

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Hydraulique
Laboratoire LRS/EAU

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

**Étude 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**

Par : Asma N'fissa MAGHEZZI

Sujet proposé par :

Dr Amir NAFI M.C. ENGEES

Dirigé par :

Dr Saâdia BENMAMAR M.C. ENP

Dr Amir NAFI M.C. ENGEES

Promotion 2008

Remerciements

Je tiens à remercier l'équipe de l'UMR Cemagref-Engées en GSP de Strasbourg ainsi que mon maître de stage Amir Nafi pour m'avoir accueillie dans leur unité et permis d'effectuer ce stage enrichissant au sein de cet organisme.

Je remercie Monsieur Jean-Bernard Bardiaux de l'ENGEES pour son aide et ses éclaircissements.

Je remercie Messieurs Bernard Brémond et Eddy Renaud du Cemagref de Bordeaux pour leur écoute et leur disponibilité à donner suite à toutes mes demandes d'informations.

Je voudrais aussi remercier le bureau d'études G2C environnement du Laxou Nancy, pour les données qui m'ont permis de réaliser cette étude. Une pensée particulière adressée à Benoît Marduel pour sa gentillesse, sa sympathie, sa clairvoyance, sa disponibilité à répondre à mes interrogations de la manière la plus intelligible et précise, pour ses conseils avisés et ses éclaircissements qui m'ont permis d'aborder plus sereinement certains aspects de mon étude.

Merci à Monsieur Benziada, pour avoir cru en moi et en cette expérience, et pour avoir fait les démarches nécessaires à la concrétisation de ce projet.

Mes vifs remerciements vont à mes enseignants du département d'*Hydraulique*, pour les efforts qu'ils déploient sans cesse à réunir toutes les conditions nécessaires au bon déroulement de notre formation, mettant ainsi à notre portée : leur savoir, leur écoute et leur compréhension.

Enfin j'exprime toute ma gratitude à Madame Benmamar, mon enseignante et maître de stage de l'École Nationale Polytechnique d'Alger, pour toute l'aide qu'elle m'a apportée, pour sa disponibilité, les conseils avisés qu'elle a su me prodiguer et surtout pour ses encouragements aux moments où je perdais confiance. Je voudrais également lui exprimer toute ma reconnaissance pour son soutien, sa gentillesse, et sa présence pour moi. Bien plus qu'une enseignante, vous êtes une personne chère à mon cœur.

Merci à toi Younès qui, tout au long de ce travail, m'as si gentiment offert ton aide si précieuse, ton écoute et ta présence.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, mes chers et tendres, nul remerciement ni sentiment de reconnaissance ne sied à la grandeur de votre âme. Les mots ne me viennent hélas, pas aussi facilement pour que je puisse vous exprimer mon amour, et tout simplement le bonheur et la fierté que j'éprouve à être votre enfant.

A vous, mes frères et sœurs, ma source de bonheur, d'équilibre, de réconfort et d'amour.

A mes deux petites perles de nièces.

A ma famille.

A mes amis.

A toi Bouzia, qui j'espère es fière de moi du lointain qu'habite à présent ton âme si pure.

Résumé

L'intérêt majeur de cette étude est de proposer un ensemble d'indices pour l'évaluation de la fiabilité hydraulique d'un système de distribution d'eau potable. Dans une étape préliminaire, une revue bibliographique des travaux menés traitant de la fiabilité hydraulique est établie. Une formulation d'indices spécifiques aux conduites, aux nœuds ainsi que des indices globaux est ensuite proposée, afin de caractériser la fiabilité du réseau. Nous nous sommes consacrés, en une phase ultérieure, à l'élaboration d'un outil qui permet, à travers les différentes fonctionnalités proposées, et suite à un paramétrage initial à effectuer, la visualisation des résultats relatifs à chaque calcul d'indice. Une application de l'outil sur un modèle hydraulique de réseau (Réseau de Sury Le Comtal) est enfin réalisée en vue de définir, sur un plan plus réaliste, le degré de pertinence de ces indicateurs.

Mots clés : Systèmes de distribution d'eau potable ; Fiabilité ; Criticité ; Simulation hydraulique ; MTTR ; Défaillance conduite ; FIAB

Abstract

The main interest of this study is to propose a set of indexes for the hydraulic reliability assessment of a water distribution system. In a preliminary stage, a bibliographical review of undertaken work treating hydraulic reliability is established. In one second stage, a formulation of specific pipes' and nodes' indexes as well as total indexes was made in order to characterize the reliability of the network. The following part of the study was totally devoted to the development of the computational tool of these indicators which enables us to display the results relative to each proposed functionality after an initial setting to carry out. An application of the tool on a hydraulic model of network (Network of Sury Le Comtal) is lastly carried out in order to define the degree of relevance of these measures on a more realistic level.

Keywords: Water distribution systems; Reliability; Criticality; Hydraulic Simulation; MTTR; Pipe's failure; FIAB

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو اقتراح مجموعة من المؤشرات قصد تقييم الفاعلية الهيدروليكية لأنظمة توزيع المياه الصالحة للشرب. كخطوة أولية، تم استعراض المراجع و الأعمال المندرجة في هذا السياق. قمنا بعد ذلك بصياغة مؤشرات تخص الأنابيب و أخرى خاصة بالعقد إضافة إلى المؤشرات الإجمالية و هذا بغية تقدير الفاعلية الهيدروليكية للشبكة. تم التطرق في الأخير إلى تصميم برنامج كمبيوتر يسمح بحساب المؤشرات السالفة الذكر و كذا إبراز مختلف النتائج المحصل عليها بعد عملية الإعداد. أجرينا تطبيقا لهذا البرنامج على النموذج الهيدروليكي لشبكة « Sury le Comtal » أملا في تحديد مدى دقة هذه المؤشرات على مستوى أكثر واقعية.

كلمات مفتاحية : شبكة توزيع المياه، فاعلية، الحرجية، محاكاة هيدروليكية، MTTR، عجز أنبوب، FIAB.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. FIABILITE DES RESEAUX AEP

Introduction.....	1
1.1. Fiabilité: définition et concepts.....	2
1.1.1. Fiabilité des systèmes AEP.....	2
1.1.2. Fiabilité du système de distribution d'eau potable	3
1.1.3. Types de fiabilité des systèmes de distribution d'eau.....	3
1.2. Les approches de la fiabilité.....	4
1.2.1. Les méthodes de simulation.....	4
1.2.2. Les méthodes analytiques.....	5
1.3. Propositions de mesure de la fiabilité.....	5
1.4. Quelques théories utilisées dans le cadre de la fiabilité.....	7

2. LES INDICES DE FIABILITE

Introduction.....	10
2.1. Les hypothèses de calcul.....	11
2.2. Les indices de fiabilité hydraulique.....	13
2.2.1. Les indices globaux	13
2.2.2. Les indices spécifiques aux conduites.....	17
2.3. Contribution à la proposition d'indices de fiabilité	18
2.3.1. Les indices spécifiques aux nœuds... ..	18
2.3.2. Les indices globaux.....	20
2.3.3. Les indices spécifiques aux conduites	23
Conclusion.....	25

3. PRESENTATION DE L'OUTIL FIAB

Introduction.....	26
3.1. Présentation de l'outil FIAB.....	27
3.2. Fonctionnement de l'outil FIAB	28
3.3. Les fonctionnalités FIAB	30
3.3.1. Propriétés du fichier.....	31
3.3.2. Définition des paramètres d'entrée.....	31
3.3.3. Simulation et calcul des indices.....	32
3.4. Calcul des indices.....	33
Conclusion.....	40

4. APPLICATION

Introduction.....	41
4.1. Identification des données.....	42
4.1.1. Description du réseau d'entrée.....	42
4.1.2. Présentation du modèle hydraulique de réseau.....	42
4.2. Application de l'outil FIAB.....	43
4.2.1. Paramétrage initial de l'outil.....	43
4.2.2. Analyse des résultats.....	44
Conclusion.....	57

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Liste des figures

Figure 2.1 : Niveau de desserte en fonction de la pression.....	12
Figure 3.1 : Schématisation du modèle de calcul FIAB.....	27
Figure 3.2 : Interface graphique de l’outil FIAB.....	29
Figure 3.3 : Lecture du fichier réseau.....	30
Figure 3.4 : Évolution horaire des indices spécifiques aux nœuds.....	32
Figure 3.5 : Les fonctionnalités FIAB_Box	33
Figure 3.6 : Affichage des indices globaux.....	34
Figure 3.7 : Choix du fichier poids des nœuds.....	34
Figure 3.8 : Choix de l’heure de calcul des indices aux nœuds.....	35
Figure 3.9 : Affichage des indices instantanés aux nœuds.....	35
Figure 3.10 : Choix de l’heure de calcul des paramètres aux conduites.....	36
Figure 3.11 : Affichage des paramètres instantanés aux conduites.....	36
Figure 3.12 : Evolution des indices à un nœud spécifique.....	37
Figure 3.13 : Evolution des indices à une conduite spécifique.....	37
Figure 3.14 : Etat de desserte des nœuds suite à une défaillance d'une conduite.....	38
Figure 3.15 : Hiérarchisation des conduites.....	39
Figure 4.1 : Modélisation Epanet2® du réseau de Sury Le Comtal.....	43
Figure 4.2 : Interface FIAB_Box avec paramétrage initial.....	44
Figure 4.3 : Courbe de modulation de la consommation à la sortie du réservoir de Sury Le Comtal.....	45
Figure 4.4 : Courbe de modulation des fuites sur le réseau de Sury Le Comtal.....	45
Figure 4.5 : Évolution des indices globaux sur la durée de la simulation.....	47
Figure 4.6 : Évolution des indices globaux pondérés sur la durée de la simulation.....	48
Figure 4.7 : Représentation des zones à faibles pressions à t = 20h.....	49
Figure 4.8 : Localisation des conduites C1 et C2.....	51
Figure 4.9 : Évolution des indices de conduite.....	52
Figure 4.10 : Localisation des mailles	54

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Proposition de pondération des nœuds.....	22
Tableau 4.1: Calcul des indices spécifiques aux nœuds N95, N26 et N133 à $t = 20$ h.....	50
Tableau 4.2 : Les paramètres hydrauliques instantanés aux conduites à $t = 20$ h.....	50
Tableau 4.3: Évolution des indices aux conduites sur la durée du MTTR.....	51
Tableau 4.4 : Indices aux conduites constituant différentes mailles.....	53
Tableau 4.5 : Indices aux conduites faisant partie de ramifications.....	53
Tableau 4.6 : État de desserte de quelques nœuds suite à la rupture de la conduite C69.....	55
Tableau 4.7 : Classement des conduites selon ICH , IDN et $IDN_{pondéré}$	56

Introduction générale

La gestion d'un réseau d'eau potable, qu'elle soit à court, moyen, ou à long terme, s'appuie sur des modèles et des outils d'aide à la décision. La proposition d'indices en matière de fiabilité hydraulique des réseaux d'eau potable vise à constituer un support d'arbitrage s'appuyant sur de multiples points de vue notamment la continuité du service, la satisfaction de la demande en eau des usagers en qualité et en quantité suffisantes et enfin, la préservation de la ressource en limitant les pertes.

La présente étude vise à proposer une approche personnalisée pour l'évaluation de la fiabilité hydraulique d'un système de distribution d'eau par la mise au point d'un panel d'indices permettant de quantifier cette caractéristique difficilement appréciable par des mesures physiques exactes.

La méthodologie suivie est composée essentiellement de deux étapes interdépendantes: (1) la définition des indices de fiabilité par des considérations et hypothèses émises, (2) la mise en œuvre d'un outil de calcul de ces indices par des simulations stochastiques à partir du logiciel Epanet.

Dans une première partie, nous ferons le point sur l'état d'avancement actuel de la recherche concernant les méthodes de calcul de la fiabilité des systèmes d'alimentation en eau potable. Nous tenterons de répertorier ces travaux et de présenter le concept de la fiabilité hydraulique selon chaque auteur. Nous examinerons ensuite les propositions d'indices de fiabilité existants ainsi que leur formulation détaillée (paramètres utilisés).

Nous déterminerons, dans une seconde étape, un ensemble d'indices mesurant la fiabilité d'un système de distribution d'eau potable, les systèmes d'approvisionnement et de traitement ne seront cependant pas pris en considération.

Nous nous consacrerons, dans une phase finale, à l'élaboration d'un outil de calcul de ces indices ainsi qu'à son application sur un modèle hydraulique de réseau, afin d'évaluer la pertinence des résultats fournis.

L'outil fin élaboré devra conforter la prise de décision concernant les travaux de renouvellement à entreprendre sur le réseau, apportant ainsi, une aide aux gestionnaires des services dans leur programmation pluriannuelle des travaux de maintenance et de renouvellement des réseaux.

Chapitre 1

Fiabilité des réseaux AEP

Introduction

L'évaluation de la fiabilité hydraulique du système d'alimentation en eau potable est une tâche complexe puisqu'elle dépend d'un large nombre de paramètres ; la qualité et la quantité d'eau disponible à la source, la caractéristique de rugosité ainsi que le débit véhiculé par chaque conduite du réseau, les ruptures de conduites, de vannes et des pompes, la variation de la demande journalière, hebdomadaire et saisonnière ainsi que l'évolution de la demande sur les années (Gupta, 1994).

On admet que la fiabilité hydraulique d'un réseau est sa capacité à assurer une continuité du service afin de satisfaire les besoins en eau des usagers en qualité (dans le respect des normes de potabilité), en quantité et à pression suffisante.

La fiabilité d'un système complexe donné peut être caractérisée par un ensemble d'indices reflétant la qualité de fonctionnement de ce système. Les différents types d'indices proposés dans la littérature notamment dans (Hobbs, 1988a) sont présentés sous la forme :

- de probabilité de défaillance définie comme la probabilité que le système ne puisse plus assurer la demande requise,
- d'indices de sévérité qui décrivent l'impact de la défaillance sur le système,
- d'indices de durée-fréquence qui indiquent la durée d'une défaillance de sévérité donnée et la fréquence d'apparition d'un tel évènement,
- d'indicateurs des conséquences économiques d'un manque d'approvisionnement du système.

Ainsi, pour bien appréhender le problème de la fiabilité des systèmes AEP et essayer d'évaluer cette caractéristique, il est nécessaire :

- de bien définir le système à étudier,
- de bien définir l'approche par laquelle on aborde cette notion fiabilité,
- de se fixer un choix d'indices traduisant cette fiabilité,
- de calculer les indices.

1.1 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 : 1) débits à desservir aux nœuds ; 2) niveaux de pressions avec lesquels ces débits doivent être délivrés (Mays et al., 2000).

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.

1.1.1 Fiabilité des systèmes (A.E.P)

Le rôle d'un système AEP est de satisfaire la demande des usagers, en faisant transiter, de la ressource aux consommateurs, la quantité d'eau adéquate définie par ces derniers.

Un système d'alimentation en eau potable peut comporter les six éléments suivants :

- ressource en eau (peut inclure un premier stockage),
- pompage,
- transport,
- traitement,
- stockage,
- transit de la demande.

Les cinq premiers éléments constituent l'approvisionnement, le dernier constitue la distribution. Ces deux parties ou sous-systèmes peuvent être considérés comme des systèmes à part entière.

Choix du système à étudier

Un système 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 des systèmes de distribution.

1.1.2 Fiabilité du système de distribution d'eau potable

Le problème de fiabilité hydraulique d'un système de distribution d'eau potable se résume au problème général de fiabilité du réseau. Les événements qui réduisent la fiabilité initiale du réseau 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.

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

1.1.3 Types de fiabilité des systèmes de distribution

L'évaluation de la fiabilité telle que le définit la littérature, peut être classée en deux catégories : topologique et hydraulique.

i) La 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.

Mays et Cullinane (1986) ; Wagner et al. (1988 a, b) ; Sue et al. (1987) se sont exclusivement consacrés à l'étude de la fiabilité mécanique.

Wagner et al. (1988) définissent deux notions distinctes pour évaluer la fiabilité du réseau : (1) l'atteignabilité (reachability) qui traduit la probabilité qu'un nœud donné soit connecté à un minimum d'un nœud source ; (2) la connectivité (connectivity) qui traduit la probabilité que l'ensemble des nœuds soient connectés à un nœud source au minimum.

Shamsi (1990) et Quimpo et Shamsi (1991) définissent la mesure NPR (Node Pair Reliability) comme étant la probabilité qu'un nœud spécifique de demande soit connecté à un nœud source précis.

Les mesures employées dans ce type d'approches, ne considèrent que l'état de connectivité existant entre les nœuds du réseau. Le niveau de service fourni aux consommateurs après la survenue d'une éventuelle défaillance sur le réseau n'est cependant pas pris en compte. Ceci dit, l'existence d'un chemin desservant un nœud de demande à partir d'un nœud source ne garantit pas forcément une desserte satisfaisante dans le cas d'un réseau fonctionnement du réseau sous défaillance. En effet, le cas échéant, la redistribution des débits et pressions se fait selon l'équation non-linéaire de Hazen-Williams.

ii) La 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. La méthode par simulation stochastique ou encore connue sous le nom de méthode Monte Carlo, demeure la plus précise pour l'évaluation de la fiabilité d'un réseau AEP. Elle a été étudiée par les auteurs Bao et Mays (1990) ; Fujiwara et Ganesharajah (1993) ; Su, Mays, Duan et Lansey (1987) ; Wagner et al. (1988b). Cette méthode englobe : la génération aléatoire d'évènements de type « défaillances » sur les composantes du réseau, une simulation du nouveau fonctionnement du réseau et enfin une récupération des paramètres ainsi générés pour le calcul des indicateurs de performance. Les données collectées dépendent du type d'indicateur que l'on doit calculer. D'autres méthodes d'évaluation de la fiabilité hydraulique des systèmes de distribution d'eau potable ont été répertoriées et publiées par l'ASCE (American Society of Civil Engineers), notamment les travaux de Mays et al., (1989) ainsi que les travaux de Engelhardt, Skipworth, Savic, Saul et Walters (2000).

Gupta et Bhave (1994), Tanyimboh et al. (2001) ont eux, considéré les deux concepts de fiabilité hydraulique et mécanique.

1.2 Les approches de la fiabilité

Bien qu'il existe plusieurs approches utilisant le concept de fiabilité : nombre total de casses, les fonctions pertes économiques ainsi que la redondance forcée du réseau par ajout de conduites, 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. Les auteurs, dans (Wagner, 1988a et 1988b) et (Hobbs, 1988a et 1988b) définissent : les approches par les méthodes de simulation et les approches par les méthodes analytiques.

1.2.1 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.

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 scénario 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.

Bao et Mays (1990) utilisent cette méthode pour la mesure de la fiabilité hydraulique du réseau. Dans leurs cas d'étude, les scénarii temps sont générés par la modélisation de la distribution des probabilités sur la demande et la pression aux nœuds ainsi que les rugosités des conduites.

Yildiz (2002) utilise la méthode de simulation pour la mesure de la fiabilité mécanique du réseau. Des scénarii de casses sur les conduites et d'isolation par fermeture des vannes sont générés et une nouvelle simulation du système dans son état de fonctionnement actuel est lancée, afin d'évaluer la fiabilité hydraulique.

1.2.2 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 (Wagner, 1988a) 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.

1.3 Propositions de mesure de la fiabilité

Les mesures de la fiabilité hydraulique peuvent changer selon la méthode de simulation adoptée. Wagner et al. (1988b) ont listé vingt mesures différentes de la fiabilité obtenues suite à différentes simulations.

a) Concernant 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) Concernant l'ensemble du réseau

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

c) Concernant les nœuds de consommation

- la demande totale durant la période de la simulation,
- le déficit en pression et en débit,
- la charge hydraulique moyenne,
- le nombre des services réduits,
- la durée du service réduit,
- le nombre d'évènement de casses,
- la durée de l'évènement casse.

d) Concernant les évènements proprement dits

- 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 pour les réparations.

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.

1.4 Quelques théories utilisées dans le cadre de la fiabilité

1.4.1 Théorie de la dépendance de la pression et de la demande

Lors de la conception du réseau de distribution d'eau, l'objectif principal à remplir est d'assurer une desserte en eau en quantité et à pression suffisante aux nœuds de consommation.

Cependant, la croissance de la demande dans le temps, le vieillissement des conduites ainsi que l'occurrence de défaillances sur les organes hydrauliques du réseau, notamment les pompes et les stabilisateurs de pression, peuvent provoquer l'apparition de nœuds déficitaires suite à une chute de leur pression de service. Afin d'assurer une satisfaction totale de la demande au niveau du nœud, il est impératif que la charge hydraulique (ou pression) y soit supérieure ou égale à la charge (ou pression) résiduelle minimum requise.

Les déficiences rencontrées sur un réseau sont généralement causées par un mal fonctionnement (ou fonctionnement intermittent) d'éléments présents sur le réseau.

Les ruptures de conduites ne sont généralement pas considérées durant la phase de conception du réseau. Afin de pouvoir intervenir pour une réparation sur conduite rompue, il est nécessaire de l'isoler du système. Certains nœuds seront par conséquent déconnectés du réseau, d'autres verront leur niveau de pression chuter.

Les vannes présentes sur le réseau doivent non seulement assurer la réduction et/ou la stabilisation de la pression, mais aussi l'isolation d'une conduite du reste des canalisations du système. Dans une configuration idéale, il y aurait présence de vanne sur chaque extrémité de conduite afin de faciliter son élagage du réseau sans perturber le fonctionnement de celui-ci. Cela n'est sans doute pas le cas dans la réalité, puisqu'il est parfois nécessaire d'actionner plusieurs vannes pour l'isolation d'une seule conduite.

