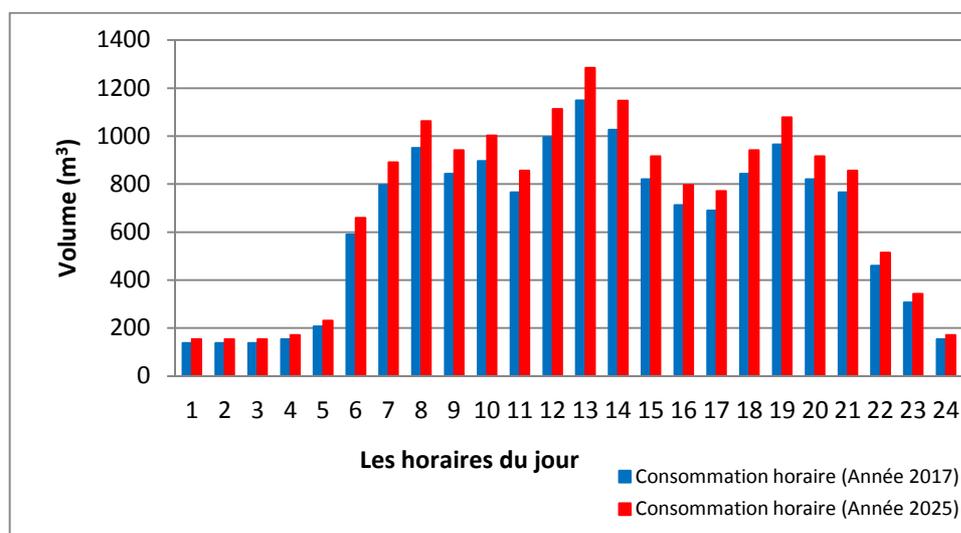


Figure 3.6 Diagramme de la variation de la consommation horaire.

Le tableau 3.13 suivant montre la variation journalière de niveau d'eau dans le réservoir principale de notre cas d'étude en fonction du coefficient de variation horaire (régime de consommation).

Heures	Régime de consommation	Régime de fonctionnement	Entrée Réservoir +	Sortie Réservoir -
(h)	(%)	(%)	(%)	(%)
0-1	0,90	4,16	3,26	
1-2	0,90	4,16	3,26	
2-3	0,90	4,16	3,26	
3-4	1,00	4,16	3,18	
4-5	1,35	4,16	2,81	
5-6	3,85	4,16	0,31	
6-7	5,20	4,16		1,02
7-8	6,20	4,16		2,04
8-9	5,50	4,16		1,34
9-10	5,85	4,16		1,69
10-11	5,00	4,16		0,84
11-12	6,50	4,16		2,34
12-13	7,50	4,16		3,34
13-14	6,70	4,16		2,54
14-15	5,35	4,16		1,19
15-16	4,65	4,16		0,49
16-17	4,50	4,16		0,34
17-18	5,50	4,16		1,34
18-19	6,30	4,16		2,14
19-20	5,35	4,16		1,19
20-21	5,00	4,16		0,84
21-22	3,00	4,16	1,16	
22-23	2,00	4,16	2,16	
23-24	1,00	4,16	3,16	

Tableau 3.13 Variation journalière de niveau d'eau dans le réservoir principal.

3.10 Modélisation du réseau d'AEP de la ville El Hadjar

La ville El Hadjar est alimentée par la station de traitement de "Chaïba". L'évolution de la population au cours des années ne cesse d'augmenter, ce qui a conduit à une augmentation de la demande qui devient de plus en plus difficile à satisfaire. Dans ces conditions, la modélisation du réseau d'eau permettra de :

- Simuler le fonctionnement hydraulique du réseau pour déterminer la ou les meilleures solutions pour améliorer la desserte des abonnées.
- Proposer des renforcements pour alimenter toutes les zones du réseau.

3.10.1 Présentation générale de la modélisation

Un modèle hydraulique est une représentation mathématique du réseau de distribution permettant la simulation de son fonctionnement hydraulique [56]. Il regroupe les différents éléments constitutifs d'un réseau : les conduites, certaines vannes et appareils de régulation, les pompes, les réservoirs et les interconnexions.

Le modèle est basé sur une représentation schématique du réseau sous forme de nœuds et de tronçons :

- Un tronçon correspond à un élément de conduite de caractéristiques homogènes. Il a deux nœuds d'extrémité ;
- Un nœud pouvant joindre plusieurs tronçons correspond souvent à une ou plusieurs connexions de conduites. La consommation est généralement répartie géographiquement aux différents nœuds par rapport à les longueurs de tronçons.

3.10.2 La base de données

Elle s'articule autour de 2 types de données :

- Les données statiques décrivant :
 - le réseau : les conduites (Longueur, Diamètre, Rugosité, ...), altimétrie des nœuds ;
 - les ouvrages : pompes, réservoirs, appareils de régulation ;
 - la répartition géographique de la consommation moyenne annuelle des nœuds.

Ces données constituent le modèle physique.

- Les données dynamiques comprenant :
 - les profils journaliers de consommation des différents usagers considérés (domestiques, industriels, ...)
 - les règles de contrôle et d'asservissement des pompes, des réservoirs, des appareils de régulation,...

3.10.3 Les principales étapes de la modélisation

La construction d'un modèle de réseau se décompose suivant les étapes successives présentées ci-dessous [56] :

- **Choix du réseau à modéliser** : Etape préalable indispensable permettant de décider du niveau de détail du modèle en fonction des objectifs visés par la modélisation.
- **Constitution de la base de données** : Collecte, Synthèse des données sur les conduites, les ouvrages, la topographie, la consommation. Mise au format du logiciel et saisie.
- **Calage du modèle** : Ajustement des paramètres du modèle (rugosité des conduites, répartition spatiale de la demande, profils de demande, pertes de charges singulières) afin d'obtenir le meilleur calage pour une configuration de réseau.
- **Utilisations du modèle** : Une fois le modèle calé, il est représentatif du fonctionnement actuel du réseau. Il sera alors possible de simuler différentes configurations de réseau et de consommations correspondant à des optimisations de fonctionnement, à des situations de crise ou aux développements futurs du réseau. Un modèle hydraulique est avant tout un outil d'aide à l'analyse.

3.10.4 Présentation du logiciel de modélisation utilisé

Le logiciel *EPANET* est un outil de simulation du comportement hydraulique dans les réseaux d'eau potable. Un réseau d'eau potable sur un logiciel se définit par des tuyaux (tronçons sur le logiciel), des nœuds (intersection de deux tuyaux et extrémité d'une antenne) mais également d'autres organes (réservoirs, pompes, clapets, différents types de vannes,...). [56]

EPANET est développé par l'agence en charge de l'environnement aux Etats Unis (U.S. Environmental Protection Agency – EPA). Il permet d'effectuer des calculs nombreux et complexes à partir d'un modèle établi grâce à une bonne connaissance du réseau.

Pour modéliser notre système de distribution d'eau, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Epanet peut afficher un fond d'écran derrière le schéma du réseau, le fond d'écran peut être une carte routière, un plan de services publics, une carte topographique, un plan d'aménagement du territoire ou n'importe quel autre dessin. Il doit être un méta fichier amélioré ou un *bitmap* créé hors EPANET. Ainsi, une fois importé il ne peut être modifié.

Pour l'ajout des tuyaux au réseau, nous avons procédé comme suit:

- Couper le schéma AUTOCAD du réseau et l'enregistrer sous format bitmap.
- Ouvrir Epanet ensuite sélectionner affichage → Fond d'écran → Importer et choisir le fichier enregistré.
- Les éléments du réseau (nœuds, conduites, vannes etc.) sont ajoutés directement sur le plan constituant le fond d'écran.

3.10.4.1 Données physiques

Le travail de modélisation consiste à décrire le réseau sous une forme simplifiée, par des tronçons de canalisation et des nœuds. Les nœuds représentent les points de consommation, les ouvrages du réseau (réservoirs, unités de production, de surpression...). Les tronçons de canalisation étant définis entre deux nœuds. Ont été représentés au total :

- 631 nœuds ;
- 598 tronçons de canalisation;
- 02 bâches à eau
- 04 réservoirs (la station de traitement de Chaïba est représentée par un réservoir).

3.10.4.2 Données à saisir

• les nœuds

Les données introduites pour chaque nœud sont l'altitude et la demande de base (voir l'annexe tableau C.2).

• les conduites

La longueur en mètres, le diamètre en millimètres et la rugosité sont les données introduites pour chaque conduite (voir l'annexe tableau C.1).

Nous donnerons un coefficient de rugosité de 1 millimètre à tous les tronçons.

• La bache à eau

La bache est un réservoir circulaire et semi enterré à grande capacité.

• Les réservoirs

Les réservoirs sont constitués du réservoir de tête et des réservoirs d'équilibre. Les données à insérer sont la côte du radier, le niveau initial, le niveau minimal, le niveau maximal et le rayon (forme circulaire).

3.10.4.4 Profil de consommation

La courbe de modulation est l'outil qui permet au logiciel Epanet de calculer les variations journalières de pression et de débit sur l'ensemble du réseau.

L'intérêt d'une simulation de longue durée est de rendre notre étude plus réaliste et d'observer le comportement du système sur une longue durée. Pour cela il faut donc créer une courbe de modulation. À chaque intervalle de temps, nous allons attribuer une valeur multiplicative (Figure 3.7).

Le débit horaire d'une agglomération est variable tout au long du jour selon l'importance de cette dernière. Le profil de consommation est déterminé en fonction du facteur de variation de débit (voir le tableau 3.10).

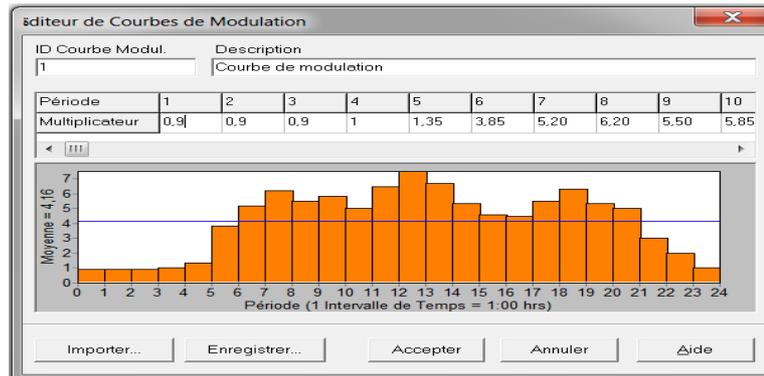


Figure 3.7 Profils de consommation.

La figure 3.8 montre la structure du réseau d'AEP de la ville El Hadjar sous logiciel Epanet :

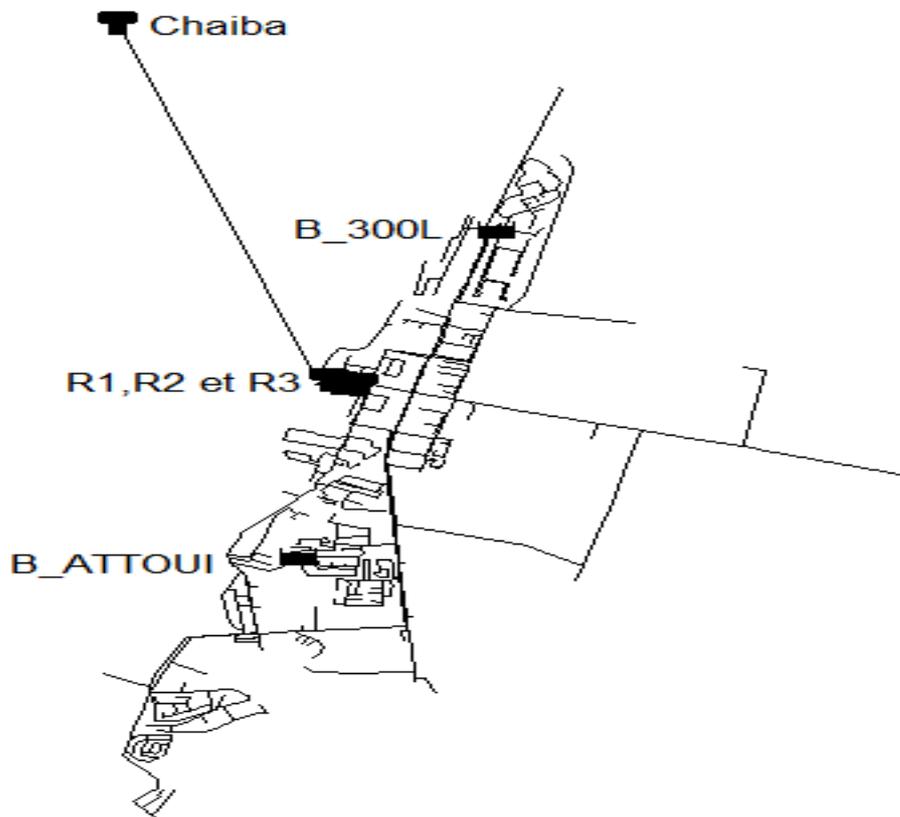


Figure 3.8 Le modèle du réseau étudié.

3.10.5 Simulation hydraulique

Après avoir introduit toutes les données appropriées aux nœuds et aux tronçons, l'étape suivante est la validation du modèle hydraulique (voir figure 3.9) ; si un message d'erreur s'affiche donc il faut revoir les données d'entrée et s'en assurer, sinon la simulation sera révélée réussie et il ne reste que de changer les diamètres des tuyaux préalablement insérés pour ceux qui sont en dehors de la fourchette des vitesses et pressions.

Pour chaque nœud on aura les données concernant la charge totale et la pression en mètre (voir l'annexe : tableau C.2), tandis que pour les conduites les résultats de la simulation porteront sur la vitesse en mètre par seconde (m/s) et le débit en litre/seconde (l/s) sont présentées dans l'annexe tableau C.1.

3.10.6 Résultats de la simulation

Les résultats des calculs effectués tout au long de la journée permettent d'observer une forte pression générale (supérieure à 5 bars) sur le réseau, visible sur le schéma de la figure 3.9 ci-dessous sur les nœuds du modèle en rouge dans le secteur de trois cents logements. Le confort d'une partie des abonnés en matière de pression (entre 2 et 5 bars) dans la configuration actuelle du réseau, est observé sur le centre de la ville par la couleur bleue claire dans les nœuds. Des pressions inférieures à 2 bars sont visibles sur le réseau surtout au niveau du secteur Attoui avec les nœuds du réseau en couleur bleue foncé.

Le modèle montre que les vitesses simulées sont globalement non satisfaisantes (< 1 m/s). La vitesse reste en effet inférieure à 0,5 m/s sur l'ensemble du réseau de distribution. Une plus forte vitesse est visible sur la conduite principale d'adduction du réseau est représenté par la couleur rouge dans la conduite principale.

Deux réseaux ont été construits sous Epanet (figure 3.9 et figure 3.12) :

- Le premier réseau représente l'état actuel.
- Le second représente le réseau avec le nouveau château d'eau (Figure 3.12).

3.10.6.1 Le premier réseau (sans le nouveau château d'eau)

Dans un premier temps, nous présentons une situation sommaire montrant une simulation réussie (figure 3.9), qui veut dire que le réseau est complet et bien équilibré.

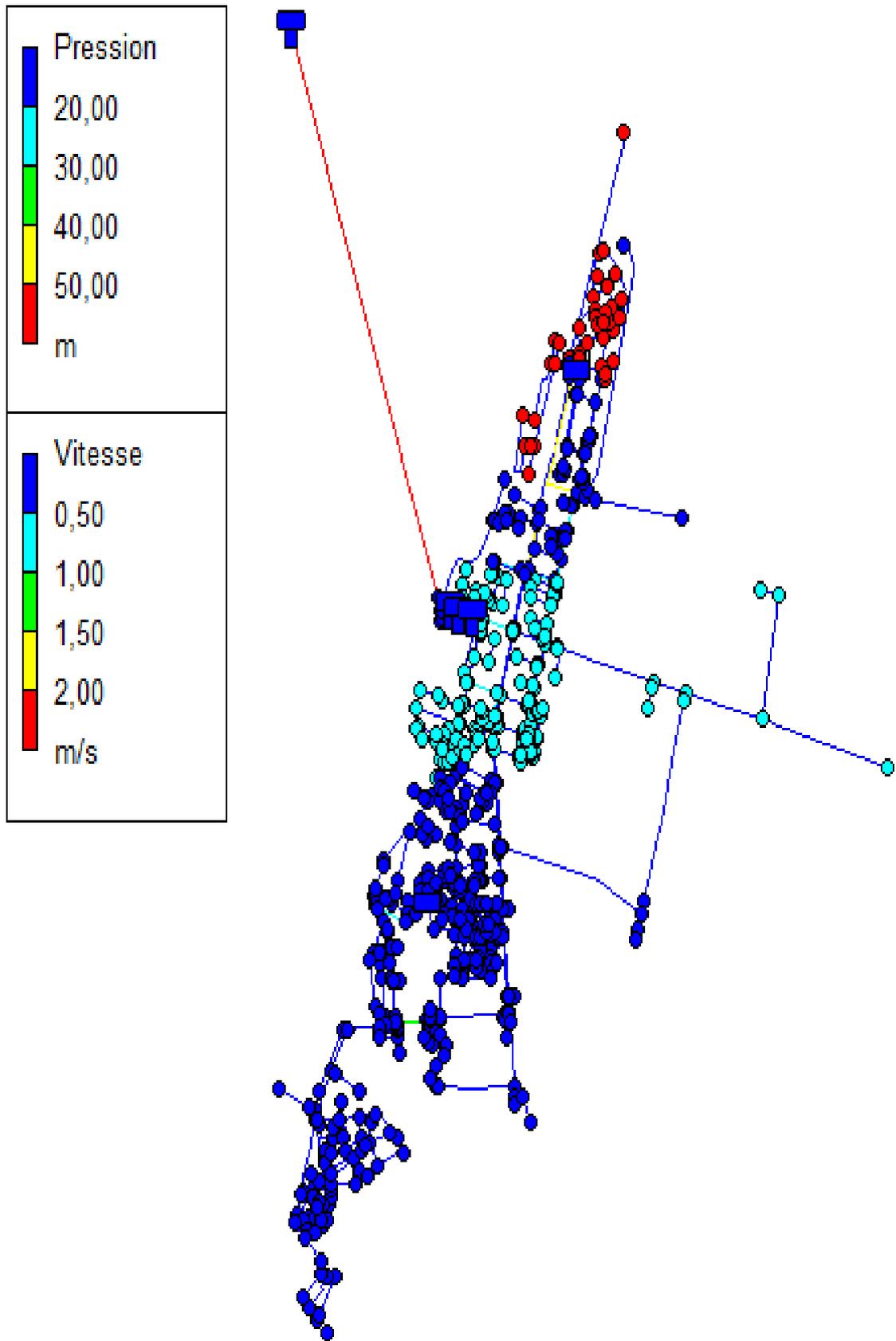


Figure 3.9 Réseau de distribution sans le nouveau château d'eau.

Essentiellement dans les systèmes d'alimentation en eaux potable on s'intéresse aux vitesses dans les conduites et les pressions sur les nœuds. La répartition des vitesses est représentée dans la figure 3.10 suivante :

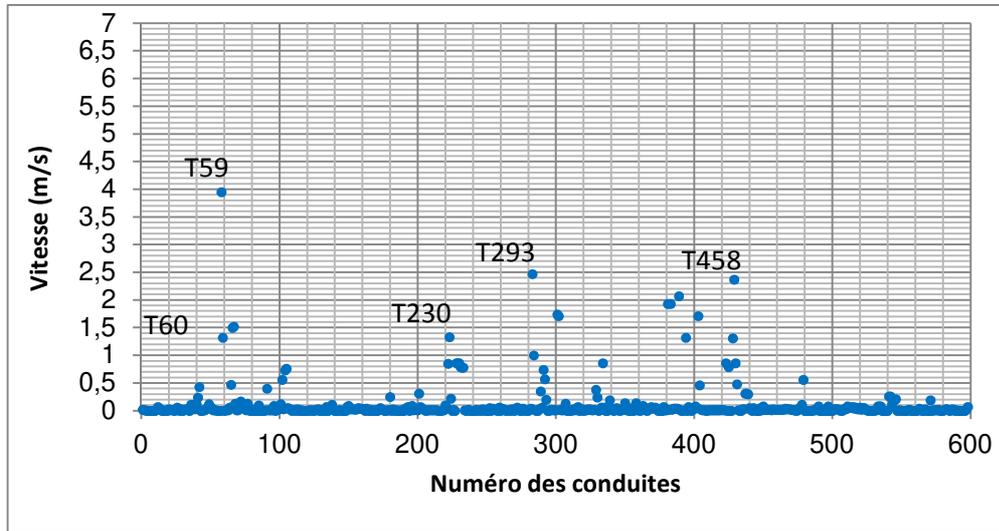


Figure 3.10 Répartition des vitesses dans les conduites sans le nouveau château d'eau.

Rappelons que pour un bon fonctionnement hydraulique, les vitesses doivent être comprises dans un réseau de distribution entre 0,5 et 1,5 m/s. Selon la figure 3.9, un grand nombre de tronçons ne vérifié pas cette condition (90% sont vitesse < 0,5).

En ce qui concerne les pressions sur les nœuds, pour une bonne alimentation des consommateurs, elles doivent être comprises entre 2 et 10 bars. Il apparait bien clair d'après le graphe de la figure 3.11 que les valeurs de pressions sont faibles (< 2 bars = 20 mètre).

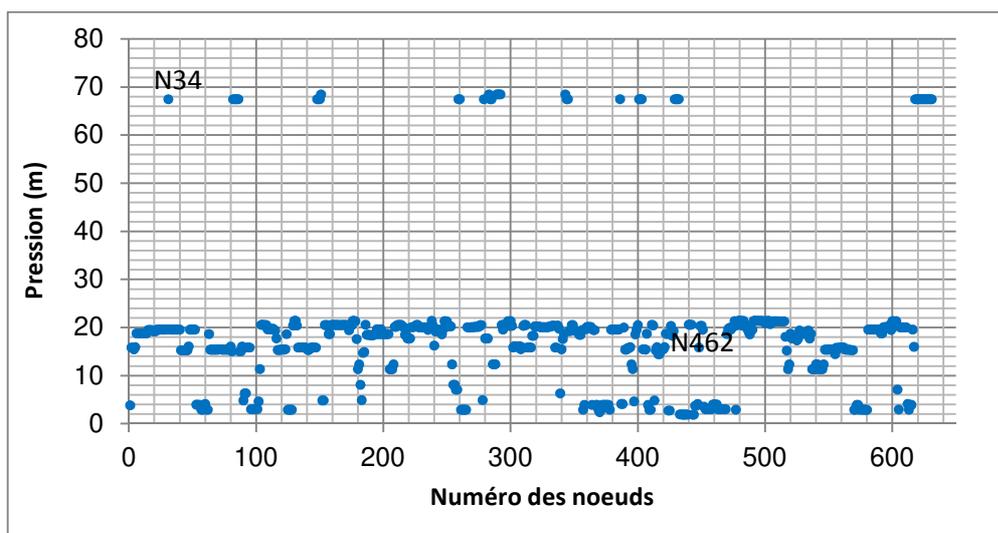


Figure 3.11 Répartition des pressions aux nœuds sans le nouveau château d'eau.

D'après ces résultats, le bon fonctionnement hydraulique du réseau d'alimentation n'est pas atteint. Cet état s'explique pour l'instant par un manque de pressions dû à l'éloignement d'une partie du réseau de la source d'alimentation, vu que le terrain d'El Hadjar est totalement plat et l'habitat très étalé. La proposition qui a été faite et qui est en cours de réalisation c'est la projection d'un nouveau château d'eau de capacité 1000 m³.

3.10.6.2 Le deuxième réseau (avec le nouveau château d'eau)

Dans le cas de la commune d'El Hadjar, l'adduction se fait directement à partir du réservoir 5000 m³ de la station de CHAIBA, par le biais d'une conduite d'adduction de long de 4,23 km, de diamètre 500mm en Fonte. Arrivée à El Hadjar, l'eau est stockée dans deux réservoirs R1 et R2 de 1000 m³ chacun, qui alimentent à leurs tours un château d'eau (R3) de 1000 m³. Selon la direction de l'hydraulique, un nouveau réservoir surélevé de capacité 1000 m³ avec une hauteur de 35 m est en cours de réalisation afin d'assurer une disponibilité d'eau à tous les consommateurs surtout le secteur Attoui par une conduite de diamètre 400 mm avec une alimentation gravitaire projetée. Donc, le système d'adduction d'El Hadjar est gravitaire (figure 3.12 ci-dessous). Dans cette partie, nous avons rajouté le nouveau château d'eau avec ses caractéristiques et nous avons effectué les modifications dans le réseau et refaisons les simulations.

