

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÈRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
Département d'Hydraulique

*Filière : Hydraulique*

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Présenté pour Obtenir le Diplôme de Master

*Spécialité : Ouvrages Hydrauliques*

Thème

*Approche probabiliste appliqué a l'étude d'un réseau d'AEP  
maillé*

Réalisé par :

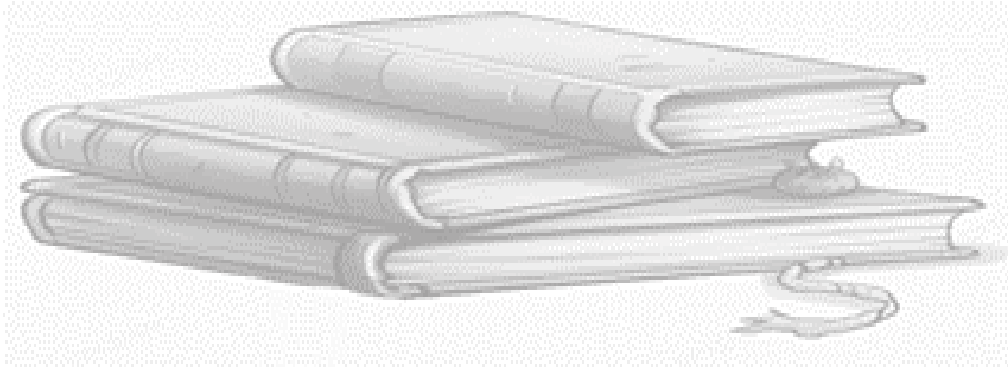
*Mlle. BOUTALEB manel*

*Mlle .HADDAK oumayma*

Soutenu devant le jury composé de :

| <i>NOM et Prénom</i>       | <i>Grade</i> | <i>Lieu d'exercice</i> | <i>Qualité</i>    |
|----------------------------|--------------|------------------------|-------------------|
| <i>M. IGROUFA MERJEM</i>   | <i>MCA</i>   | <i>UMMTO</i>           | <i>Présidente</i> |
| <i>M. DEHMOUS HOCINE</i>   | <i>MCA</i>   | <i>UMMTO</i>           | <i>Promoteur</i>  |
| <i>M. YAHI TAQI EDDINE</i> | <i>MCA</i>   | <i>UMMTO</i>           | <i>Examineur</i>  |

Date de soutenance : le 24/06/2025



# *Remerciement*

*Nos remerciements vont premièrement à dieu pour la santé et la Patience qu'il nous a accordées tout au long de ce parcours académique.*

*Un sincère merci à notre encadreur, **Mr. Dehmous**, pour son soutien, ses conseils précieux et sa disponibilité qui ont guidé notre travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude envers nos familles pour leur amour inconditionnel, leur encouragement constant et leur patience durant nos études.*

*Nous exprimons notre sincère gratitude envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet et qui ont rendu possible l'accomplissement de ce travail.*



# Dédicace

*Je dédie ce projet :*

*À ma mère et mon père, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant tout au long de ma vie et leurs prières qui m'ont portée jusqu'ici. C'est grâce à vous que je suis là aujourd'hui.*

*À mes frères **Islam** ; **Mouhamed** et leurs épouses mes sœurs **Hajer** ; **Serine** ; **Malak**, et les petites **Alae** et **Marwa** ; qui ont toujours été à mes côtés dans les moments difficiles comme dans les moments de joie.*

*À mon fiancé **Merzak**, pour son encouragement et sa présence qui me donne la force d'avancer.*

*À ma binôme **Manel**, pour sa collaboration et tous les efforts partagés durant ce parcours. À toutes ma famille ; mes cousines et mes amies, my bestie **Celina**, qui ont enrichi ma vie par leur présence et leur affection.*

*Oumayma*



# Dédicace

*Je dédie ce travail à ma mère et mon père , qui ont été mes premiers guides et mes plus grands soutiens. Merci de m'avoir toujours cru capable et de m'avoir donné la force d'aller jusqu'au bout.*