Nous définissons deux types d'approches pour la mesure de la fiabilité : l'approche basée sur la demande ou DDA (Demand Driven Analysis) et l'approche basée sur la pression ou PDA (Pressure Driven Analysis)

L'inconvénient majeur de l'approche basée sur la demande (DDA) est qu'elle ne soit pas capable de mesurer la déficience partielle du réseau en matière de performance. Les approches basées sur la pression (PDA) répondent, à contrario, à cette exigence. En effet, il est à noter que la demande au nœud ne peut être entièrement satisfaite que lorsque la pression de desserte est supérieure ou égale à la pression requise à ce nœud, autrement, il ne sera délivré qu'une fraction de la demande.

Les approches basées sur la pression sont établies sur la théorie de la dépendance « Demande-Pression ». Celle-ci énonce clairement la relation existant entre la demande et la pression disponibles.

Plusieurs approches mettant en évidence cette dépendance entre demande et pression existent dans la littérature.

Bhave (1981, 1991) propose une méthode itérative appelée « Node Flow Analysis » (Analyse de la Demande au Nœud) qui calcule les débits disponibles aux nœuds sous une défaillance quelconque. Cette méthode ne propose pas de relation directe entre la pression disponible et la fraction de la demande ainsi desservie, mais met à disposition une solution itérative par une catégorisation des nœuds de demande suivant leur niveau de pression.

La première étude menée en ce sens et énonçant explicitement l'étroite relation entre la pression et la consommation au nœud a été établie par Germanopoulos (1985). L'inconvénient de ce modèle réside notamment dans les trois constantes qu'il présente et dont aucune description précise ni explication ne sont fournies pour deux d'entre elles.

Plus tard, dans les études de (Wagner, 1988a), (Fujiwara, 1990), (Fujiwara, 1993) et (Goulter, 1990), les auteurs notent la nécessité de tenir compte des débits et/ou des pressions aux différents nœuds mettant en évidence la différence entre une desserte en eau dans des conditions de pressions et de débits désirés et celle ne s'effectuant pas dans ces mêmes conditions.

Il serait nécessaire dans ce cas, de définir de nouveaux indices tenant compte du niveau de desserte aux nœuds de consommation. Deux principaux indices de fiabilité sont alors formulés :

- la probabilité que la demande soit servie (Wagner, 1988a), (Goulter, 1990) ;
- le rapport entre la demande servie et la demande totale (Fujiwara, 1990), (Fujiwara, 1991)

Pour calculer ces indices, il est essentiel d'utiliser un modèle de fonctionnement hydraulique de réseau plus ou moins complexe (Wagner, 1988a).

Dans (Wagner, 1988a), les auteurs utilisent un modèle capacitif simple où chaque tronçon possède une capacité de transport maximale. Ce modèle leur permet :

- de déterminer si, dans le cas où certaines conduites sont défaillantes, le débit correspondant à la demande peut arriver à un nœud donné,
- de calculer la probabilité que le nœud puisse recevoir de l'eau en quantité suffisante, en explorant les différentes alternatives de casses des conduites.

Les approches (Fujiwara, 1990) et (Goulter, 1990), sont similaires. (Fujiwara, 1990), présente un modèle capacitif ; tandis que (Goulter, 1990) utilise un modèle qui consiste en une répartition des débits dans les tronçons suivant une table d'allocation prédéterminée.

La méthode suivie dans (Jowitt, 1993) consiste à calculer une distribution de débit (afin de savoir par quels tronçons est transitée l'eau qui arrive aux nœuds) pour ainsi mesurer l'impact des défaillances des tronçons sur la demande aux nœuds avec l'hypothèse simplificatrice, que plusieurs conduites ne peuvent se rompre simultanément.

Les modèles utilisés par les auteurs précédemment cités sont des modèles relativement simplistes.

Les auteurs de (Gupta, 1994) utilisent un modèle hydraulique de calcul de réseau qui permet d'évaluer les valeurs de demande et de pression au niveau des nœuds, les demandes étant considérées comme des fonctions discontinues de la pression. La demande des consommateurs est supposée satisfaite si la pression est supérieure à une pression fixée donnée et nulle, si la pression est inférieure à cette dernière valeur.

Pour les méthodes de simulation, les modèles de réseaux doivent être précis. Dans (Wagner, 1988b), les auteurs emploient un modèle hydraulique non-linéaire de calcul des pressions. Ce modèle est, comme le précédent, relativement réaliste.

Toutefois, une approche tout à fait différente existe (Awumah, 1991). Cette approche consiste à mesurer la redondance du réseau par une mesure de son entropie. Selon les auteurs, un maillage du réseau augmente sa fiabilité.

Chandapillai (1991) propose un modèle qui s'avère satisfaisant de part l'équation fondamentale établie entre la pression et la demande plus tard développée les études de Tanyimboh et al. (2001) et Nohutçu (2002). Misirdali (2003) s'inspire du modèle Chandapillai (1991) et de l'étude de Nohutçu (2002) et propose ainsi le « Modified Chandapillai Model ».

Chapitre 2

Les indices de fiabilité hydraulique

Introduction

L'intérêt majeur de cette étude est de proposer une approche personnalisée d'évaluation de la fiabilité hydraulique du réseau. La présente partie du travail mené est, en ce sens, entièrement consacrée à la définition d'un ensemble d'indices permettant d'évaluer cette caractéristique difficilement quantifiable.

Les indices proposés seront calculés sur la base de la nature stochastique des paramètres hydrauliques tels que la demande aux nœuds, la pression, les coefficients de friction, les niveaux des réservoirs etc. Les hypothèses conditionnant la formulation de ces indicateurs sont préalablement définies.

2.1 Les hypothèses de calcul

Un ensemble d'hypothèses restrictives et simplificatrices a été émis afin de faciliter certains calculs d'indices notamment ceux spécifiques aux conduites.

Ces hypothèses portent essentiellement sur la dépendance existant au niveau du nœud, entre la demande et la pression de service. Les consommations seront donc estimées selon les hypothèses de Wagner et al. (1988).

Autre considération importante, celle de la non occurrence simultanée des défaillances sur les conduites. En effet, la chronique d'évènements du type 'casse de conduite' est strictement linéaire. Plusieurs canalisations ne peuvent donc se rompre au même instant. Un temps de réparation ou d'intervention sur la conduite élaguée, désigné par le MTTR (Mean Time To Repair), est ainsi pris en considération.

Nous partons donc des considérations suivantes :

- Les évènements de type « défaillances » considérés tout au long de notre étude ne sont portés que sur les ruptures de conduites.
- Les défaillances n'ont pas lieu simultanément sur les conduites, une seule casse peut être envisagée à un instant donné.
- La défaillance de la conduite est traduite par sa mise hors service du réseau (fermeture).
- La durée d'indisponibilité de la conduite est mesurée par le temps moyen d'intervention sur la conduite MTTR (MeanTime To Repair).

Évaluation de la consommation au nœud

La consommation au niveau des nœuds ne peut être mesurée, ni calculée mais peut cependant être approchée en utilisant quelques unes des méthodes proposées, notamment celles donnant la relation entre la demande et la pression desservies aux nœuds.

Dans l'étude de (Wagner et al, 1988) les auteurs établissent une relation mettant en exergue l'étroite dépendance existant entre la quantité d'eau desservie et la pression disponible au nœud de consommation. Ils distinguent, à travers la définition de deux seuils de pression; inférieure P_{inf} et supérieure P_{sup} , trois paliers relatifs au degré de satisfaction de la demande. La consommation est alors estimée selon une comparaison qu'ils établissent entre la pression disponible au nœud (notamment celle après occurrence de la défaillance) et les deux seuils de pression P_{inf} (ou P_{min}) et P_{sup} (ou P_{max})

- Le premier palier concerne les pressions inférieures à P_{inf} . La consommation au nœud i est nulle : $Consommation(i) = 0$
- Le second palier considère les pressions comprises entre P_{inf} et P_{sup} . La demande au nœud i ($demande(i)$) est partiellement satisfaite. La consommation est alors donnée par la relation suivante :

$$Consommation(i) = demande(i) \sqrt{\frac{P_i^{dispo} - P_{inf}}{P_{sup} - P_{inf}}} \quad (2.1)$$

avec P_i^{dispo} : Pression disponible au nœud de consommation i .

- Le troisième palier concerne les pressions supérieures à P_{sup} . la demande au nœud est entièrement satisfaite. La consommation est égale à la demande :

$$Consommation(i) = demande(i)$$

La figure ci-dessous est une illustration de la méthode de calcul de la consommation en fonction des paliers de pression

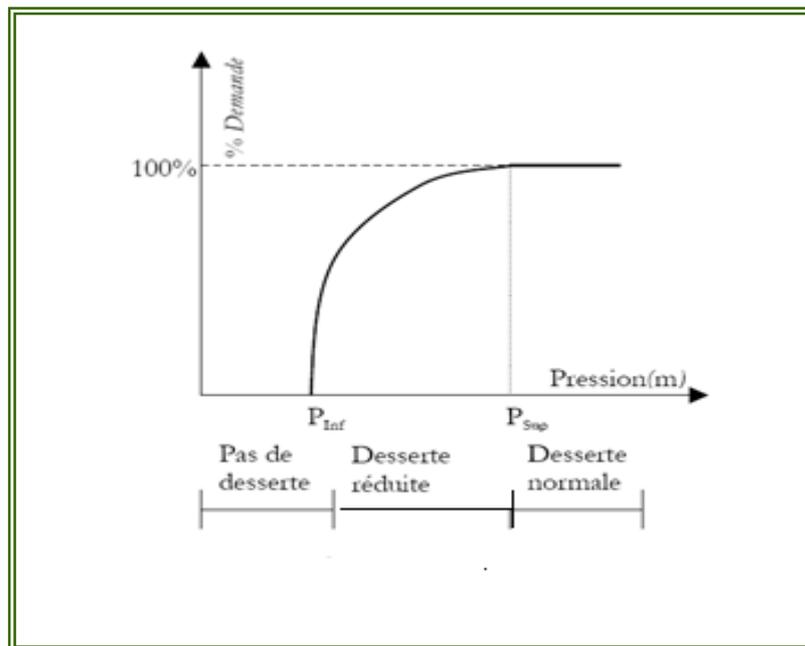


Figure 2.1 : Niveau de desserte en fonction de la pression (Wagner et al., 1988)

2.2 Les indices de fiabilité hydraulique

Après nous être intéressés à ce que proposait la littérature en termes de mesures pour l'évaluation de la fiabilité hydraulique, nous nous sommes consacrés à la définition de nouveaux indices, en nous inspirant des concepts utilisés dans les études préalables.

Nous allons, dans un premier temps, présenter les indices tirés d'une synthèse de la bibliographie que nous avons établie, notamment ceux, portant sur les conduites ainsi que sur le réseau dans son ensemble.

2.2.1 Les indices globaux

Ce sont des indices formulés en termes d'énergie contenue dans le réseau, de surpression ou encore de surpuissance disponible sur l'ensemble des nœuds, l'intérêt majeur étant de pouvoir considérer le réseau dans son ensemble. Ces indices peuvent servir d'éléments de comparaison de la fiabilité de deux configurations possibles de réseau, d'un point de vue de dimensionnement et de topologie.

a) Indice de satisfaction de la demande

(Ivaltemir et al, 2004) proposent de mesurer la fiabilité du réseau par une estimation de l'adéquation existant entre la pression disponible au nœud de consommation et la pression minimale requise. L'indice est formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi(i, t) = \sqrt{\frac{P(i, t) - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}} \quad \text{si } P_{\min}(i, t) < P(i, t) \leq P_{\max}(i, t) \\ \psi(i, t) = 0 \quad \text{si } P(i, t) < P_{\min}(i, t) \quad \text{ou} \quad P(i, t) > P_{\max}(i, t) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

avec $P(i, t)$: Pression disponible au nœud i à l'instant t ,

$P_{\min}(i, t)$: Pression minimale à partir de laquelle une desserte en eau des nœuds de consommation est possible,

$P_{\max}(i, t)$: Pression maximale tolérée aux nœuds de consommation.

Les auteurs proposent un indice traduisant la satisfaction journalière de la demande aux nœuds à travers la formule suivante :

$$I_{satis.demand} = \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_n} \psi(i,t) \frac{Q_{dem}(i,t)}{\sum_{i=1}^{N_n} Q_{dem}(i,t)}}{\sum_{i=1}^{N_n} Q_{dem}(i,t)} \quad (2.3)$$

avec $Q_{dem}(i,t)$: Demande au nœud i à l'instant t ,

N_n : Nombre total des nœuds de consommation du réseau.

b) Indice de surplus de pression (Total Surplus Head Index)

(Walski & Gessler, 1999) évaluent la fiabilité du réseau en calculant la surpression disponible sur l'ensemble des nœuds de consommation. L'indice est défini comme suit :

$$I_{surplus.head} = \sum_{i=1}^{N_n} (P_i^{dispo} - P_i^{req}) \quad [m] \quad (2.4)$$

avec N_n : Nombre total des nœuds de consommation du réseau ;

P_i^{dispo} : Pression disponible au nœud i [m],

P_i^{req} : Pression requise (P_{max}) au nœud i pour une satisfaction totale de la demande [m]

c) Indice de résilience

(Todini, 2000) propose une nouvelle méthode de mesure de la fiabilité des réseaux maillés s'inspirant du concept de la résilience. Il préconise, d'augmenter l'énergie à chaque nœud de consommation comme un moyen envisageable pour faire face à une défaillance ou à un changement de la demande aux nœuds, créant ainsi un surplus d'énergie interne à dissiper en cas de défaillance. L'objectif étant d'assurer une pression adéquate aux nœuds de consommation supérieure à la pression minimale de service.

Selon l'auteur, le réseau est de plus en plus fiable lorsque sa puissance interne (ou énergie par unité de temps) augmente. Il formule un indice en termes d'énergie interne contenue dans le réseau (ou entropie).

La puissance contenue dans le réseau, ou encore puissance totale des apports au réseau P_{totale} , est définie comme étant la somme de la puissance interne dissipée en raison des frictions et les pertes de charge dans les conduites P_{int} , ainsi que la puissance extérieure délivrée aux nœuds de consommation P_{ext} . Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_{totale} = P_{int} + P_{ext} \quad (2.5)$$

$$P_{totale} = \gamma \sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k \quad (2.6)$$

$$P_{ext} = \gamma \sum_{i=1}^{N_n} q_i^{dispo} h_i^{dispo} \quad (2.7)$$

- où
- P_{totale} : Puissance totale des apports au réseau (réservoirs) [watts],
 - P_{ext} : Puissance délivrée aux nœuds de consommation [watts],
 - N_r : Nombre total des réservoirs présents au niveau du réseau,
 - γ : Poids spécifique de l'eau [N/m³],
 - Q_k : Débit à la sortie du réservoir k [m³/s],
 - H_k : Charge hydraulique du réservoir k égale à la côte du radier [m],
 - N_n : Nombre total des nœuds de consommation du réseau,
 - q_i^{dispo} : Consommation au nœud i [m³/s],
 - h_i^{dispo} : Charge hydraulique disponible au nœud i [m].

L'idée que suggère l'auteur est d'augmenter l'énergie disponible dans le réseau en surestimant l'énergie dissipée. Il définit l'indice de résilience I_r comme suit :

$$I_r = 1 - \frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \quad (2.8)$$

où :

$$P_{int}^* = P_{tot} - \gamma \sum_{i=1}^{N_n} q_i^{req} h_i^{dispo} \quad (2.9)$$

$$P_{max}^* = P_{tot} - \gamma \sum_{i=1}^{N_n} q_i^{req} h_i^{req} \quad (2.10)$$

- P_{int}^* : Puissance dissipée dans le réseau pour satisfaire la demande totale [watts],
- P_{max}^* : Puissance maximum à dissiper pour une satisfaction aux contraintes de demande et de charge sur l'ensemble des nœuds de consommation [watts],
- q_i^{req} : Demande au nœud i [m³/s],
- h_i^{req} : Charge hydraulique requise au nœud i [m].

Après un nombre de substitutions appropriées, l'indice de résilience s'écrit :

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{Nn} q_i^{req} \left(h_i^{dispo} - h_i^{req} \right)}{\sum_{k=1}^{Nr} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{Nn} q_i^{req} h_i^{req}} \quad (2.11)$$

Il est à noter que l'indice de résilience est facilement modifiable afin de tenir compte de la présence de pompes dans le réseau. Il suffit de rajouter la puissance délivrée par chaque pompe à la puissance totale d'entrée au réseau :

$$P_{totale} = \gamma \sum_{k=1}^{Nr} Q_k H_k + \sum_{j=1}^{Np} \left(\frac{P_j}{\gamma} \right) \quad (2.12)$$

où P_j : Puissance délivrée par la pompe j [watts],
 N_p : Nombre total des pompes présentes au niveau du réseau,

L'indice de résilience devient:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{noeuds} q_i^{req} \left(h_i^{dispo} - h_i^{req} \right)}{\sum_{k=1}^{reservoirs} Q_k H_k + \sum_{j=1}^{pompes} \left(\frac{P_j}{\gamma} \right) - \sum_{i=1}^{noeuds} q_i^{req} h_i^{req}} \quad (2.13)$$

Plus la valeur de l'indice est proche de 1, plus notre réseau contient un surplus d'énergie aux nœuds suffisant pour assurer une redistribution adéquate des pressions en cas de défaillance. En effet, cet indice n'est autre que le rapport entre le surplus de puissance délivrée aux nœuds et l'énergie interne contenue dans le réseau pour des contraintes satisfaites en termes de demande et de charge aux nœuds.

d) Indice de Rendement net du réseau

Le rendement est calculé comme étant le rapport entre le volume d'eau consommé (et donc comptabilisé) et le volume mis en distribution pour satisfaire la demande totale du réseau.

$$I_{rendement} = \sum_{t=0}^{durée \text{ simulation}} \left(\frac{\sum_{i=1}^{noeuds} conso(i,t)}{\sum_{i=1}^{noeuds} demand(i,t)} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

avec $demand(i,t)$: Demande à l'instant t au niveau du nœud i .

$conso(i,t)$: Consommation réelle au nœud i calculée à partir du produit de la demande de base et du coefficient de modulation correspondant au temps t .

Le rendement est calculé sur la durée totale de la simulation du réseau par un cumul des consommations et des demandes instantanées sur l'ensemble des nœuds de consommation.

2.2.2 Les indices spécifiques aux conduites

Ce sont des indices caractérisant l'impact que peut avoir la rupture d'une conduite sur le fonctionnement hydraulique du réseau notamment la desserte en eau des usagers.

Ces indices permettent de considérer le degré de criticité des conduites, et font l'objet d'éléments concrets pour une hiérarchisation des conduites selon leur importance hydraulique ou rôle, dans le réseau.

Cette importance hydraulique demeure néanmoins tributaire des dimensions de la conduite, de sa localisation ainsi que de la nature et du nombre d'abonnés desservis.

a) 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. Pour chaque conduite élaguée j du réseau, l'indice de criticité est obtenu par la formule suivante:

$$ICH_j = \frac{\sum_{i=1}^{noeuds} (Q_{init} - Q_{nouv})}{\sum_{i=1}^{noeuds} Q_{init}} \quad (2.15)$$

où Q_{init} : Demande initiale au niveau du nœud i (pour un fonctionnement normal du réseau)

Q_{nouv} : Nouvelle consommation calculée au nœud i selon la nouvelle distribution de pression (Wagner et al., 1988).

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.

b) Indice de déficience aux nœuds

L'indice de déficience aux nœuds (IDN_j) exprime le pourcentage des nœuds déconnectés du réseau suite à la 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 ($P < P_{\min}$).

$$IDN_j = \frac{\text{Nombre de nœuds non desservis}}{\text{Nombre total des nœuds}} \quad (2.16)$$

2.3 Contribution à la proposition d'indices de fiabilité

S'inspirant des concepts tirés de la littérature, nous avons tenté de formuler un ensemble d'indices à travers une contribution que l'on a voulue 'pratique'.

En effet, les indices sont formulés en termes d'entropie du système, de pressions et de consommations aux nœuds, qui demeurent des grandeurs hydrauliques que l'on peut facilement exploiter, notre souci par la suite étant d'élaborer un outil informatique pour le calcul de ces indices

2.3.1 Les indices spécifiques aux nœuds

a) Indice de Surpuissance au nœud

Cet indice permet d'estimer la surpuissance (ou surplus d'énergie) disponible au niveau du nœud de consommation. Ce surplus de puissance est comparé à la puissance minimale requise pour la desserte du nœud i . Il est donné par le rapport suivant :

$$\text{Surpuissance}(i) = \frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{\min}} \quad \text{avec} \quad H_i^{\min} = P_{\min} + Z_i \quad (2.17)$$

avec H_i : Charge disponible au nœud i [m]
 H_i^{min} : Charge minimum requise pour qu'il y ait desserte du nœud i [m]
 P_{min} : Pression minimum requise pour une desserte du nœud i [m]
 Z_i : Élévation du nœud i [m]

b) Indice de Surpression au nœud

Cet indice, de même que l'indice de surpuissance, permet d'estimer le surplus de pression disponible au niveau nœud de consommation. Il est formulé comme suit :

$$Surpression(i) = \frac{P_i - P_i^{min}}{P_i^{min}} \quad (2.18)$$

avec P_i : Pression disponible au nœud i [m]
 P_i^{min} : Pression minimum requise pour la desserte du nœud i [m]

c) Les ratios hydrauliques aux nœuds

Ces ratios sont formulés en termes de consommation et de pression au niveau de chaque nœud de demande. L'idée étant de calculer un pourcentage de satisfaction de la demande et de la pression au nœud pour l'évaluation de sa fiabilité. Nous définissons les rapports aux nœuds suivants :

c.1) Rapport de Consommation

Cet indice exprime le rapport entre la quantité d'eau réellement consommée au niveau des nœuds et celle devant l'être. L'indice est formulé comme suit :

$$R_{conso}(i) = \frac{conso(i)}{demand(i)} \quad (2.19)$$

avec $demand(i)$: Demande actuelle du nœud i

$conso(i)$: Consommation réelle au nœud i calculée à partir de la demande de base et des coefficients de modulations,

c.2) Rapport de Consommation_Wagner

Pour cet indice la consommation considérée est celle calculée selon les hypothèses de Wagner et al. (1988)

$$R_{consoWagner}(i) = \frac{conso_{wag}(i)}{demand(i)} \quad (2.20)$$

où $demand(i,t)$: demande actuelle (à l'instant t) au niveau du nœud i ,

$conso_{wag}(i,t)$: consommation théorique au nœud i calculée à l'instant t selon les niveaux de pressions (hypothèses de Wagner et al., 1988)

c.3) Rapport de Pression

Cet indice est exprimé par le rapport entre la pression disponible au nœud et celle requise pour une satisfaction totale de la demande.

$$R_{preesion}(i) = \frac{P^{dispo}(i)}{P^{requisite}(i)} \quad (2.21)$$

avec $P^{dispo}(i)$: Pression disponible au nœud i [m]

$P^{requisite}(i)$: Pression requise pour une satisfaction totale de la demande au nœud i [m]

2.3.2 Les indices globaux

Pour ces propositions, nous nous sommes inspirés des indices tirés de la littérature, notamment l'indice de résilience de (Todini, 2000), l'indice de surplus total de pression (Walski & Gessler, 1999) ainsi que l'indice de rendement net du réseau et sommes arrivés à proposer ce qui suit :

a) Indice de Rendement Wagner du réseau

Le rendement Wagner est calculé comme étant le rapport entre la consommation totale du réseau calculée selon les hypothèses de Wagner (dépendance demande-pression au nœud), et le volume mis en distribution pour satisfaire la demande totale du réseau.