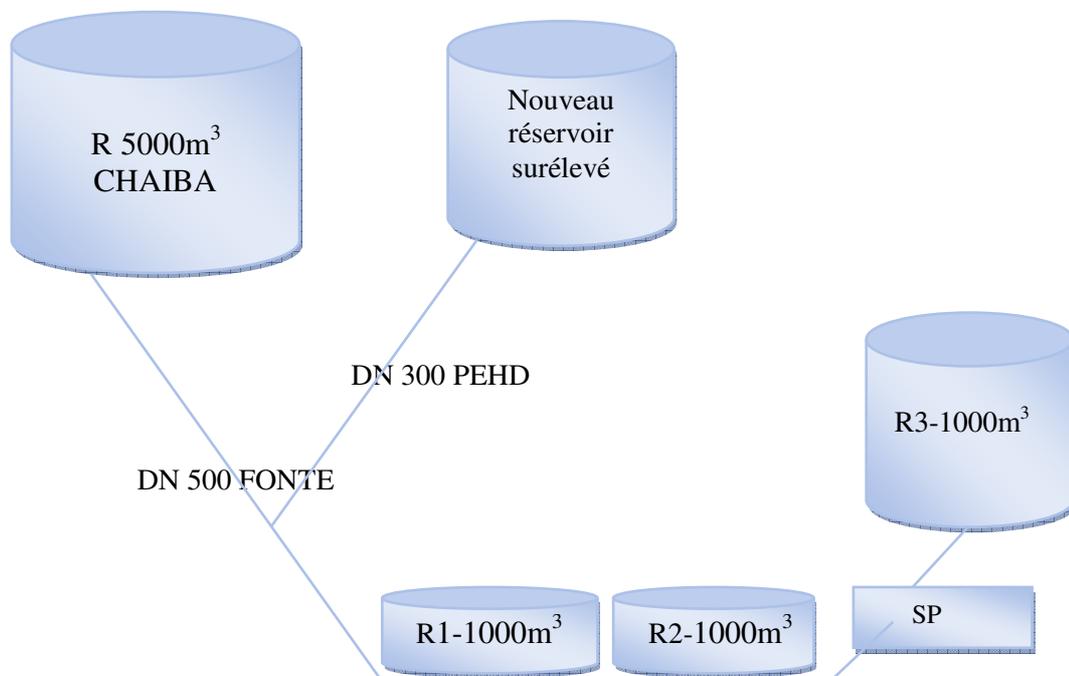


Figure 3.12 Schéma du système d'adduction d'El Hadjar.

Les deux graphes suivants (figure 3.13 et figure 3.14) représentent la répartition des pressions et des vitesses respectivement. Nous remarquons que les pressions sur la majorité des nœuds s'améliorent nettement (la majorité des nœuds sont à des valeurs de pression entre 2 et 10 bars). En ce qui concerne les vitesses dans les tronçons une légère amélioration se fait mais globalement elles restent hors valeurs recommandées.

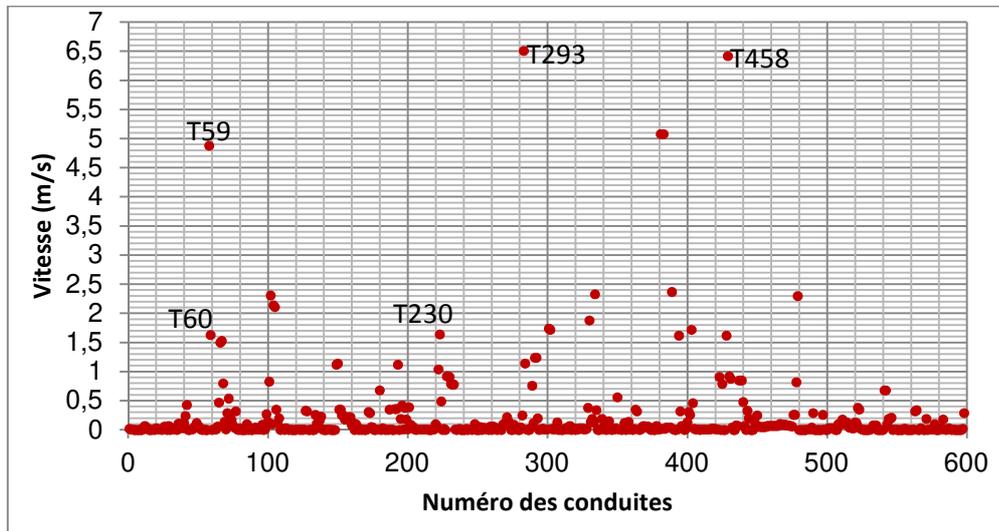


Figure 3.13 Répartition des vitesses dans les conduites avec le nouveau château d'eau.

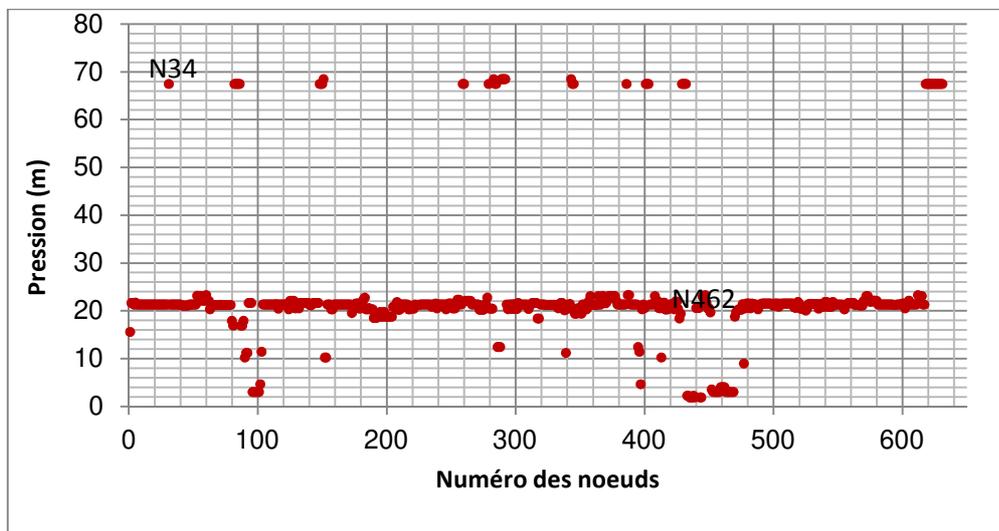


Figure 3.14 Répartition des pressions aux nœuds avec le nouveau château d'eau.

Les graphes 3.15 et 3.16 suivants illustrent le changement du résultat entre l'ancien et le nouveau réseau (les données numériques sont présentées dans l'annexe : tableau C.3 et C.4) :

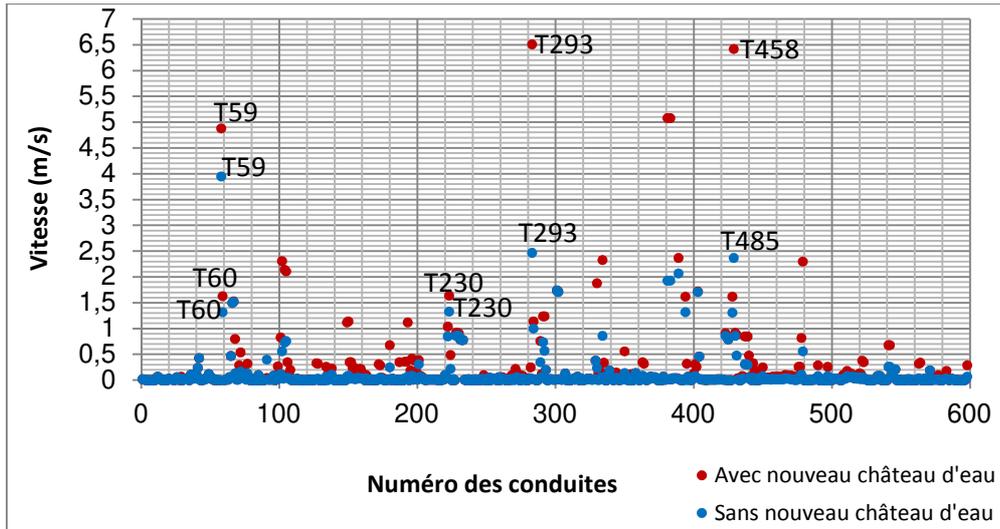


Figure 3.15 Récapitulatif comparatif des vitesses dans les conduites.

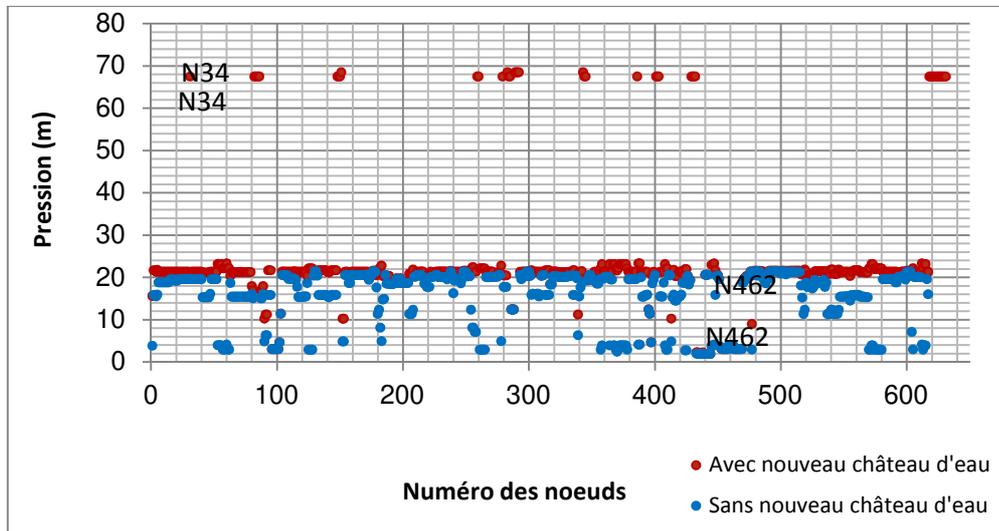


Figure 3.16 Récapitulatif comparatif des pressions aux nœuds.

D'après les figures 3.15 et 3.16, on remarque qu'il y a une amélioration de la vitesse au niveau des conduites et de la pression pour les nœuds du réseau avec le rajout d'un nouveau château d'eau qui se traduit par la bonne alimentation en eau aux différents consommateurs.

3.10.6.3 Analyse des résultats

Après l'analyse des résultats des deux simulations, nous nous sommes rendus compte que le réseau est réellement surdimensionné ce qui explique les faibles vitesses (inférieur à 0,5 m/s).

Les services exploitants pour faire desservir les abonnés recourent à de nombreuses manipulations et jeux de vannes lors de la distribution.

Pour améliorer le fonctionnement du réseau trois possibilités existent :

- Augmenter le stockage : cette option est difficile à réaliser et très coûteuse.
- Redimensionner le réseau pour réduire les diamètres : cette option aussi n'est pas viable car elle sera très coûteuse et irréalisable.
- La sectorisation du réseau : cette option est la plus plausible mais elle nécessite une étude approfondie vue l'architecture du réseau.

3.11 Conclusion

Une bonne gestion du réseau passe toujours par une bonne connaissance de ses infrastructures, de son fonctionnement hydraulique et un entretien de ce réseau. Sur le réseau « d'El Hadjar », le développement de la ville a entraîné une surconsommation nécessitant l'implantation d'un nouveau réservoir surélevé afin d'augmenter le volume de stockage et d'augmenter la hauteur de charge surtout au niveau des habitations élevées. Toutefois, il existe au niveau de certains tronçons des vitesses très faibles, ce qui explique l'existence d'un surdimensionnement du réseau. L'idéale aurait été avant de projeter le nouveau château de faire une analyse du fonctionnement et une étude de sectorisation. À la fin de ce chapitre, nous avons un modèle du réseau d'El Hadjar qu'il peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision.

CHAPITRE 4
AMELIORATION DE LA FIABILITE ET LA
DISPONIBILITE DU RESEAU D'AEP

Chapitre 4

Amélioration de la fiabilité et la disponibilité du réseau d'AEP

4.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est l'étude méthodologique d'un réseau d'AEP en cas de déficience. L'étude est entreprise sur un cas réel dont nous disposons des données suffisantes : cas de la ville d'El Hadjar qui constitue un réseau très complexe. L'analyse de ce problème est abordée avec un cas d'étude assez simple mais représentatif du mode de fonctionnement de l'ensemble du réseau. La zone d'étude en question concerne l'alimentation en eau potable du secteur trois cent logements, cité attenante de la ville d'El Hadjar.

Dans cette étude, on a montrée les outils de simulation à travers le calcul de l'indice de criticité hydraulique, une modélisation par diagramme de fiabilité : sans et avec redondance et par une modélisation spatiale pour localiser la portion du réseau le plus vulnérable.

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Modélisation hydraulique du cas d'étude

D'après le chapitre précédent, une modélisation du réseau d'El Hadjar a été réalisée à des fins de simulations hydrauliques. La figure 4.1, représente le schéma du réseau modélisé du secteur trois cent logements qui constitue le cas d'étude. Il comporte : 40 conduites, 46 nœuds de consommation, 3 réservoirs, 2 stations de pompage, une bache à eau et la station de traitement de Chaïba comme source principale.

Par ailleurs, un code de couleurs a été établi tant au niveau des pressions dans les nœuds qu'au niveau du débit dans les conduites. Il a pour utilité de positionner les valeurs des débits et pressions dans le réseau.

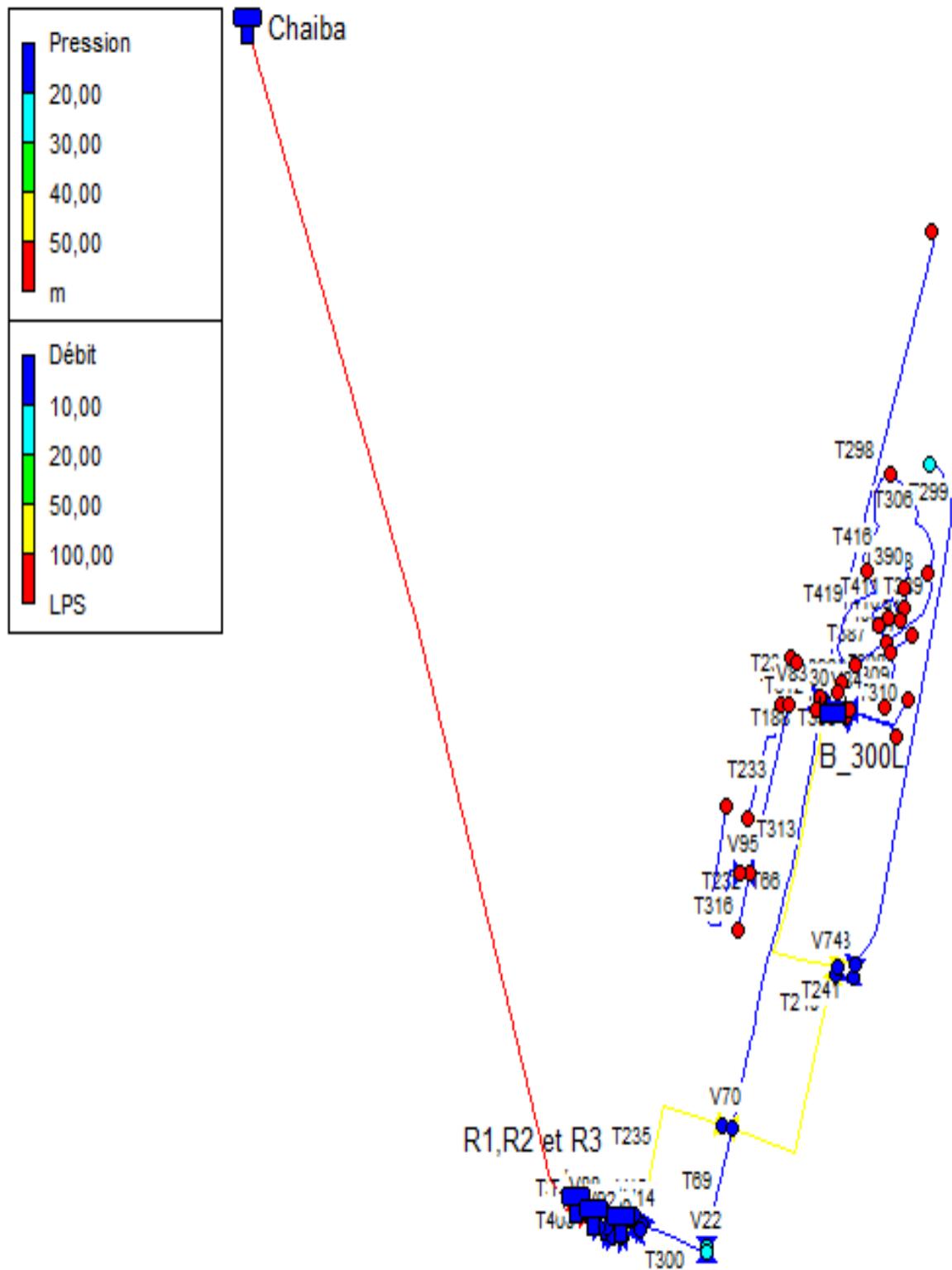


Figure 4.1 La modélisation hydraulique du réseau étudié.

4.2.2 Calcul d'indice de criticité hydraulique

L'indice de criticité hydraulique ICH est calculé par le rapport entre la quantité d'eau distribuée avant et après la survenue d'une défaillance sur une conduite donnée [57]. Le calcul des consommations au niveau des nœuds s'appuie sur les niveaux de pression aux nœuds. Deux niveaux sont identifiés : une pression minimale, à partir de laquelle une desserte en eau est possible mais en quantité proportionnelle à la demande et une pression désirée à partir de laquelle la desserte en eau correspond à la demande du nœud. Pour un niveau de pression inférieur à la pression désirée, la consommation est inférieure à la demande aux nœuds [13].

La première étape consiste à analyser le fonctionnement hydraulique du réseau à travers le calcul des pressions et des demandes aux niveaux des nœuds de consommation sous logiciel Epanet pour des plages horaires désirées. Une défaillance est injectée sur une conduite donnée (traduite par la fermeture de cette conduite) ce qui conduit au recalcul des pressions et des demandes [7].

La consommation au nœud sera en fonction de la comparaison des niveaux des pressions avant et après l'indisponibilité de la conduite.

- La consommation à un nœud donné sera nulle si la pression à ce nœud est inférieure à la pression minimale initialement définie.

$$\text{Consommation}_i = 0 \quad (1)$$

- Pour une pression comprise entre la pression minimale et la pression désirée, la consommation sera proportionnelle à la demande au nœud et aux pressions avant et après l'indisponibilité de la conduite telle que [7] :

$$\text{Consommation}_i = \text{Demande}_i \frac{\sqrt{P - P_{\text{inf}}}}{\sqrt{P_{\text{sup}} - P}} \quad (2)$$

- Pour une pression supérieure à P_{sup} , la demande au nœud est entièrement satisfaite, la consommation est dans ce cas la égale à la demande au nœud :

$$\text{Consommation}_i = \text{Demande}_i \quad (3)$$

Les valeurs de l'ICH sont comprises entre 0 et 1. Plus la valeur est proche de 1, plus la conduite est importante dans le réseau [7, 13]. Le calcul d'ICH permet de mesurer l'impact

d'une indisponibilité d'une conduite donnée j sur le fonctionnement du réseau. Il est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$ICH_j = \frac{\sum_{\text{Noeuds}_i} (\text{Demande}_i - \text{Consommation}_i)}{\sum_{\text{Noeuds}_i} \text{Demande}} \quad (2)$$

Avec : $j = \overline{1, p}$ $i = \overline{1, n}$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Noeuds : le numéro "i" du nœud de consommation du réseau.} \\ p : \text{nombre de conduites dans le réseau et } n : \text{nombre de nœuds dans le réseau.} \end{array} \right.$

Une valeur de l' ICH_j égale à 0.1 signifie que 10% du volume n'a pas été acheminé dans le réseau suite à la rupture de la conduite j . Cette considération faite sur les volumes d'eau non distribués suite à une défaillance, nous porte naturellement à attribuer à chaque conduite élaguée du réseau, un degré de criticité hydraulique. Ce critère constitue un élément clé pour le classement des conduites.

Cette partie de l'étude a été consacrée à la proposition d'indices permettant d'évaluer la fiabilité du réseau de distribution d'eau potable. Plusieurs considérations et hypothèses de calcul ont été émises à savoir : la non-simultanéité des défaillances sur les conduites ainsi qu'une estimation des consommations selon les niveaux de pressions aux nœuds.

La figure 4.2 ci-dessous représente une démarche de calcul de l'Indice de Criticité Hydraulique (ICH) de chaque conduite du réseau.

En surcouche à EPANET, une application Macro développée en Visual Basic : VBA Excel Visual Basic for Applications) calcule l'indice ICH. [76]

Cet outil est appelé "Fiab – Box" : Indice de fiabilité hydraulique.

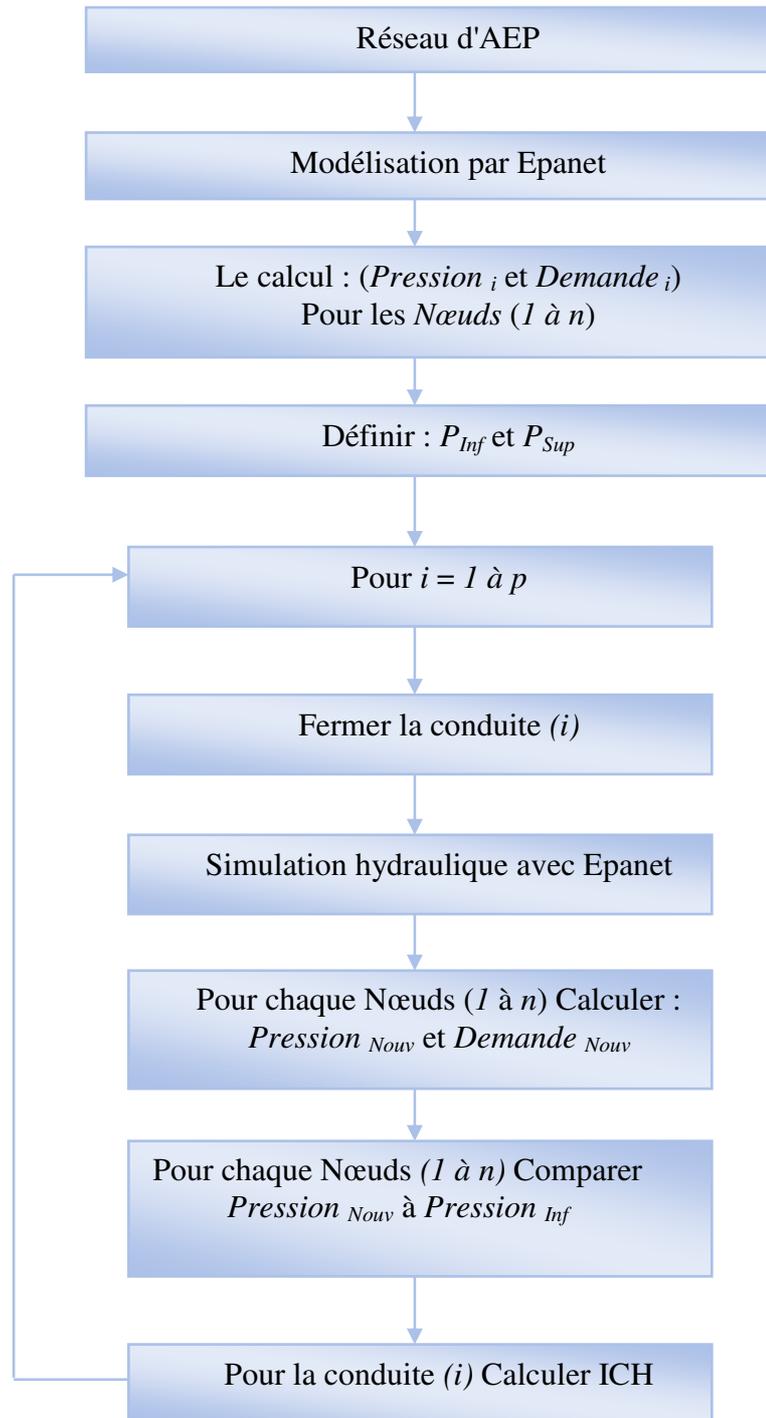


Figure 4.2 Calcul d'ICH.