*À ma sœur **Melissa**, ma confidente. Tu as su être présente dans les moments les plus durs comme les plus heureux. Tu as toujours su alléger mes peines et porter avec moi les poids les plus lourds. Je t'en suis infiniment reconnaissante.*

*Et à mon petit neveu, **Amir**, que j'aime de tout mon cœur.*

*À mon ami **Amine**, merci pour ton aide précieuse, tes conseils avisés et ta présence à chaque étape de ce parcours.*

*Et enfin, à ma binôme **Oumayma**, avec qui j'ai partagé ces belles années universitaires et cette aventure de fin d'études. Merci pour ta collaboration, ton soutien et tous ces souvenirs que nous avons construits ensemble.*

# Manel



## SOMMAIRE

### *Chapitre I : Généralités sur le calcul des réseaux d'alimentation en eau potable*

|   |    |
|---|----|
| I.1 Introduction .....  | 3  |
| I.2 Définition et composantes d'un réseau d'AEP .....                     | 3  |
| I.2.1. Définition d'un réseau d'AEP .....                                 | 3  |
| I.2.2. Les éléments constitutifs d'un réseau d'AEP .....                  | 3  |
| I.2.2.1. Captage .....  | 3  |
| I.2.2.2. Traitement des eaux .....  | 3  |
| I.2.2.3. Adduction .....  | 4  |
| I.2.2.4. Accumulation ou réservoir .....                                  | 4  |
| I.2.2.5. Distribution .....   | 4  |
| I.2.2.6. Pompes .....   | 4  |
| I.3. Typologie des réseaux d'AEP .....                                    | 5  |
| I.3.1 réseau ramifié .....  | 5  |
| I.3.2. Réseau maillé .....  | 6  |
| I.3.3. Réseau mixte .....   | 7  |
| I.4. Principes hydrauliques fondamentaux .....                            | 7  |
| I.4.1. Équation de continuité .....                                       | 7  |
| I.4.2. Équation de conservation de l'énergie (Equation de Bernoulli)..... | 8  |
| I.4.3. Pertes de charge.....  | 9  |
| I.4.3.1. Pertes de charges linéaires .....                                | 9  |
| I.4.3.3. Pertes de charge totales .....                                   | 11 |
| I.5. Méthodes de calcul des réseaux d'AEP .....                           | 12 |
| I.5.1. Méthode de Hardy-cross .....                                       | 12 |
| I.5.2. Méthode de Newton-Raphson .....                                    | 16 |
| I.5.3. Méthode de la théorie linéaire .....                               | 16 |
| I.6. Critères de performance hydraulique .....                            | 16 |
| I.6.1. Débit .....  | 16 |
| I.6.2. Pression .....   | 17 |
| I.6.3. Vitesse d'écoulement .....   | 17 |
| I.6.4. Choix du diamètre .....  | 17 |
| I.7. Conclusion .....   | 17 |

## ***Chapitre II : Analyse fiabiliste des réseaux maillés***

|  |    |
|--|----|
| II.1 Introduction .....  | 18 |
| II.1.1 Définition de la fiabilité.....                               | 18 |
| II.2 Indicateurs de fiabilité .....                                  | 19 |
| II.3 Choix des variables aléatoires de base.....                     | 19 |
| II.4 Lois de distribution .....                                      | 21 |
| II.5 Choix de la fonction de performance pour les réseaux AEP .....  | 22 |
| II .6 Principales approches pour tenir compte des incertitudes ..... | 23 |
| II .6.1 Méthode de Monte Carlo .....                                 | 23 |
| II.7 Application de l'Analyse Fiabiliste .....                       | 25 |
| II .7.1 Identification des paramètres incertains .....               | 25 |
| II .7.3 Intégration de la méthode de Monte Carlo sous MATLAB .....   | 26 |
| II.8 Conclusion .....  | 27 |