L'indice est formulé comme suit :

$$I_{rendementWag} = \sum_{t=0}^{durée\ simulation} \left(\frac{\sum_{i=1}^{noeuds} conso_{wag}(i,t)}{\sum_{i=1}^{noeuds} demand(i,t)} \right) \quad (2.22)$$

où $demand(i,t)$: demande actuelle (à l'instant t) au niveau du nœud i .

$consoWag(i,t)$: consommation théorique au nœud i calculée à l'instant t selon les hypothèses Wagner (1988).

De la même manière que l'indice de rendement net du réseau, cet indice est calculé sur la durée totale de la simulation du réseau par un cumul des consommations et des demandes instantanées sur l'ensemble des nœuds de consommation.

b) Indice de surpression moyenne

Adapté de l'indice de surplus de pression totale, cet indice permet d'évaluer la surpression moyenne disponible au niveau du réseau. Il est défini comme suit :

$$I_{surpressMoy} = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} (P_i^{dispo} - P_i^{req})}{N_n} \quad [m] \quad (2.23)$$

avec N_n : Nombre total des nœuds de consommation.

P_i^{dispo} : Pression de service au nœud i [m]

P_i^{req} : Pression requise pour satisfaire la demande au nœud i [m]

c) Indice de surpuissance disponible au niveau du réseau

Cet indice a été inspiré de l'indice de résilience de Todini, employant la notion d'entropie du réseau. Il rend compte de la surpuissance existant au niveau du réseau comme une marge de sécurité assurant, en cas de défaillance sur une conduite, une redistribution convenable des pressions (ou énergies) aux nœuds de consommation. L'indice est défini comme suit :

$$I_{surpuissance\ réseau} = \frac{\sum_{i=1}^{noeuds} q_i^{req} (h_i^{dispo} - h_i^{req})}{\sum_{i=1}^{noeuds} q_i^{req} h_i^{req}} \quad (2.24)$$

avec q_i^{req} : Demande au nœud i [m^3/s]

h_i^{dispo} : Charge hydraulique disponible au nœud i [m]

h_i^{req} : Charge hydraulique requise pour une satisfaction de la demande au nœud i [m]

Une valeur X de cet indice, signifie que la puissance disponible dans le réseau excède de $X\%$ la puissance minimale requise pour une desserte satisfaisant les conditions aux demandes et pressions sur l'ensemble du réseau.

d) Les indices globaux pondérés

Nous partons de l'idée que la fiabilité du système peut être estimée par une somme pondérée des fiabilités nodales sur tout le réseau. Nous introduisons, pour cela, la notion d'importance du nœud de consommation. En effet, cette notion de poids aux nœuds a été introduite pour prendre en compte le fait qu'une coupure d'eau puisse avoir un impact plus dommageable pour certains usagers tels les hôpitaux et unités de production, que pour les usagers ordinaires. La valeur de l'importance peut être fixée de façon subjective selon la nature des usagers raccordés aux nœuds. Nous avons choisi d'attribuer les importances de la façon suivante (valeurs adaptées du logiciel SIROCO développé par le Cemagref):

Tableau 2.1: Proposition de pondération des nœuds

Nature de consommation	Valeur
Pas de consommateur	0
Consommateurs domestiques	1
Consommateurs à enjeu économique	10
Consommateurs à enjeu de santé	20

Les indices globaux pondérés sont des indices formulés à partir d'une somme pondérée, sur l'ensemble des nœuds du réseau, des ratios hydrauliques aux nœuds de consommation.

Soit W_i le poids du nœud i dans la configuration du réseau.

Nous définissons les indices suivants :

d.1) Indice de Consommation

Cet indice est une somme pondérée des Rapports de Consommation sur l'ensemble des nœuds du réseau. L'indice est formulé comme suit

$$I_{conso} = \frac{\sum_{i=1}^{noeuds} R_{conso}(i) \times W_i}{\sum_{i=1}^{noeuds} W_i} \quad (2.25)$$

$R_{conso}(i)$ représente l'indice de Rapport de Consommation au nœud i .

d.2) Indice de Pression

L'indice n'est autre que la somme pondérée des Rapports de Pression aux nœuds. Il est formulé comme suit

$$I_{pression} = \frac{\sum_{i=1}^{noeuds} R_{pression}(i) \times W_i}{\sum_{i=1}^{noeuds} W_i} \quad (2.26)$$

$R_{pression}$ représente le Rapport de Pression au nœud i .

2.3.3 Les indices spécifiques aux conduites

Lorsqu'il y a non desserte d'un ensemble de nœuds suite à une défaillance de conduite, il importe au gestionnaire de connaître non seulement la localisation de chaque nœud de cet ensemble mais également la nature de ce nœud ou encore son importance dans le réseau.

C'est alors dans ce sens, que nous avons jugé utile de proposer une pondération de l'indice de déficience aux nœuds et de présenter un état de desserte pour chaque nœud du réseau suite à une rupture de conduite. Les propositions sont les suivantes :

a) Indice de pondération des nœuds non desservis

L'indice de pondération des nœuds non desservis ($IDN_{pondéré}$) est le rapport entre la somme des poids des nœuds non desservis et la somme des poids de tous les nœuds du réseau. L' $IDN_{pondéré}$ est exprimé comme suit :

$$IDN_{pondéré} = \frac{\sum_{p=1}^{NND} W_{NND}(p)}{\sum_{i=1}^{N_n} W(i)} \quad (2.27)$$

Où $IDN_{pondéré}$: Indice de pondération du nombre de nœuds non desservis,

NND : Nombre total des nœuds non desservis,

N_n : Nombre total des nœuds de consommation,

$W(p)_{NND}$: Poids du nœud non desservi p ,

$W(i)$: Poids du nœud de consommation i .

Cet indice pourrait servir d'élément pour un classement des conduites selon le poids total des nœuds non desservis.

b) État de desserte des nœuds après rupture de conduite

Cet indicateur permet de visualiser l'état de desserte de l'ensemble des nœuds du réseau suite à la rupture d'une conduite que l'utilisateur pourra choisir. Une évolution de l'état d'alimentation du nœud sera donnée sur la période d'indisponibilité de la conduite (MTTR).

Conclusion

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 simultanée des défaillances sur les conduites, ainsi qu'une estimation des consommations selon les niveaux de pressions aux nœuds.

Les indices proposés se résument en : 1) des indices spécifiques aux conduites permettant d'identifier les conduites vulnérables et de mesurer leur importance dans le fonctionnement du réseau; 2) des indices spécifiques aux nœuds évaluant les rapports entre les valeurs des demandes et pressions disponibles et celles attendues à chaque nœud de consommation ; 3) des indices globaux formulés en termes de rendement, de résilience, et de surplus de pression ou de puissance disponibles au niveau du réseau.

Une hiérarchisation des conduites en vue des travaux de réhabilitation, est alors possible pour une sélection des conduites prioritaires au renouvellement

Nous nous consacrons dans la suite de ce travail à la présentation et à la prise en main de l'outil de calcul des indices de fiabilité, ainsi qu'à son application sur le modèle hydraulique du réseau de la localité de Sury Le Comtal.

Chapitre 3

Présentation de l'outil FIAB

Introduction

Le projet a apporté le plus grand soin à la définition d'indices de fiabilité hydraulique du système de distribution d'eau potable. L'objectif était double : 1) créer un tableau de bord où l'exploitant pourrait visualiser les performances de son réseau ; 2) élaborer un outil d'aide à la décision pour la gestion des travaux de maintenance et de renouvellement du réseau.

L'outil élaboré a pour but d'évaluer la fiabilité d'un réseau d'eau potable à travers la proposition d'un ensemble de fonctionnalités permettant le calcul des indices concernant, d'une part le réseau pris dans sa globalité et d'autre part les conduites et nœuds de consommation du système. Cet outil emploie la macro « Mesure de fiabilité » en VBA Excel faisant appel à la boîte à outils « EN2Toolkit » du logiciel Epanet2®.

3.1 Présentation de l'outil FIAB

L'outil vise à proposer différentes fonctionnalités pour le calcul des indices spécifiques aux nœuds et aux conduites ainsi que les indices globaux formulés afin d'évaluer la fiabilité du réseau. Le modèle est composé des processus imbriqués que l'on peut distinguer à travers la schématisation suivante :

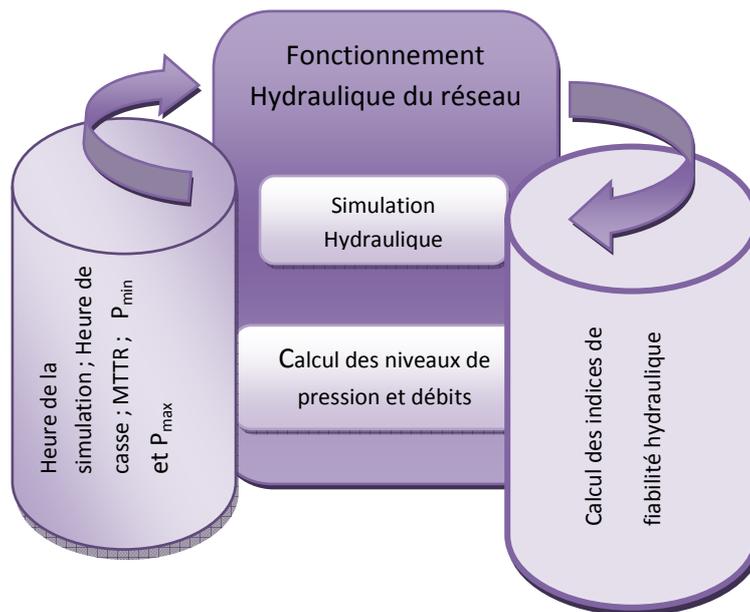


Figure 3.1 Schématisation du modèle de calcul FIAB.

L'application FIAB a été développée exclusivement sous un environnement VBA-Excel. Les instructions permettant de lancer la simulation ainsi que de récupérer les différentes entités hydrauliques ont été introduites en faisant appel à la boîte à outils EN2toolkit fournie avec 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). Ce type de fichier est connu dans le monde informatique par son rôle primordial dans l'échange dynamique des données (Dynamic Data Exchange ou technologie DDE). Cela s'effectue en mettant des fonctions externes pouvant être exploitées par des logiciels autres que l'original.

En introduisant les différentes fonctions présentes sur EN2Toolkit dans des boucles et des instructions conditionnelles sous VBA, nous arrivons à calculer toutes sortes d'indices, chose qui est toutefois impossible à réaliser par l'utilisation seule du logiciel Epanet.

L'outil FIAB permet donc 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 ;
- comparer la fiabilité de deux projets différents de réseaux ou plus.

Pour ce faire, nous avons élaboré un certain nombre de fonctions et procédures facilitant la prise en main de l'outil par l'utilisateur et ce, en ayant recours à des boîtes de dialogue structurées et paramétrées.

3.2 Fonctionnement de l'outil FIAB

Le calcul des indices de fiabilité à l'aide de l'outil FIAB ne peut se faire qu'une fois certains paramètres introduits. Une lecture du fichier réseau à étudier, de type "inp" est alors impérative. Autre fichier de type "xls" pouvant être introduit à l'outil mais demeurant optionnel, celui comportant la pondération des nœuds de consommation.

La lecture, le paramétrage et le calcul des indices du réseau sous FIAB se font en même temps grâce à une interface graphique Homme/Machine. Il s'agit d'une boîte de dialogue mère que nous avons 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 ses performances hydrauliques. Cela se fait grâce à la boîte de dialogue mère qui nous offre, la possibilité de lancer la simulation hydraulique en tenant en compte les différents paramètres retenus. En effet, nous y avons introduit, 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. L'outil FIAB consacre chaque feuille à l'affichage d'un ensemble d'indices donné (indices globaux, indices pondérés, évolution des indices spécifiques aux nœuds etc.).

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. L'outil bénéficie donc des avantages offerts par l'utilisation couplée Epanet/VBA-Excel.

Les différentes fonctionnalités offertes par l'interface graphique FIAB_Box, notamment le paramétrage et le calcul des indices, sont étudiées en détail dans la partie qui suit.

L'interface graphique

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

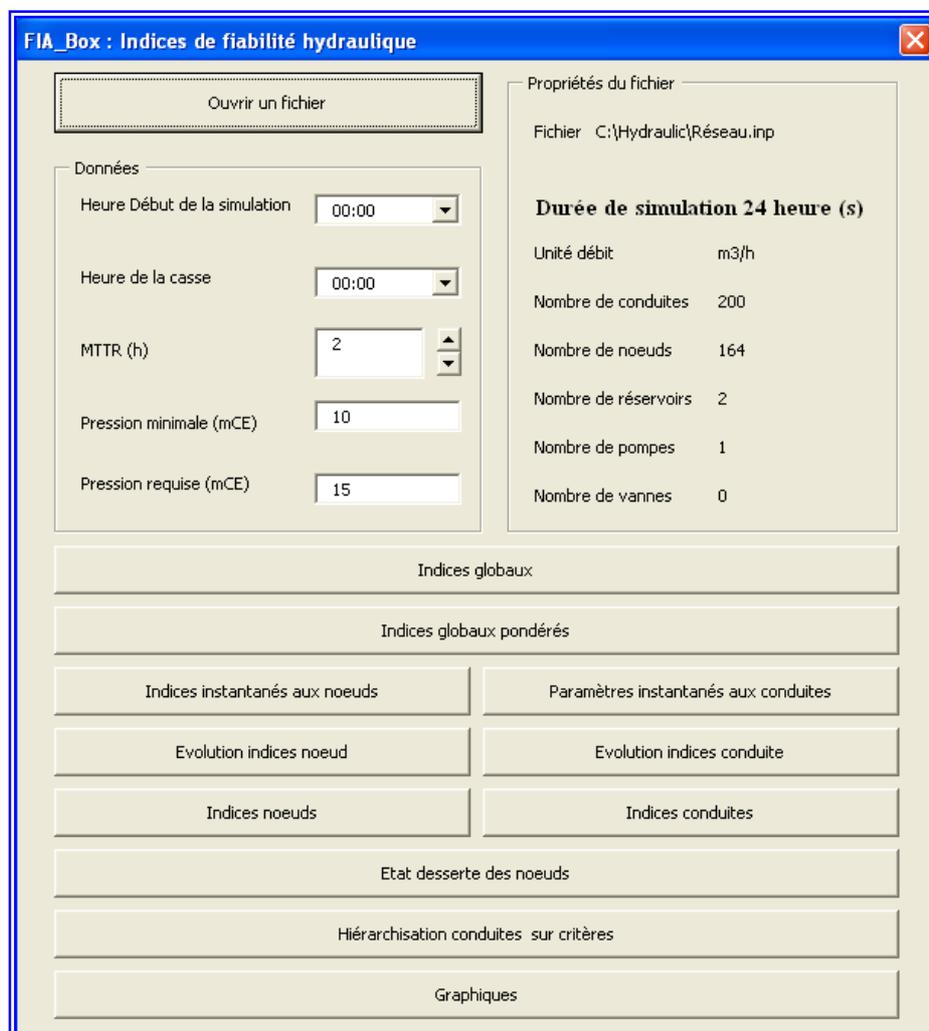


Figure 3.2 Interface graphique de l'outil FIAB.

3.3 Les fonctionnalités 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 fille représentée dans la figure ci-dessous, est associée à ce bouton. L'utilisateur ne doit spécifier qu'un seul fichier réseau de type « inp ». Cette première version de l'outil ne gère pas encore la multi-sélection ni les fichiers avec des extensions différentes à « inp ».

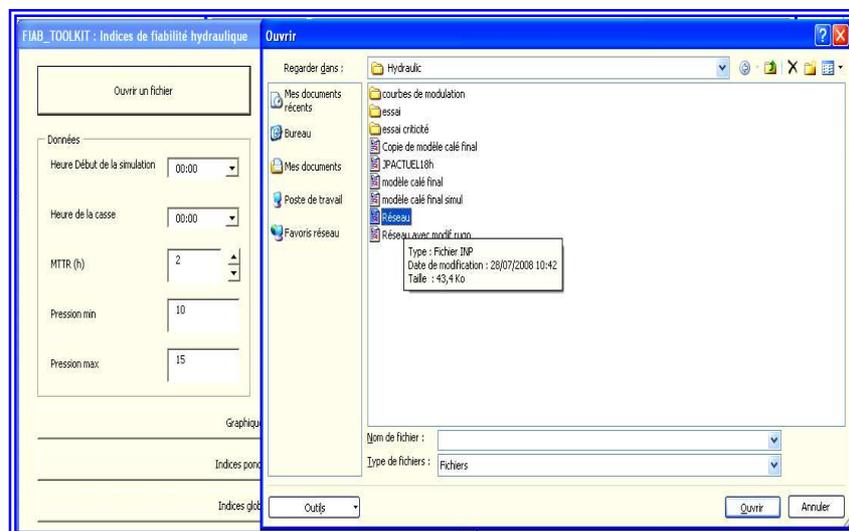


Figure 3.3 Lecture du fichier réseau.

- Les propriétés du fichier : il s'agit de certaines caractéristiques du réseau qui sont en mode lecture seule (Read Only). Cette section donne un aperçu rapide du réseau ouvert sous FIAB_Box. De telles informations pourraient être utiles à l'utilisateur dans son choix du paramétrage initial.
- Les données : l'outil exige l'introduction de certaines données nécessaires au bon fonctionnement des routines. 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 possibilité de paramétrer le réseau selon le choix de l'utilisateur constitue l'un des avantages de l'outil FIAB.
- 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.

3.3.1 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.

3.3.2 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 selon les hypothèses émises dans la seconde partie de l'étude (voir § 2.1).

a) Paramétrage temporel

Heure de début de la simulation

Heure à laquelle la simulation hydraulique est lancée par Epanet. Seront récupérées au pas de temps horaire, les valeurs des paramètres hydrauliques tels que la pression, la demande au nœud (ou demande actuelle, la demande au nœud variant sur la journée), et seront calculées les consommations aux nœuds.

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, n'offrent cependant pas la possibilité d'entrer une heure possédant une entité « minutes ». L'utilisateur doit, par conséquent, choisir l'heure antérieure ou postérieure qui se rapprocherait le plus de l'heure réelle à laquelle se produisent ces deux événements. Pour une heure de casse égale à 20:15 h, il lui serait plus judicieux d'entrer une heure égale à 20:00 h.

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 utilisés pour le calcul des indices hydrauliques et définis par les hypothèses de Wagner. Il appartient à l'utilisateur d'entrer des pressions en mètres ou encore mCE (mètres de colonne d'eau).

3.3.3 Simulation et calcul des indices de fiabilité

Qu'il s'agisse d'indices globaux ou d'indices spécifiques aux nœuds et conduites, l'outil FIAB propose un calcul au pas de temps horaire de nos indicateurs de fiabilité.