4.2.3 Présentation de l'outil FIAB

L'outil logiciel choisi pour cette étude vise à proposer d'un indice spécifique aux conduites (Indice de Criticité Hydraulique (ICH)) et d'un indice spécifique aux nœuds (Indice de Déficience aux Nœuds (IDN)) afin d'évaluer la fiabilité du réseau.

L'application FIAB a été développée exclusivement sous un environnement VBA-Excel, qui est une implémentation de Microsoft Visual Basic qui est intégrée dans toutes les applications de Microsoft Office [7]. Les instructions permettant de lancer la simulation et de récupérer les différentes valeurs hydrauliques fournies par le logiciel Epanet. Il s'agit d'une bibliothèque de fonctions sous forme d'un fichier de type ".dll" (Dynamic Links Library ou bibliothèque de liens dynamiques).

L'outil FIAB permet de :

- calculer les indices de fiabilité ;
- afficher les caractéristiques du réseau ;
- suivre l'évolution des entités hydrauliques au cours du temps ;
- classer les conduites constituant le réseau selon leur importance hydraulique.

L'exécution de se fait en recourant ces tâches, à des boites de dialogue structurées et paramétrées.

4.2.4 Fonctionnement de l'outil FIAB

Le calcul des indices de fiabilité à l'aide de l'outil FIAB ne peut avoir lieu qu'après l'introduction de certains paramètres. Cela se fait après la lecture impérative d'un fichier de type "inp" qui constitue le réseau à étudier.

La lecture, le paramétrage et le calcul des indices du réseau sous FIAB se font en même temps grâce à une interface graphique. Il s'agit d'une boîte de dialogue conçue de sorte que l'utilisateur puisse avoir la possibilité de visualiser les propriétés du réseau. Ainsi, le paramétrage précédant effectué, le calcul des indices peut se faire plus aisément, sans avoir à recourir à d'autres manipulations sous Epanet. Une fois lu et paramétré, le réseau est prêt à la simulation sous FIAB afin d'évaluer sa fiabilité. En effet, plusieurs boutons de commande permettant de calculer les différents indices. Il est à noter que l'affichage des résultats se fait sur des feuilles de calcul sous Excel.

De cette manière, l'outil met à la disposition de l'utilisateur un panel d'indices qui lui permet de conclure sur la fiabilité du réseau et ses composantes.

4.2.4.1 L'interface graphique

La figure 4.3 ci-dessous illustre l'interface principale FIAB_Box de l'outil ainsi que les fonctionnalités qu'elle présente.

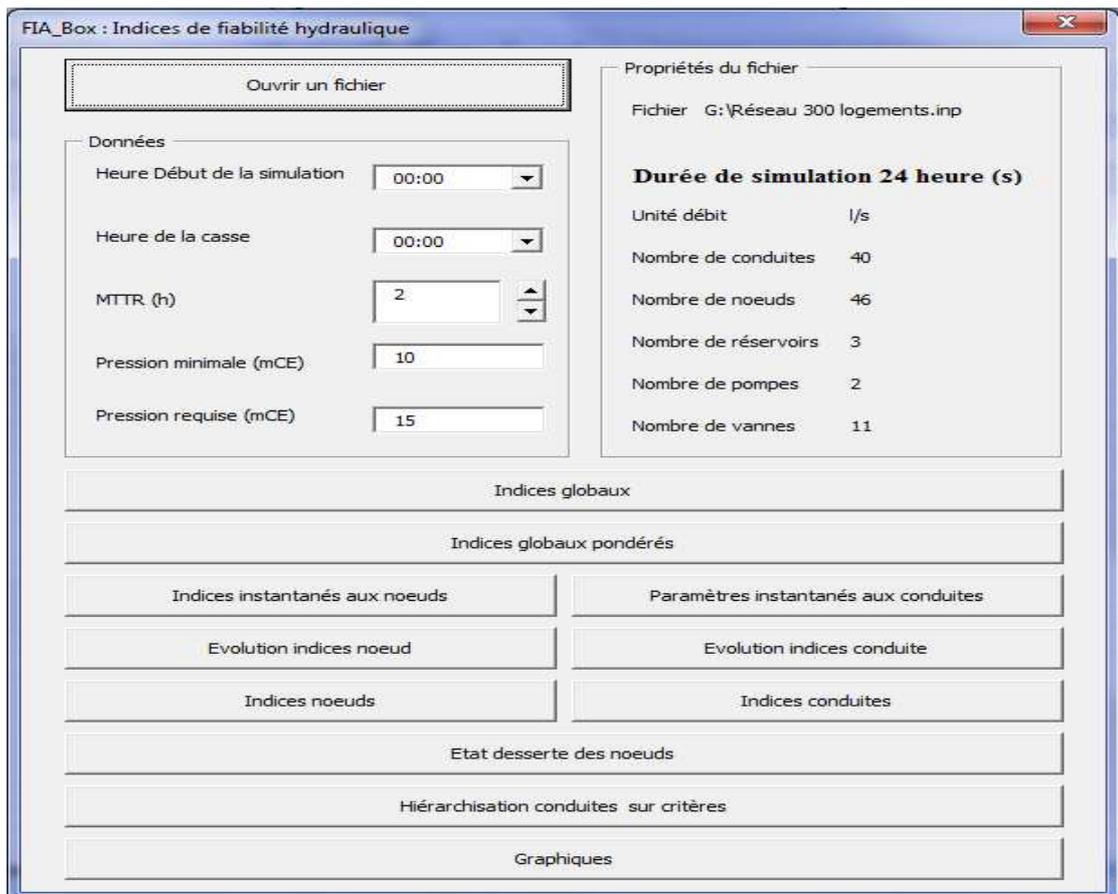


Figure 4.3 Interface graphique de l’outil FIAB.

4.2.4.2 Les fonctionnalités de l’outil FIAB

Différentes fonctionnalités sont proposées par l’outil FIAB à savoir :

- La lecture du fichier réseau : à l’aide du bouton de commande « Ouvrir un fichier », une boîte de dialogue représentée dans la figure 4.3, est associée à ce bouton.
- Les propriétés du fichier : il s’agit de certaines caractéristiques du réseau qui sont en mode lecture seule. Cette section donne un aperçu rapide du réseau ouvert sous FIA_Box. De telles informations pourraient être utiles à l’utilisateur dans ses choix de paramétrage initial.
- Les données : l’outil exige l’introduction de certaines données nécessaires au bon fonctionnement des usages. L’utilisateur peut faire varier les valeurs de paramètres tels que la pression, le MTTR selon les contraintes du réseau. Les valeurs des indices ainsi que leur affichage varient en conséquence.
- La simulation et le calcul d’indices : le calcul des indices hydrauliques et le suivi de leur évolution dans le temps, constituent la fonctionnalité principale de l’outil FIAB.

Consacrer un bouton de commande pour chaque tâche semble être une idée incontournable pour réduire le temps de calcul, selon l'intérêt de l'utilisateur à évaluer tel ou tel indicateur.

4.2.4.5 Propriétés du fichier

Les propriétés du réseau sont affichées sur la boîte de dialogue FIAB_Box notamment : la durée de la simulation (en heures), l'unité du débit (utilisé pour le calcul des propriétés hydrauliques du réseau), ainsi que le nombre des composantes physiques du réseau : conduites, nœuds de demande, réservoirs, pompes et enfin les vannes.

4.2.4.4 Définition des paramètres d'entrée

Tout calcul effectué par l'outil est relié à un contexte et à la définition d'un ensemble de paramètres définissant le type d'indice à évaluer. L'initialisation du modèle consiste en une série d'implémentations comprenant:

- un paramétrage temporel de la simulation hydraulique : heure de début de simulation, heure d'occurrence de la casse, temps moyen d'intervention sur la conduite (MTTR).
- un paramétrage des pressions : il s'agit d'introduire les pressions minimale et requise, indispensables au calcul de certains indices.

a) Paramétrage temporel

- **Heure de début de la simulation**

Heure à laquelle la simulation hydraulique est lancée par Epanet, les valeurs des paramètres hydrauliques tels que la pression, la demande au nœud seront calculées.

- **Heure de la casse**

Heure à laquelle la conduite est mise hors service. Ce paramètre doit être spécifié lorsqu'une estimation de la criticité d'une conduite est envisagée. Il est à noter que les barres de défilement de la FIAB_Box, consacrées à l'heure de casse et à l'heure de début de la simulation.

- **MTTR (Mean Time To Repair)**

Le temps moyen d'intervention sur la conduite doit être introduit lorsque l'utilisateur désire évaluer la criticité d'une conduite donnée. Les indices de criticité ainsi que l'état de la

desserte des nœuds après casse, sont calculés sur cette période où la conduite est dite indisponible.

b) Paramétrage des pressions

- **Pression minimale et Pression requise**

Ce sont les deux seuils de pressions utilisées pour le calcul des indices hydrauliques et définies par les hypothèses de Wagner [15]. Il appartient à l'utilisateur d'entrer des pressions en mètre de colonne d'eau (noté mCE).

4.2.4.5 Calcul des indices de fiabilité

L'outil FIAB présente différentes fonctionnalités associées, chacune à un bouton de commande. Les indices proposés :

1) des indices spécifiques aux conduites (ICH) permettant d'identifier les conduites vulnérables et de mesurer leur importance dans le fonctionnement du réseau;

2) des indices spécifiques aux nœuds (IDN) évaluant les rapports entre les valeurs des demandes et pressions disponibles et celles attendues à chaque nœud de consommation.

- **Indices aux conduites**

Il s'agit là d'afficher des indices relatifs aux évènements de type « casse sur conduite » notamment ICH et IDN. Ces indices sont calculés sur le MTTR = 5 heures et l'heure de casse est à 13 :00 h (heure de pointe), on a choisi comme exemple le calcul de l'ICH et l'IDN des conduites T394 et T386 sur la durée de MTTR comme le montre le tableau 4.1.

Conduite ID	T394				
Heure	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
ICH %	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41
IDN %	41,67	41,67	41,67	41,67	41,67
Conduite ID	T386				
Heure	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
ICH %	47,96	47,96	47,96	47,96	47,96
IDN %	37,93	37,93	37,93	37,93	37,93

Tableau 4.1 Évolution des indices aux conduites sur la durée du MTTR.

Le bouton de commande "paramètres instantanés aux conduites" permet le calcul des paramètres physiques (longueur, diamètre,...) et hydrauliques (charges aux nœuds amont et aval, débit, vitesse) de chaque conduite du réseau (voir la figure 4.4).

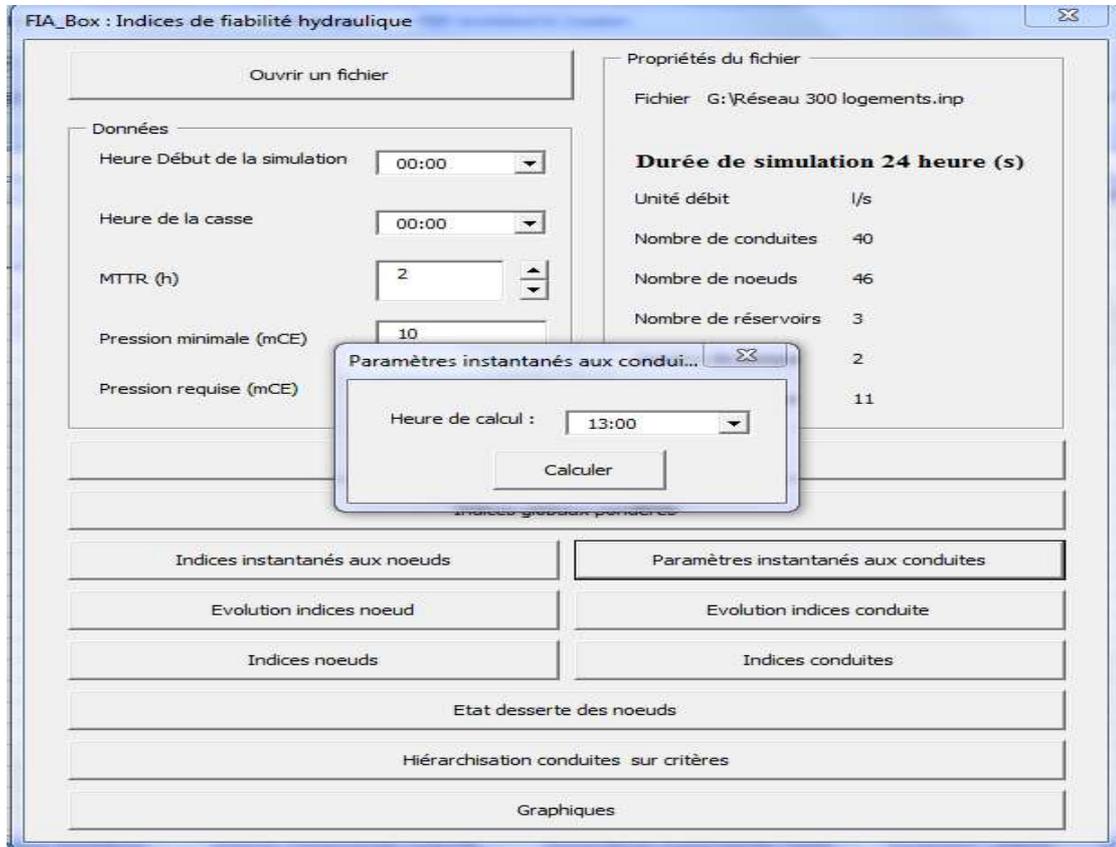


Figure 4.4 Choix heure de calcul des paramètres aux conduites.

ID Conduite	Type	Noeud Init	Noeud Final	Longeur(m)	Diam(mm)	Frug(H-V)	H amont (m)	H aval (m)	Debit	Vitesse
T57	Arc	3	5	57,31	63,00	1,00	68,83	68,83	0,02	0,01
T66	Arc	57	61	981,61	90,00	1,00	27,85	10,10	5,86	0,89
T69	Arc	7	57	46,10	90,00	1,00	28,50	27,85	4,99	0,78
T91	Arc	9	10	88,06	110,00	1,00	68,85	68,85	0,06	0,01
T188	Arc	9	19	218,73	110,00	1,00	68,85	68,85	0,06	0,01
T232	Arc	22	27	55,13	110,00	1,00	68,85	68,85	0,02	0,00
T233	Arc	28	22	225,60	110,00	1,00	68,85	68,85	0,13	0,01
T234	Arc	28	29	81,60	110,00	1,00	68,85	68,85	0,06	0,01
T240	Arc	57	25	432,09	300,00	1,00	27,85	26,56	58,27	0,80
T241	Arc	25	31	9,36	300,00	1,00	26,56	26,56	0,38	0,01
T294	Arc	64	32	15,23	300,00	1,00	28,35	28,60	54,33	0,77
T298	Arc	11	12	111,20	300,00	1,00	68,86	68,86	0,01	0,00
T299	Arc	40	30	655,23	90,00	1,00	26,56	26,56	0,19	0,03
T300	Arc	13	8	133,17	150,00	1,00	28,63	28,50	5,03	0,28
T302	Arc	64	14	5,20	150,00	1,00	28,35	28,63	7,81	0,44
T303	Arc	14	15	4,00	150,00	1,00	28,63	28,63	5,06	0,29
T306	Arc	41	58	236,92	110,00	1,00	68,83	68,83	-0,03	0,00
T308	Arc	2	3	17,93	63,00	1,00	68,83	68,83	0,08	0,02
T309	Arc	3	4	90,10	63,00	1,00	68,83	68,83	0,02	0,01
T310	Arc	43	6	148,07	63,00	1,00	68,85	68,85	0,01	0,00
T311	Arc	39	35	117,05	63,00	1,00	68,86	68,86	0,02	0,01
T313	Arc	26	61	666,83	200,00	1,00	26,56	10,10	55,76	1,78
T316	Arc	23	24	220,90	110,00	1,00	68,85	68,85	0,05	0,01
T384	Arc	44	38	40,56	110,00	1,00	68,86	68,86	0,47	0,05
T385	Arc	38	28	45,37	100,00	1,00	68,86	68,85	0,42	0,05
T386	Arc	17	37	115,63	110,00	1,00	68,85	68,84	0,83	0,09
T387	Arc	37	2	88,08	110,00	1,00	68,84	68,83	0,49	0,05
T388	Arc	41	42	45,51	110,00	1,00	68,83	68,83	-0,08	0,01
T389	Arc	2	41	107,91	110,00	1,00	68,83	68,83	-0,06	0,01
T390	Arc	42	1	140,32	110,00	1,00	68,83	68,83	-0,18	0,02
T391	Arc	42	18	37,13	200,00	1,00	68,83	68,83	0,06	0,00

Figure 4.5 Affichage paramètres instantanés aux conduites.

L'utilisateur aura le choix de visualiser toutes les conduites du réseau (avec indices) sur une même feuille « Indice conduites » comme est affiché sur la figure 4.5, ou bien entrer une conduite au choix et visualiser l'évolution des indices sur toute la durée de la simulation. L'affichage se fait sur la feuille «Évolution conduite». La figure 4.6 suivante illustre les indices spécifiques à la conduite T394 :

Conduite ID		T394		Changeur			
Heure	H amont (m)	H aval (m)	Débit	Vitesse	ICH Z	IDN Z	
00:00:00	68,86	68,85	0,88	0,09	42,41	41,67	
01:00:00	65,93	65,93	0,94	0,10	42,41	41,67	
02:00:00	75,35	75,35	0,73	0,08	42,41	41,67	
03:00:00	74,14	74,14	0,76	0,08	42,41	41,67	
04:00:00	61,19	61,18	1,02	0,11	42,41	41,67	
05:00:00	50,42	50,42	1,20	0,13	42,41	41,67	
06:00:00	42,30	42,30	1,32	0,14	42,41	41,67	
07:00:00	33,43	33,42	1,43	0,15	42,41	41,67	
08:00:00	33,43	33,42	1,43	0,15	42,41	41,67	
09:00:00	16,08	16,07	1,64	0,17	42,41	41,67	
10:00:00	33,43	33,42	1,43	0,15	42,41	41,67	
11:00:00	37,96	37,96	1,38	0,14	42,41	41,67	
12:00:00	44,41	44,40	1,29	0,14	42,41	41,67	
13:00:00	50,42	50,42	1,20	0,13	42,41	41,67	
14:00:00	50,42	50,42	1,20	0,13	42,41	41,67	
15:00:00	44,41	44,40	1,29	0,14	42,41	41,67	
16:00:00	46,46	46,45	1,26	0,13	42,41	41,67	
17:00:00	50,42	50,42	1,20	0,13	42,41	41,67	
18:00:00	42,30	42,30	1,32	0,14	42,41	41,67	
19:00:00	42,30	42,30	1,32	0,14	42,41	41,67	
20:00:00	42,30	42,30	1,32	0,14	42,41	41,67	
21:00:00	35,72	35,71	1,40	0,15	42,41	41,67	
22:00:00	40,16	40,15	1,35	0,14	42,41	41,67	
23:00:00	64,40	64,39	0,97	0,10	42,41	41,67	
24:00:00	68,86	68,85	0,88	0,09	42,41	41,67	

Figure 4.6 Evolution indices d'une conduite spécifique.

- **Indice de déficience aux nœuds**

L'indice de déficience aux nœuds (IDN_j) exprime le pourcentage des nœuds déconnectés du réseau suite à une rupture de la conduite j . Un nœud est considéré comme déconnecté (ou non desservi) si sa pression de service est inférieure à la pression minimale requise pour qu'il puisse y avoir desserte à son niveau ($P < P_{min}$).

$$IDN_j = \frac{\text{Nb de nœuds non desservis}}{\text{Nb total des nœuds}} \quad (2)$$

Les conduites du réseau se différencient non seulement par leurs dimensions, mais aussi par leur fonction hydraulique dans le réseau. Le bouton de commande "Hiérarchisation conduites sur critères" sert à identifier les conduites critiques et de les classer selon leur importance hydraulique ou effet réseau qu'elles produisent. Nous avons défini, en ce sens, deux critères d'importance pour la conduite :

- Importance selon l'ICH : déterminée selon le volume d'eau non véhiculé suite à la défaillance,

- Importance selon l'IDN : fixée suivant le rapport entre le nombre de nœuds non desservis suite à la défaillance et le nombre total des nœuds du réseau.

L'outil permet de classer les conduites selon ces deux critères d'importance (ICH et IDN). Pour un classement d'ICH, l'utilisateur doit introduire les deux valeurs seuils de l'ICH qui définissent trois ordres de criticité haute, moyenne et basse (Haute : $ICH > 15$ et Basse : $ICH < 7$). Un classement des conduites selon l'un de ces trois critères constitue une approche pour la sélection des conduites candidates à la redondance est représentée dans le tableau 4.2 :

ID Conduite	ICH (%)	IDN (%)	Criticité	ID Conduite	ICH (%)	IDN (%)	Criticité
T386	47,96	37,93	Haute	T316	3,78	17,24	Basse
T394	42,41	41,67	Haute	T395	3,54	20,69	Basse
T387	36,96	25,67	Haute	T311	2,58	17,24	Basse
T235	25,49	27,59	Haute	T57	2,5	17,24	Basse
T240	21,64	24,14	Haute	T309	2,5	17,24	Basse
T384	20,24	36,21	Haute	T232	2,33	17,24	Basse
T313	18,88	20	Haute	T310	2,06	17,24	Basse
T385	18,3	31,03	Haute	T396	1,97	17,24	Basse
T66	16,6	20	Haute	T298	1,96	17,24	Basse
T410	9,53	17,24	Moyenne	T389	1,72	15,52	Basse
T411	9,53	17,24	Moyenne	T390	1,72	15,52	Basse
T299	9,01	17,24	Moyenne	T302	1,72	15,52	Basse
T312	8,55	20,69	Moyenne	T409	1,72	15,52	Basse
T233	6,67	22,41	Basse	T388	1,72	15,52	Basse
T294	6,65	15,52	Basse	T69	1,72	15,52	Basse
T308	4,72	20,69	Basse	T416	1,72	15,52	Basse
T391	4,19	17,24	Basse	T300	1,72	15,52	Basse
T188	4,12	17,24	Basse	T306	1,72	15,52	Basse
T91	4,12	17,24	Basse	T419	1,72	15,52	Basse
T234	4,12	17,24	Basse	T241	1,72	15,52	Basse

Tableau 4.2 ICH et IDN des conduites.

ICH du réseau actuel et futur

A partir de la situation actuelle, cet indice est calculé pour un nombre de population courant. A l'avenir, nous nous attendons à ce que la consommation d'eau potable augmente en fonction de la croissance démographique. Dans ce cas, nous allons faire augmenter la demande de nœuds du réseau dans la procédure de simulation numérique et après nous recalculerons l'ICH. En extrapolant la densité de la population, cet indice ne se développe que naturellement (voir le tableau 4.3). Ce concept est clairement expliqué dans le diagramme de

la figure 4.7 où il montre les conduites avec leurs ICH actuel et futur.

ID Conduite	ICH Actuel (%)	ICH Futur (%)	ID Conduite	ICH Actuel (%)	ICH Futur (%)
T57	2,50	4,29	T313	18,88	34,74
T66	16,60	29,58	T316	3,78	5,74
T69	1,72	3,41	T384	20,24	27,03
T91	4,12	6,12	T385	18,30	40,65
T188	4,12	6,12	T386	47,96	50,82
T232	2,33	4,1	T387	36,96	68,62
T233	6,67	9	T388	1,72	3,41
T234	4,12	6,12	T389	1,72	3,41
T240	21,64	32,45	T390	1,72	3,41
T241	1,72	3,41	T391	4,19	6,2
T294	6,65	10,23	T394	42,41	70,77
T298	1,96	3,68	T395	3,54	5,47
T299	9,01	11,64	T396	1,97	3,69
T300	1,72	3,41	T312	8,55	11,12
T302	1,72	3,41	T235	25,49	37,53
T306	1,72	3,41	T409	1,72	3,41
T308	4,72	6,8	T416	1,72	3,41
T309	2,50	4,29	T410	9,53	12,24
T310	2,06	3,8	T411	9,53	12,24
T311	2,58	4,39	T419	1,72	3,41

Tableau 4.3 ICH des conduites du réseau actuel et futur.