## ***Chapitre III : Analyse probabiliste d'un réseau maillé***

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction .....   | 28 |
| III.2 Cas d'étude .....  | 28 |
| III.2.1 Description générale .....   | 29 |
| III.2.2 Exigences hydrauliques de fonctionnement .....                           | 30 |
| III.3 Calcul déterministe du réseau maillé par la méthode d'HARDY-CROSS .....    | 31 |
| III.3.1 Analyses hydrauliques du réseau .....                                    | 31 |
| III.4 Données d'entrée pour l'analyse probabiliste .....                         | 36 |
| III.4.1 Choix des variables aléatoires .....                                     | 36 |
| III.4.2 Modélisation de la variabilité des paramètre d'entrée et de sortie ..... | 36 |
| III.4.3 Fonction d'état limite G .....   | 38 |
| III.4.4 Calcul de la probabilité de défaillance .....                            | 38 |
| III.5 Résultats et discussions .....   | 41 |
| III.6 Probabilité de défaillance en intégrant les variables spatiales .....      | 46 |
| III.7 Conclusion .....   | 51 |
| Conclusion générale .....  | 53 |

Annexe

Références bibliographique



## Listes des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I.01 : Un schéma général du cycle de l'approvisionnement en eau potable .....   | 5  |
| Figure I.02 : Réseau de distribution ramifié . .....   | 6  |
| Figure I.03 : Réseau maillé. ....  | 7  |
| Figure I.04: théorème de Bernoulli .....   | 8  |
| Figure II. 1 : domaines de sûreté et de défaillance dans le cas de deux variables aléatoires<br>22                               |    |
| Figure II .2 : Schéma d'illustration de la méthode de Monte-Carlo dans l'espace<br>phtisque (X1, X2).....                        | 24 |
| Figure III .1 : Schéma du réseau maillé  | 29 |
| III.2.1 Description générale :.....  | 29 |
| Figure III.2 : Organigramme de calcul déterministe du réseau d'AEP .....   | 33 |
| Figure III.3 : valeur des vitesse et pression calculée (à court terme CHW =150) .....  | 35 |
| Figure III.4 : valeur des vitesse et pression calculée (à long terme CHW =95) .....  | 35 |
| Figure III.5: Histogramme illustrant la variabilité du coefficient de Hazem Williams .....                                       | 37 |
| Figure III.6 : Histogramme illustrant la variabilité de la pression minimale dans le réseau ...                                  | 38 |
| Figure III.7 :Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance du réseau d'AEP .....                                      | 40 |
| Figure III. 8 : Courbe de probabilités Pfvmax en fonction de Coefficient de variation (Cv)<br>(CHW a long et court terme) .....  | 42 |
| Figure III .9 : Courbe de probabilités Pfvmin en fonction de Coefficient de variation (Cv)<br>(CHW a long et court terme) .....  | 43 |
| Figure III .10 : Courbe de probabilités Pfpmax en fonction de Coefficient de variation (Cv)<br>(CHW a long et court terme) ..... | 44 |
| Figure III .11 : Courbe de probabilités Pfvmin en fonction de Coefficient de variation (Cv)<br>(CHW a long et court terme) ..... | 46 |