Nous jugeons utile de permettre à l'utilisateur de visualiser la tendance d'évolution de nos indices sur la durée totale de la simulation. Ainsi, nous pouvons suivre l'état de fonctionnement de notre système aussi bien sur les heures de pointes que pendant les heures creuses. Cela est d'autant plus intéressant pour le calcul des indices de criticité des conduites qui se fait sur l'intervalle de temps MTTR. D'autre part, l'affichage de l'évolution horaire des indices sur des feuilles de calcul, permet une meilleure exploitation des résultats via des tracés de courbes. La figure ci-après illustre l'évolution horaire des indices spécifiques à un nœud donné :

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	Noeud ID	N46	Changer						
3									
4	Heure	Demande	Charge (m)	Pression (m)	Surplussance %	Surpression %	Rapport consommation	Rapport_conso_wagner	Indice pression %
5	00:00:00	0,20	404,05	28,05	3,34	87,03	13,92	100,00	187,03
6	01:00:00	0,20	404,44	28,44	3,44	89,62	11,17	100,00	189,62
7	02:00:00	0,21	404,73	28,73	3,51	91,56	16,50	100,00	191,56
8	03:00:00	0,21	405,09	29,09	3,60	93,94	15,23	100,00	193,94
9	04:00:00	0,22	405,37	29,37	3,68	95,83	18,93	100,00	195,83
10	05:00:00	0,24	405,57	29,57	3,73	97,16	25,45	100,00	197,16
11	06:00:00	0,31	405,28	29,28	3,65	95,17	42,42	100,00	195,17
12	07:00:00	0,36	404,74	28,74	3,51	91,59	51,03	100,00	191,59
13	08:00:00	0,36	404,43	28,43	3,44	89,55	50,59	100,00	189,55
14	09:00:00	0,31	404,82	28,82	3,48	90,80	43,01	100,00	190,80
15	10:00:00	0,34	403,97	27,97	3,32	86,43	48,78	100,00	186,43
16	11:00:00	0,31	404,02	28,02	3,33	86,79	43,01	100,00	186,79
17	12:00:00	0,32	403,68	27,68	3,24	84,51	44,15	100,00	184,51
18	13:00:00	0,31	403,42	27,42	3,18	82,82	43,58	100,00	182,82
19	14:00:00	0,29	403,36	27,36	3,16	82,39	39,28	100,00	182,39
20	15:00:00	0,28	403,16	27,16	3,11	81,10	37,92	100,00	181,10
21	16:00:00	0,29	402,89	26,89	3,04	79,28	38,61	100,00	179,28
22	17:00:00	0,30	402,76	26,76	3,01	78,37	40,57	100,00	178,37
23	18:00:00	0,33	402,67	26,67	2,99	77,82	46,31	100,00	177,82
24	19:00:00	0,34	402,49	26,49	2,94	76,81	48,78	100,00	176,81
25	20:00:00	0,35	402,06	26,06	2,83	73,76	49,70	100,00	173,76
26	21:00:00	0,32	402,57	26,57	2,96	77,12	44,70	100,00	177,12
27	22:00:00	0,27	403,26	27,26	3,13	81,72	34,26	100,00	181,72
28	23:00:00	0,22	403,56	27,56	3,21	83,74	21,23	100,00	183,74
29	24:00:00	0,22	403,89	27,89	3,30	85,90	18,93	100,00	185,90
30									
31									

Figure 3.4 : Évolution horaire des indices spécifiques aux nœuds

L'outil offre également la possibilité d'évaluer des indices dits « journaliers » calculés sur toute la durée de la simulation, tels les indices de rendement et l'indice de satisfaction journalière de la demande.

3.4 Calcul des indices

L'outil FIAB présente différentes fonctionnalités associées, chacune, à un bouton de commande comme illustré dans la figure qui suit:

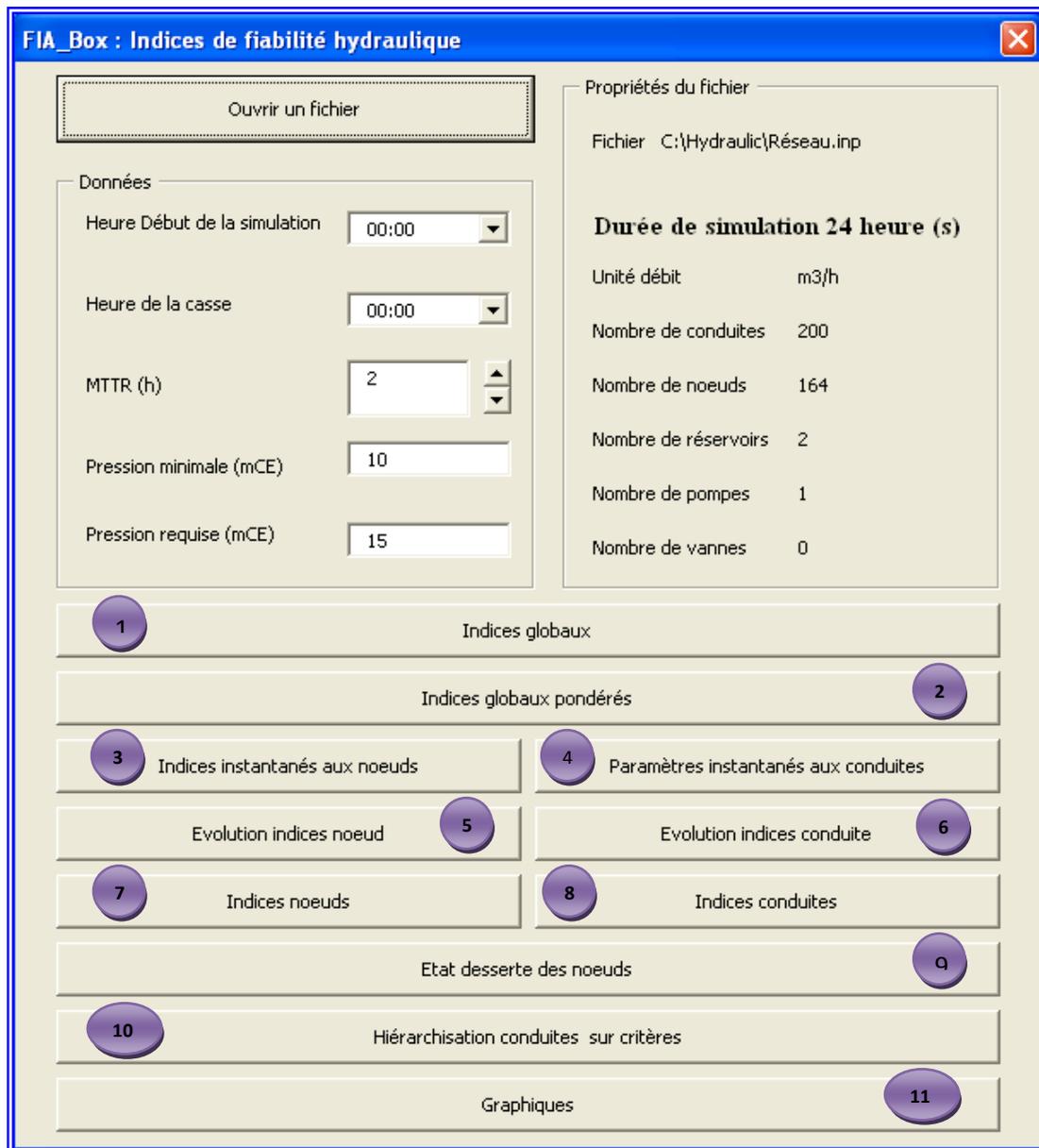


Figure 3.5 : Les fonctionnalités FIA_Box.

1

Lance le calcul des indices globaux du réseau avec un affichage

- au pas de temps horaire : des indices de Surpuissance, Suppression, Suppression moyenne, Surplus total de pression (indice Walski),
- à la fin de la durée totale de la simulation : des indices journaliers de Rendement du réseau et de l'indice de Satisfaction de la demande.

Le calcul ne prend pas en considération la pondération aux nœuds de consommation.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Heure	Surpuissance %	Suppression %	Surplus Pression Total (Walski)	Suppression Moyenne	Résilience						
00:00:00	2,67	75,80	174,64	10,62	1,25						
01:00:00	2,77	73,35	184,43	10,00	1,23						
02:00:00	2,85	75,33	193,18	10,30	1,45						
03:00:00	2,94	77,68	191,00	10,65	1,46						
04:00:00	3,02	79,61	195,33	10,94	1,66						
05:00:00	3,08	81,02	193,18	12,85	1,89						
06:00:00	3,03	79,51	195,04	10,93	1,73						
07:00:00	2,91	76,41	187,69	10,46	1,63						
08:00:00	2,83	74,35	182,09	10,95	1,62						
09:00:00	2,88	75,20	184,80	10,29	1,97						
10:00:00	2,71	71,04	175,05	10,67	1,21					Rendement total	59,15
11:00:00	2,71	71,21	175,04	10,68	1,85						
12:00:00	2,82	68,99	187,26	10,35	1,03					Rendement wagner	99,21
13:00:00	2,56	67,29	185,39	10,09	1,07						
14:00:00	2,53	66,70	184,73	10,00	1,53					Satisfaction de la demande (Waltimir)	77,91
15:00:00	2,49	65,37	187,99	9,80	1,64						
16:00:00	2,41	63,60	184,09	9,94	2,07						
17:00:00	2,39	62,75	184,63	9,41	2,07						
18:00:00	2,37	62,44	183,07	9,37	1,42						
19:00:00	2,33	61,37	180,81	9,31	1,20						
20:00:00	2,22	59,60	184,47	8,79	1,51						
21:00:00	2,34	61,67	187,19	9,25	2,28						
22:00:00	2,50	65,07	182,90	9,88	1,10						
23:00:00	2,56	67,62	183,57	10,14	2,03						
00:00:00	2,64	69,74	176,67	10,46	1,38						

Figure 3.6 Affichage des indices globaux.

2

Lance la lecture du fichier « Poids » des nœuds de consommation pour un calcul horaire des indices globaux pondérés : les indice de Pression et de Consommation.

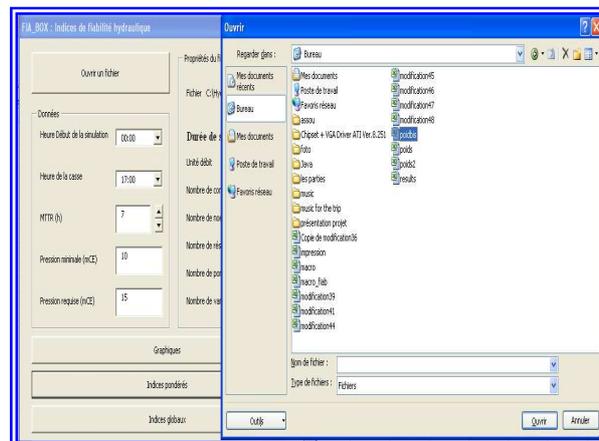


Figure 3.7 Choix du fichier poids des nœuds.

Lance le calcul des ratios hydrauliques nodaux pour l'heure choisie par l'utilisateur. Le calcul et l'affichage des résultats se font pour l'ensemble des nœuds du réseau.

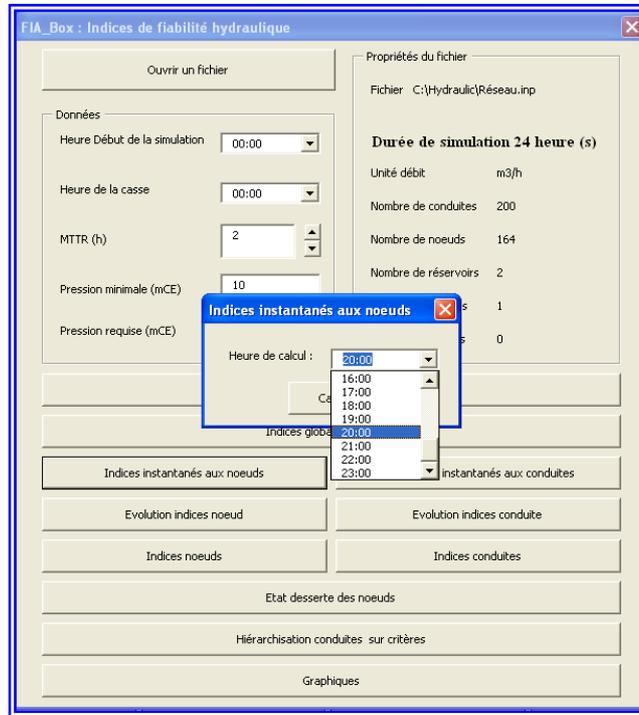


Figure 3.8 Choix de l'heure de calcul des indices aux nœuds.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
ID Nœud	Type	Altitude (m)	Demande de base	Surpuissance Z	Suppression Z	Rapport Consommation Z	Rapport Consommation_VaguesZ	Rapport Pression %		
H1	Noeud de conso	390	0,131	0,89	35,56	31,78	84,45	90,44		
H2	Noeud de conso	387	0,105	1,65	65,36	28,98	100,00	110,24		
H3	Noeud de conso	389	0,163	1,15	46,00	34,51	95,91	97,33		
H4	Noeud de conso	389	0,150	1,08	43,21	33,48	92,97	95,48	20.00	
H5	Noeud de conso	387	0,157	1,57	62,48	34,06	100,00	108,32		
H6	Noeud de conso	387	0,080	1,57	62,45	52,73	100,00	108,30		Actualiseer
H7	Noeud de conso	387	0,052	1,57	62,40	19,87	100,00	108,27		
H8	Noeud de conso	387	0,052	1,57	62,40	19,87	100,00	108,27		
H9	Noeud de conso	392	0,142	0,31	12,27	32,83	49,54	74,85		
H10	Noeud de conso	392	0,151	0,31	12,40	33,55	49,90	74,93		
H11	Noeud de conso	392	0,188	0,31	12,42	34,85	49,83	74,94		
H12	Noeud de conso	389	0,188	1,06	42,35	34,85	92,03	94,90		
H13	Noeud de conso	388	0,322	1,28	50,80	41,57	100,00	100,54		
H14	Noeud de conso	379	0,219	3,55	138,11	37,84	100,00	158,74		
H15	Noeud de conso	378	0,378	3,76	145,76	42,93	100,00	163,84		
H16	Noeud de conso	387	0,047	1,57	62,31	18,54	100,00	108,21		
H17	Noeud de conso	384	0,047	2,34	92,30	18,54	100,00	128,20		
H18	Noeud de conso	383	0,025	2,61	102,45	11,77	100,00	134,97		
H19	Noeud de conso	381	0,047	3,13	122,56	18,54	100,00	148,38		
H20	Noeud de conso	378	0,152	3,85	153,43	33,63	100,00	168,86		
H21	Noeud de conso	378	0,226	3,92	152,07	38,16	100,00	169,04		
H22	Noeud de conso	378	0,226	3,88	150,43	38,16	100,00	168,95		
H23	Noeud de conso	377	0,188	4,15	160,55	34,85	100,00	173,70		
H24	Noeud de conso	378	0,250	3,72	144,29	39,18	100,00	162,86		
H25	Noeud de conso	378	0,235	3,71	143,96	38,58	100,00	162,64		
H26	Noeud de conso	376	0,176	4,20	162,14	35,38	100,00	174,76		
H27	Noeud de conso	378	0,163	4,00	155,27	34,51	100,00	170,18		
H28	Noeud de conso	378	0,163	4,00	155,27	34,51	100,00	170,18		
H29	Noeud de conso	378	0,274	3,62	140,33	40,09	100,00	160,22		
H30	Noeud de conso	378	0,192	3,61	140,08	36,40	100,00	160,05		
H31	Noeud de conso	378	0,063	3,61	140,00	22,25	100,00	160,00		
H32	Noeud de conso	378	0,063	3,61	140,00	22,25	100,00	160,00		
H33	Noeud de conso	378	0,213	3,61	140,00	37,53	100,00	160,00		
H34	Noeud de conso	378	0,063	3,61	140,00	22,25	100,00	160,00		
H35	Noeud de conso	378	0,063	3,75	145,52	22,25	100,00	163,68		
H36	Noeud de conso	376	0,162	4,17	160,85	34,38	100,00	173,90		
H37	Noeud de conso	376	0,105	4,17	161,07	28,98	100,00	174,04		
H38	Noeud de conso	376	0,086	4,19	161,74	26,30	100,00	174,50		

Figure 3.9 Affichage des indices instantanés aux nœuds.

4

Ce bouton de commande permet l'affichage, des paramètres physiques (longueur, diamètre,...) et hydrauliques (charges aux nœuds amont et aval, débit, vitesse) de chaque conduite du réseau et ce, à l'instant indiqué par l'utilisateur.

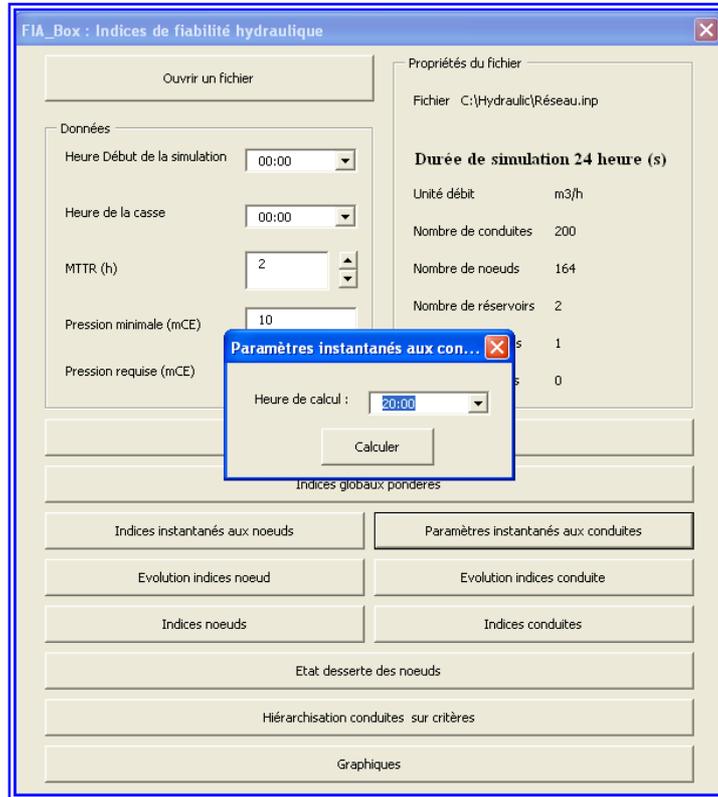


Figure 3.10 Choix de l'heure de calcul des paramètres aux conduites.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
ID Conduite	Type	N _{nod} Init	N _{nod} Final	Longeur(m)	Diam(mm)	Rugos(H-V)	H amont (m)	H aval (m)	Débit	Vitesse		
C1	Arc	166	3	59,80	300,00	110,00	403,57	403,60	79,08	0,31		
C2	Arc	3	1	65,90	300,00	110,00	403,60	403,57	77,18	0,30		
C3	Arc	2	3	340,34	80,00	110,00	403,54	403,60	-1,39	0,08		
C4	Arc	1	4	542,96	250,00	110,00	403,57	403,32	44,91	0,25		20:00
C5	Arc	5	6	68,55	150,00	110,00	403,25	403,25	3,01	0,05		Actualiseer
C6	Arc	6	7	189,67	150,00	110,00	403,25	403,24	2,60	0,04		
C7	Arc	7	8	151,48	150,00	110,00	403,24	403,24	0,86	0,01		
C8	Arc	11	12	221,78	80,00	110,00	403,24	403,23	0,52	0,03		
C9	Arc	4	11	194,83	250,00	110,00	403,32	403,24	42,69	0,24		
C10	Arc	11	10	4,41	250,00	110,00	403,24	403,24	41,66	0,24		
C11	Arc	8	10	207,29	150,00	110,00	403,24	403,24	-0,05	0,00		
C12	Arc	10	9	32,79	250,00	110,00	403,24	403,23	41,12	0,23		
C13	Arc	9	13	129,43	200,00	110,00	403,23	403,68	41,28	0,37		
C14	Arc	13	14	235,80	200,00	110,00	403,08	402,81	41,26	0,36		
C15	Arc	14	15	345,43	200,00	110,00	402,81	402,58	31,21	0,28		
C16	Arc	9	16	293,53	100,00	110,00	403,23	403,23	-0,63	0,02		
C17	Arc	7	16	100,72	100,00	110,00	403,24	403,23	1,85	0,06		
C18	Arc	21	13	452,75	80,00	110,00	403,21	403,68	0,81	0,08		
C19	Arc	17	18	55,54	100,00	110,00	403,23	403,25	-3,12	0,11		
C20	Arc	17	21	75,86	100,00	110,00	403,23	403,21	3,24	0,11		
C21	Arc	18	19	41,05	100,00	110,00	403,25	403,26	-3,10	0,11		
C22	Arc	19	20	112,66	100,00	110,00	403,26	403,34	-5,40	0,19		
C23	Arc	5	20	191,51	100,00	110,00	403,25	403,34	-4,26	0,15		
C24	Arc	22	19	178,57	63,00	110,00	403,04	403,26	-2,03	0,18		
C25	Arc	22	21	135,22	60,00	110,00	403,04	403,21	-1,80	0,18		
C26	Arc	24	25	15,77	100,00	110,00	402,43	402,40	9,22	0,33		
C27	Arc	25	26	256,34	100,00	110,00	402,40	402,21	5,16	0,18		
C28	Arc	20	27	73,84	100,00	110,00	403,34	403,53	-10,15	0,36		
C29	Arc	27	24	244,76	100,00	110,00	403,53	402,43	13,95	0,49		
C30	Arc	27	28	9,26	300,00	110,00	403,53	403,53	-24,60	0,10		
C31	Arc	28	23	183,53	80,00	100,00	403,53	402,86	7,71	0,43		
C32	Arc	28	1	397,76	300,00	110,00	403,53	403,57	-31,83	0,13		
C33	Arc	35	23	68,56	60,00	110,00	402,55	402,56	-0,30	0,03		
C34	Arc	34	31	74,79	100,00	110,00	402,00	402,00	-0,30	0,01		
C35	Arc	31	32	11,76	100,00	110,00	402,00	402,00	0,42	0,01		
C36	Arc	32	33	207,23	100,00	110,00	402,00	402,00	0,11	0,00		
C37	Arc	33	30	12,26	30,00	110,00	402,06	402,01	-2,56	0,14		
C38	Arc	30	31	207,27	100,00	110,00	402,01	402,00	1,03	0,04		

Figure 3.11 Affichage des paramètres instantanés aux conduites.

5

L'utilisateur devra choisir un nœud pour lequel l'évolution horaire des indices sera affichée.

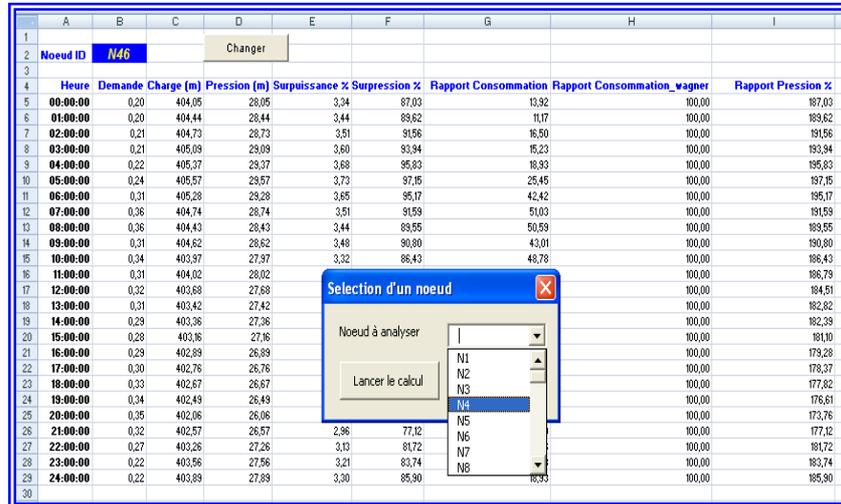


Figure 3.12 Évolution des indices à un nœud spécifique.