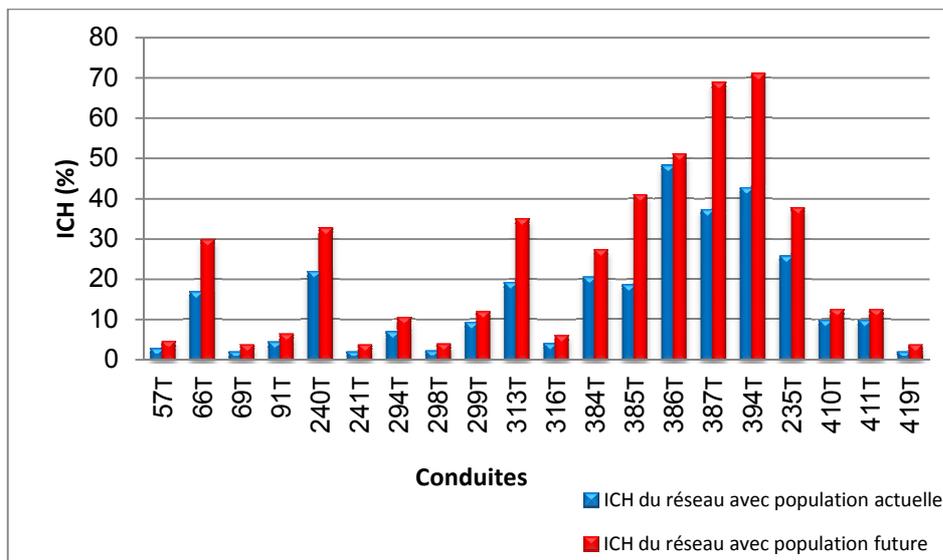


Figure 4.7 Les valeurs d'ICH de quelques conduites du réseau actuel et futur.

Nous essayons de proposer des solutions différentes en abordant l'aspect structurel et en apportant une redondance dans les tuyaux les plus vulnérables. Les résultats du calcul d'ICH avec population actuelle, future et avec redondance sont présentés dans l'annexe tableau C.5.

Ces résultats permettent d'avoir une variation claire et significative de l'ICH (figure 4.8).

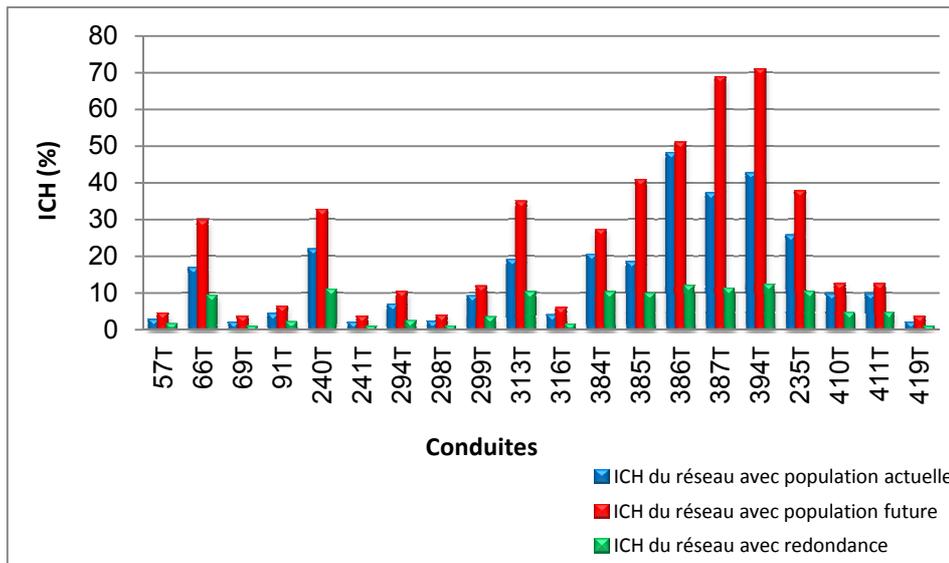


Figure 4.8 Les valeurs d'ICH de quelques conduites du réseau avec population actuelle, future et avec redondance.

4.3.4 Modélisation par bloc diagramme de fiabilité

Pour rappel, la Sûreté de Fonctionnement (SdF) est un concept générique. Ses principaux éléments sont : la fiabilité, la disponibilité, la sécurité et la maintenabilité [58, 59, 60 et 61]. Selon les méthodes de la SdF notre choix est orienté vers la modélisation par bloc diagramme de fiabilité. Il est connu que la méthode de bloc diagramme de fiabilité est une représentation logique du fonctionnement du système. Les composants du système sont modélisés par des blocs reliés par des arcs au sens qu'il y a un chemin dans le graphe entre l'entrée et la sortie pour que le système soit fonctionnelle [69].

La fiabilité peut être exprimée selon une loi exponentielle. Elle est utilisée pour la période de vie utile c'est-à-dire pour λ constant. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

La fiabilité d'un ensemble de n composants montés en parallèle s'exprime par :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (5)$$

Si les n composants sont en série, la fiabilité résultante devient :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (6)$$

Le calcul de la disponibilité se fait par l'équation suivante :

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (7)$$

Où : t est le temps en heure, λ est le taux défaillance et μ est le taux de réparation.

Le principe de calcul de la disponibilité d'un ensemble de n composants montés en parallèle ou en série est le même que celui de la fiabilité.

Dans le cadre de la modélisation de notre site, nous nous sommes concentrés sur les conduites, les réservoirs (aussi que la bêche à eau) et les pompes (figure 4.9). La bêche à eau (noté B_300L) distribue l'eau vers le secteur 300 logements d'El Hadjar. Si une défaillance arrive sur les pompes, cette desserte en eau diminue et une pompe de secours est alors rajoutée.

Le calcul de l'indice de criticité hydraulique de chaque conduite permet d'hiérarchiser les conduites selon leur importance dans le réseau. Nous proposons de faire aussi des redondances au niveau des conduites où les indices de criticité sont très élevés (proche de 1) pour assurer la disponibilité de différentes parties du réseau (figure 4.10).

Le schéma de la figure 4.9 représente un bloc diagramme de fiabilité du réseau d'étude sans redondance. L'ICH et l'IDN est calculés, il est alors possible de définir les tronçons sur lesquels nous devons apporter une solution de redondance, car leurs ICH et IDN étant élevés. La figure 4.10 représente alors un bloc diagramme de fiabilité avec redondance.

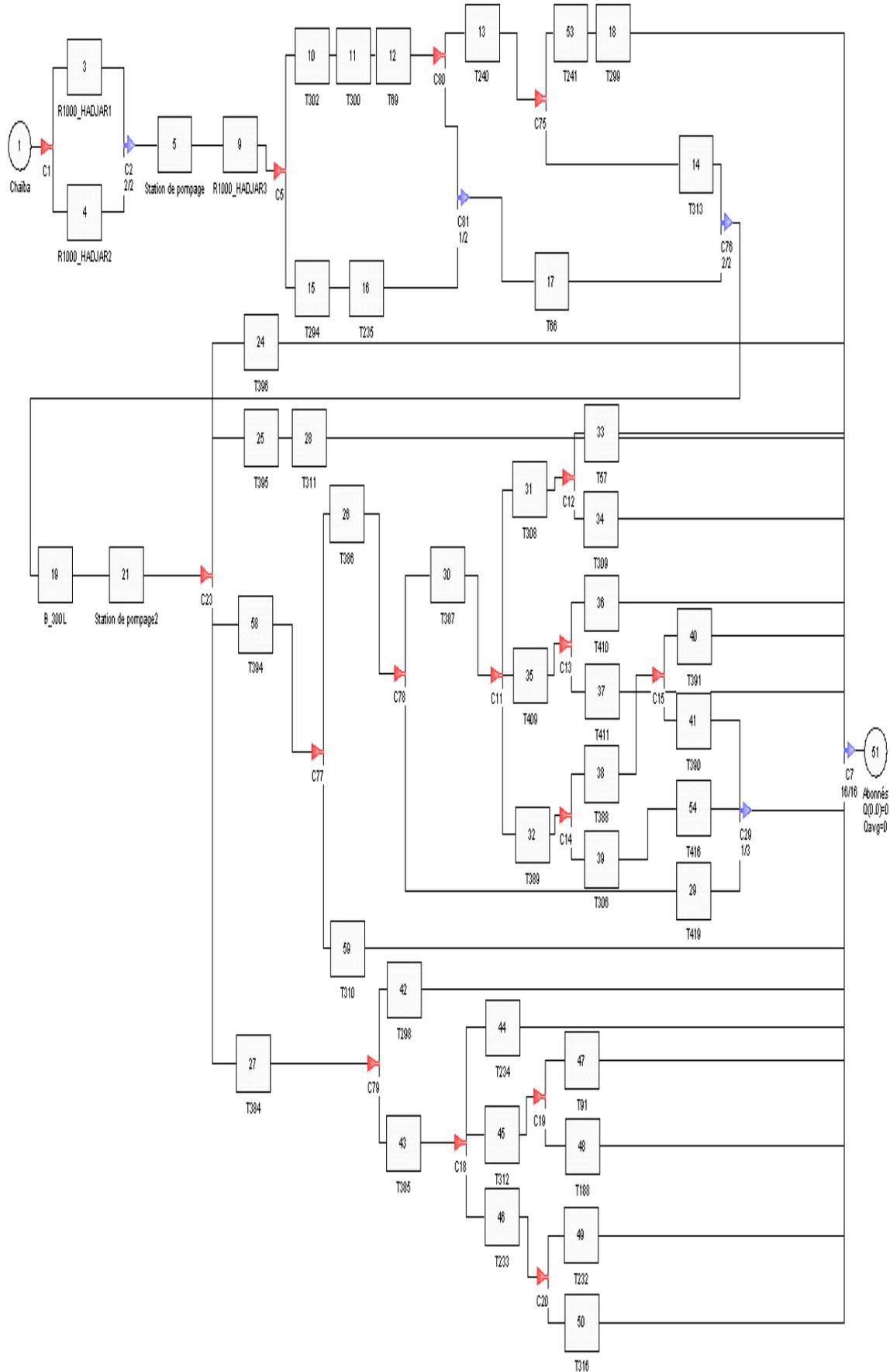


Figure 4.9 Bloc Diagramme de Fiabilité du réseau sans redondance.

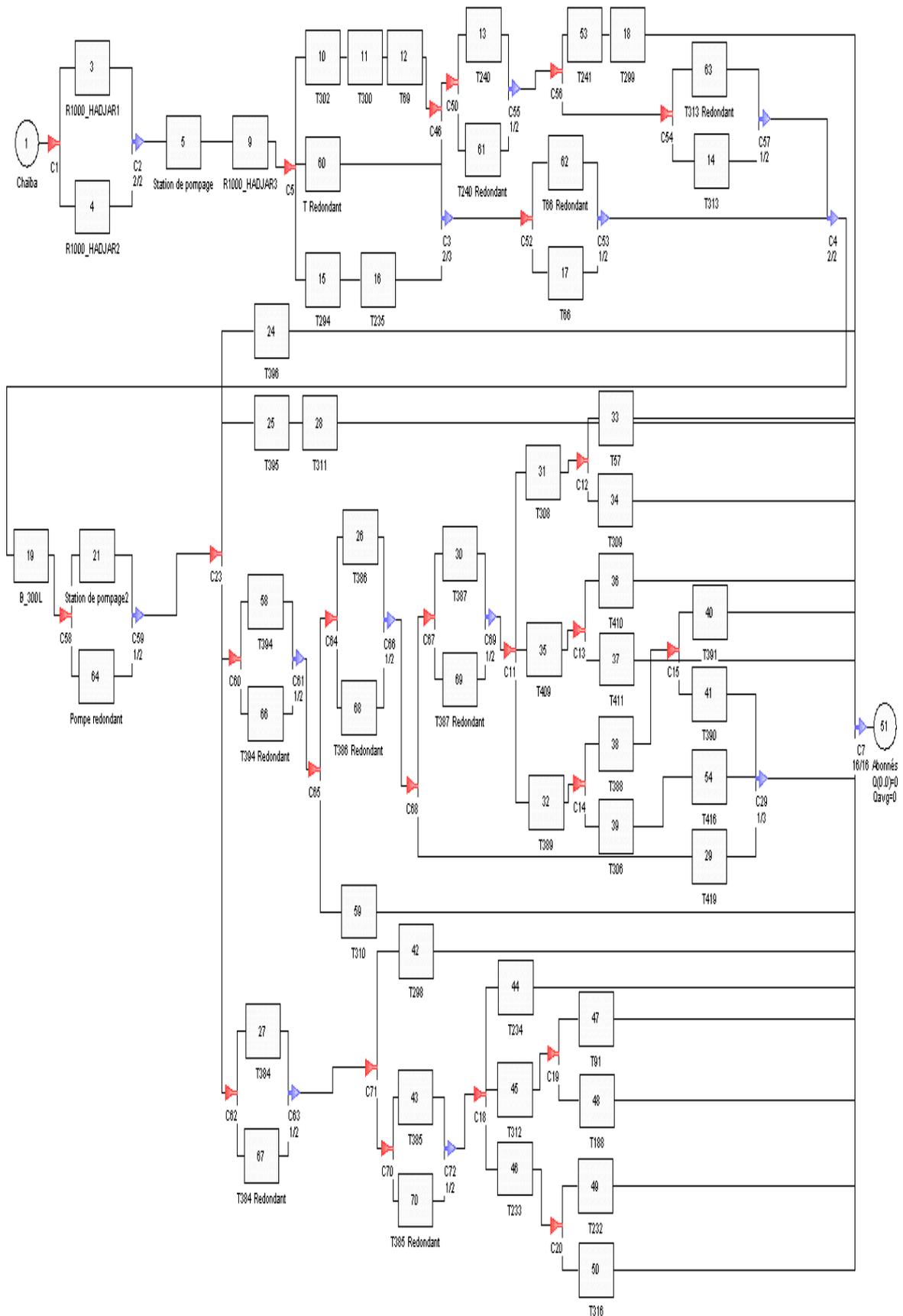


Figure 4.10 Bloc Diagramme de Fiabilité du réseau avec redondance.

Les résultats des calculs de la fiabilité et de la disponibilité du réseau avec l'outil GRIF est présentées dans le tableau 4.4 suivant :

Temps (h)	Fiabilité sans redondance (%)	Fiabilité avec redondance (%)	Disponibilité sans redondance (%)	Disponibilité avec redondance (%)
0	100	100	100	100
100	92,27	97,02	95,08	99,60
200	85,14	94,13	95,06	99,57
300	78,56	91,33	95,05	99,57
400	72,49	88,62	95,05	99,56
500	66,89	85,98	95,05	99,56
600	61,73	83,42	95,05	99,56
700	56,96	80,94	95,05	99,56
800	52,56	78,53	95,05	99,56
900	48,5	76,2	95,05	99,56
1000	44,75	73,93	95,05	99,56
1100	41,29	71,73	95,05	99,56
1200	38,1	69,6	95,05	99,56
1300	35,16	67,52	95,05	99,56
1400	32,44	65,52	95,05	99,56
1500	29,93	63,57	95,05	99,56
1600	27,62	61,68	95,05	99,56
1700	25,49	59,84	95,05	99,56
1800	23,52	58,06	95,05	99,56
1900	21,7	56,33	95,05	99,56
2000	20,02	54,66	95,05	99,56
2100	18,48	53,03	95,05	99,56
2200	17,05	51,45	95,05	99,56
2300	15,73	49,92	95,05	99,56
2400	14,52	48,44	95,05	99,56
2500	13,39	47	95,05	99,56
2600	12,36	45,6	95,05	99,56
2700	11,4	44,24	95,05	99,56
2800	10,52	42,92	95,05	99,56
2900	9,71	41,65	95,05	99,56
3000	8,96	40,41	95,05	99,56
3100	8,27	39,21	95,05	99,56
3200	7,63	38,04	95,05	99,56
3300	7,04	36,91	95,05	99,56
3400	6,49	35,82	95,05	99,56
3500	5,99	34,75	95,05	99,56
3600	5,53	33,72	95,05	99,56
3700	5,1	32,71	95,05	99,56
3800	4,71	31,74	95,05	99,56
3900	4,34	30,80	95,05	99,56

4000	4,01	29,88	95,05	99,56
4100	3,7	28,99	95,05	99,56
4200	3,41	28,13	95,05	99,56
4300	3,15	27,29	95,05	99,56
4400	2,9	26,48	95,05	99,56
4500	2,68	25,69	95,05	99,56
4600	2,47	24,93	95,05	99,56
4700	2,28	24,19	95,05	99,56
4800	2,1	23,47	95,05	99,56
4900	1,94	22,77	95,05	99,56
5000	1,79	22,09	95,05	99,56
5100	1,65	21,43	95,05	99,56
5200	1,52	20,80	95,05	99,56
5300	1,41	20,18	95,05	99,56
5400	1,3	19,58	95,05	99,56
5500	1,2	18,99	95,05	99,56
5600	1,1	18,43	95,05	99,56
5700	1,02	17,88	95,05	99,56
5800	0,94	17,35	95,05	99,56
5900	0,87	16,83	95,05	99,56
6000	0,8	16,33	95,05	99,56
6100	0,74	15,85	95,05	99,56
6200	0,68	15,38	95,05	99,56
6300	0,63	14,92	95,05	99,56
6400	0,58	14,47	95,05	99,56
6500	0,53	14,04	95,05	99,56
6600	0,49	13,63	95,05	99,56
6700	0,45	13,22	95,05	99,56
6800	0,42	12,83	95,05	99,56
6900	0,38	12,45	95,05	99,56
7000	0,35	12,08	95,05	99,56
7100	0,33	11,72	95,05	99,56
7200	0,3	11,37	95,05	99,56
7300	0,28	11,03	95,05	99,56
7400	0,26	10,70	95,05	99,56
7500	0,24	10,38	95,05	99,56
7600	0,22	10,07	95,05	99,56
7700	0,2	9,77	95,05	99,56
7800	0,18	9,48	95,05	99,56
7900	0,17	9,20	95,05	99,56
8000	0,16	8,93	95,05	99,56

Tableau 4.4 Fiabilité et disponibilité du système (sans et avec redondance).

La modélisation par bloc diagramme de fiabilité du réseau du secteur trois cents logements est réalisée à la figure 4.9 par des blocs qui représentent toutes les infrastructures de ce réseau.

S'ensuit alors un calcul de la fiabilité et de la disponibilité du système par l'outil logiciel GRIF. Sur la figure 4.8, le calcul d'ICH permet de prioriser les conduites en fonction de leur importance dans le réseau [74,75]. Ainsi, nous essayons de faire des redondances matérielles et structurelles (pompes, tuyaux ...), un calcul de la fiabilité et de la disponibilité du système est alors refait sur la base de ces changements. Une étude comparative de cette modélisation avant et après la redondance est expliquée dans les figures 4.11 et figure 4.12.

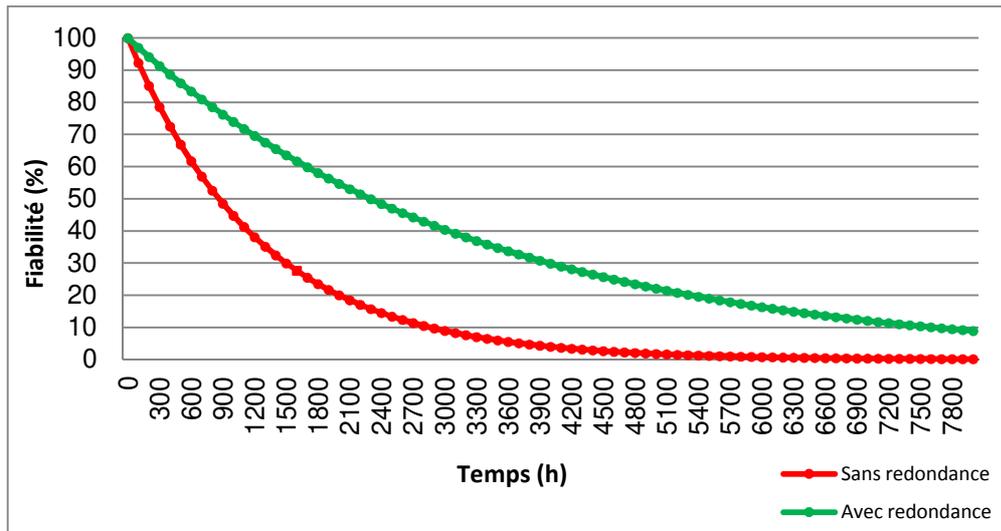


Figure 4.11 Fiabilité du système.

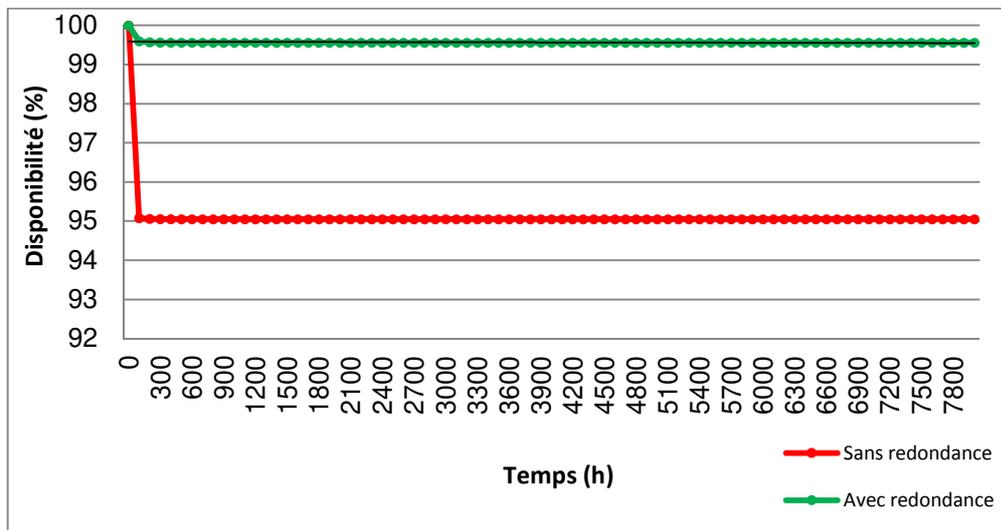


Figure 4.12 Disponibilité du système.

La figure 4.12 représente la variation de la disponibilité du système à travers le temps. Cette disponibilité décroissante dans le temps vers une valeur fixe est appelée disponibilité asymptotique. Pour la modélisation par bloc diagramme de fiabilité sans redondance, la disponibilité asymptotique tend vers la valeur de 95,05%. Après l'intégration des redondances matérielle au modèle, la disponibilité asymptotique devient 99,56%. Cette

amélioration représente la disponibilité des différents organes du réseau donc la disponibilité d'eau chez les abonnés avec une quantité suffisante, cela se fait après l'intégration de la redondance aux conduites les plus vulnérables du réseau.

La variation de la fiabilité suit elle aussi, la même déclinaison dans le temps. Partant d'une valeur maximale, la courbe décroît selon une exponentielle montrée par la figure 4.11. Après comparaison entre la courbe de fiabilité sans redondance et avec redondance, nous remarquons qu'il y a une amélioration de la fiabilité du réseau au niveau de la modélisation avec redondance.

4.3.5 Modélisation spatiale

La modélisation géographique a pour but de produire des modèles spatiaux dont la détermination est basée majoritairement sur les méthodes de statistiques spatiales [68]. L'interpolation spatiale permet d'estimer la valeur d'une variable sur un site à partir des valeurs de la même variable mesurée à des points voisins [63, 64, 65, 67]. Les données d'ICH définies auparavant introduites à l'aide de Système d'Information Géographique (SIG) afin de modéliser une cartographie. Cette dernière a pour but d'informer aux différents endroits du site sur les valeurs de cet indice. Nous aurons la capacité de pouvoir suivre de près les différents points où les problèmes risquent d'apparaître (ICH à valeurs plus élevées).