6

Ce bouton de commande affiche l'évolution horaire des indices spécifiques à la conduite choisie par l'utilisateur.

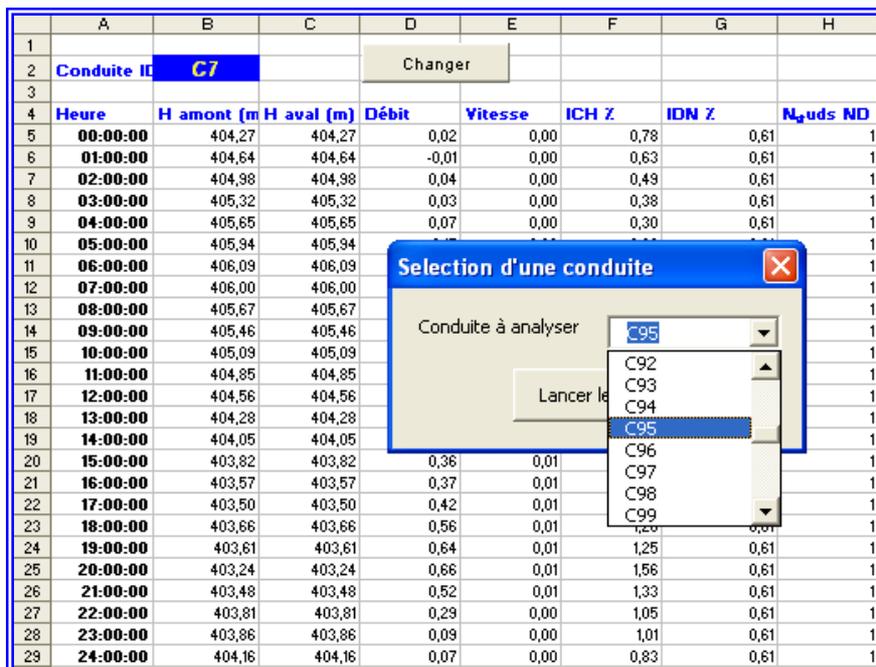


Figure 3.13 Evolution des indices à une conduite spécifique.

7 + 8

Lancez le calcul, au pas de temps horaire, des indices spécifiques aux nœuds et aux conduites.

9

Permet l'affichage de l'identifiant du nœud de consommation, de son poids, ainsi que de son état de desserte suite à la rupture de la conduite que l'utilisateur aura choisie sur le menu déroulant « Conduite ID ». L'affichage se fait sur la période du MTTR et ce, au pas de temps horaire (en notant par « Nœud D » un nœud desservi et par « Nœud ND » un nœud non desservi).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2			Conduite ID	C76				Lancer le calcul		
3										
4										
5	ID Nœud	Poids Nœud	17:00-00	C76	:00-00	20:00-00	21:00-00	22:00-00	23:00-00	
6	N1	50	Noeud D	C77	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
7	N2	50	Noeud D	C78	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
8	N3	30	Noeud D	C79	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
9	N4	50	Noeud D	C80	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
10	N5	40	Noeud D	C81	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
11	N6	40	Noeud D	C82	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
12	N7	50	Noeud D	C83	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
13	N8	10	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
14	N9	40	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
15	N10	40	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
16	N11	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
17	N12	20	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
18	N13	40	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
19	N14	10	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
20	N15	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
21	N16	40	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
22	N17	20	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
23	N18	40	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
24	N19	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
25	N20	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
26	N21	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
27	N22	20	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
28	N23	20	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
29	N24	10	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
30	N25	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
31	N26	30	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
32	N27	50	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
33	N28	20	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
34	N29	50	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	
35	N30	50	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	Noeud D	

Figure 3. 14 Etat de desserte des nœuds suite à une défaillance d'une conduite.

Les conduites du réseau se différencient non seulement par leurs dimensions, mais aussi par leur fonction hydraulique dans le réseau.

Il s'agit dans cette partie, d'identifier les conduites critiques et de les classer selon leur importance hydraulique ou « effet réseau » qu'elles produisent. Nous avons défini, en ce sens, trois critères d'importance pour la conduite:

- Importance selon l'*ICH* : déterminée selon le volume d'eau non véhiculé suite à la défaillance de la conduite considérée,
- 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,
- Importance selon l'*IDN_{pondéré}* : ce classement peut s'avérer plus intéressant que le précédent, du moment que le poids de chaque nœud non alimenté est pris en considération. L'objectif majeur étant d'avoir un minimum de consommateurs importants pénalisés par la rupture d'une conduite donnée, ce qui se traduit par un *IDN_{pondéré}* moindre.

L'outil permet donc de classer les conduites selon ces trois critères d'importance.

Pour un classement ICH, l'utilisateur doit introduire les deux valeurs seuils de l'ICH qui définissent trois ordres de criticité haute, moyenne et basse.

Un classement des conduites selon l'un de ces trois critères constitue une première approche pour la sélection des conduites candidates au renouvellement.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	ID Conduite	ICH %	IDN %	IDN_pondéré %	Criticité				
	C1	100,0000	99,3902	99,6055	Haute	Critère de classement :	ICH		
	C2	99,3077	98,7805	99,0138	Haute				
	C93	7,2186	5,4878	5,1282	Basse	Actualiser			
	C97	6,2036	4,2683	4,1420	Basse	remettre à zéro			
	C95	5,1362	3,0488	3,5503	Basse				
	C101	3,6624	1,8293	2,1696	Basse				
	C114	2,8984	3,0488	3,1558	Basse				
	C170	1,9495	1,8293	1,3807	Basse				
	C158	1,8663	3,0488	3,5503	Basse				
	C113	1,8006	1,8293	1,9724	Basse				
	C132	1,6518	1,8293	1,1834	Basse				
	C151	1,3810	1,2195	1,1834	Basse				
	C98	1,3579	1,2195	1,1834	Basse				
	C8	1,3373	1,2195	0,9862	Basse				
	C140	1,3253	1,2195	1,1834	Basse				
	C178	1,3011	1,2195	1,3807	Basse				
	C90	1,3002	1,2195	1,3807	Basse				
	C92	1,3002	1,2195	1,1834	Basse				
	C108	1,2847	1,2195	1,5779	Basse				
	C173	1,2831	1,2195	0,9862	Basse				
	C153	1,2785	2,4390	2,5641	Basse				
	C142	1,2667	1,2195	1,3807	Basse				
	C104	1,2614	1,2195	1,3807	Basse				
	C184	1,2614	1,2195	1,5779	Basse				
	C181	1,2571	1,2195	0,9862	Basse				
	C138	1,2538	1,2195	1,5779	Basse				

Figure 3. 15 Hiérarchisation des conduites.

Conclusion

L'outil informatique FIAB est une contribution à l'aide à la décision des gestionnaires de réseau en matière de définition des stratégies de maintenance et de réhabilitation. Il sert à avoir une première appréciation des grandeurs régissant la fiabilité hydraulique du système de distribution d'eau potable et d'en définir les éléments vulnérables.

En somme, l'outil de calcul des indices de fiabilité sera mis en place par l'application du concept de la simulation stochastique qu'offre le logiciel Epanet et ce, en tenant compte de l'ensemble des composantes hydrauliques du réseau à savoir : les données sur les conduites (longueurs, diamètres, rugosités), la demande aux nœuds de consommation, les courbes de consommation (par type), ainsi que des considérations sur les paramètres temporels tels que la durée totale de la simulation, l'heure d'occurrence de la casse et enfin le temps d'indisponibilité de la conduite que l'on considère correspondant au temps moyen de réparation (MTTR).

Une fois élaboré, l'outil FIAB est appliqué à un réseau de taille réelle. La partie qui suit de l'étude y est entièrement consacrée. L'utilisateur n'aura plus qu'à indiquer les paramètres d'entrée qui conviennent au fonctionnement de son réseau, le calcul d'indices se fera en prenant en compte le choix des valeurs fournies. Les résultats mettant en évidence les performances du système seront mis à disposition pour ces mesures adoptées.

Chapitre 4

Application

Introduction

La partie précédente de notre étude a consisté en une description de l'outil de calcul des indices de fiabilité afin de permettre une prise en main rapide par l'utilisateur.

Nous nous consacrons à présent, à l'application de l'outil FIAB sur un réseau de taille réelle que l'on présentera de manière brève. Une évaluation de l'influence des paramètres d'entrée à l'application sera établie pour les différents résultats de pression, de puissance et de consommation au niveau du système. L'intérêt étant d'arriver à analyser les nombreuses utilisations possibles de l'outil, en fonction des objectifs que peut avoir un exploitant pour la gestion de son réseau.

Nous ne fixons donc pas de contraintes d'entrée pour garder une plus grande liberté de choix de nos paramètres. En revanche, nous nous concentrons sur les résultats proprement-dits de cette application ainsi que leur interprétation choisissant ainsi de porter notre analyse sur les résultats de calcul les plus saillants.

Le modèle hydraulique utilisé pour notre application est celui du réseau de la commune de Sury Le Comtal.

4.1. Identification des données

4.1.1. Description du réseau d'entrée

Le réseau étudié est celui de la commune de Sury le Comtal, située à 25 km au Nord-Ouest de la ville de Saint-Etienne (Préfecture de la Loire (42)). Le réseau s'étend sur un linéaire de 42.5 km (hors branchements) comprenant 200 conduites essentiellement constituées de fonte ductile et dont l'âge moyen est de 40 à 50 ans (aucune donnée précise n'a pu être analysée). Les diamètres des conduites varient entre 60 et 400 mm. La station de pompage sise à la commune avoisinante de Bonson assure l'alimentation du réservoir de Sury Le Comtal. Ce dernier est composé d'une seule cuve cylindrique d'une capacité de 1500 m³ qui assure la desserte de l'ensemble du territoire communal. Le réservoir est surélevé, les côtes radier et trop plein sont respectivement de 397 mNGF et 406.50 mNGF. La conduite d'alimentation du réservoir (ou conduite d'adduction) est d'un DN 300 en fonte ductile.

A la sortie du réservoir, une conduite d'un DN 300 permet l'alimentation d'environ 2000 abonnés. La population municipale étant de 5031 habitants (recensement 1999).

Le rendement moyen du réseau est estimé à $\eta = 63 \%$.

4.1.2. Présentation du modèle hydraulique de réseau

L'application FIAB nécessite de disposer d'un modèle hydraulique du réseau sur le logiciel EPANET2® (Rossman, 2000), élaboré par l'EPA (Environmental Protection Agency). Ce logiciel permet de simuler le fonctionnement du réseau d'eau potable et des ouvrages de stockage, de production et de régulation, sur une période étendue dans le temps, en tenant compte de la répartition des consommations domestiques et industrielles au cours de la journée. Nous disposons au départ d'une modélisation Epanet du réseau de Sury le Comtal que nous avons directement exploitée pour le calcul des indices de fiabilité via l'outil FIAB et ce, à travers une récupération par une simulation pas à pas des paramètres hydrauliques nécessaires aux différents calculs.

Le modèle hydraulique décrivant le fonctionnement du réseau de Sury Le Comtal sur une plage horaire de 24h est présenté dans la figure 4.1.

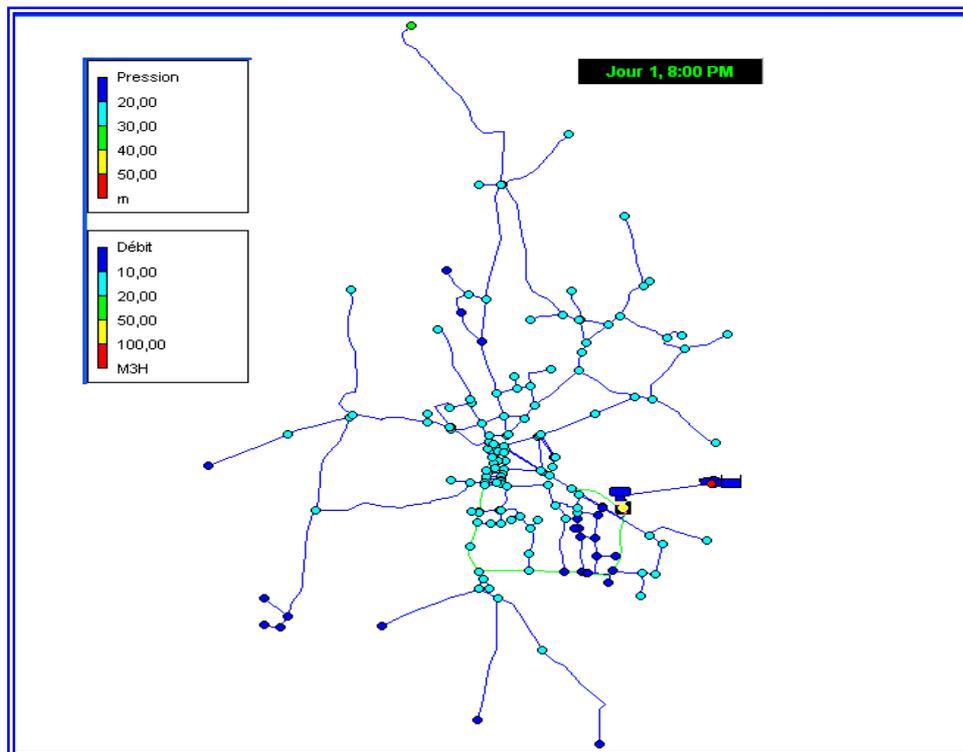


Figure 4.1 : Modélisation Epanet2® du réseau de Sury Le Comtal

4.2. Application de l’outil FIAB

4.2.1. Paramétrage initial de l’outil

Avant de lancer le calcul des différents indices, il est nécessaire de spécifier les valeurs des quelques paramètres d’entrée de l’outil. Nous étudions la proposition suivante pour la définition des paramètres initiaux, tel que le montre la figure 4.2.

- (1) Durée totale de la simulation = 24h ;
- (2) Heure d’occurrence de la casse = 17h. Nous avons choisi de faire coïncider la casse avec les heures de pointes de la journée, afin de permettre à l’utilisateur de mieux apprécier l’effet de rupture de chacune des conduites du réseau ;
- (3) Temps Moyen d’intervention sur la conduite (ou MTTR) = 7h ;
- (4) Des paliers de pressions correspondant à $P_{min} = 10 \text{ mCE}$ et $P_{max} = 15 \text{ mCE}$.

Une fois ce paramétrage effectué, nous pouvons visualiser les résultats sur les feuilles de calcul Excel relatives à chaque bouton de commande de l’interface FIAB_Box.

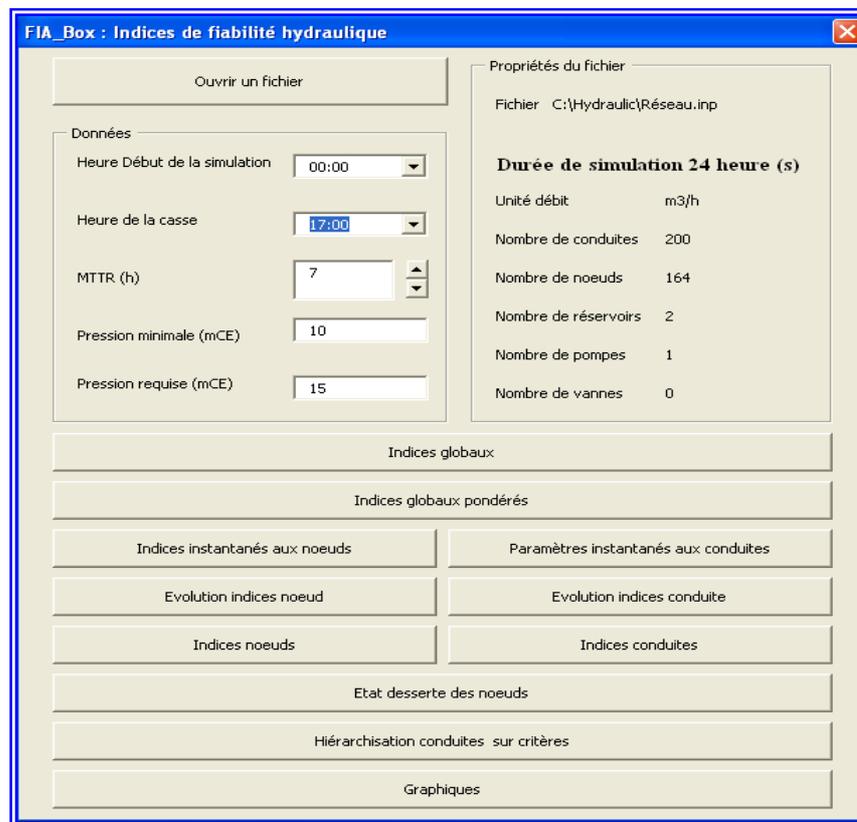


Figure 4.2 : Interface FIA_Box avec paramétrage initial

4.2.2. Analyse des résultats

Cette partie de l'étude est consacrée à l'analyse des résultats escomptés de l'outil et relatifs au paramétrage défini précédemment. Les résultats que l'on a jugés utiles à mettre en exergue sont les suivants (la mention FIAB signifie que le calcul s'effectue par l'outil FIAB):

a) Le rendement FIAB

Le rendement est un critère relatif d'appréciation, car il ne permet pas de comparer l'état de fonctionnement de réseaux de configurations différentes, mais seulement d'observer les variations de ce fonctionnement d'une année à l'autre.

La figure 4.3 ci-dessous représente la courbe de modulation régissant la consommation horaire utilisée dans le calcul du rendement FIAB.

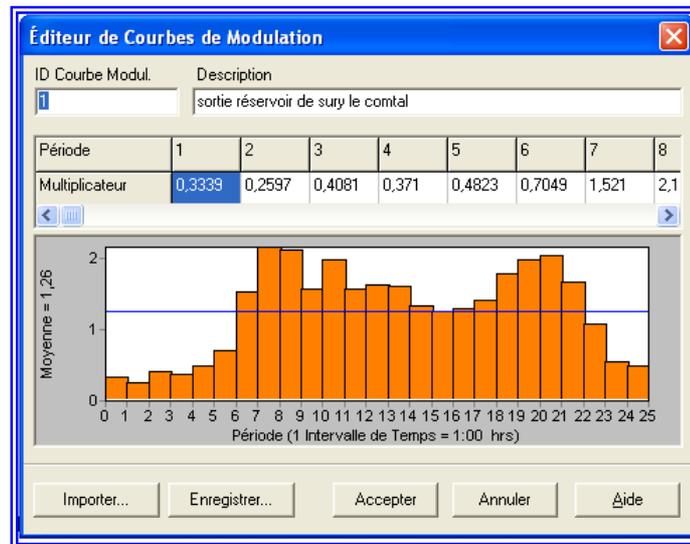


Figure 4.3 : Courbe de modulation de la consommation à la sortie du réservoir de Sury Le Comtal (Epanet2®)

Les périodes de forte consommation (périodes de pointe) se situent entre 7 h et 8 h et de 18 à 20 h. La période de faible consommation se situe entre 0 h et 1 h du matin.

Le volume des fuites est estimé à $24 \text{ m}^3/\text{h}$ et représente environ 42 % du volume total distribué. Le profil de consommation affecté aux fuites est constant dans le temps comme le représente la figure 4.4.

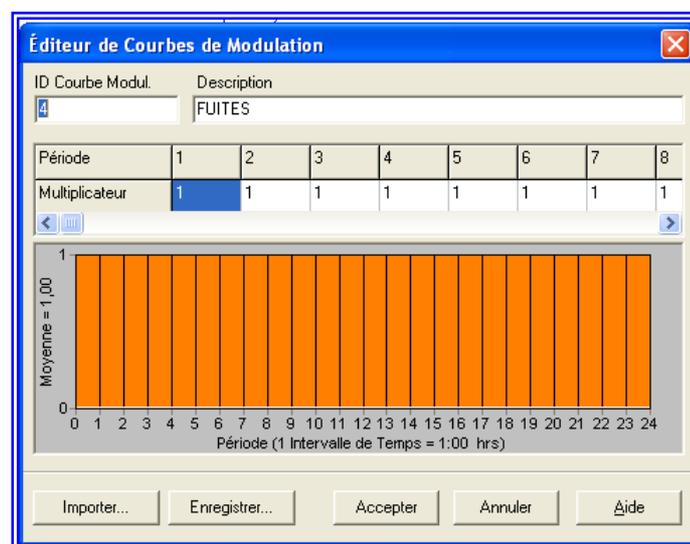


Figure 4.4 : Courbe de modulation des fuites sur le réseau de Sury Le Comtal (Epanet2®)

A partir des courbes de modulations sus-présentées, l'outil de calcul évalue un rendement primaire de 59,15% pour le réseau, correspondant à une satisfaction de la demande égale à 77,91%. Toutefois, cette valeur reste relativement proche de la valeur de $\eta = 63 \%$

(rapport entre les volumes d'eau comptabilisés et ceux mis en distribution) estimée par le service de l'eau de Sury Le Comtal pour l'année 2003 suite aux évaluations suivantes sur les :

- Volumes produits : 0 m^3 (1)
- Volumes importés : $401\,154 \text{ m}^3$ (2)
- Volumes exportés : 0 m^3 , (3)
- Volumes mis en distribution : $(1) + (2) - (3) = 401\,154 \text{ m}^3$,
- Volumes comptabilisés : $255\,599 \text{ m}^3$.

Nous pouvons néanmoins, justifier cette différence de 4% entre les deux valeurs par les erreurs pouvant être commises lors de la modélisation du réseau, le calage du modèle ainsi que le calcul des coefficients de modulation que l'on a d'ailleurs utilisés pour l'estimation des consommations réelles.

Pour les autres résultats de l'application, nous nous positionnons dans deux cas de figures différents :

- Cas de fonctionnement du réseau avec occurrence d'évènements de type « casse de conduite » : calcul des indices spécifiques aux conduites;
- Cas de fonctionnement normal du réseau : calcul des indices globaux et indices spécifiques aux nœuds.

b) Fonctionnement normal du réseau

b. 1) Évolution des indices globaux en fonction du temps

Dans cette partie de l'application nous avons choisi d'analyser la tendance évolutive existant entre la résilience et l'ensemble des indices de surpuissance, de surpression et de surpression totale du réseau (indice de Walski).

Nous avons tracé les courbes résilience, de surpuissance, de surpression et de surpression totale (Walski) en fonction du temps sur un même graphe en vue de chercher une éventuelle corrélation des indices entre eux. Les tableaux et figures suivants traduisent l'évolution des indices en fonction du temps ainsi que de l'état de vidange ou de remplissage du réservoir.

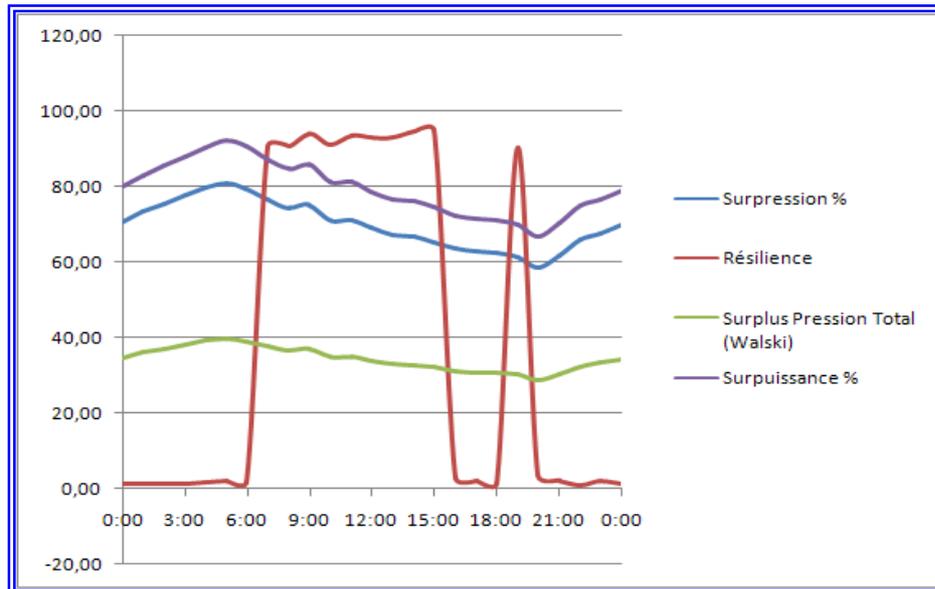


Figure 4.5 : Évolution des indices globaux sur la durée de la simulation

L'évolution des indices est fractionnée en plusieurs intervalles temps selon les variations des valeurs de l'indice de résilience.

Pour un intervalle temps allant de 00h à 6h le degré de résilience est bas, le réservoir se remplit, l'apport en énergie d'entrée est peu important ;

Pour un temps compris entre 7h et 16h l'indice de résilience augmente brusquement de 6h à 7h jusqu'à atteindre la valeur maximum de 0,94. Cette période correspond au temps de vidange du réservoir et donc à un apport en énergie à l'entrée du réseau de distribution.

De 16h à 18h, la résilience connaît une forte diminution, les apports en énergie du réservoir sont moindres, chose qui est due à leur état remplissage.

De 18h à 19h la résilience augmente brusquement et atteint la valeur de 90,20%, car il s'agit là encore d'une vidange du réservoir. Le réseau présente donc une résilience élevée en période de forte demande (ou période de pointe) ce qui est synonyme de son aptitude à faire face à une défaillance en période de grande sollicitation.

Enfin, de 19h à 00h, la résilience du système rechute pour atteindre une valeur minimum de 1,10%.

Nous devons également noter la corrélation existant entre les trois fonctions de surpuissance et de surpression. Et ainsi relever la sensibilité de la résilience du réseau aux variations de la surpuissance disponible, chose qui vient conforter les théories émises.

Nous pouvons donc constater que le système est le plus résilient de 6h à 7h et de 18h à 19h atteignant les valeurs de 94 % et de 90,20% respectivement, ce qui traduit grande résilience aux heures de pointes.

Nous ne sommes cependant pas en mesure d'interpréter ces fluctuations brutales dans les valeurs de cet indice de résilience.

b. 2) Évolution des indices pondérés globaux en fonction du temps

Pour le calcul de ces indices nous nous sommes basés, faute de données sur la nature des nœuds de consommation, sur une pondération aléatoire générée grâce à un programme. Nous obtenons les deux courbes d'évolution suivantes :

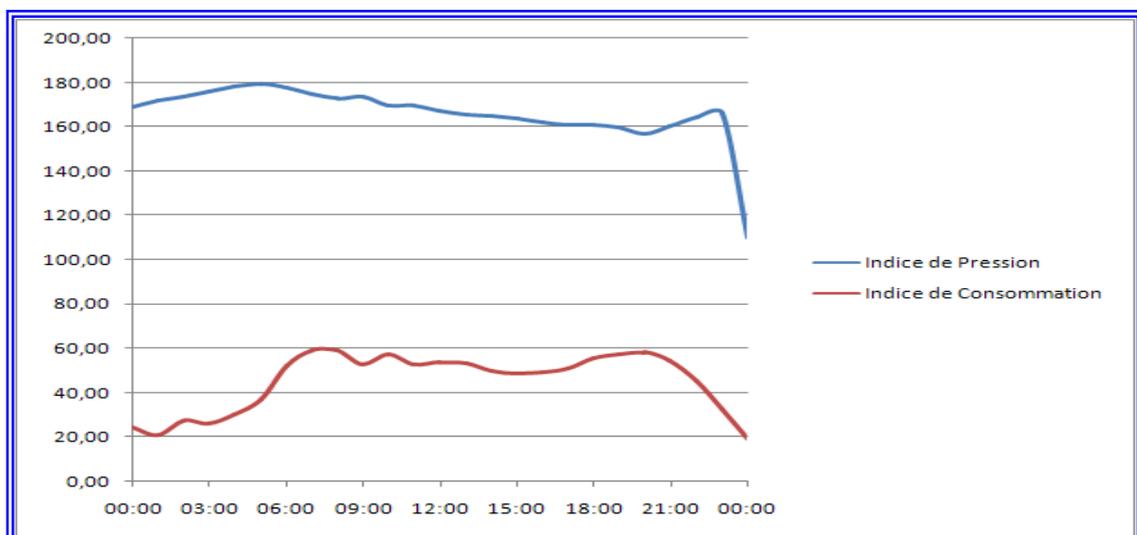


Figure 4.6 : Évolution des indices globaux pondérés sur la durée de la simulation

L'interprétation de ces deux indices demeure difficile de part la pondération utilisée pour leur calcul. On peut néanmoins distinguer que l'indice de consommation prend ses plus grandes valeurs sur les intervalles temps allant de 7h à 8h et de 18h à 21h correspondant aux deux périodes de forte consommation de la journée.

L'indice de pression, quant à lui, renseigne sur les heures auxquelles les pressions de service sont satisfaisantes devant les pressions requises pour une satisfaction de la demande. La variation de cet indice est due aux variations des pressions aux nœuds. La période de déficit en pression correspond aux heures de faible consommation prises entre 23h et 1h.

b.3) Les indices instantanés aux nœuds

Nous avons choisi, à travers notre outil de calcul, de proposer à l'utilisateur d'entrer le choix de l'heure à laquelle il voudrait établir le calcul de ses indices. Nous avons opté pour une heure égale à 20h qui correspond à une heure de pointe.

Afin de vérifier la fiabilité de notre outil dans le calcul des indices aux nœuds, notamment l'évaluation de la surpression disponible, nous prenons comme référence le schéma du réseau mettant en évidence les zones de pressions défavorables.

Il faut noter que les faibles pressions sont induites par la faible différence altimétrique entre le réservoir et le point de desserte. Elles feront l'objet de préconisations.

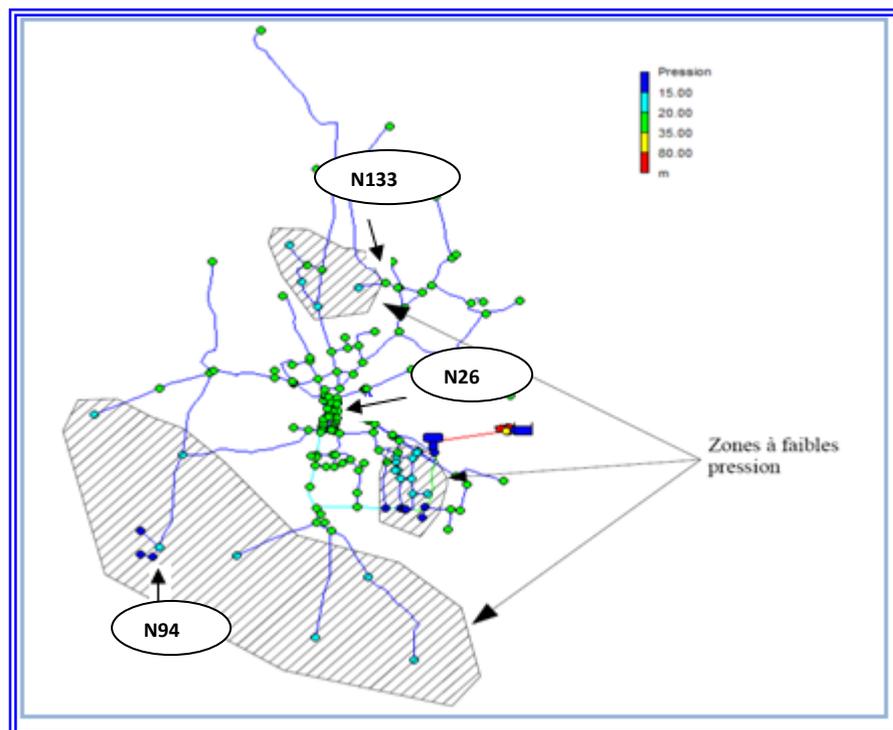


Figure 4.7 : Représentation des zones à faibles pressions à $t = 20h$ (Epanet2®)

Les indices calculés par l'outil, se font sur les nœuds :

- N94 appartenant à l'une des zones défavorables en pressions;
- N26 appartenant à l'une des mailles du réseau;
- N133 appartenant à une ramification du réseau.

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 4.1 suivant :

Tableau 4.1: Calcul des indices spécifiques aux nœuds N95, N26 et N133 à t = 20 h

Nœud de demande	Demande (m ³ /h)	Charge (m)	Pression (m)	Surpuissance %	Surpression %	Rapport Consommation	Rapport Conso Wagner	Rapport Pression %
N94	0,50	401,83	11,83	0,78	21,14	71,85	60,48	78,86
N26	0,54	402,21	26,21	2,87	74,76	67,11	100,00	174,76
N133	0,63	401,56	26,56	2,96	77,08	90,86	100,00	177,08

b.4) Les paramètres instantanés aux conduites

Nous entrons un choix de l'heure à laquelle nous voulons visualiser les paramètres hydrauliques, à caractère dynamique, des conduites (côte amont, côte aval, vitesse, débit). Pour une heure prise égale à 20h, un affichage des résultats se fait pour toutes les conduites du réseau. Nous avons pris une partie de ce tableau afin d'illustrer ce calcul, le reste sera présenté en annexe.

Tableau 4.2 : Les paramètres hydrauliques instantanés aux conduites à t = 20 h

ID Conduite	Nœud Init	Nœud Final	Longueur (m)	Diam (mm)	Rugo (H-W)	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)
C1	166	3	59,80	300,00	110,00	403,57	403,60	79,08	0,31
C2	3	1	65,90	300,00	110,00	403,60	403,57	77,18	0,30

où

ID Conduite : Identifiant de la conduite ;

Nœud Init : nœud initial de la conduite (amont) ;

Nœud final : nœud aval de la conduite (selon le sens de l'écoulement) ;

Rugo : Rugosité de la conduite calculée par la formule de Hazen-Williams ;

Hamont : Charge hydraulique du nœud amont de la conduite ;

Haval : Charge hydraulique du nœud aval de la conduite ;

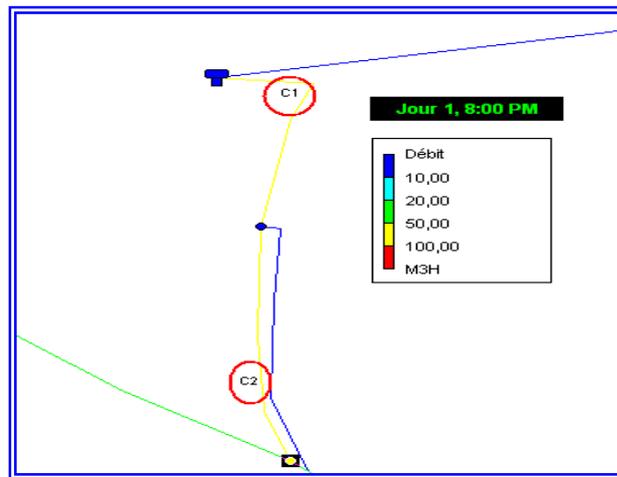


Figure 4.8 Localisation des conduites C1 et C2.

c) Fonctionnement du réseau après défaillance d'une conduite

c. 1) *Indices aux conduites*

Il s'agit là d'afficher des indices relatifs aux évènements de type « casse sur conduite » notamment ICH, IDN, NND, IDNpondéré. Les indices sont calculés sur le MTTR et affichés pour l'ensemble des conduites comme le montre le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Évolution des indices aux conduites sur la durée du MTTR

Conduite ID	C1						
Heure	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
ICH %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
IDN %	99,39	99,39	99,39	99,39	99,39	99,39	99,39
IDN Pondéré %	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93
Nœuds ND	163	163	163	163	163	163	163
Conduite ID	C2						
Heure	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
ICH %	99,36	99,35	99,36	99,38	99,37	99,34	99,32
IDN %	98,78	98,78	98,78	98,78	98,78	98,78	98,78
IDN Pondéré %	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87
Nœuds ND	162	162	162	162	162	162	162

L'utilisateur aura le choix de visualiser toutes les conduites du réseau (avec indices) sur une même feuille « Indice conduites » comme est affiché sur le tableau 4.3, 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 suivante illustre les indices spécifiques à la conduite C7 :

Conduite ID				Changer					
Heure	H amont (m)	H aval (m)	Débit	Vitesse	ICH %	IDN %	Nœuds ND		
00:00:00	404,27	404,27	0,02	0,00	0,78	0,61	1		
01:00:00	404,64	404,64	-0,01	0,00	0,63	0,61	1		
02:00:00	404,98	404,98	0,04	0,00	0,49	0,61	1		
03:00:00	405,32	405,32	0,03	0,00	0,38	0,61	1		
04:00:00	405,65	405,65	0,07	0,00	0,30	0,61	1		
05:00:00	405,94	405,94	0,15	0,00	0,22	0,61	1		
06:00:00	406,09	406,09	0,46	0,01	0,18	0,61	1		
07:00:00	406,00	406,00	0,71	0,01	0,23	0,61	1		
08:00:00	405,67	405,67	0,69	0,01	0,32	0,61	1		
09:00:00	405,46	405,46	0,48	0,01	0,36	0,61	1		
10:00:00	405,09	405,09	0,64	0,01	0,50	0,61	1		
11:00:00	404,85	404,85	0,48	0,01	0,55	0,61	1		
12:00:00	404,56	404,56	0,50	0,01	0,68	0,61	1		
13:00:00	404,28	404,28	0,49	0,01	0,81	0,61	1		
14:00:00	404,05	404,05	0,39	0,01	0,91	0,61	1		
15:00:00	403,82	403,82	0,36	0,01	1,05	0,61	1		
16:00:00	403,57	403,57	0,37	0,01	1,24	0,61	1		
17:00:00	403,50	403,50	0,42	0,01	1,29	0,61	1		
18:00:00	403,66	403,66	0,56	0,01	1,20	0,61	1		
19:00:00	403,61	403,61	0,64	0,01	1,25	0,61	1		
20:00:00	403,24	403,24	0,66	0,01	1,56	0,61	1		

Figure 4.9 : Évolution des indices de conduite

Nous allons à présent étudier la criticité des conduites selon leur localisation dans le réseau. Une conduite appartenant à un maillage devrait avoir un degré de criticité moindre du moment qu'une certaine redondance est assurée, que celle constituant une branche de ramification. Nous allons pour cela afficher les criticités de quatre conduites constituant une maille et de quatre autres conduites présentes dans des ramifications. Le calcul des indices se fait à $t = 20h$.

Le tableau 4.4 représente les indices spécifiques à des conduites constituant trois mailles distinctes du réseau. Nous pouvons constater que pour des conduites appartenant à une même maille, les valeurs des indices ICH sont identiques. Ceci peut être expliqué par la redondance qu'assure le maillage au niveau du réseau. Les différentes conduites constituant les mailles constituent des chemins redondants assurant le passage de l'eau en cas de rupture de l'une d'elles.

Tableau 4.4 : Indices aux conduites constituant différentes mailles

Maille1	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)	ICH %	IDN %	Nœuds ND
C63	402,22	402,22	0,33	0,03	1,56	0,61	1
C57	402,22	402,23	11,12	0,17	1,55	0,61	1
C64	402,23	402,23	0,26	0,01	1,56	0,61	1
C59	402,22	402,23	9,20	0,14	1,55	0,61	1
Maille2	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)	ICH %	IDN %	Nœuds ND
C135	401,82	401,82	1,14	0,02	1,56	0,61	1
C136	401,91	401,82	8,06	0,18	1,56	0,61	1
C121	401,91	401,82	4,62	0,16	1,56	0,61	1
Maille3	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)	ICH %	IDN %	Nœuds ND
C53	402,06	402,07	3,34	0,18	1,56	0,61	1
C52	401,97	402,06	2,68	0,15	1,56	0,61	1
C50	402,06	401,97	7,74	0,27	1,56	0,61	1
C49	402,07	402,06	2,58	0,09	1,56	0,61	1

Tableau 4.5 : Indices aux conduites faisant partie de ramifications

Conduite	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)	ICH %	IDN %	Nœuds ND
C108	403,22	403,22	0,39	0,02	2,05	1,22	2
C178	403,24	403,23	0,43	0,04	2,10	1,22	2
C104	403,29	403,30	0,33	0,03	1,98	1,22	2
C188	402,06	402,06	0,31	0,03	1,95	1,22	2

Le tableau 4.5 quant à lui, représente les indices spécifiques à quelques conduites présentes sur des ramifications du réseau.

Les mailles 1, 2 et 3 sont représentées dans la figure 4.10 ci-dessous.

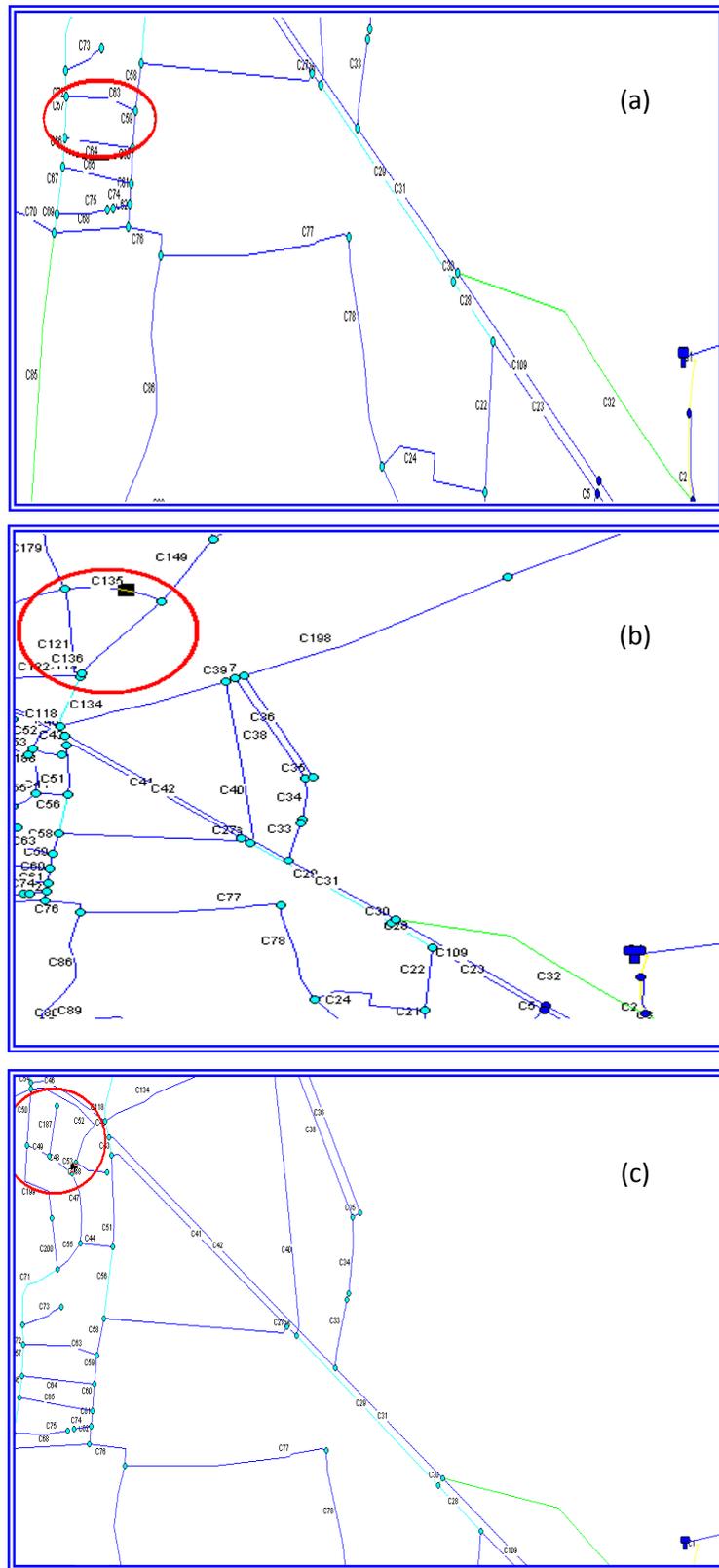


Figure 4.10 : Localisation des mailles (a) maille 1; (b) maille 2; (c) maille 3.

c.2) L'état de desserte des nœuds après casse

A travers l'outil FIAB, l'utilisateur peut prendre connaissance de l'état de desserte des nœuds sur la période d'indisponibilité de la conduite élaguée qu'il aura choisie. Le cas échéant, il sera en mesure de gérer ses politiques de maintenance vis-à-vis de l'importance de chaque nœud pénalisé. Le tableau 4.6 représente la desserte des nœuds N2, N3, N159 et N160 suite à la rupture de la conduite C69.