Les techniques d'interpolation spatiale sont en général divisées en deux catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques [62]. Nous avons testé dans ce travail la méthode de pondération d'inverse des distances et la méthode de krigeage [66].

4.3.5.1 Méthode de pondération d'inverse des distances

La méthode de pondération en distance inverse ou pondérée en distance inverse (Inverse Distance Weighting (IDW)) est une méthode déterministe. Elle estime les valeurs d'un attribut en des points non échantillonnés en utilisant une combinaison linéaire de valeurs en points échantillonnés pondérées par une fonction inverse de la distance entre le point d'intérêt et les points échantillonnés. L'hypothèse est que les points échantillonnés plus proches du point non échantillonné lui ressemblent davantage que ceux dont les valeurs sont plus éloignées [63]. On attribue à chaque site "S_i" un poids inversement proportionnel à une distance entre ce site et le point à estimer x₀. Ainsi, l'estimation en un point non mesuré x₀ s'exprime de la sorte [64]:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad (7)$$

Où

n : est le nombre de valeurs mesurées.
 $Z(x_i)$: est la valeur mesurée à l'emplacement S_i .
 λ_i : est le poids de la valeur mesurée dans le $i^{\text{ème}}$ emplacement.
 $\hat{Z}(x_0)$: est la valeur estimée à l'emplacement x_0 .

4.3.5.2 Méthode Krigeage ordinaire

Le krigeage est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé ; il se fonde sur une méthode objective. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux. La méthode de Krigeage ordinaire est une méthode statistique qui se déroule en deux étapes [73]. La première est l'analyse exploratoire qui permet de se familiariser avec les données et d'éclairer le choix du modèle et de l'énoncer. La deuxième étape concerne le choix de la forme de la tendance déterministe pour l'espérance de $Z(s)$, l'analyse variographique, puis une validation croisée.

$$Z(s) = \mu(s) + \delta(s), \quad s \in D \quad (8)$$

Avec $\mu(s)$: structure déterministe pour l'espérance de $Z(s)$, dépendant de la localisation des observations.

$\delta(s)$: fonction aléatoire normale d'espérance nulle, de variance homogène et qui ne présente pas de structure de dépendance spatiale.

4.3.5.3 Validation croisée

La validation croisée a été utilisée pour déterminer la technique d'interpolation la plus adéquate [72]. Cela consiste à retirer un point connu de l'ensemble de données et d'exploiter les points restants pour estimer la valeur enlevée. Une fois que l'estimation est calculée, elle peut être comparée à la valeur réelle qui a été initialement retirée de l'ensemble de données d'échantillonnage [69]. Cette procédure est répétée pour toutes les valeurs d'échantillons disponibles [70, 71].

Méthode d'interpolation	IDW Déterministe	Krigeage ordinaire
Pourcentage d'erreur (%)	5.58	2.99

Tableau 4.5 Comparaison entre IDW et Krigeage.

D'après le tableau 4.5, l'erreur de l'interpolation spatiale par la méthode de Krigeage ordinaire est plus faible que celle d'inverse des distances. On peut dire alors que l'interpolation par le krigeage ordinaire pour ce cas est plus optimale que l'IDW.

4.4 ICH global

Nous avons défini la cartographie par l'outil ARCGIS 9.3. L'objectif de cette étude est d'établir une carte des risques qui définit la variation spatiale de l'indice de criticité hydraulique (ICH). Pour cela, nous définissons d'abord l'état critique actuel de la zone d'étude sur la base des valeurs ICH des tuyaux de réseau (voir Figure 4.13). Nous notons que les valeurs de l'ICH sur les nœuds du réseau sont en augmentation; ce qui explique une forte demande de ressources (figure 4.14). L'approche adoptée pour réduire cet indice est l'application de redondances aux tuyaux les plus critiques. Cette approche a conduit au diagramme présenté sur la figure 4.15, où l'on constate une diminution de l'indice de criticité hydraulique en cas de redondance.

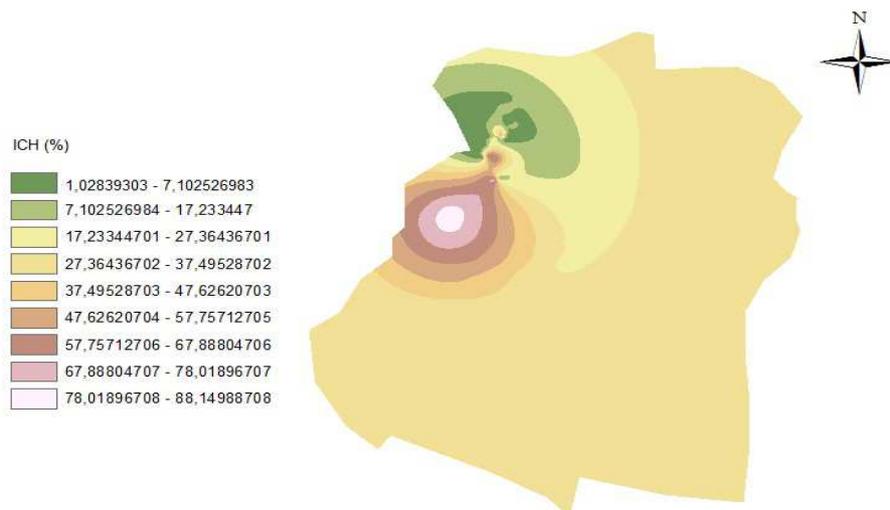


Figure 4.13 ICH dans l'état actuel.

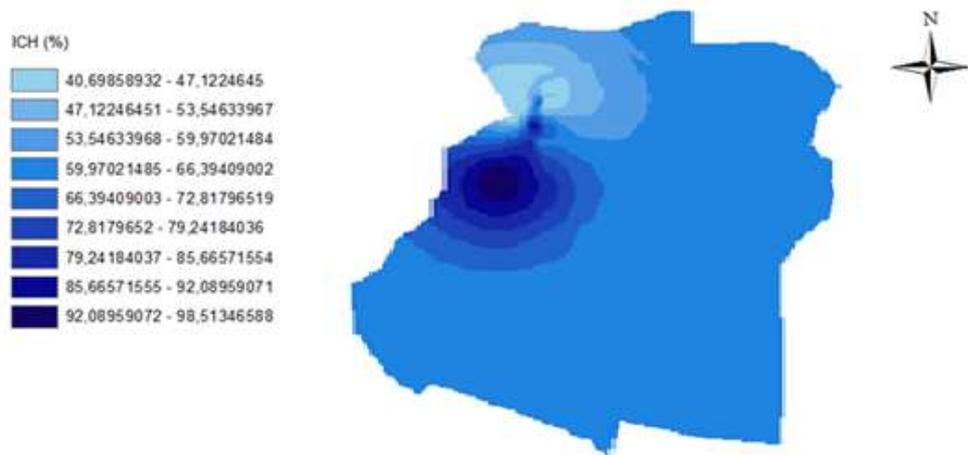


Figure 4.14 ICH dans l'état futur.

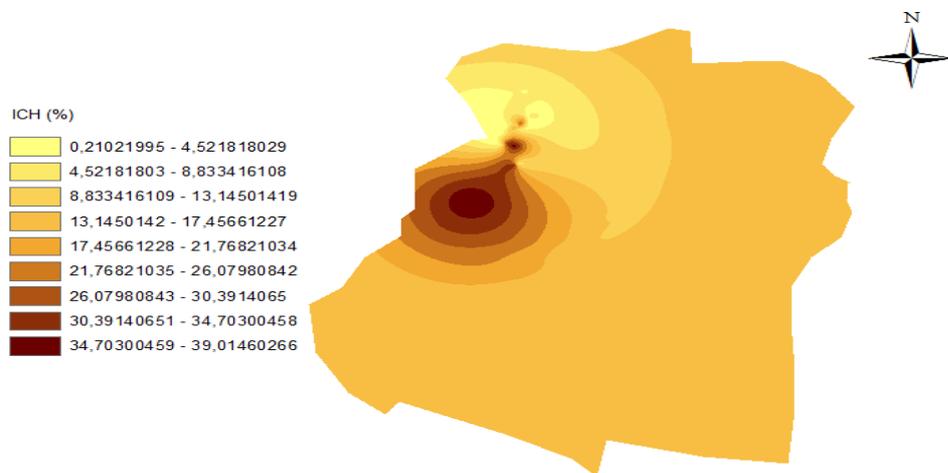


Figure 4.15 ICH en état avec redondance.

Sur l'ensemble des figures: 4.13, 4.14 et 4.15, nous observons clairement l'apparition de zones critiques représentant des risques d'apparition de problèmes pour un ICH élevé à travers les codes des couleurs. Les zones deviennent plus dense, donc accroissement de l'ICH en fonction de l'exigence croissante en ressource hydrique. Cependant, en appliquant des redondances au niveau des conduites ayant un ICH élevé, on observe une diminution de la densité critique, d'où le décroissement de l'ICH même avec des conditions critiques.

4.5 Conclusion

Le réseau d'eau potable doit répondre à une demande exprimée par toutes les parties de la ville. Pour assurer la disponibilité d'eau suffisante pour tous les clients, nous avons mis l'accent sur le rôle d'une étude de sûreté de fonctionnement des systèmes hydrauliques par le détour d'un modèle de bloc diagramme de fiabilité.

Cette partie de l'étude a été consacrée à la proposition d'indices permettant d'évaluer la fiabilité du réseau de distribution d'eau potable. L'utilisation de l'outil "FIAB" a montré son apport dans la hiérarchisation des conduites selon leur importance dans le réseau, ce qui rend possible une sélection des conduites prioritaires à la redondance. Pour ce faire, nous constatons que les indices de criticité peuvent être améliorés grâce à de nouvelles dispositions structurelles et matérielles en cas de carence d'un réseau.

Grâce à l'interpolation spatiale, nous avons la possibilité de localiser des zones qui posent des problèmes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse a contribué à l'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes d'alimentation en eau potable dans le but d'assurer une meilleure disponibilité de la ressource hydrique aux différents usagers.

L'objectif de cette présente étude est l'élaboration d'une méthodologie pour le diagnostic des réseaux d'eau potable. Il est alors nécessaire de diagnostiquer le réseau afin de proposer les actions à entreprendre pour le mettre à niveau et augmenter ainsi son rendement. Une étude de cas a été faite sur le réseau d'AEP de la ville El Hadjar.

La méthodologie suivie est composée essentiellement de deux étapes successives :

Le modèle du réseau étudié et les problèmes liés à l'indisponibilité de l'eau chez les abonnés et la définition des indices de fiabilité hydraulique et l'hierarchisation des conduites du réseau pour les classer selon leur importance hydraulique et de faire des redondances au niveau des conduites les plus critiques.

Dans une première partie, il est fait le point sur l'état actuel du réseau existant à travers un modèle hydraulique de notre cas d'étude par une simulation du comportement hydraulique afin de prévoir les comportements futurs du réseau, cela ce fait par logiciel Epanet.

Dans une seconde partie, un ensemble d'indices ont été présentés : un indice de criticité hydraulique (ICH) pour un classement des conduites selon leur degré de criticité dans le réseau et un indice de déficience des nœuds (IDN) pour la présentation de l'état de desserte des nœuds après une défaillance de conduite en vue de leur redondance. Ces indices donnent des aperçus sur la fiabilité hydraulique du réseau en prenant compte de l'ensemble des

paramètres régissant le fonctionnement du système de distribution d'eau. Cela permet aussi de classer les conduites du réseau selon ces critères.

Une fois les indices calculés, une modélisation par bloc diagramme de fiabilité du réseau est réalisée et représentant toutes les infrastructures de ce réseau. S'ensuit alors un calcul numérique de la fiabilité et de la disponibilité du système par l'outil logiciel GRIF. Le calcul de ces indices permet de prioriser les conduites en fonction de leur importance dans le réseau. Une redondance matérielle et structurelle (pompes, tuyaux ...), a été réalisée et un nouveau calcul de la fiabilité et de la disponibilité du système sur la base de ces changements. Une étude comparative de cette modélisation avant et après redondance a été entreprise et donnant avantage au modèle redondant. L'application du modèle redondant devient alors applicatif car il garantit une meilleure disponibilité d'eau et rendre le système plus fiable.

Une modélisation spatiale est aussi proposée pour pouvoir suivre de près les différents points du réseau où les problèmes risquent d'apparaître. Elle permet d'estimer la valeur d'une variable sur un site à partir des valeurs de la même variable mesurée à des points voisins. Les données d'ICH définies auparavant introduites à l'aide de Système d'Information Géographique (SIG) afin de modéliser une cartographie. Cette dernière a pour but d'informer aux différents endroits du site sur les valeurs de cet indice.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Tarfaya C., (2012). « Approche méthodologique pour le diagnostic des réseaux d'eau ». Pour obtenir le diplôme de Magistère en Hydraulique. Université Hadj Lakhdar- BATNA, Algérie.
- [2] Bedjaoui A., Achour B., (2014). « Dimensionnement des réseaux de distribution d'eau potable par la méthode du Modèle Rugueux de Référence (MMR) ». Courrier du Savoir – N°18, Mars 2014, pp.129-136.
- [3] Ouellabi F., Chettouh Y., (2015). « Dimensionnement du réseau d'alimentation en eau potable de secteur route Touggourt – El Oued -». Master en Hydraulique. Université Echahid Hamma Lakhdar - El – Oued, Algérie.
- [4] Bacharou T., Houinou G., Adjovi EC., Adjiboicha M., (2012). « Régime de consommation en eau et son utilisation dans le calcul des réseaux d'alimentation en eau potable ». École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Bénin. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 19 (2012) pp.159 – 174, ISSN 1813-3290.
- [5] Haidar H., (2006). « Réhabilitation des réseaux d'eau potable : méthodologie d'analyse multicritère des patrimoines et des programmes de réhabilitation ». Doctorat en Génie Civil. Institut National des sciences Appliquées de Lyon.
- [6] Traoré R., (2012). « Eau, Territoire et Conflits : analyse des enjeux de la gestion communautaire de l'eau au Burkina Faso : l'exemple du bassin versant du Nakambé ». En vue de l'obtention du Doctorat. Université de Toulouse.
- [7] Nafi A., (2006). « La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable », Mémoire de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I.
- [8] Abdelbaki Ch., (2014). « Modélisation d'un réseau d'AEP et Contribution à sa gestion à l'aide d'un SIG : - Cas du Groupement Urbain de Tlemcen -», Doctorat en hydraulique.
- [9] Blindu I., (2004). « Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques ». Thèse doctorat. Ecole nationale des mines Saint-Étienne, France.

- [10] Eisenbeis P., (2004). « Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, France.
- [11] Merzouk N., (2005). « Méthodologie de détection et de localisation des fuites dans Un réseau d'eau potable dans les petites et les moyennes collectivités ». Thèse de Doctorat de l'université d'Artois en collaboration avec l'école des mines de Douai, France.
- [12] Masmoudi R., (2009). « Etude de la fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable en zones arides cas de la région de Biskra ». Thèse de Doctorat en Hydraulique. Université Mohamed Khider Biskra, Algérie.
- [13] Maghezzi A., (2008). « Etude de la vulnérabilité des réseaux AEP et proposition d'une approche de calcul d'indices de fiabilité hydraulique Application aux systèmes de distribution d'eau potable ». Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie.
- [14] Demri A., (2008). « Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ». Thèse de doctorat. Ecole Doctorale d'Angers.
- [15] Wagner J., Shamir U., Marks D., (1988a). « Water Distribution System Reliability: Analytical Methods ». Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 127(4), pp 206-213.
- [16] Wagner J., Shamir U., Marks D., (1988b). « Water Distribution System Reliability: Simulation Methods ». Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 114, pp 276-293.
- [17] Broy P., Dijoux Y., Bérenguer C., Chraïbi H., Donat R., (2014). « Fiabilité dynamique : estimation de la sûreté de systèmes dynamiques hybrides complexes dans le domaine hydraulique ». 19^e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement - Dijon 21-23 Octobre 2014.
- [18] Hobbs B-F., Beim G-K., (1988a). « Analytical Simulation of Water System Capacity Reliability: 1. Modified Frequency-Duration Analysis ». Water Resources Research, 24(9), pp. 1431-1444.
- [19] Hobbs B-F., Beim G-K., (1988b). « Analytical Simulation of Water System Capacity Reliability: 2. A Markov Chain Approach and Verification of the Models ». Water Resources Research, 24(9), pp. 1445-1458.
- [20] Nichane M., Khelil M-A., (2014). « Changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation ». Revue des BioRessources, Vol 4 N° 2 Décembre 2014.
- [21] Djellouli R., Hamel L, Chadli A., Latreche A., Mesri N., (2007). « Analyse et évaluation des ressources hydriques dans la wilaya de Mascara ». Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07, Tlemcen (2007), pp 35 – 40.

- [22] Boudjadja A., Messahel M, Pauc H., (2003). « Ressources hydriques en Algérie du Nord ». Revue des Sciences de l'Eau, Rev. Sci. Eau 16/3(2003), pp 285-304.
- [23] Perez-Castaneda G-A., (2009). « Evaluation par simulation de la sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [24] Demri A., (2009). « Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ». Thèse de Doctorat. Université d'Angers.
- [25] Mkhida A., (2008). « Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés de sécurité intégrant de l'intelligence ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [26] Pagetti C., (2012). « Module de sûreté de fonctionnement ». 3^{ème} TR - option SE, 10 décembre 2012.
- [27] Batteux M., (2011). « Diagnosticabilité et diagnostic de systèmes technologiques pilotés ». Thèse de doctorat, Université Paris-Sud11.
- [28] Mkhida A., Thiriet J.M., Abury J.F., (2010). « Déficience de la validation d'un capteur intelligent et incidence sur les performances d'une boucle de sécurité ». 17^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu'2010, La Rochelle : France.
- [29] Sylvie L., (2004). « Etudes de sûreté des installations électriques ». Cahier Technique Schneider Electric, n°184.
- [30] Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F., (1981). « Fault Tree Handbook ». U.S Nuclear Regulatory Commission Washington.
- [31] Riera D., Clement E., (2012). « Modélisation dynamique en sûreté de fonctionnement : une avance pour l'analyse des systèmes complexes ». 18^{ème} Congrès de Maîtrise des Risqué et Sûreté de Fonctionnement, 16 – 18 Octobre 2012. Tours.
- [32] Watson H.A., (1961). « Launch Control Safety Study ». Section VII, Vol. 1, Bell Labs, Murray Hill, NJ.
- [33] Ledoux J., Gaudoin O., (2007). « Modélisation aléatoire en fiabilité des logiciels ». Edition Hermes Science Publications.
- [34] Villemeur A., (1988). « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels ». Edition Eyrolles.
- [35] CEI 50 191. (1990). « Vocabulaire Electrotechnique International ». Sûreté de fonctionnement et qualité des services, Chapitre 191.
- [36] Belhadaoui H., (2011). « Conception sûre des systèmes mécatroniques intelligents pour des applications critiques ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.

- [37] Laprie J. C., (2004). « Sûreté de fonctionnement informatique : concepts, défis, directions ». ACI Sécurité et Informatique, CNRS, LAAS, Toulouse, 15 – 17 novembre.
- [38] NF EN 292 – 1, (1991). « Sécurité de machines – Notions fondamentales, principes, généraux de conception – Partie 1: Terminologie de base – Méthodologie».
- [39] Boucerredj L., (2015). «Sûreté de Fonctionnement : Recherche des Scénarios Critiques dans les Systèmes Mécatroniques». Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- [40] Romain B., (2009). « Analyses de sûreté de fonctionnement multi-systèmes ». Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- [41] Boumelita D., (2012). « Etude de la sécurité d'un système d'alimentation en eau potable par réseau de Pétri hybride », JD'12, l'Automatique, les Télécommunications, l'Instrumentation et les Multimédia « JIDATIM'12 », Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie, 16 et 17 Janvier 2012.
- [42] Guillerm R., (2011). « Intégration de la Sûreté de Fonctionnement dans les Processus d'Ingénierie Système ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier.
- [43] ARP-4754, (1996). « Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems ». Society of Automotive Engineers (SAE) standard, November 1996.
- [44] DO-178B, (1992). « Software considerations in airborne systems and equipment certification ». RTCA et EUROCAE, 1^{er} décembre 1992.
- [45] DO-254, (2000). « Design assurance guidance for airborne electronic hardware ». RTCA et EUROCAE, 19 avril 2000.
- [46] ARP-4761, (1996). « Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment». Society of Automotive Engineers (SAE) standard.
- [47] CEI-61508, (2010). « Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems ». International Electrotechnical Commission standard.
- [48] ISO-26262, (2008). « Véhicules routiers – sécurité fonctionnelle, version projet de comité ». International Organization of Standardization standard.
- [49] Gendreau F., Gubry F., Lohle-Tart., Van De Walle E., Waltisperger (1985). «Estimations indirectes en démographie africaine ». Manuel de Yaounde, Institut de Formation et de Recherches Démographiques (IFORD), C.E.D.I.D.-CRSTOM INV.03398.
- [50] Dumont G-F., (2004). « La démographie mondiale ». Conférence aux étudiants étrangers de l'Ecole Centrale de Lyon.
- [51] Benariba M., (2012). « Alimentation en eau potable de la ville de Chebli (W. Blida) ». En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique, Université Abou Baker Belkaid-Tlemcen- Algérie.

- [52] Allatchi T., (2011). « Projet d'adduction d'eau potable dans la ville d'Amzoer (Tchad) ». Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- [53] Robin F-X., (2005). « Méthodes d'estimations de population ». Centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Lyon.
- [54] Mathlouthi H., (2014). « Cours de démographie ». Ecole supérieur de statistique et d'analyse de l'information, Université de Carthage.
- [55] Elodie J., (2009). « Contrôle de l'état hydraulique dans un réseau d'eau potable pour limiter les pertes ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- [56] Lounes A., (2008). « Simulation d'un réseau de distribution d'eau potable à pression modulée. Application : Etage Telemly ». Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique.
- [57] Boumelita D., Debbache N., Ouerdachi L., (2014). « Contribution à l'étude de la sûreté de fonctionnement d'un système hydraulique », ICIEM'14, International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing, Batna University, Algeria May, 11-13, 2014, 5 p.
- [58] Djebabra M., (2006). « Etude de sûreté de fonctionnement d'un système électrique simple », Afrique SCIENCE 02(2) (2006), pp 176–186, ISSN 1813-548X, 11p.
- [59] Plantey J., (1997) « Gestion des risques dans un aménagement hydraulique a buts multiples », Société du Canal de Provence, 13 p.
- [60] Khalfaoui S., (2003). « Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, Année 2003.
- [61] Megdiche M., (2004). « Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée », Institut national polytechnique de Grenoble, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'INPG, Spécialité : « Génie Electrique », 13 Décembre 2004, 240 p.
- [62] Coulibaly M., Becker S., (2007). « Spatial Interpolation of Annual Precipitation in South Africa - Comparison and Evaluation of Methods », International Water Resources Association Water International, Vol. 32, N° 3, Pg. 494-502.
- [63] Keblouti M., Ouerdachi L., Boutaghane H., (2012). « Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria-comparison and evaluation of methods ». Energy Procedia pp 468–475. doi:10.1016/j.egypro. 2012.05.058.
- [64] Drešković N., Đug S., (2012). « Applying the inverse distance weighting and kriging methods of the spatial interpolation on the mapping the annual precipitation in Bosnia and Herzegovina », International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software.