Tableau 4.6 : État de desserte de quelques nœuds suite à la rupture de la conduite C69

ID nœud	Poids	17:00:00	18:00:00	19:00:00	20:00:00	21:00:00	22:00:00	23:00:00
N2	20	Noeud D						
N3	1	Noeud D						
N159	1	Noeud D						
N160	10	Noeud ND						

c.3) Classement des conduites selon ICH, IDN et $IDN_{pondéré}$

Il s'agit là, de classer les conduites selon l'un des trois critères : ICH ou encore pourcentage de volume non distribué (suite à la rupture de la conduite), IDN ou $IDN_{pondéré}$. Les valeurs de ces trois paramètres sont les valeurs maximums prises sur le MTTR pour chaque conduite. Il appartient à l'utilisateur de choisir sur le menu déroulant « Critère de classement » l'élément de classement qu'il juge le plus judicieux à prendre en considération.

L'utilisateur devra entrer les deux valeurs seuils de haute et moyenne criticité pour le calcul et l'affichage du degré de criticité des conduites. Notre application s'est faite pour des seuils ICH respectivement de 40% et 20%.

Tableau 4.7 : Classement des conduites selon ICH, IDN et $IDN_{pondéré}$

Classement ICH %			Classement IDN %		Classement $IDN_{pondéré}$ %	
ID Conduite	ICH %	Criticité	ID Conduite	IDN %	ID Conduite	$IDN_{pondéré}$ %
C1	100,0000	Haute	C1	99,3902	C1	99,6055
C2	99,3818	Haute	C2	98,7805	C2	99,0138
C93	9,3624	Basse	C93	5,4878	C93	5,1282
C97	8,8929	Basse	C97	4,2683	C97	4,1420
C95	8,3071	Basse	C95	3,0488	C95	3,5503
C14	7,7760	Basse	C158	3,0488	C158	3,5503
C101	6,8200	Basse	C114	3,0488	C114	3,1558
C13	6,2497	Basse	C153	2,4390	C153	2,5641
C4	5,9253	Basse	C101	1,8293	C101	2,1696
C192	4,9860	Basse	C113	1,8293	C113	1,9724
C191	4,9860	Basse	C33	1,2195	C33	1,5779
C9	4,7788	Basse	C74	1,2195	C74	1,5779
C10	3,9651	Basse	C108	1,2195	C108	1,5779
C158	3,3845	Basse	C112	1,2195	C112	1,5779
C114	3,3494	Basse	C138	1,2195	C138	1,5779
C12	3,3263	Basse	C155	1,2195	C155	1,5779
C170	2,5775	Basse	C162	1,2195	C162	1,5779
C113	2,4206	Basse	C184	1,2195	C184	1,5779
C15	2,4130	Basse	C186	1,2195	C186	1,5779
C151	2,3491	Basse	C73	1,2195	C73	1,3807

Les travaux à engager prioritairement concernent tout d'abord le renforcement des conduites dites de haute criticité hydraulique notamment la conduite principale de distribution ainsi que la conduite qui y est reliée.

4.3. Conclusion

L'application du prototype de calcul FIAB sur le modèle du réseau de Sury Le Comtal, constitue une nouvelle approche d'évaluation de la fiabilité hydraulique. La méthodologie adoptée permet, de mettre en évidence un ensemble de grandeurs servant de critères pour cette évaluation.

Les résultats de cette application ont été présentés sous forme de tableaux et de graphiques permettant de visualiser des évolutions horaires ainsi que des calculs instantanés des indices spécifiques aux nœuds et conduites et des indices globaux.

L'utilisation de l'outil a montré son apport dans la hiérarchisation des conduites selon leur importance hydraulique dans le réseau.

La pertinence des résultats escomptés reste cependant à discuter, et l'outil, à améliorer...

Conclusion générale

La présente étude constitue une nouvelle approche pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable. L'objectif étant de mettre au point un outil d'évaluation qui tiendrait compte des caractéristiques hydrauliques du réseau, ainsi que de l'effet d'éventuels événements de type « défaillance de conduite » qu'il pourrait subir.

Trois types d'indices évaluant la fiabilité hydraulique ont été proposés:

- Des indices spécifiques aux nœuds traduisant le niveau de la desserte en termes de demande et de pression.
- Des indices spécifiques aux conduites permettant non seulement, leur hiérarchisation suivant les trois critères proposés pour la définition de l'importance hydraulique, mais également une mise en évidence de l'état de desserte des nœuds de consommation suite à la défaillance d'une conduite donnée.
- Des indices globaux concernant le réseau en entier et donnant une vue d'ensemble sur ses performances.

L'un des intérêts majeurs de ce travail de recherche, a consisté en l'implémentation informatique d'un outil permettant le calcul des différents indices : l'outil « FIAB ». L'application a été développée par l'addition de plusieurs autres fonctionnalités garantissant à l'utilisateur la possibilité de l'adapter au fonctionnement de son réseau assurant ainsi, une meilleure gestion des risques liés aux défaillances des conduites.

FIAB constitue un outil d'aide à la décision adapté aux besoins des services, son application reste un véritable pari. L'outil est encore en phase d'expérimentation et doit être amélioré afin d'envisager son intégration dans la conception des réseaux d'eau potable et ce, en vue de rendre compte des configurations assurant le plus grand degré de fiabilité.

Des travaux pour l'amélioration de l'interface afin de permettre une plus grande souplesse dans les options d'entrée sont à entreprendre. Autre perspective que l'on juge intéressante, l'introduction d'un modèle de calcul du taux de casse des conduites afin d'élargir les fonctionnalités de l'outil dans le classement des conduites vulnérables.

En somme, l'outil FIAB permet au gestionnaire d'être en possession d'un plus grand nombre d'éléments décisionnels pour une meilleure gestion des travaux de maintenance et de renouvellement du réseau.

Bibliographie

Adnot M., 1991. « *Étude pour la mise au point d'une méthodologie de programmation des renouvellements de réseaux d'adduction d'eau* ». Mémoire de DEA : Sciences de la décision et micro-économie : ENS. Cachan.

Andreou S.A., 1986. « *Predictive models for pipe failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems* ». Phd Thesis, Department of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, USA. 191p.

Arnoux P., 1998. « *Modélisation du vieillissement d'un réseau d'eau potable en fonte et application aux stratégies de renouvellement* ». Thèse en Science de l'eau. Université Louis Pasteur. Strasbourg, France. 138p.

Awumah K., Goulter I., Bhatt S.K., 1991. « *Entropy-Based Redundancy Measures in Water Distribution Networks* ». Journal of Hydraulic Engineering, 117(5), pp. 595-614.

Bao, Y.X., Mays, L.W., 1990. « *Model for Water Distribution System Reliability* ». Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116 (9), pp. 1119-1137.

Bhave P.R., 1991. « *Analysis of Flow in Water Distribution Networks* ». Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.

Bhave P.R., 1988. « *Calibrating Water Distribution Network Models* ». Journal of Environmental Engineering Division, ASCE.

Bhave P.R., 1981. « *Node Flow Analysis of Water Distribution Networks* ». Transportation Engineering Journal, ASCE, 107, pp. 457-467.

Chandapillai, J., 1991. « *Realistic Simulation of Water Distribution Systems* ». Journal of Transportation Engineering, ASCE, 117, pp. 258-263.

Clark J.M., Viessman W., Hammer M.J., 1977. « *Water Supply and Pollution Control* ». Harper and Row Publishers, Inc., U.S.A.

Carrijo Ivaltemir. B., Reis R. L. F., Walters G.A., Savic D. « *Operational Optimization of WDS Based on Multiobjective Genetic Algorithms and Operational Extraction Rules Using Data Mining* ». Part of Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management. World Water and Environmental Resources Congress. Editors Salt Lake City, Utah, USA June 27 – July 1, 2004.

Damelin E., Shamir U., Arad N., 1972. « *Engineering and Economic Evaluation of the Reliability of Water Supply* ». Water Resources Research, 4(8), pp. 861-877.

- Duan N., Mays L.W., Lansey K.E., 1990 a. «*Optimal Reliability-Based Design of Pumping and Distribution Systems*». Journal of Hydraulic Engineering, 116(2), pp. 249-268.
- Duan N., Mays L.W., 1990 b. «*Reliability Analysis of Pumping Systems*». Journal of Hydraulic Engineering, 116(2), pp. 230-247.
- Eisenbeis P., 1994. «*Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable* ». Thèse en Génie de l'environnement. Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 156 p.
- Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A., Saul A.J., Walters G.A., 2 (2000). «*Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with UK perspective*». Urban Water, pp. 153-170
- Fujiwara O., De Silva A.U., 1990, «*Algorithm for Reliability-Based Optimal Design of Water Networks* », Journal of Environmental Engineering, 116(3), pp. 575-587.
- Fujiwara O., Ganesharajah T., 1993. «*Reliability Assessment of Water Supply Systems With Storage and Distribution Networks* ». Water Resources Research, 29(8), pp. 2917-2924.
- G2C environnement MÂCON, Nov 2006, "*Rapport diagnostic du réseau d'eau potable de la commune de SURY LE COMTAL, Département de La Loire*".
- Germanopoulos G., 1985. «*A Technical Note on the Inclusion of Pressure Dependant Demand and Leakage Terms in Water Supply networks Models* ». Civil Engineering Systems, Volume 2.
- Goulter I.C., Bouchart F., 1990, "*Reliability-Constrained pipe Network Model.*" Journal of Hydraulic Engineering, 116(2), pp. 211-229.
- Gupta, R., Bhave, P.R., 1994. «*Reliability Analysis of Water Distribution Systems* ». Journal of Environmental Engineering, ASCE, 120(2), pp. 447- 460.
- Hobbs B.F., Beim G.K., 1988 a. «*Analytical Simulation of Water System Capacity Reliability: 1. Modified Frequency-Duration Analysis* ». Water Resources Research, 24(9), pp. 1431-1444.
- Hobbs B.F., Beim G.K., 1988 b.«*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.
- Janel J.L., Gandon G., Werey C., 2001. «*Inventaire des réseaux d'eau potable du département du Bas-Rhin : Glossaire* ». Laboratoire Gestion des Services Publics. Strasbourg, France. 11p.
- Jowitt P.W., Xu C., 1993, "*Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks*", Journal of Water Resources Planning and Management, 119(1), pp. 18-31.
- Mays L.W, 2000. «*Water Distribution Systems Handbook* ». McGraw-Hill, New York.
- May L.W., 1989. «*Reliability Analysis of Water Distribution Systems* ». ASCE, pp. 532.
- Mays, L.W., Cullinane, M.J., 1986. «*A Review and Evaluation of Reliability Concepts for Design of Water Distribution Systems*». U.S. Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

- Misirdali, M., 2003. « *A Methodology for Calculating Hydraulic System Reliability of Water Distribution Networks* ». M. Sc. Thesis, METU, Dept of Civil Engineering.
- Nafi A., 2006. « *La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable* ». Thèse en Science de gestion. Université Louis Pasteur. Strasbourg, France. 239p.
- Nohutçu M., 2002. « *Analysis of Water Distribution Networks with Pressure Dependent Demand* ». M. Sc. Thesis, METU, Dept. of Civil Engineering.
- Quimpo R.G., Shamsi U.M., 1991. « *Reliability based distribution system maintenance* ». Journal of Water Resources Planning and Management Division, ASCE, 117(3), 321-339.
- Reddy L.S., Elango K., 1989. « *Analysis of Water Distribution Networks with Head-Dependant Outlets* ». Civil Engineering Systems, 6(3), pp. 102-110.
- Rossman L.A., 2000. « *Epanet2 Users Manual* ». US. Environmental Protection Agency, EPA. USA.
- Shamsi U.M., 1990. « *Computerized evaluation of water supply reliability* ». IEEE Transaction on Reliability, 39(1), pp. 35-41.
- Sue Y., Mays L.W, Duan N., Lansey K., 1987. « *Reliability Based Optimization for Water Distribution Systems* ». Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113, pp. 589-596.
- Tanyimboh T.T., Tabesh M., Burrows R., 2001. « *Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks* ». Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 127(4), 206-213.
- Todini E., 2000. « *Looped water distribution network design using a resilience index based heuristic approach* ». Urban Water N°2, pp 115-122.
- Wagner, J., Shamir, U., Marks, D., 1988a. « *Water Distribution System Reliability: Analytical Methods* ». Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 127(4), 206-213.
- 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.
- Walski, T.M., Gessler J., 1999, « *Discussion of Improved design of Anytown distribution network using structured messy genetic algorithms* », by Walters G.A., Halhal D., Savic D.A., Ouzar D., Urban Water, Vol 1 n°2, pp 256-268]
- Weber E., 2001. « *Alimentation en eau potable. Support de cours : Généralités, Besoins, Stockage, Matériels* ». ENGEES, Stras bourg, France, 74 p.
- Yildiz E., 2002, « *Reliability of Water Distribution Systems* », M. Sc. Thesis, METU, Dept of Civil Engineering.

Annexes

**Annexe 1: Logiciel de simulation
hydraulique EPANET 2®**

Définition:

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique et qualitatif de l'eau sur de longues durées dans les réseaux sous pression. Il calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs, et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau, au cours d'une durée de simulation divisée en plusieurs étapes.

EPANET a été développé par la Division de Ressources et d'Alimentation en Eau du Laboratoire National pour l'Investigation sur la Gestion de Risques, de l'Agence d'Environnement des États Unis (Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory).

Avantages du logiciel EPANET :

Ce logiciel est distribué gratuitement par l'E.P.A. depuis le mois de septembre 1993. Depuis, il est largement utilisé dans le monde entier grâce à :

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

Utilisation du logiciel EPANET :

Les fonctionnalités du logiciel EPANET sont diversifiées, et portent principalement sur

- la régulation des pressions dans le réseau,
- la détection des zones de fonctionnement déficitaire
- le dimensionnement de travaux d'amélioration du réseau ou d'extension.
- l'évolution de la qualité de l'eau et l'étude de traitement en différents points du réseau
- l'amélioration de la gestion des équipements (marnage des réservoirs.), des coûts énergétiques (fonctionnement des stations de pompage.), du contrôle des débits d'eau (sectorisation du réseau.), de la gestion de crise (suppression d'une ressource, rupture d'une canalisation maîtresse, introduction de contaminants dans le réseau).

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

- utilisation en alternance des différentes ressources du système,

- modifier le régime de pompage ou de marnage des réservoirs,
- préciser l'usage des stations de rechloration (ou autres retraitements) en réseau,
- planifier l'entretien et le remplacement de certaines canalisations.

Capacités pour la Modélisation Hydraulique

Une modélisation hydraulique scrupuleuse et complète est la première condition pour pouvoir modéliser la qualité de l'eau de manière efficace. EPANET contient un moteur de calcul hydraulique moderne ayant les caractéristiques suivantes:

- la taille du réseau étudié est illimitée.
- pour calculer les pertes de charge dues aux frottements, il dispose des formules de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, et Chezy-Manning.
- il inclut les pertes de charge singulières aux coudes, aux tés, etc.
- il peut modéliser des pompes à vitesse fixe ou variable.
- Il peut calculer l'énergie consommée par une pompe et son coût.

En utilisant ces capacités, EPANET peut modéliser des phénomènes en rapport avec la qualité de l'eau comme:

- le mélange d'eau provenant de différentes sources;
- le temps de séjour de l'eau dans le réseau;
- diminution du chlore résiduel;
- l'accroissement des sous-produits de la désinfection.

Annexe 2 : Paramètres spécifiques aux conduites
Application à l'instant $t = 20h$

ID conduite	Nœud Init	Nœud Final	Longueur (m)	Diam (mm)	Rugosité (H-W)	H amont (m)	H aval (m)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)
C1	166	3	59,80	300,00	110,00	403,57	403,60	79,08	0,31
C2	3	1	65,90	300,00	110,00	403,60	403,57	77,18	0,30
C3	2	3	340,34	80,00	110,00	403,54	403,60	-1,39	0,08
C4	1	4	542,96	250,00	110,00	403,57	403,32	44,91	0,25
C5	5	6	68,55	150,00	110,00	403,25	403,25	3,01	0,05
C6	6	7	189,67	150,00	110,00	403,25	403,24	2,60	0,04
C7	7	8	151,48	150,00	110,00	403,24	403,24	0,66	0,01
C8	11	12	221,78	80,00	110,00	403,24	403,23	0,52	0,03
C9	4	11	194,83	250,00	110,00	403,32	403,24	42,69	0,24
C10	11	10	4,41	250,00	110,00	403,24	403,24	41,66	0,24
C11	8	10	207,29	150,00	110,00	403,24	403,24	-0,05	0,00
C12	10	9	32,79	250,00	110,00	403,24	403,23	41,12	0,23
C13	9	13	128,43	200,00	110,00	403,23	403,08	41,28	0,37
C14	13	14	235,80	200,00	110,00	403,08	402,81	41,26	0,36
C15	14	15	345,43	200,00	110,00	402,81	402,58	31,21	0,28
C16	9	16	293,53	100,00	110,00	403,23	403,23	-0,63	0,02
C17	7	16	100,72	100,00	110,00	403,24	403,23	1,65	0,06
C18	21	13	452,75	60,00	110,00	403,21	403,08	0,81	0,08
C19	17	18	55,54	100,00	110,00	403,23	403,25	-3,12	0,11
C20	17	21	75,86	100,00	110,00	403,23	403,21	3,24	0,11
C21	18	19	41,05	100,00	110,00	403,25	403,26	-3,10	0,11
C22	19	20	112,66	100,00	110,00	403,26	403,34	-5,40	0,19
C23	5	20	191,51	100,00	110,00	403,25	403,34	-4,26	0,15
C24	22	19	178,57	63,00	110,00	403,04	403,26	-2,03	0,18
C25	22	21	135,22	60,00	110,00	403,04	403,21	-1,80	0,18
C26	24	25	15,77	100,00	110,00	402,43	402,40	9,22	0,33
C27	25	26	256,32	100,00	110,00	402,40	402,21	5,16	0,18
C28	20	27	73,64	100,00	110,00	403,34	403,53	-10,15	0,36
C29	27	24	244,76	100,00	110,00	403,53	402,43	13,95	0,49
C30	27	28	9,26	300,00	110,00	403,53	403,53	-24,60	0,10
C31	28	23	183,53	80,00	100,00	403,53	402,56	7,71	0,43
C32	28	1	397,78	300,00	110,00	403,53	403,57	-31,83	0,13
C33	35	23	68,56	60,00	110,00	402,55	402,56	-0,30	0,03
C34	34	31	74,79	100,00	110,00	402,00	402,00	-0,30	0,01
C35	31	32	11,76	100,00	110,00	402,00	402,00	0,42	0,01
C36	32	33	207,23	100,00	110,00	402,00	402,00	0,11	0,00
C37	33	30	13,29	80,00	110,00	402,00	402,01	-2,56	0,14
C38	30	31	207,27	100,00	110,00	402,01	402,00	1,03	0,04
C39	30	29	17,90	80,00	110,00	402,01	402,03	-4,15	0,23

C40	24	29	295,76	80,00	110,00	402,43	402,03	4,04	0,22
C41	25	37	297,01	80,00	110,00	402,40	402,11	3,40	0,19
C42	23	36	387,18	100,00	110,00	402,56	402,08	6,89	0,24
C43	37	36	17,46	125,00	110,00	402,11	402,08	12,58	0,28
C44	38	39	44,26	100,00	110,00	402,17	402,16	3,13	0,11
C45	36	45	17,17	125,00	110,00	402,08	402,04	18,97	0,43
C46	45	44	111,37	100,00	110,00	402,04	401,97	4,71	0,17
C47	39	40	72,10	100,00	110,00	402,16	402,07	6,87	0,24
C48	40	41	35,20	100,00	110,00	402,07	402,07	3,11	0,11
C49	41	42	32,66	100,00	110,00	402,07	402,06	2,58	0,09
C50	42	43	55,63	100,00	110,00	402,06	401,97	7,74	0,27
C51	38	37	90,02	125,00	110,00	402,17	402,11	9,57	0,22
C52	43	46	141,85	80,00	110,00	401,97	402,06	-2,68	0,15
C53	46	40	12,14	80,00	110,00	402,06	402,07	-3,34	0,18
C54	43	44	6,38	125,00	110,00	401,97	401,97	7,24	0,16
C55	39	47	41,31	100,00	110,00	402,16	402,18	-4,08	0,14
C56	26	38	71,38	150,00	110,00	402,21	402,17	13,05	0,21
C57	49	53	30,92	150,00	110,00	402,22	402,23	-11,12	0,17
C58	26	48	37,17	150,00	110,00	402,21	402,22	-8,43	0,13
C59	48	50	27,91	150,00	110,00	402,22	402,23	-9,20	0,14
C60	50	51	26,73	150,00	110,00	402,23	402,24	-9,29	0,15
C61	51	55	15,04	150,00	110,00	402,24	402,24	-8,82	0,14
C62	55	56	17,68	150,00	110,00	402,24	402,25	-9,27	0,15
C63	48	49	103,28	63,00	110,00	402,22	402,22	0,33	0,03
C64	53	50	100,80	100,00	110,00	402,23	402,23	0,26	0,01
C65	51	52	100,00	100,00	110,00	402,24	402,24	-0,79	0,03
C66	52	53	21,51	150,00	110,00	402,24	402,23	11,75	0,18
C67	52	54	36,00	150,00	110,00	402,24	402,26	-12,91	0,20
C68	57	56	109,12	125,00	110,00	402,27	402,25	4,59	0,10
C69	57	54	14,98	150,00	110,00	402,27	402,26	13,39	0,21
C70	57	58	104,19	125,00	110,00	402,27	402,25	4,08	0,09
C71	47	59	85,51	150,00	110,00	402,18	402,21	-10,22	0,16
C72	59	49	19,35	150,00	110,00	402,21	402,22	-10,83	0,17
C73	59	60	57,07	80,00	110,00	402,21	402,21	0,23	0,01
C74	55	62	23,98	100,00	110,00	402,24	402,24	0,18	0,01
C75	61	54	74,36	80,00	110,00	402,26	402,26	-0,18	0,01
C76	56	63	66,09	80,00	110,00	402,25	402,38	-5,02	0,28
C77	63	64	281,26	100,00	110,00	402,38	402,42	-2,01	0,07
C78	64	22	179,15	60,00	110,00	402,42	403,04	-3,19	0,31
C79	71	66	115,06	80,00	110,00	402,39	402,40	-0,44	0,02
C80	66	65	14,07	150,00	110,00	402,40	402,39	6,30	0,10

C81	65	67	140,91	80,00	110,00	402,39	402,36	1,70	0,09
C82	67	68	13,34	200,00	110,00	402,36	402,36	-22,02	0,19
C83	68	69	46,93	80,00	110,00	402,36	402,36	0,25	0,01
C84	68	70	84,62	200,00	110,00	402,36	402,39	-23,00	0,20
C85	67	57	225,54	200,00	110,00	402,36	402,27	22,99	0,20
C86	63	65	215,08	150,00	110,00	402,38	402,39	-4,08	0,06
C87	71	72	67,87	80,00	110,00	402,39	402,39	0,06	0,00
C88	72	70	99,05	100,00	110,00	402,39	402,39	-0,27	0,01
C89	66	73	164,28	150,00	110,00	402,40	402,43	-7,28	0,11
C90	73	74	91,87	100,00	110,00	402,43	402,43	0,43	0,02
C91	73	76	125,13	150,00	110,00	402,43	402,46	-8,14	0,13
C92	76	75	79,90	100,00	110,00	402,46	402,45	0,43	0,02
C93	15	77	62,30	150,00	110,00	402,58	402,57	6,17	0,10
C94	77	78	96,35	150,00	110,00	402,57	402,57	0,18	0,00
C95	80	79	152,98	150,00	110,00	402,54	402,56	-5,34	0,08
C96	81	79	736,02	80,00	110,00	402,55	402,56	-0,23	0,01
C97	79	77	93,89	150,00	110,00	402,56	402,57	-5,80	0,09
C98	82	80	1032,55	80,00	110,00	402,50	402,54	-0,57	0,03
C99	14	83	136,08	100,00	110,00	402,81	402,52	9,43	0,33
C100	83	76	217,75	150,00	110,00	402,52	402,46	9,00	0,14
C101	80	84	706,57	100,00	110,00	402,54	402,20	4,16	0,15
C102	4	85	209,37	100,00	110,00	403,32	403,30	1,73	0,06
C103	85	86	83,36	63,00	110,00	403,30	403,27	1,07	0,09
C104	87	85	193,64	63,00	110,00	403,29	403,30	-0,33	0,03
C105	86	88	258,70	63,00	110,00	403,27	403,22	0,73	0,07
C106	88	89	115,70	80,00	110,00	403,22	403,22	0,18	0,01
C107	89	5	393,96	80,00	110,00	403,22	403,25	-0,76	0,04
C108	90	89	443,43	80,00	110,00	403,22	403,22	-0,39	0,02
C109	2	28	260,82	100,00	110,00	403,54	403,53	1,00	0,04
C110	58	91	128,17	100,00	110,00	402,25	402,25	0,09	0,00
C111	58	92	1146,87	125,00	110,00	402,25	402,10	3,77	0,09
C112	93	95	220,92	63,00	110,00	401,84	401,84	0,19	0,02
C113	93	94	107,81	80,00	110,00	401,84	401,83	1,01	0,06
C114	92	93	915,15	80,00	110,00	402,10	401,84	1,74	0,10
C115	96	92	829,47	80,00	70,00	401,78	402,10	-1,31	0,07
C116	44	97	48,51	125,00	110,00	401,97	401,92	11,46	0,26
C117	97	98	129,92	125,00	110,00	401,92	401,82	9,89	0,22
C118	45	99	94,13	125,00	110,00	402,04	401,92	12,66	0,29
C119	99	100	7,42	125,00	110,00	401,92	401,91	13,03	0,30
C120	98	101	169,97	150,00	110,00	401,82	401,82	0,56	0,01
C121	100	101	160,75	100,00	110,00	401,91	401,82	4,62	0,16

C122	99	97	126,59	125,00	110,00	401,92	401,92	-0,85	0,02
C123	43	102	310,74	80,00	110,00	401,97	401,79	2,61	0,14
C124	102	103	14,09	80,00	110,00	401,79	401,78	2,22	0,12
C125	103	104	5,65	150,00	110,00	401,78	401,78	1,46	0,02
C126	103	98	227,27	150,00	110,00	401,78	401,82	-6,41	0,10
C127	104	105	167,53	150,00	110,00	401,78	401,78	1,16	0,02
C128	105	106	74,32	63,00	110,00	401,78	401,78	0,27	0,02
C129	96	107	32,86	150,00	90,00	401,78	401,78	0,04	0,00
C130	105	107	524,53	150,00	110,00	401,78	401,78	0,63	0,01
C131	107	108	1164,91	63,00	110,00	401,78	401,77	0,16	0,01
C132	96	109	448,68	150,00	110,00	401,78	401,78	0,55	0,01
C133	109	110	593,86	63,00	110,00	401,78	401,77	0,16	0,01
C134	45	29	243,33	100,00	110,00	402,04	402,03	0,85	0,03
C135	111	101	138,84	150,00	110,00	401,82	401,82	-1,14	0,02
C136	100	111	171,92	125,00	110,00	401,91	401,82	8,06	0,18
C137	112	113	133,36	80,00	110,00	401,73	401,69	1,63	0,09
C138	113	114	571,49	63,00	110,00	401,69	401,67	0,32	0,03
C139	113	115	510,18	80,00	110,00	401,69	401,64	0,97	0,05
C140	115	116	318,58	80,00	110,00	401,64	401,64	0,49	0,03
C141	115	117	200,33	80,00	110,00	401,64	401,64	-0,08	0,00
C142	117	118	131,73	63,00	110,00	401,64	401,64	0,35	0,03
C143	119	120	206,73	150,00	110,00	401,70	401,69	2,99	0,05
C144	120	121	191,78	63,00	110,00	401,69	401,61	1,17	0,10
C145	121	122	12,29	63,00	110,00	401,61	401,61	0,43	0,04
C146	119	122	200,62	80,00	110,00	401,70	401,61	2,25	0,12
C147	120	123	108,20	80,00	110,00	401,69	401,67	1,37	0,08
C148	123	117	378,05	80,00	110,00	401,67	401,64	0,83	0,05
C149	111	124	133,91	150,00	110,00	401,82	401,78	8,83	0,14
C150	124	125	160,12	110,00	110,00	401,78	401,77	2,21	0,06
C151	125	127	259,61	110,00	110,00	401,77	401,76	0,63	0,02
C152	121	128	263,48	63,00	110,00	401,61	401,60	0,20	0,02
C153	123	129	321,72	80,00	110,00	401,67	401,67	0,40	0,02
C154	129	130	602,70	63,00	110,00	401,67	401,66	0,11	0,01
C155	129	131	54,20	80,00	110,00	401,67	401,66	0,16	0,01
C156	122	133	114,17	80,00	110,00	401,61	401,56	2,09	0,12
C157	133	132	234,55	50,00	110,00	401,56	401,53	0,34	0,05
C158	135	136	6,99	200,00	110,00	401,41	401,41	1,44	0,01
C159	135	134	13,21	200,00	110,00	401,41	401,41	-0,78	0,01
C160	136	137	148,73	60,00	110,00	401,41	401,41	0,19	0,02
C161	133	134	1216,06	80,00	110,00	401,56	401,41	1,12	0,06
C162	136	138	1692,08	110,00	90,00	401,41	401,41	0,25	0,01

C163	139	135	976,90	80,00	110,00	401,57	401,41	1,28	0,07
C164	140	139	131,86	75,00	110,00	401,57	401,57	0,31	0,02
C165	141	139	347,08	100,00	110,00	401,59	401,57	1,64	0,06
C166	142	141	283,69	100,00	110,00	401,59	401,59	-0,95	0,03
C167	142	140	212,99	75,00	110,00	401,59	401,57	0,78	0,05
C168	140	143	257,02	63,00	110,00	401,57	401,56	0,30	0,03
C169	98	144	183,40	80,00	110,00	401,82	401,71	2,55	0,14
C170	144	145	35,02	80,00	110,00	401,71	401,71	0,81	0,04
C171	144	146	148,35	80,00	110,00	401,71	401,73	-1,17	0,06
C172	146	103	340,89	125,00	110,00	401,73	401,78	-4,00	0,09
C173	145	147	651,07	63,00	110,00	401,71	401,67	0,39	0,03
C174	6	18	137,15	100,00	110,00	403,25	403,25	0,25	0,01
C175	16	148	72,27	100,00	110,00	403,23	403,23	0,75	0,03
C176	148	17	79,98	100,00	110,00	403,23	403,23	0,40	0,01
C177	148	149	25,89	110,00	110,00	403,23	403,23	0,08	0,00
C178	8	150	132,49	60,00	110,00	403,24	403,23	0,43	0,04
C179	152	101	196,30	100,00	110,00	401,74	401,82	-3,62	0,13
C180	152	151	145,64	110,00	110,00	401,74	401,74	-0,16	0,00
C181	151	126	103,40	63,00	110,00	401,74	401,74	0,32	0,03
C182	151	125	96,77	63,00	110,00	401,74	401,77	-0,81	0,07
C183	153	124	426,07	150,00	110,00	401,73	401,78	-5,92	0,09
C184	84	154	979,64	63,00	110,00	402,20	402,16	0,33	0,03
C185	94	155	112,21	63,00	120,00	401,83	401,82	0,50	0,04
C186	136	156	634,27	63,00	110,00	401,41	401,41	0,09	0,01
C187	41	158	50,35	60,00	110,00	402,07	402,06	0,23	0,02
C188	46	157	44,40	60,00	110,00	402,06	402,06	0,31	0,03
C189	112	153	450,78	150,00	120,00	401,73	401,73	-0,15	0,00
C190	152	141	450,90	100,00	110,00	401,74	401,59	3,42	0,12
C191	166	159	1,00	400,00	120,00	403,57	403,63	0,00	0,00
C192	160	165	1,00	400,00	120,00	342,50	342,50	0,00	0,00
C193	70	161	204,00	200,00	110,00	402,39	402,48	-24,09	0,21
C194	161	15	227,75	200,00	110,00	402,48	402,58	-24,09	0,21
C195	119	162	86,00	150,00	110,00	401,70	401,71	-5,64	0,09
C196	162	153	154,25	150,00	110,00	401,71	401,73	-5,64	0,09
C197	112	163	302,52	80,00	110,00	401,73	401,84	-2,06	0,11
C198	163	33	409,18	80,00	110,00	401,84	402,00	-2,06	0,11
C199	42	164	95,03	100,00	110,00	402,06	402,14	-5,64	0,20
C200	164	47	50,64	100,00	110,00	402,14	402,18	-5,64	0,20

Annexe 3 : Etat de desserte des nœuds
Application au cas de rupture de la
conduite C95

Annexe 4 : Hiérarchisation des conduites

Seuil haute criticité = 40%

Seuil criticité moyenne = 20%

Classement selon ICH %					Classement selon IDN %					Classement selon IDN _{Pondéré} %				
ID	ICH	IDN	IDN _{Pds}	Criticité	ID	ICH	IDN	IDN _{Pds}	Criticité	ID	ICH	IDN	IDN _{Pds}	Criticité
C1	100,0000	99,3902	99,9348	Haute	C1	100,0000	99,3902	99,9348	Haute	C1	100,0000	99,3902	99,9348	Haute
C2	99,3077	98,7805	99,8696	Haute	C2	99,3077	98,7805	99,8696	Haute	C2	99,3077	98,7805	99,8696	Haute
C93	7,2186	5,4878	5,4759	Basse	C93	7,2186	5,4878	5,4759	Basse	C93	7,2186	5,4878	5,4759	Basse
C97	6,2036	4,2683	4,1069	Basse	C97	6,2036	4,2683	4,1069	Basse	C97	6,2036	4,2683	4,1069	Basse
C95	5,1362	3,0488	3,3898	Basse	C95	5,1362	3,0488	3,3898	Basse	C158	1,8663	3,0488	3,9765	Basse
C101	3,6624	1,8293	2,0209	Basse	C114	2,8984	3,0488	3,3898	Basse	C95	5,1362	3,0488	3,3898	Basse
C114	2,8984	3,0488	3,3898	Basse	C158	1,8663	3,0488	3,9765	Basse	C114	2,8984	3,0488	3,3898	Basse
C170	1,9495	1,8293	0,7823	Basse	C153	1,2785	2,4390	1,4342	Basse	C113	1,8006	1,8293	3,2595	Basse
C158	1,8663	3,0488	3,9765	Basse	C101	3,6624	1,8293	2,0209	Basse	C132	1,6518	1,8293	2,6076	Basse
C113	1,8006	1,8293	3,2595	Basse	C113	1,8006	1,8293	3,2595	Basse	C101	3,6624	1,8293	2,0209	Basse
C132	1,6518	1,8293	2,6076	Basse	C132	1,6518	1,8293	2,6076	Basse	C34	1,2494	1,2195	1,9557	Basse
C151	1,3810	1,2195	1,3038	Basse	C170	1,9495	1,8293	0,7823	Basse	C74	1,1974	1,2195	1,9557	Basse
C98	1,3579	1,2195	0,7171	Basse	C33	1,2494	1,2195	1,3038	Basse	C92	1,3002	1,2195	1,9557	Basse
C8	1,3373	1,2195	1,3038	Basse	C34	1,2494	1,2195	1,9557	Basse	C94	1,1967	1,2195	1,9557	Basse
C140	1,3253	1,2195	1,3038	Basse	C73	1,2189	1,2195	0,7171	Basse	C108	1,2847	1,2195	1,9557	Basse
C178	1,3011	1,2195	0,7171	Basse	C74	1,1974	1,2195	1,9557	Basse	C128	1,1370	1,2195	1,9557	Basse
C90	1,3002	1,2195	1,3038	Basse	C75	1,1974	1,2195	1,3038	Basse	C131	1,0937	1,2195	1,9557	Basse
C92	1,3002	1,2195	1,9557	Basse	C83	1,2265	1,2195	1,3038	Basse	C133	1,0941	1,2195	1,9557	Basse
C108	1,2847	1,2195	1,9557	Basse	C90	1,3002	1,2195	1,3038	Basse	C142	1,2667	1,2195	1,9557	Basse
C173	1,2831	1,2195	0,7171	Basse	C92	1,3002	1,2195	1,9557	Basse	C162	0,8940	1,2195	1,9557	Basse
C153	1,2785	2,4390	1,4342	Basse	C94	1,1967	1,2195	1,9557	Basse	C177	0,7821	1,2195	1,9557	Basse
C142	1,2667	1,2195	1,9557	Basse	C96	1,2194	1,2195	0,7171	Basse	C184	1,2614	1,2195	1,9557	Basse
C104	1,2614	1,2195	0,7171	Basse	C98	1,3579	1,2195	0,7171	Basse	C185	1,2341	1,2195	1,9557	Basse
C184	1,2614	1,2195	1,9557	Basse	C104	1,2614	1,2195	0,7171	Basse	C153	1,2785	2,4390	1,4342	Basse
C181	1,2571	1,2195	0,7171	Basse	C108	1,2847	1,2195	1,9557	Basse	C33	1,2494	1,2195	1,3038	Basse
C138	1,2538	1,2195	1,3038	Basse	C110	0,7882	1,2195	1,3038	Basse	C75	1,1974	1,2195	1,3038	Basse
C188	1,2520	1,2195	1,3038	Basse	C112	1,1049	1,2195	0,7171	Basse	C83	1,2265	1,2195	1,3038	Basse
C33	1,2494	1,2195	1,3038	Basse	C128	1,1370	1,2195	1,9557	Basse	C90	1,3002	1,2195	1,3038	Basse
C34	1,2494	1,2195	1,9557	Basse	C131	1,0937	1,2195	1,9557	Basse	C110	0,7882	1,2195	1,3038	Basse
C185	1,2341	1,2195	1,9557	Basse	C133	1,0941	1,2195	1,9557	Basse	C8	1,3373	1,2195	1,3038	Basse
C83	1,2265	1,2195	1,3038	Basse	C138	1,2538	1,2195	1,3038	Basse	C138	1,2538	1,2195	1,3038	Basse
C96	1,2194	1,2195	0,7171	Basse	C140	1,3253	1,2195	1,3038	Basse	C140	1,3253	1,2195	1,3038	Basse
C73	1,2189	1,2195	0,7171	Basse	C142	1,2667	1,2195	1,9557	Basse	C151	1,3810	1,2195	1,3038	Basse
C187	1,2171	1,2195	0,7171	Basse	C151	1,3810	1,2195	1,3038	Basse	C152	0,8736	1,2195	1,3038	Basse
C74	1,1974	1,2195	1,9557	Basse	C152	0,8736	1,2195	1,3038	Basse	C155	0,8552	1,2195	1,3038	Basse
C75	1,1974	1,2195	1,3038	Basse	C8	1,3373	1,2195	1,3038	Basse	C168	0,9135	1,2195	1,3038	Basse
C94	1,1967	1,2195	1,9557	Basse	C154	0,8347	1,2195	0,7171	Basse	C186	0,8280	1,2195	1,3038	Basse
C128	1,1370	1,2195	1,9557	Basse	C155	0,8552	1,2195	1,3038	Basse	C188	1,2520	1,2195	1,3038	Basse

C112	1,1049	1,2195	0,7171	Basse	C157	0,9296	1,2195	0,7171	Basse	C170	1,9495	1,8293	0,7823	Basse
C133	1,0941	1,2195	1,9557	Basse	C160	0,8686	1,2195	0,7171	Basse	C73	1,2189	1,2195	0,7171	Basse
C131	1,0937	1,2195	1,9557	Basse	C162	0,8940	1,2195	1,9557	Basse	C96	1,2194	1,2195	0,7171	Basse
C157	0,9296	1,2195	0,7171	Basse	C168	0,9135	1,2195	1,3038	Basse	C98	1,3579	1,2195	0,7171	Basse
C168	0,9135	1,2195	1,3038	Basse	C173	1,2831	1,2195	0,7171	Basse	C104	1,2614	1,2195	0,7171	Basse
C162	0,8940	1,2195	1,9557	Basse	C177	0,7821	1,2195	1,9557	Basse	C112	1,1049	1,2195	0,7171	Basse
C4	0,8903	0,6098	0,6519	Basse	C178	1,3011	1,2195	0,7171	Basse	C154	0,8347	1,2195	0,7171	Basse
C152	0,8736	1,2195	1,3038	Basse	C181	1,2571	1,2195	0,7171	Basse	C157	0,9296	1,2195	0,7171	Basse
C160	0,8686	1,2195	0,7171	Basse	C184	1,2614	1,2195	1,9557	Basse	C160	0,8686	1,2195	0,7171	Basse
C155	0,8552	1,2195	1,3038	Basse	C185	1,2341	1,2195	1,9557	Basse	C173	1,2831	1,2195	0,7171	Basse
C9	0,8357	0,6098	0,6519	Basse	C186	0,8280	1,2195	1,3038	Basse	C178	1,3011	1,2195	0,7171	Basse
C154	0,8347	1,2195	0,7171	Basse	C187	1,2171	1,2195	0,7171	Basse	C181	1,2571	1,2195	0,7171	Basse
C186	0,8280	1,2195	1,3038	Basse	C188	1,2520	1,2195	1,3038	Basse	C187	1,2171	1,2195	0,7171	Basse
C110	0,7882	1,2195	1,3038	Basse	C52	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C52	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C53	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C53	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C53	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C54	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C54	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C54	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C55	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C55	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C55	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C56	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C56	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C56	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C57	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C57	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C57	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C58	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C58	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C58	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C59	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C59	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C59	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C60	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C60	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C60	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C61	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C61	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C61	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C62	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C62	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C62	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C63	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C63	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C63	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C64	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C64	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C64	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C65	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C65	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C65	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C66	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C66	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C66	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C67	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C67	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C67	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C68	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C68	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C68	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C69	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C69	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C69	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C70	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C70	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C70	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C71	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C71	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C71	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C72	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C72	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C72	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C28	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C15	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C40	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C35	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C16	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C12	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C36	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C17	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C26	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C76	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C76	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C76	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C77	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C77	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C77	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C78	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C78	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C78	0,7821	0,6098	0,6519	Basse
C79	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C79	0,7821	0,6098	0,6519	Basse	C79	0,7821	0,6098	0,6519	Basse