- [65] Wu H., Xu Ch., (2013). « Comparison of Spatial Interpolation Methods for Precipitation in Ningxia, China », International Journal of Science and Research (IJSR), India Online ISSN: 2319-7064, Vol. 2 Issue 8, pp 181-184.
- [66] Nurul N., Mohd F., Suhaimi A-T., (2014). « Spatial interpolation of monthly precipitation in Selangor, Malaysia-comparison and evaluation of methods », International Conference on Global Trends in Academic Research, Malaysia.334-343.
- [67] Taieb D., Hamdi E., (2014). «Modélisation spatio-temporelle de la dispersion du dioxyde de soufre près d'un site industriel: Réseau de neurone & bio-indicateur », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3, pp 465 – 473.
- [68] Sandeep Ch., (2014). « A Comparison of Spatial Interpolation Methods in Wind Speed Estimation across Anantapur District, Andhra Pradesh », Journal of Earth Science Research, Vol. 2, Iss. 2, pp 48-54.
- [69] Cabau E., (1999). « Introduction à la conception de la sûreté. Cahier technique Schneider », Electric n°144, 1999.
- [70] Zaninetti J-M., (2005). « Statistique spatiale, méthodes et applications géomatiques », Hermes Science publications, Paris, 320 p.
- [71] Laurent A., (2007). « Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain », Thèse de doctorat, université de Tours, 393 p.
- [72] Laurent A., (2008). « Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain », Actes de la conférence SIG 2008 ESRI, versailles, 19 p.
- [73] Cressie, N., (1991). « Statistics for spatial data wiley series in probability and mathematical statistics: applied probability and statistics », John Wiley 900p.
- [74] Boumelita D., Debbache N., Ouerdachi L., (2018). « Contribution to study of the dependability of a drinking water system». “Journal of Water and Land Development”, 2018, No. 38 (VII-IX), pp. 11–18, No.38, PL ISSN 1429–7426, e-ISSN 2083-4535.
- [75] Boumelita D., Debbache N., Ouerdachi L., (2018). « Contribution to study of the dependability of hydraulic system », International Conference on Electronics and Electrical Engineering (IC3E'18) November 12-13, 2018, University of Bouira, Algeria.
- [76] Abderamane S-A., (2016). « Analyse du fonctionnement du réseau d'alimentation en eau potable de la commune d'El Hadjar », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba.

ANNEXES

Sectorisation du réseau d'AEP d'El Hadjar

A.1 Sectorisation du réseau d'AEP d'El Hadjar

À travers des vannes de sectorisation, on peut diviser la zone de distribution d'eau en cinq secteurs qui sont : HADJ 1, HADJ 2, HADJ 3, Cité Attoui et la cité 300 logements. Le schéma de la figure A.1 montre cette configuration.

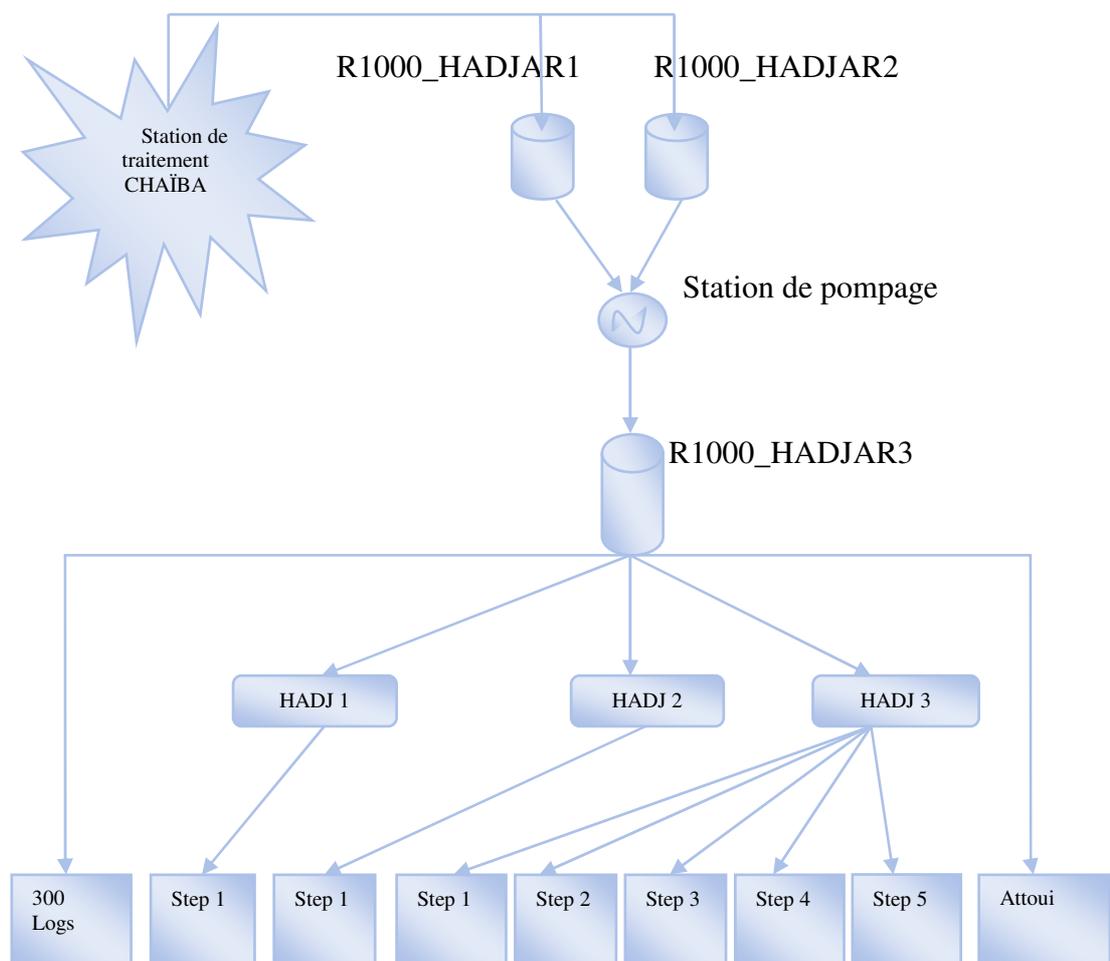


Figure A.1 Sectorisation du réseau de distribution d'eau de la ville d'El Hadjar.

A.1.1 Le secteur HADJ 1 (El Hadjar 1)

Le secteur HADJ 1 est alimenté via une conduite de diamètre nominal (dn) de 300 mm en FD. L'alimentation est assurée à travers une chambre de vannes depuis un réservoir de 1000m³ (R1000_HADJAR3).

A.1.1.1 Step 1

Le step 1 concerne le secteur CAPC qui est alimenté via une conduite dn 300 mm en FD. Il est défini comme la nourrisse de :

- La cité 200 logements.
- La cité 502 logements.

A.1.1.2 Caractéristique géométrique du secteur

Les Caractéristiques géométriques du secteur HADJ 1 Step1 sont présentées dans le tableau A.1 le suivant :

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ1	1	40	122
HADJ1	1	40	128
HADJ1	1	90	127
HADJ1	1	90	128
HADJ1	1	110	128
HADJ1	1	150	130
HADJ1	1	200	127
HADJ1	1	300	130

Tableau A.1 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 1 Step1.

A.1.2 Le secteur HADJ 2 (El hadjar 2)

Le secteur HADJ 2 est alimenté via une conduite dn 150 mm en FD. L'alimentation est assurée à travers une chambre de vannes depuis un réservoir de 1000 m³ (R1000_HADJAR3).

A.1.2.1 Step 1

Le step 1 concerne le secteur HADJ 2 qui est alimenté via une conduite dn 150 mm en FD.

A.1.2.2 *Caractéristique géométrique du secteur*

Les Caractéristiques géométriques du secteur HADJ 2 Step1 sont présentées dans le tableau A.2 :

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ2	1	110	127
HADJ2	1	150	135

Tableau A.2 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 2 Step 1.

A.1.3 **Le secteur HADJ 3 (El hadjar 3)**

Le secteur HADJ 3 est alimenté via une conduite dn 300 mm en FD. L'alimentation est assurée à travers une chambre de vannes depuis un réservoir de 1000 m³ (R1000_HADJAR3).

Le secteur HADJ 3 alimente cinq zone du réseau à travers des vannes de sous secteur (donc cinq step) qui sont :

A.1.3.1 *Step 1*

Le step 1 concerne le secteur HADJ 3 qui est alimenté via une conduite dn 300 mm en FD. Elle est défini comme la nourrisse de :

- la cité SONELGAZ.
- la cité MARS OMAR.

A.1.3.2 *Step 2*

Le step 2 concerne le secteur HADJ 3 qui est alimenté via une conduite dn 160 mm en PVC.

A.1.3.3 *Step 3*

Le step 3 concerne le secteur HADJ 3 qui est alimenté via une conduite dn 200 mm en FG. Elle est définie comme la nourrisse de :

- la cité ATTOUI.
- la cité centrale.

A.1.3.4 *Step 4*

Le step 4 concerne le secteur HADJ 3 qui est alimenté via une conduite dn 200 mm en PVC.

A.1.3.5 Step 5

Le step 5 concerne le secteur HADJ 3 qui est alimenté via une conduite dn 160 mm en PVC.

A.1.3.6 Caractéristique géométrique du secteur

Les Caractéristiques géométriques du secteur HADJ 3 avec les cinq step sont présentées dans les tableaux A.3, A.4, A.5, A.6 et A.7 les suivants :

➤ Secteur HADJ 3 Step 1

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ3	1	40	127
HADJ3	1	63	128
HADJ3	1	63	127
HADJ3	1	90	127
HADJ3	1	90	128
HADJ3	1	110	127
HADJ3	1	160	127
HADJ3	1	300	130

Tableau A.3 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step 1.

➤ Secteur HADJ 3 Step 2

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ3	2	40	122
HADJ3	2	40	128
HADJ3	2	50	122
HADJ3	2	63	128
HADJ3	2	63	127
HADJ3	2	90	128
HADJ3	2	110	127
HADJ3	2	160	127
HADJ3	2	200	130
HADJ3	2	300	130

Tableau A.4 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step2.

➤ Secteur HADJ 3 Step 3

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ3	3	40	128
HADJ3	3	60	123
HADJ3	3	63	128
HADJ3	3	90	127
HADJ3	3	90	128
HADJ3	3	110	127
HADJ3	3	110	128
HADJ3	3	160	128
HADJ3	3	160	128
HADJ3	3	200	127
HADJ3	3	200	130
HADJ3	3	300	130

Tableau A.5 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step3.

➤ Secteur HADJ 3 Step 4

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ3	4	63	127
HADJ3	4	90	127
HADJ3	4	125	127
HADJ3	4	200	127

Tableau A.6 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step4.

➤ Secteur HADJ 3 Step 5

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
HADJ3	5	40	128
HADJ3	5	63	127
HADJ3	5	90	127
HADJ3	5	160	127

Tableau A.7 Caractéristique géométrique du secteur HADJ 3 Step 5.

A.1.3.7 Liste des vannes de STEP

Liste des vannes du secteur HADJ 3 est présenté dans le tableau A.8 :

Secteur	Step	N°	Objet	Diamètre (mm)
HADJ3	2-3	55	STEP	200
HADJ3	1-2	26	STEP	150
HADJ3	1-3	78	STEP	100
HADJ3	4-3	79	STEP	200
HADJ3	3-5	80	STEP	200

Tableau A.8 Liste des vannes de STEP.

A.1.4 Secteur 300 Logements

Une bache de capacité de 200 m³ est alimentée depuis le réservoir R1000_HADJAR3, puis le distribue le vers la cité 300 logements (figure A.2). Ce secteur est alimenté via une conduite dn 110 mm en PVC, à travers une station de pompage.

A.1.4.1 Step 1

Le step 1 concerne le secteur 300 logements, il est défini comme la nourrisse de :

- La cité 300 logements.
- La cité 150 logements.

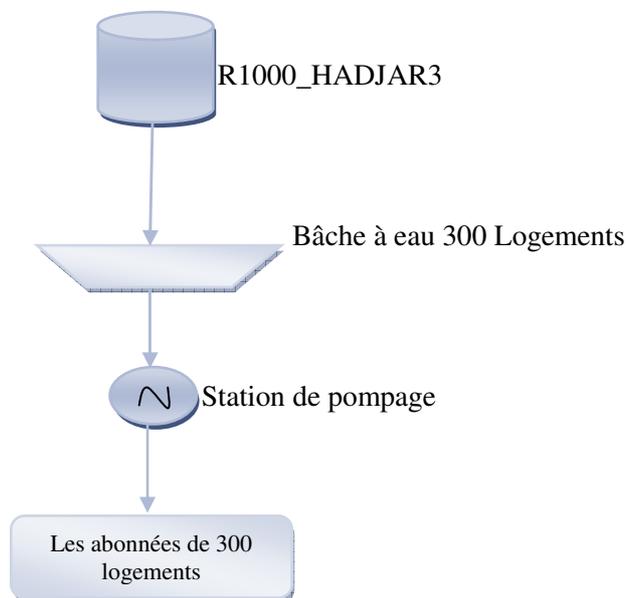


Figure A.2 Schéma du réseau de distribution d'eau de la cité 300 logements.

A.1.4.2 Caractéristique géométrique du secteur

Les Caractéristiques géométriques du secteur 300L Step 1 sont présentées dans le tableau A.9 le suivant :

Secteur	Step	Diamètre (mm)	Matériel
300L	1	40	123
300L	1	63	127
300L	1	63	128
300L	1	90	127
300L	1	110	127

Tableau A.9 Caractéristique géométrique du secteur de la cité 300 logements.

A.1.5 Secteur Attoui

Une bache de capacité de 200 m³ est alimentée depuis le réservoir R1000_HADJAR3, depuis un piquage sur une conduite de dn 300 mm en FD. Cette bache assure l'alimentation de la cité Attoui à via une conduite dn 160 mm en PVC.

A.1.5.1 Step 1

Le step 1 concerne le secteur ATTN qui est alimenté via une conduite dn 160 en PVC. Il est défini comme la nourrisse de la cité Attoui.

A.1.5.2 Caractéristique géométrique du secteur

Les Caractéristiques géométriques du secteur ATTN Step 1 sont présentées dans le tableau A.10 le suivant :

Secteur	Step	Diamètre	Matériel
ATTN	1	40	127
ATTN	1	63	128
ATTN	1	90	128
ATTN	1	90	127
ATTN	1	110	127
ATTN	1	160	127

Tableau A.10 Caractéristique géométrique du secteur de la cité Attoui.

A.1.5.3 Liste des vannes du secteur

Une liste des vannes du secteur Attoui est présentée dans le tableau A.11 suivant :

Secteur	STEP	N°	Objet	Diamètre
ATTN-HADJ3	1	87	SECT	150

Tableau A.11 Liste des vannes du secteur.

A.1 Type de matériel

Le tableau A.12 démontre le type de matériel :

Numéro	Matériel
119	Béton
120	Amiante Ciment
122	Acier
123	Acier Galvanisé
127	Polychlorure de vinyle (PVC)
128	Polyéthylène haute densité (PEHD)
130	Fonte grise (FG)
135	Fonte ductile (FD)
140	INCONNU

Tableau A.12 Type de matériel.

La figure A.3 présente une vue du secteur El Hadjar.

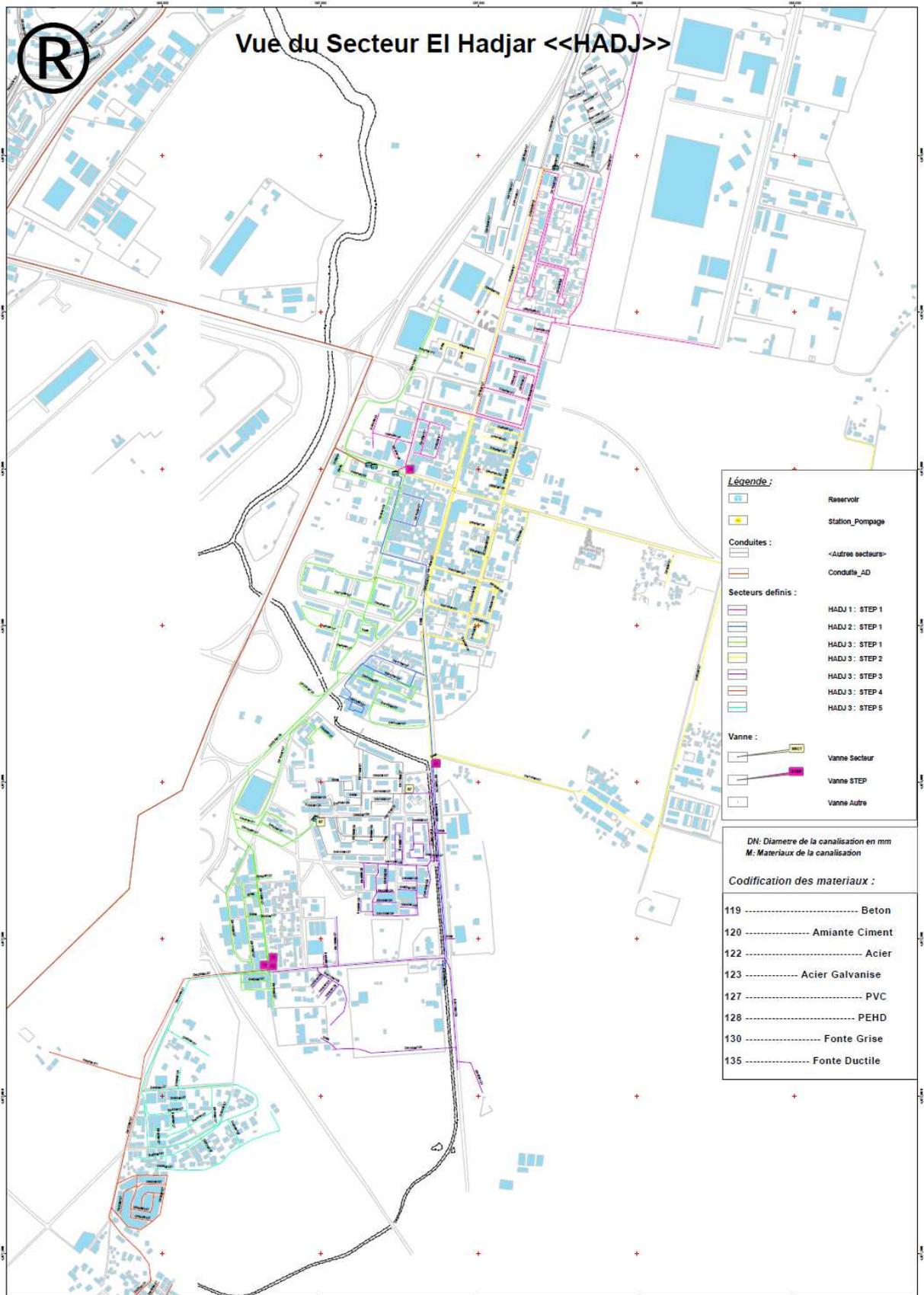


Figure A.3 Vue du secteur El Hadjar.

Annexe B

Modélisation du réseau d'AEP par GRIF

B.1 Les étapes de la modélisation par GRIF

Cette partie a pour objectif de présenter les étapes de modélisation et simulation de notre cas d'étude par l'outil «GRIF».

GRIF : est une plate-forme logicielle d'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement :

Fiabilité – Disponibilité – Performance – Sécurité

GRIF laisse le choix à l'utilisateur d'opter pour la technique de modélisation la plus adéquate à la résolution du système étudié : blocs diagrammes, arbres de défaillance, graphes de Markov, réseaux de Pétri. Des architectures déjà intégrées dans le logiciel facilitent cette modélisation. Développé au sein de Total, GRIF bénéficie de plus de 25 ans de Recherche et Développement. Cette plate-forme dispose ainsi de moteurs de calcul matures, très performants et aux capacités de modélisation propres à répondre aux besoins de l'ensemble des études fiabilistes.

B.1.1 Fenêtre principale du module Bloc diagramme de fiabilité

La fenêtre principale est décomposée en plusieurs parties (voir la figure B.1) :

- **Barre de titre:** La barre de titre indique le nom du module et le nom du fichier en cours d'édition.
- **Barre de menu:** La barre de menu permet d'accéder à toutes les fonctions de l'application.
- **Barre d'icônes (raccourcis):** La barre de raccourcis est une barre (horizontale) d'icônes permettant d'accéder plus rapidement aux fonctions usuelles.

- **Barre d'outils:** La barre d'outils (verticale) permet de sélectionner les éléments à utiliser pour la modélisation.
- **Zone de saisie:** Un maximum de place a été laissé à la zone de saisie graphique pour permettre de réaliser le modèle.
- **Arborescence:** L'arborescence est entre la zone de saisie et la barre d'outils. Elle permet de naviguer dans les pages et groupes du document.
- **Modèles:** La liste des modèles se situent en dessous de l'arborescence. Ils sont groupés en deux sous dossier suivant leur lieu d'enregistrement (Répertoire utilisateur ou d'installation).
- **Ensemble des tableaux:** Les tableaux de données sont regroupés dans des onglets à droite de la zone de saisie.

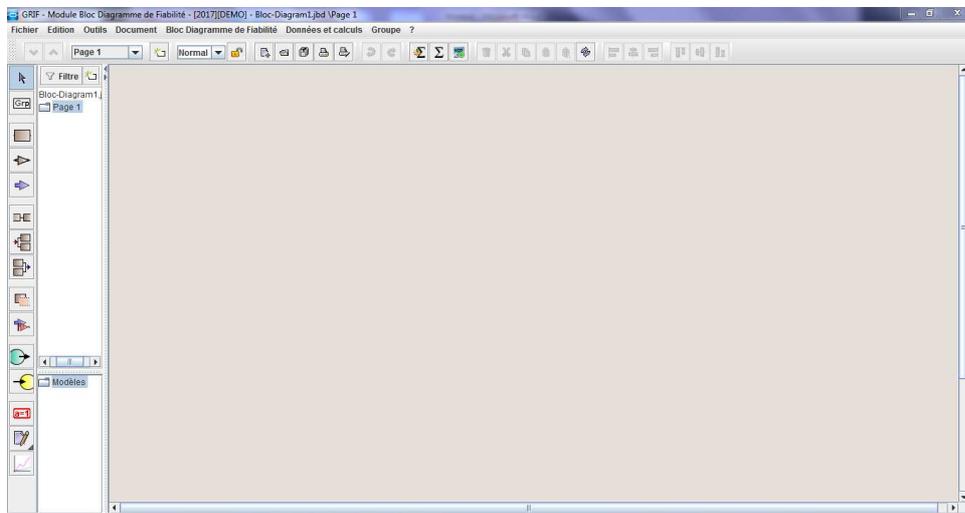


Figure B.1 Fenêtre principale du module Bloc diagramme de fiabilité.

B.1.1.1 Barre d'outils verticale

Chaque modèle utilisé en sûreté de fonctionnement possède sa propre iconographie. L'ensemble de symboles graphiques relatifs aux diagrammes de fiabilité est représenté sur la barre d'icônes placée verticalement à gauche de la fenêtre de saisie. La barre d'outils verticale est montrée dans le tableau B.1 comporte les éléments suivants : bloc, connecteur, sortie, lien série, lien diviseur, lien k sur n, bloc identique, entrée, source, cible, outils champs dynamique, outils commentaire et outils.

	Outils de sélection Permet de sélectionner les objets graphiques dans la zone de saisie.
	Groupe Permet d'ajouter un groupe (sous-page) au modèle.
	Bloc représenté par un rectangle de couleur brune.
	Connecteur représenté par une flèche de couleur brune.
	Sortie représentée par une flèche de couleur bleue.
	Lien série représenté par un arc non-orienté et permettant de connecter les différents éléments du modèle.
	Lien diviseur représenté par une flèche de couleur rouge.
	Lien K sur N représenté par une flèche de couleur bleue.
	Bloc identique représentée par un bloc en pointillé de couleur rose.
	Entrée représentée par une flèche de couleur rouge.
	Source représentée par un cercle de couleur verte.
	Cible représentée par un cercle de couleur jaune.
	Outils champs dynamique Permet de créer des commentaires dynamiques affichant les données du modèle.
	Outils commentaire Permet de créer des commentaires statiques.
	Outils courbe Permet de tracer des courbes en sélectionnant des résultats de calculs dans la banque de résultats.

Tableau B.1 Barre d'outils verticale.

B.1.2 Création d'un diagramme de fiabilité

B.1.2.1 Saisie du diagramme

➤ Saisie des blocs

Pour saisir les différents **Blocs**, il suffit de sélectionner le symbole correspondant sur la barre d'outils verticale.

Ensuite à chaque clic gauche de la souris sur la surface de saisie graphique, un nouvel élément est créé. Chacun des blocs du modèle est caractérisé par trois paramètres:

- ✓ Un **numéro**: Situés au centre des blocs, ils sont incrémentés automatiquement. Ces numéros sont les vrais identifiants des blocs qui seront utilisés par le moteur de calcul. C'est pour cette raison que deux blocs ne peuvent pas avoir un numéro identique.

- ✓ Un **nom**: Un nom par défaut est attribué à chaque bloc ("Bi" pour le bloc numéro "i"). Comme chaque bloc représente, en général, un composant ou un sous-système bien précis, il est fortement conseillé de lui attribuer un nom plus mnémotechnique que celui donné par défaut afin de mieux se repérer dans le modèle et surtout dans le fichier résultat.
- ✓ Un **commentaire**: Ce champ permet d'ajouter du texte à un bloc afin de spécifier une particularité. Les commentaires ont pour but final de faciliter la compréhension générale du modèle.
- ✓ Une **loi**: C'est l'élément qui va servir à modéliser le comportement aléatoire du bloc c'est à dire celui qui va déterminer à chaque instant si l'état est à **VRAI** ou à **FAUX**.

➤ **Les connecteurs**

- ❖ Fonction: élément pouvant "être la source" et/ou "être la cible" de plusieurs liens.
 1. S'il est la "source" de plusieurs liens, il est appelé connecteur **diviseur**.
 2. S'il est la "cible" de plusieurs liens, il est appelé connecteur **K sur N**.
- ❖ Représentation graphique:
 1. les connecteurs "classiques" sont des triangles de couleur brune;
 2. les connecteurs **diviseurs** sont des triangles de couleur rouge;
 3. les connecteurs **K sur N** sont des triangles de couleur bleue.

Remarque importante: En fonction des liens qui sont reliés au connecteur, ce dernier est converti automatiquement en **diviseur** ou en **K sur N**.

Dans l'exemple de la figure B.2 ci-dessous, un connecteur **diviseur** a été tracé entre les blocs **B1** et **B3** et un connecteur **K sur N** a été tracé entre **B2** et **B4**.

- ❖ Identification: chaque connecteur est défini par
 1. un numéro: C'est le "vrai" identifiant (celui qui sera utilisé par le moteur de calcul). Les numéros sont incrémentés automatiquement. Deux connecteurs ne peuvent pas avoir un numéro identique.
 2. un nom: Il permet simplement à l'utilisateur de donner au connecteur une appellation lui permettant de mieux se repérer au sein du modèle.
 3. un nombre **K** (seulement pour les connecteurs **K sur N**): Ici, **N** est le nombre de connections en entrée du connecteur. Si au moins **K** d'entre elles sont à VRAI, alors la valeur booléenne transmise par la sortie du connecteur est VRAI sinon c'est FAUX.

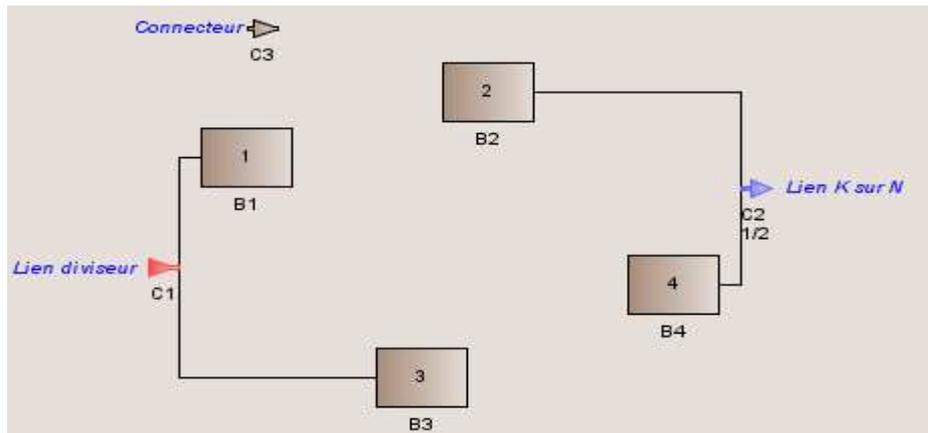


Figure B.2 Les connecteurs sur GRIF.

B.1 Bloc diagramme de fiabilité de notre cas d'étude

La figure B.3 représente le diagramme de fiabilité qui modélise le comportement du système d'alimentation en eau potable du secteur trois cent logements d'El Hadjar. Le but était donc de construire un diagramme permettant d'évaluer la disponibilité du système.

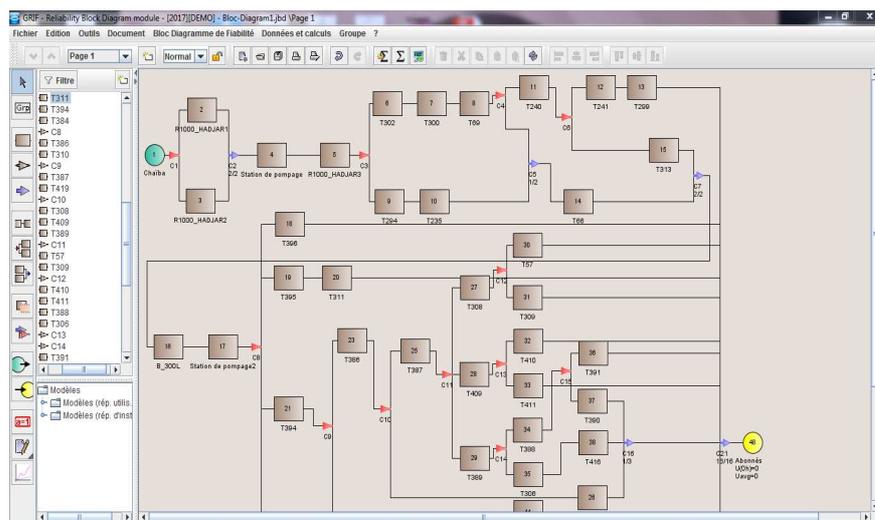


Figure B.3 Diagramme de fiabilité de notre cas d'étude sur GRIF.

B.2.1 Calcul de la fiabilité du système

Les calculs s'effectuent en deux étapes:

- le paramétrage des calculs;
- la lecture des résultats dans la banque de résultat.

La fenêtre de paramétrage des calculs est accessible de deux manières différentes : soit par le menu **Données et calculs - configuration et lancement du calcul**.

La fenêtre de paramétrage qui est ainsi ouverte est appelée **Lancement des calculs**.

La fenêtre de paramétrage se décompose en cinq onglets comme la figure B.4 ce dessous démontre.

- ❖ **Paramétrage des calculs de probabilités** : permet de définir les calculs à effectuer.
 - **Indisponibilité** : qui selon les normes notée $Q(t)$, $U(t)$ ou $PF(t)$
 - **Disponibilité** : $A(t) = 1 - U(t)$
 - **Intensité Inconditionnelle de Défaillance** : qui selon les normes notée $W(t)$, $UFI(t)$ ou $PFH(t)$. C'est la probabilité que le système tombe en panne entre t et $t+dt$, sachant qu'à $t=0$ le système n'est pas défaillant.
 - **Intensité Conditionnelle de Défaillance (Lambda eq)** : qui selon les normes notée $CFI(t)$. C'est la probabilité que le système tombe en panne entre t et $t+dt$, sachant que le système n'est pas défaillant à t et qu'à $t=0$ il n'était pas défaillant non plus.
 - **Défiabilité** : $F(t) = 1 - R(t)$
 - **Fiabilité** : $R(t) = e^{-\lambda(t)}$

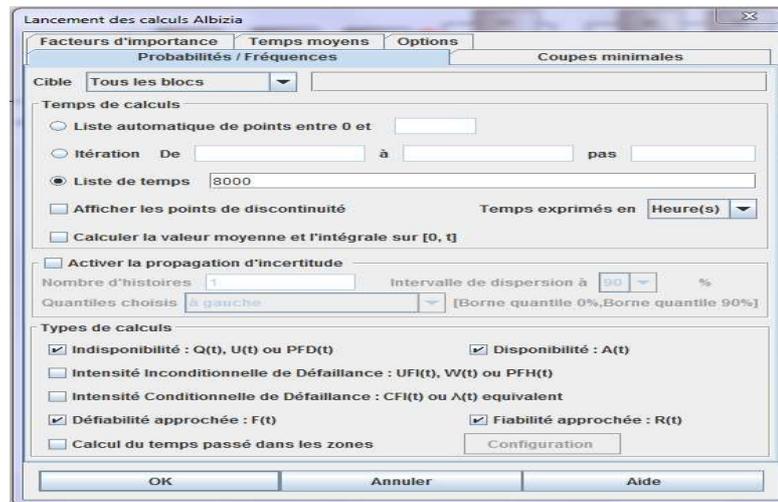


Figure B.4 Fenêtre des calculs.

Le calcul de la fiabilité $R(t)$ de notre système s'effectue à l'aide du lancement d'un calcul avec des itérations de 0 à 8000 avec un pas de 100 dans la fenêtre de paramétrage des calculs de probabilités (Probabilités / Fréquences) qui été bien expliqué dans la figure B.5.

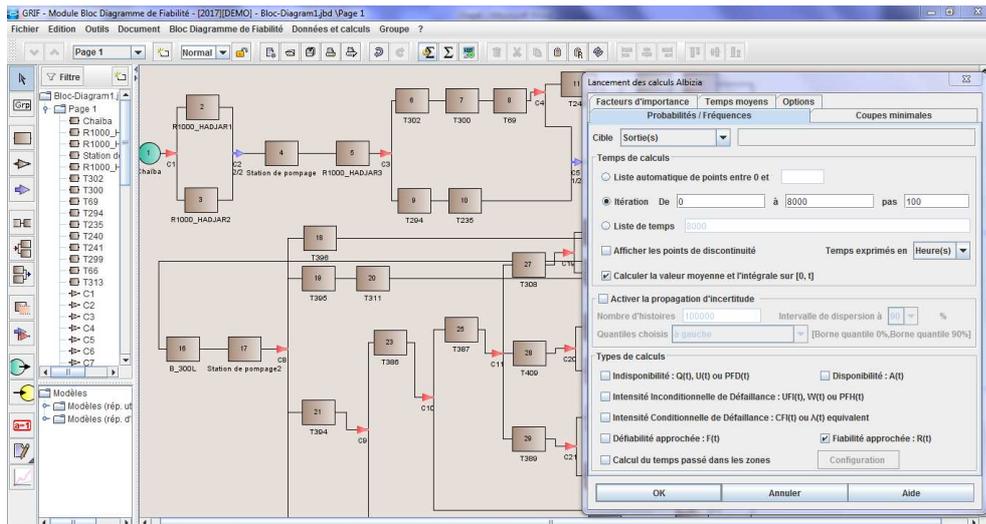


Figure B.5 Calcul de la fiabilité du système.

B.2.2 Résultat de la simulation pour la fiabilité

Les résultats sont présentés sous la forme d'une fenêtre composée de 5 onglets:

- Probabilités
- Facteurs d'importance
- Coupes
- Temps moyens
- Résultats
- Info

Afin de mieux étudier le modèle et les résultats, il est possible de tracer des courbes. Pour cela, il suffit de faire un clic gauche sur l'icône correspondante de la barre des tâches verticale. Puis la courbe de la fiabilité montrée dans la figure B.6 suivante donc sera affichée.

icône **Graphique**:

La courbe de la fiabilité décroît selon une exponentielle montrée par la figure B.6 :

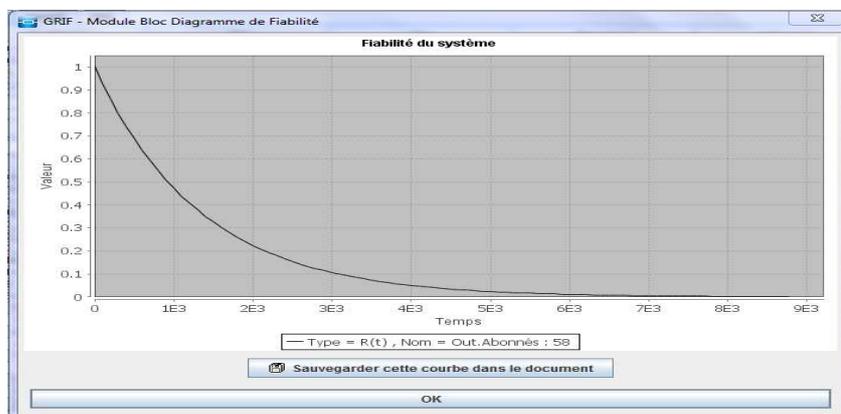


Figure B.6 Courbe de la fiabilité du système.

B.2.3 Le calcul de la disponibilité du système

Le principe de calcul de la disponibilité du système s'exécute de la même façon que la fiabilité, sauf on a choisi le type de probabilité de calcul et cocher l'icône : Disponibilité $A(t)$.

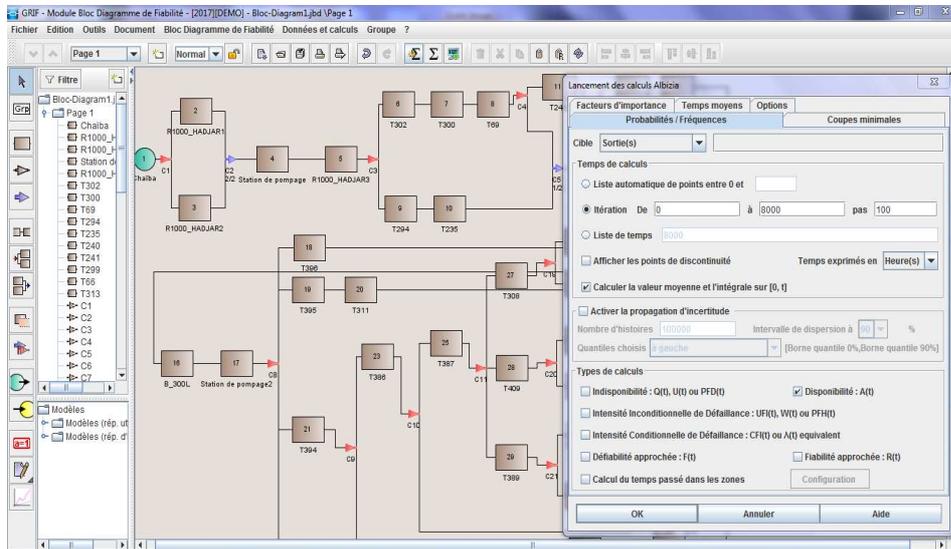


Figure B.7 Calcul de la disponibilité du système.

B.2.4 Résultat de la simulation pour la disponibilité

La figure B.8 représente la variation de la disponibilité du système à travers le temps. Cette disponibilité décroissante dans le temps vers une valeur fixe est appelée disponibilité asymptotique. Pour la modélisation par bloc diagramme de fiabilité sans redondance, la disponibilité asymptotique tend vers la valeur de 95,05%.

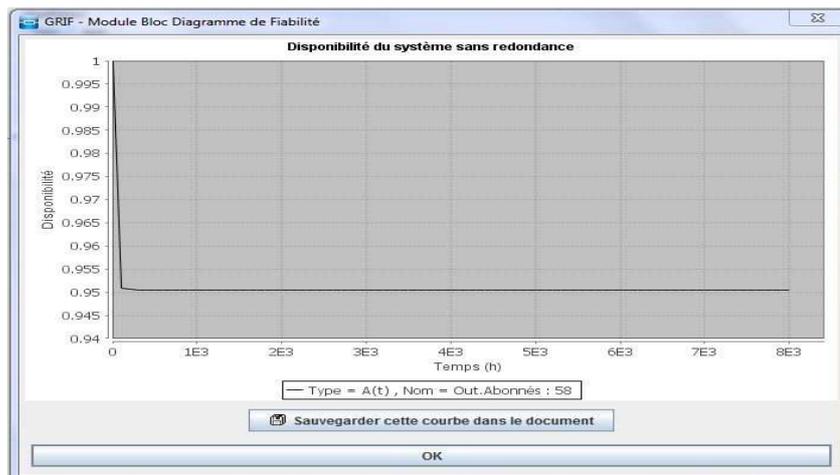


Figure B.8 Courbe de la disponibilité du système.

Annexe C

Résultats de la simulation par Epanet

C.1 Propriétés des conduites

Le tableau C.1 ci-dessous récapitule : la longueur, le diamètre, le débit et la vitesse des tronçons de notre réseau :

ID Arc	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Débit (LPS)	Vitesse (m/s)	ID Arc	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Débit (LPS)	Vitesse (m/s)
Tuyau T1	28,11	110	0,16	0,02	Tuyau T311	100,05	63	0,03	0,01
Tuyau T2	25,55	110	0,13	0,01	Tuyau T313	646,27	200	54,52	1,74
Tuyau T3	20,25	110	0,09	0,01	Tuyau T314	20,56	200	53,79	1,71
Tuyau T4	126,42	110	0,04	0,01	Tuyau T315	87,66	40	0,02	0,02
Tuyau T5	51,22	90	0,01	0,01	Tuyau T316	220,90	110	0,05	0,01
Tuyau T6	49,82	90	0,01	0,01	Tuyau T317	134,97	63	0,03	0,01
Tuyau T7	43,93	90	0,01	0,01	Tuyau T318	106,17	90	0,21	0,03
Tuyau T8	198,40	160	0,05	0,01	Tuyau T319	63,09	63	0,4	0,13
Tuyau T9	14,04	60	0,04	0,01	Tuyau T320	137,31	63	0,01	0,01
Tuyau T10	127,10	160	0,03	0,01	Tuyau T321	78,61	63	0,03	0,01
Tuyau T11	18,08	110	0,22	0,02	Tuyau T322	50,73	63	0,02	0,01
Tuyau T12	15,81	110	0,64	0,07	Tuyau T323	49,17	63	0,01	0,01
Tuyau T13	28,02	110	0,34	0,04	Tuyau T324	95,07	63	0,02	0,01
Tuyau T14	122,10	110	0,24	0,03	Tuyau T325	57,15	63	0,1	0,03
Tuyau T15	11,05	110	0,23	0,03	Tuyau T326	78,06	63	0,03	0,01
Tuyau T16	65,03	63	0,04	0,01	Tuyau T327	78,17	63	0,15	0,05
Tuyau T17	64,01	90	0,01	0,01	Tuyau T328	277,91	125	0,88	0,07
Tuyau T18	40,01	110	0,06	0,01	Tuyau T329	47,18	90	0,01	0,01
Tuyau T19	24,00	110	0,03	0,01	Tuyau T330	79,53	63	0,02	0,01
Tuyau T21	25,08	110	0,26	0,03	Tuyau T331	99,48	63	0,09	0,03
Tuyau T22	144,13	110	0,2	0,02	Tuyau T332	48,88	63	0,01	0,01
Tuyau T23	24,02	110	0,11	0,01	Tuyau T333	207,25	90	0,06	0,01
Tuyau T24	29,60	110	0,08	0,01	Tuyau T334	165,64	90	0,06	0,01
Tuyau T25	77,71	110	0,02	0,01	Tuyau T335	77,92	90	0,21	0,03
Tuyau T26	37,00	40	0,01	0,01	Tuyau T337	68,00	90	0,15	0,02

Tuyau T27	40,46	63	0,18	0,06	Tuyau T338	72,41	90	0,2	0,03
Tuyau T28	51,09	63	0,1	0,03	Tuyau T339	90,24	63	0,04	0,01
Tuyau T29	54,56	63	0,01	0,01	Tuyau T340	135,17	63	0,03	0,01
Tuyau T30	34,00	160	1,35	0,07	Tuyau T341	63,20	90	0,12	0,02
Tuyau T31	47,04	63	0,01	0,01	Tuyau T342	100,87	63	1,18	0,38
Tuyau T32	44,01	40	0,01	0,01	Tuyau T343	5,00	63	5,87	1,88
Tuyau T33	39,82	110	0,28	0,03	Tuyau T344	3,00	200	4,47	0,14
Tuyau T34	63,04	40	0,02	0,02	Tuyau T345	3,16	200	5,83	0,19
Tuyau T35	62,00	40	0,01	0,01	Tuyau T346	233,00	160	2,49	0,12
Tuyau T36	11,00	110	0,02	0,01	Tuyau T347	52,71	63	7,26	2,33
Tuyau T37	86,35	90	0,68	0,11	Tuyau T348	76,43	110	3,24	0,34
Tuyau T38	46,00	90	0,64	0,1	Tuyau T349	2,00	160	0,05	0,01
Tuyau T39	39,00	90	0,61	0,1	Tuyau T350	10,00	150	0,04	0,01
Tuyau T40	53,12	90	0,21	0,03	Tuyau T351	117,67	110	0,06	0,01
Tuyau T41	136,10	90	0,77	0,12	Tuyau T352	18,76	90	1,2	0,19
Tuyau T42	8,00	90	1,5	0,24	Tuyau T353	43,01	110	0,46	0,05
Tuyau T43	32,02	90	2,73	0,43	Tuyau T354	93,01	160	0,25	0,01
Tuyau T44	22,02	40	0,01	0,01	Tuyau T355	16,00	200	0,06	0,02
Tuyau T45	21,00	40	0,01	0,01	Tuyau T356	20,01	63	0,05	0,02
Tuyau T46	25,50	90	0,05	0,01	Tuyau T357	112,77	300	10,33	0,15
Tuyau T47	53,94	90	0,06	0,01	Tuyau T358	35,36	63	0,13	0,04
Tuyau T48	24,52	63	0,12	0,04	Tuyau T359	103,13	110	0,02	0,01
Tuyau T49	23,35	63	0,12	0,04	Tuyau T360	77,99	110	0,07	0,01
Tuyau T50	54,56	63	0,39	0,12	Tuyau T361	280,08	110	0,11	0,01
Tuyau T51	26,00	63	0,21	0,07	Tuyau T362	222,73	90	0,17	0,03
Tuyau T52	5,10	63	0,16	0,05	Tuyau T363	29,16	110	5,35	0,56
Tuyau T53	26,48	63	0,04	0,01	Tuyau T364	45,00	110	0,09	0,01
Tuyau T54	24,33	63	0,02	0,01	Tuyau T365	45,00	110	0,06	0,01
Tuyau T55	26,08	63	0,04	0,01	Tuyau T366	45,10	110	0,04	0,02
Tuyau T56	62,65	110	0,01	0,01	Tuyau T367	21,02	63	0,02	0,01
Tuyau T57	57,31	63	0,01	0,01	Tuyau T368	11,24	300	8,33	0,12
Tuyau T58	19,92	40	0,02	0,01	Tuyau T369	18,03	63	0,01	0,01
Tuyau T59	14,02	63	15,22	4,88	Tuyau T371	151,23	63	0,03	0,01
Tuyau T60	15,23	63	5,07	1,63	Tuyau T372	93,13	63	0,43	0,14
Tuyau T61	15,23	63	0,01	0,01	Tuyau T373	244,11	90	0,05	0,01
Tuyau T62	501,34	90	0,08	0,01	Tuyau T374	130,34	63	0,03	0,01
Tuyau T63	3,16	200	0,38	0,01	Tuyau T375	31,00	90	0,01	0,01
Tuyau T64	279,10	110	0,12	0,01	Tuyau T376	54,62	110	0,16	0,02
Tuyau T65	101,14	110	0,6	0,06	Tuyau T377	55,00	110	3,35	0,35
Tuyau T66	672,76	160	9,37	0,47	Tuyau T378	55,00	150	5,58	0,32
Tuyau T67	152,61	90	9,52	1,5	Tuyau T379	39,09	90	0,07	0,01
Tuyau T68	156,24	90	9,68	1,52	Tuyau T380	42,63	90	0,02	0,01
Tuyau T69	46,10	90	0,83	0,13	Tuyau T381	165,91	110	0,15	0,02
Tuyau T71	1045,47	63	0,44	0,14	Tuyau T382	63,60	160	1,3	0,06
Tuyau T72	71,57	63	0,03	0,01	Tuyau T383	31,12	40	0,09	0,07

Tableau C.1 Les paramètres des conduites.

C.2 Propriétés des nœuds

Le tableau C.2 suivant donne l'altitude, la demande, la charge et la pression de chaque nœud du réseau :

ID Nœud	Altitude (m)	Demande Base (LPS)	Charge (m)	Pression (m)	ID Nœud	Altitude (m)	Demande Base (LPS)	Charge (m)	Pression (m)
Nœud N1	8	0,01435	11,88	3,88	Nœud N325	6	0,00407	21,9	15,9
Nœud N5	6	0,01494	21,89	15,89	Nœud N326	8	0,00551	26,34	18,34
Nœud N6	6	0,02863	21,89	15,89	Nœud N327	8	0,03718	26,34	18,34
Nœud N7	7	0,01543	22,53	15,53	Nœud N328	7	0,00763	27,29	20,29
Nœud N8	6	0,03667	21,97	15,97	Nœud N329	7	0,00763	27,29	20,29
Nœud N9	7	0,00990	25,85	18,85	Nœud N330	7	0,00458	27,29	20,29
Nœud N10	7	0,00207	25,85	18,85	Nœud N331	7	0,00458	27,29	20,29
Nœud N11	7	0,00717	25,85	18,85	Nœud N332	7	0,00273	27,13	20,13
Nœud N12	7	0,00703	25,85	18,85	Nœud N333	7	0,00211	27,13	20,13
Nœud N13	7	0,01454	25,85	18,85	Nœud N334	7	0,00198	27,13	20,13
Nœud N14	7	0,00051	25,85	18,85	Nœud N335	7	0,00690	27,13	20,13
Nœud N15	7	0,00376	25,85	18,85	Nœud N336	7	0,00191	27,13	20,13
Nœud N16	7	0,00366	25,85	18,85	Nœud N337	7	0,00211	27,13	20,13
Nœud N17	7	0,00323	25,85	18,85	Nœud N338	7	0,00091	27,13	20,13
Nœud N18	7	0,03205	26,54	19,54	Nœud N339	7	0,00091	27,13	20,13
Nœud N19	7	0,00015	26,54	19,54	Nœud N340	7	0,00604	27,31	20,31
Nœud N20	7	0,00383	26,54	19,54	Nœud N341	7	0,00604	27,31	20,31
Nœud N21	7	0,00103	26,54	19,54	Nœud N342	8	0,00599	28,48	20,48
Nœud N22	7	0,02282	26,27	19,27	Nœud N343	7,4	0,01053	27,84	20,44
Nœud N23	7	0,00934	26,27	19,27	Nœud N344	6	0,00993	21,89	15,89
Nœud N24	7	0,00934	26,27	19,27	Nœud N345	6	0,02728	21,89	15,89
Nœud N25	7	0,00178	26,62	19,62	Nœud N346	8	0,00911	28,48	20,48
Nœud N26	7	0,00316	26,62	19,62	Nœud N347	8	0,02224	27,84	19,84
Nœud N27	7	0,00615	26,62	19,62	Nœud N348	8	0,01005	14,37	6,37
Nœud N28	7	0,01397	26,62	19,62	Nœud N349	7	0,00958	22,53	15,53
Nœud N29	7	0,00883	26,62	19,62	Nœud N350	8	0,00222	25,66	17,66
Nœud N30	7	0,00081	26,62	19,62	Nœud N351	7	0,00301	25,78	18,78
Nœud N31	7	0,01139	26,62	19,62	Nœud N352	7	0,00515	75,53	68,53
Nœud N32	7	0,00757	26,62	19,62	Nœud N353	8	0,02031	75,53	67,53
Nœud N33	7	0,00470	26,62	19,62	Nœud N354	8	0,00394	75,53	67,53
Nœud N34	8	0,01323	75,52	67,52	Nœud N355	7	0,06175	26,33	19,33
Nœud N35	7	0,00742	26,62	19,62	Nœud N356	7	0,00260	26,34	19,34
Nœud N36	7	0,00603	26,62	19,62	Nœud N357	8	0,01141	28,55	20,55
Nœud N38	7	0,00390	26,62	19,62	Nœud N358	8	0,00074	28,55	20,55
Nœud N39	7	0,01567	26,62	19,62	Nœud N359	8	0,00740	27,59	19,59
Nœud N40	7	0,00677	26,62	19,62	Nœud N360	7	0,02890	26,34	19,34
Nœud N41	7	0,00850	26,62	19,62	Nœud N361	7	0,00243	26,23	19,23
Nœud N42	7	0,00987	26,62	19,62	Nœud N362	7	0,00243	26,23	19,23
Nœud N43	7	0,01233	26,62	19,62	Nœud N363	8	0,00313	26,54	18,54
Nœud N44	7	0,00272	26,62	19,62	Nœud N364	8	0,01724	26,54	18,54

Nœud N45	7	0,00777	22,33	15,33	Nœud N365	7	0,00140	26,54	19,54
Nœud N46	7	0,01112	22,33	15,33	Nœud N366	8	0,00844	10,96	2,96
Nœud N47	7	0,01665	22,34	15,34	Nœud N367	7	0,00595	10,96	3,96
Nœud N48	7	0,00992	22,33	15,33	Nœud N368	7	0,00588	26,68	19,68
Nœud N49	7	0,01078	22,34	15,34	Nœud N369	7	0,00282	27,17	20,17
Nœud N50	7	0,00401	22,33	15,33	Nœud N370	7	0,00418	27,17	20,17
Nœud N51	7	0,00140	23,14	16,14	Nœud N371	7	0,01045	27,18	20,18
Nœud N52	7	0,00346	26,62	19,62	Nœud N372	7	0,00339	27,18	20,18
Nœud N53	7	0,00323	26,62	19,62	Nœud N373	7	0,00379	10,96	3,96
Nœud N54	7	0,00096	26,62	19,62	Nœud N374	7	0,01593	26,54	19,54
Nœud N55	7	0,00456	26,62	19,62	Nœud N375	7	0,00120	26,54	19,54
Nœud N56	7	0,00081	26,62	19,62	Nœud N376	7	0,00801	10,96	3,96
Nœud N57	7	0,01694	11,02	4,02	Nœud N377	7	0,00257	10,96	3,96
Nœud N58	7	0,00610	10,99	3,99	Nœud N378	8	0,01081	10,96	2,96
Nœud N59	7	0,00779	10,97	3,97	Nœud N379	8,5	0,01026	10,96	2,46
Nœud N60	7	0,00828	10,96	3,96	Nœud N380	8	0,00062	10,96	2,96
Nœud N61	8	0,00527	10,97	2,97	Nœud N381	7	0,00552	10,96	3,96
Nœud N62	8	0,01000	10,97	2,97	Nœud N382	7	0,00471	10,96	3,96
Nœud N63	8	0,00456	11,03	3,03	Nœud N383	7	0,01135	10,96	3,96
Nœud N64	7	0,00235	11,16	4,16	Nœud N384	7	0,00375	10,96	3,96
Nœud N65	8	0,00162	10,99	2,99	Nœud N385	7	0,00074	10,96	3,96
Nœud N66	8	0,00154	10,97	2,97	Nœud N386	7	0,00208	10,96	3,96
Nœud N67	8	0,04671	26,71	18,71	Nœud N387	8	0,00228	10,96	2,96
Nœud N68	7	0,03154	22,46	15,46	Nœud N388	7	0,00390	26,62	19,62
Nœud N69	7	0,00868	22,46	15,46	Nœud N389	7	0,00287	26,62	19,62
Nœud N70	7	0,00584	22,46	15,46	Nœud N390	7	0,01561	26,62	19,62
Nœud N71	7	0,00768	22,46	15,46	Nœud N391	7	0,00140	26,62	19,62
Nœud N72	7	0,00926	22,46	15,46	Nœud N392	7	0,01205	26,62	19,62
Nœud N73	7	0,00746	22,46	15,46	Nœud N393	7	0,00551	26,62	19,62
Nœud N74	7	0,01167	22,47	15,47	Nœud N394	7	0,02206	26,62	19,62
Nœud N75	7	0,00401	22,5	15,5	Nœud N395	8	0,00125	75,53	67,53
Nœud N76	7	0,02506	22,5	15,5	Nœud N396	7	0,00140	11,16	4,16
Nœud N77	7	0,01031	22,46	15,46	Nœud N397	7	0,00088	11,16	4,16
Nœud N78	7	0,00927	22,46	15,46	Nœud N398	7	0,00929	27,06	20,06
Nœud N79	7	0,01192	22,46	15,46	Nœud N399	7	0,01487	22,47	15,47
Nœud N80	7	0,00447	22,46	15,46	Nœud N400	7	0,00489	22,47	15,47
Nœud N81	7	0,00552	22,46	15,46	Nœud N401	7	0,00222	22,78	15,78
Nœud N82	7	0,00926	22,46	15,46	Nœud N402	7	0,00222	22,78	15,78
Nœud N83	7	0,00699	22,46	15,46	Nœud N403	7	0,00228	22,97	15,97
Nœud N84	7	0,00460	23,1	16,1	Nœud N404	7	0,00266	19,42	12,42
Nœud N85	8	0,02814	23,1	15,1	Nœud N405	8	0,00161	19,42	11,42
Nœud N86	8	0,01291	75,52	67,52	Nœud N406	7	0,00644	11,69	4,69
Nœud N87	8	0,01215	75,52	67,52	Nœud N407	8	0,00184	26,64	18,64
Nœud N88	8	0,00662	75,52	67,52	Nœud N408	7	0,00154	26,57	19,57

Tableau C.2 Les paramètres des nœuds.

C.3 Répartition des vitesses

La répartition des vitesses du réseau sans et avec le nouveau château d'eau est représentée dans le tableau C.3 suivant :

ID Arc	Sans nouveau château d'eau	Avec nouveau château d'eau	ID Arc	Sans nouveau château d'eau	Avec nouveau château d'eau
	Vitesse (m/s)	Vitesse (m/s)		Vitesse (m/s)	Vitesse (m/s)
Tuyau T106	0,12	0,83	Tuyau T428	0,02	0,02
Tuyau T107	0,56	2,31	Tuyau T429	0,04	0,13
Tuyau T108	0,03	0,1	Tuyau T430	0,08	0,31
Tuyau T109	0,73	2,14	Tuyau T431	0,05	0,26
Tuyau T110	0,76	2,11	Tuyau T432	1,71	1,72
Tuyau T111	0,05	0,35	Tuyau T433	0,46	0,46
Tuyau T112	0,04	0,12	Tuyau T434	0,02	0,02
Tuyau T114	0,02	0,2	Tuyau T435	0,01	0,01
Tuyau T133	0,02	0,33	Tuyau T436	0,01	0,01
Tuyau T134	0,03	0,32	Tuyau T437	0,01	0,01
Tuyau T137	0,01	0,01	Tuyau T446	0,01	0,02
Tuyau T140	0,07	0,26	Tuyau T447	0,01	0,02
Tuyau T142	0,01	0,1	Tuyau T448	0,01	0,02
Tuyau T143	0,06	0,17	Tuyau T449	0,02	0,02
Tuyau T144	0,11	0,23	Tuyau T450	0,01	0,01
Tuyau T145	0,01	0,01	Tuyau T451	0,01	0,01
Tuyau T149	0,01	0,01	Tuyau T452	0,86	0,91
Tuyau T150	0,01	0,01	Tuyau T458	2,37	6,42
Tuyau T156	0,07	1,12	Tuyau T459	0,86	0,92
Tuyau T157	0,09	1,14	Tuyau T460	0,48	0,88
Tuyau T158	0,03	0,35	Tuyau T461	0,01	0,04
Tuyau T159	0,03	0,35	Tuyau T113	0,03	0,08
Tuyau T160	0,03	0,25	Tuyau T464	0,03	0,07
Tuyau T161	0,03	0,25	Tuyau T465	0,31	0,85
Tuyau T162	0,02	0,18	Tuyau T466	0,31	0,85
Tuyau T163	0,03	0,18	Tuyau T467	0,3	0,85
Tuyau T164	0,05	0,2	Tuyau T468	0,05	0,48
Tuyau T165	0,04	0,22	Tuyau T469	0,02	0,07
Tuyau T166	0,04	0,22	Tuyau T472	0,05	0,33
Tuyau T167	0,03	0,08	Tuyau T473	0,03	0,2
Tuyau T168	0,03	0,12	Tuyau T477	0,05	0,15
Tuyau T170	0,04	0,1	Tuyau T478	0,01	0,05
Tuyau T171	0,01	0,01	Tuyau T479	0,08	0,25
Tuyau T173	0,02	0,02	Tuyau T480	0,02	0,06
Tuyau T175	0,01	0,01	Tuyau T481	0,02	0,05
Tuyau T179	0,03	0,31	Tuyau T482	0,02	0,05
Tuyau T180	0,05	0,29	Tuyau T483	0,02	0,05
Tuyau T181	0,02	0,05	Tuyau T484	0,02	0,05
Tuyau T182	0,02	0,04	Tuyau T485	0,01	0,05
Tuyau T185	0,01	0,01	Tuyau T486	0,03	0,07

Tuyau T186	0,01	0,01	Tuyau T487	0,02	0,07
Tuyau T187	0,25	0,68	Tuyau T488	0,02	0,07
Tuyau T189	0,03	0,03	Tuyau T489	0,02	0,07
Tuyau T190	0,01	0,01	Tuyau T490	0,02	0,07
Tuyau T198	0,04	0,36	Tuyau T491	0,02	0,07
Tuyau T199	0,04	0,36	Tuyau T492	0,02	0,07
Tuyau T200	0,07	1,12	Tuyau T493	0,02	0,07
Tuyau T202	0,04	0,19	Tuyau T494	0,02	0,07
Tuyau T203	0,09	0,42	Tuyau T495	0,04	0,1
Tuyau T204	0,01	0,01	Tuyau T496	0,03	0,1
Tuyau T205	0,05	0,38	Tuyau T497	0,03	0,09
Tuyau T206	0,02	0,18	Tuyau T498	0,03	0,09
Tuyau T207	0,01	0,01	Tuyau T499	0,02	0,09
Tuyau T208	0,31	0,39	Tuyau T500	0,02	0,08
Tuyau T209	0,07	0,09	Tuyau T501	0,01	0,08
Tuyau T210	0,04	0,06	Tuyau T502	0,01	0,07
Tuyau T211	0,03	0,05	Tuyau T503	0,01	0,07
Tuyau T212	0,01	0,01	Tuyau T504	0,01	0,06
Tuyau T214	0,01	0,01	Tuyau T505	0,05	0,26
Tuyau T215	0,01	0,01	Tuyau T506	0,05	0,26
Tuyau T216	0,01	0,01	Tuyau T507	0,11	0,82
Tuyau T217	0,01	0,01	Tuyau T508	0,56	2,3
Tuyau T218	0,01	0,01	Tuyau T515	0,01	0,01
Tuyau T219	0,01	0,01	Tuyau T516	0,01	0,01
Tuyau T220	0,01	0,01	Tuyau T517	0,01	0,01
Tuyau T221	0,01	0,01	Tuyau T518	0,04	0,04
Tuyau T225	0,01	0,01	Tuyau T519	0,08	0,29
Tuyau T226	0,01	0,01	Tuyau T526	0,08	0,26
Tuyau T227	0,1	0,1	Tuyau T538	0,03	0,1
Tuyau T228	0,06	0,06	Tuyau T539	0,03	0,1
Tuyau T229	0,85	1,04	Tuyau T540	0,08	0,18
Tuyau T230	1,33	1,64	Tuyau T541	0,06	0,13
Tuyau T231	0,22	0,49	Tuyau T542	0,06	0,13
Tuyau T233	0,02	0,02	Tuyau T543	0,06	0,13
Tuyau T235	0,86	0,92	Tuyau T544	0,07	0,07
Tuyau T236	0,86	0,92	Tuyau T545	0,04	0,04
Tuyau T237	0,86	0,91	Tuyau T546	0,06	0,06
Tuyau T238	0,79	0,79	Tuyau T547	0,03	0,03
Tuyau T289	0,02	0,04	Tuyau T548	0,03	0,03
Tuyau T290	0,04	0,25	Tuyau T549	0,06	0,13
Tuyau T293	2,47	6,51	Tuyau T550	0,02	0,12
Tuyau T294	1	1,14	Tuyau T551	0,05	0,38
Tuyau T295	0,01	0,01	Tuyau T552	0,05	0,35
Tuyau T303	0,57	1,24	Tuyau T470	0,07	0,29

Tableau C.3 Répartition des vitesses dans les conduites sans et avec le nouveau château d'eau.

C.4 Répartition des pressions

La répartition des pressions du réseau sans et avec le nouveau château d'eau est représentée dans le tableau C.4 le suivant :

ID Nœud	Sans nouveau château d'eau	Avec nouveau château d'eau	ID Nœud	Sans nouveau château d'eau	Avec nouveau château d'eau
	Pression (m)	Pression (m)		Pression (m)	Pression (m)
Nœud N1	3,88	15,65	Nœud N324	15,9	21,72
Nœud N5	15,89	21,71	Nœud N325	15,9	21,72
Nœud N6	15,89	21,71	Nœud N326	18,34	18,46
Nœud N7	15,53	21,35	Nœud N327	18,34	18,46
Nœud N8	15,97	21,8	Nœud N328	20,29	21,4
Nœud N9	18,85	21,38	Nœud N329	20,29	21,4
Nœud N10	18,85	21,38	Nœud N330	20,29	21,4
Nœud N11	18,85	21,38	Nœud N331	20,29	21,4
Nœud N12	18,85	21,38	Nœud N332	20,13	21,31
Nœud N13	18,85	21,38	Nœud N333	20,13	21,31
Nœud N14	18,85	21,38	Nœud N334	20,13	21,31
Nœud N15	18,85	21,38	Nœud N335	20,13	21,31
Nœud N16	18,85	21,38	Nœud N336	20,13	21,31
Nœud N17	18,85	21,38	Nœud N337	20,13	21,31
Nœud N18	19,54	21,39	Nœud N338	20,13	21,31
Nœud N19	19,54	21,39	Nœud N339	20,13	21,31
Nœud N20	19,54	21,39	Nœud N340	20,31	21,32
Nœud N21	19,54	21,39	Nœud N341	20,31	21,32
Nœud N22	19,27	21,39	Nœud N342	20,48	20,6
Nœud N23	19,27	21,39	Nœud N343	20,44	20,76
Nœud N24	19,27	21,39	Nœud N344	15,89	21,71
Nœud N25	19,62	21,39	Nœud N345	15,89	21,72
Nœud N26	19,62	21,39	Nœud N346	20,48	20,6
Nœud N27	19,62	21,39	Nœud N347	19,84	20,16
Nœud N28	19,62	21,39	Nœud N348	6,37	11,26
Nœud N29	19,62	21,38	Nœud N349	15,53	21,35
Nœud N30	19,62	21,38	Nœud N350	17,66	20,52
Nœud N31	19,62	21,39	Nœud N351	18,78	21,5
Nœud N32	19,62	21,39	Nœud N352	68,53	68,53
Nœud N33	19,62	21,38	Nœud N353	67,53	67,53
Nœud N34	67,52	67,52	Nœud N354	67,53	67,53
Nœud N35	19,62	21,39	Nœud N355	19,33	19,45
Nœud N36	19,62	21,39	Nœud N356	19,34	19,46
Nœud N38	19,62	21,39	Nœud N357	20,55	20,57
Nœud N39	19,62	21,39	Nœud N358	20,55	20,57
Nœud N40	19,62	21,39	Nœud N359	19,59	19,73
Nœud N41	19,62	21,39	Nœud N360	19,34	19,46
Nœud N42	19,62	21,39	Nœud N361	19,23	21,38
Nœud N43	19,62	21,38	Nœud N362	19,23	21,38

Nœud N44	19,62	21,39	Nœud N363	18,54	20,39
Nœud N45	15,33	21,16	Nœud N364	18,54	20,39
Nœud N46	15,33	21,16	Nœud N365	19,54	21,39
Nœud N47	15,34	21,16	Nœud N366	2,96	22,16
Nœud N48	15,33	21,16	Nœud N367	3,96	23,16
Nœud N49	15,34	21,17	Nœud N368	19,68	21,39
Nœud N50	15,33	21,16	Nœud N369	20,17	21,31
Nœud N51	16,14	21,37	Nœud N370	20,17	21,31
Nœud N52	19,62	21,39	Nœud N371	20,18	21,31
Nœud N53	19,62	21,39	Nœud N372	20,18	21,31
Nœud N54	19,62	21,38	Nœud N373	3,96	23,16
Nœud N55	19,62	21,38	Nœud N374	19,54	21,39
Nœud N56	19,62	21,39	Nœud N375	19,54	21,39
Nœud N57	4,02	23,22	Nœud N376	3,96	23,16
Nœud N58	3,99	23,19	Nœud N377	3,96	23,16
Nœud N59	3,97	23,17	Nœud N378	2,96	22,16
Nœud N60	3,96	23,16	Nœud N379	2,46	21,66
Nœud N61	2,97	22,17	Nœud N380	2,96	22,16
Nœud N62	2,97	22,17	Nœud N381	3,96	23,16
Nœud N63	3,03	22,23	Nœud N382	3,96	23,16
Nœud N64	4,16	23,36	Nœud N383	3,96	23,16
Nœud N65	2,99	22,19	Nœud N384	3,96	23,16
Nœud N66	2,97	22,17	Nœud N385	3,96	23,16
Nœud N67	18,71	20,39	Nœud N386	3,96	23,16
Nœud N68	15,46	21,28	Nœud N387	2,96	22,16
Nœud N69	15,46	21,29	Nœud N388	19,62	21,39
Nœud N70	15,46	21,29	Nœud N389	19,62	21,39
Nœud N71	15,46	21,29	Nœud N390	19,62	21,39
Nœud N72	15,46	21,29	Nœud N391	19,62	21,39
Nœud N73	15,46	21,29	Nœud N392	19,62	21,39
Nœud N74	15,47	21,29	Nœud N393	19,62	21,39
Nœud N75	15,5	21,33	Nœud N394	19,62	21,39
Nœud N76	15,5	21,33	Nœud N395	67,53	67,53
Nœud N77	15,46	21,29	Nœud N396	4,16	23,36
Nœud N78	15,46	21,29	Nœud N397	4,16	23,36
Nœud N79	15,46	21,29	Nœud N398	20,06	21,41
Nœud N80	15,46	21,29	Nœud N399	15,47	21,37
Nœud N81	15,46	21,29	Nœud N400	15,47	21,37
Nœud N82	15,46	21,29	Nœud N401	15,78	21,38
Nœud N83	15,46	21,29	Nœud N402	15,78	21,38
Nœud N84	16,1	17,97	Nœud N403	15,97	21,37
Nœud N85	15,1	16,97	Nœud N404	12,42	12,49
Nœud N86	67,52	67,52	Nœud N405	11,42	11,49
Nœud N87	67,52	67,52	Nœud N406	4,69	4,7
Nœud N88	67,52	67,52	Nœud N407	18,64	20,39

Tableau C.4 Répartition des pressions dans les conduites sans et avec le nouveau château d'eau.

C.5 ICH dans l'état actuel, futur et avec redondance

Le tableau C.5 représente les valeurs de l'ICH du secteur 300 logements d'El Hadjar dans l'état actuel, futur et avec redondance.

ID Conduite	ICH Actuel (%)	ICH Futur (%)	ICH Avec redondance (%)	ID Conduite	ICH Actuel (%)	ICH Futur (%)	ICH Avec redondance (%)
T57	2,50	4,29	1,3	T313	18,88	34,74	10,04
T66	16,60	29,58	9,02	T316	3,78	5,74	1,25
T69	1,72	3,41	0,66	T384	20,24	27,03	10
T91	4,12	6,12	1,87	T385	18,30	40,65	9,66
T188	4,12	6,12	1,87	T386	47,96	50,82	11,72
T232	2,33	4,1	1,22	T387	36,96	68,62	11
T233	6,67	9	2,25	T388	1,72	3,41	0,66
T234	4,12	6,12	1,87	T389	1,72	3,41	0,66
T240	21,64	32,45	10,72	T390	1,72	3,41	0,66
T241	1,72	3,41	0,66	T391	4,19	6,2	1,87
T294	6,65	10,23	2,23	T394	42,41	70,77	12
T298	1,96	3,68	0,69	T395	3,54	5,47	1,24
T299	9,01	11,64	3,22	T396	1,97	3,69	0,68
T300	1,72	3,41	0,66	T312	8,55	11,12	3,20
T302	1,72	3,41	0,66	T235	25,49	37,53	10,1
T306	1,72	3,41	0,66	T409	1,72	3,41	0,66
T308	4,72	6,8	1,89	T416	1,72	3,41	0,66
T309	2,50	4,29	1,3	T410	9,53	12,24	4,33
T310	2,06	3,8	1,30	T411	9,53	12,24	4,33
T311	2,58	4,39	1,34	T419	1,72	3,41	0,6

Tableau C.5 ICH des conduites du réseau actuel, futur et avec redondance.