## Listes des tableau

|  |    |
|--|----|
| Tableau II .1 : Principales lois de distribution .....   | 21 |
| Tableau III.1: données d'entrée du réseau du réseau. [1], [2] .....  | 29 |
| Tableau III.2 : Caractéristiques géométrique et physiques du réseau .....                                      | 30 |
| Tableau III.3: Altitudes (côtes du terrain) .....  | 30 |
| Tableau III. 4 : Débits imposés (en L/s).....  | 31 |
| Tableau III.5 : Résultats du calcul des vitesses dans le réseau. ....  | 34 |
| Tableau III.6 : Résultats du calcul des pressions dans le réseau. (à court et à long terme) ....               | 34 |
| Tableau III.7. Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres. ....                                | 36 |
| Tableau III.8 : la probabilité de défaillance sous critère de la vitesse maximale .....                        | 41 |
| Tableau III.9: la probabilité de défaillance sous critère de la vitesse minimale .....                         | 42 |
| Tableau III.10 : la probabilité de défaillance sous critère de la pression maximale .....                      | 44 |
| Tableau III.11 : la probabilité de défaillance sous critère de la pression minimale.....                       | 45 |
| Tableau III.12 probabilité de défaillances sous critère de la pression maximale avec variables spatiales ..... | 47 |
| Tableau III.13 probabilité de défaillances sous critère de la pression minimale avec variables spatiales ..... | 48 |
| Tableau III.14 probabilité de défaillances sous critère de la vitesse maximale avec variables spatiales .....  | 49 |
| Tableau III.15 probabilité de défaillances sous critère de la vitesse minimale avec variables spatiales .....  | 50 |

## Liste des notations et indices

$\Delta HL$  : Les pertes de charge linéaires

$\Delta HS$  : Pertes de charge singulières

**AEP** : Alimentation en eau potable

**CHW** : Coefficient de Hazen-Williams

**CP** : Cote piézométrique

**CTN**: cote de terrain naturel

**Ham** : Cote piézométrique amont

**H av** : Cote piézométrique aval

**Pam**: pression amont

**Pav** : pression Aval

**Kp** :Coefficient de pointe

**Qp** : Débit de pointe

**Qc** : Débit de calcul

## **Introduction Générale**

L'alimentation en eau potable constitue l'un des enjeux majeurs du développement durable et de la gestion des ressources en eau. Garantir un accès continu, sécurisé et fiable à une eau de qualité est une priorité pour les collectivités et les gestionnaires de services publics, en particulier face à l'urbanisation croissante, à l'évolution des besoins des populations et aux défis liés au changement climatique.

Les réseaux d'alimentation en eau potable (AEP) sont des systèmes complexes composés de nombreuses composantes hydrauliques (conduites, réservoirs, pompes, vannes, etc.) interconnectées et soumises à des sollicitations variables dans le temps et l'espace. Le bon dimensionnement et le fonctionnement optimal de ces réseaux reposent non seulement sur l'application rigoureuse des principes de l'hydraulique, mais aussi sur l'intégration de l'incertitude et du risque dans les processus de conception et d'exploitation.

La fiabilité d'un réseau d'AEP, définie comme sa capacité à assurer un service sans interruption malgré les aléas (pannes, surcharges, erreurs de conception, vieillissement des équipements), est aujourd'hui un critère d'évaluation essentiel. Face à cette problématique, l'analyse fiabiliste s'impose comme un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer et de quantifier les risques de défaillance, en prenant en compte les incertitudes inhérentes aux paramètres du système.

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans cette perspective. Il vise dans un premier temps à rappeler les bases théoriques du calcul hydraulique des réseaux d'AEP, puis à introduire les fondements de l'analyse fiabiliste appliquée à ces réseaux, avant de proposer une application concrète à travers un cas d'étude simulé sous MATLAB.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- Le **premier chapitre** est consacré aux généralités sur le calcul hydraulique des réseaux d'AEP, incluant les types de réseaux, les principes fondamentaux, les pertes de charge, les méthodes de calcul et les critères de performance.
- Le **deuxième chapitre** introduit les concepts de fiabilité des systèmes appliqués aux réseaux d'eau, présente la méthode de Monte Carlo comme outil d'analyse probabiliste, et détaille la modélisation des incertitudes.

- Le **troisième chapitre** expose une étude de cas appliquée à un réseau maillé. Après un calcul déterministe basé sur la méthode de Hardy-Cross, une analyse fiabiliste est réalisée sous MATLAB, avec interprétation et comparaison des résultats.

Ce travail a pour ambition de contribuer à une meilleure compréhension des limites des approches déterministes classiques et de mettre en lumière l'intérêt d'intégrer l'analyse de fiabilité dans la gestion des réseaux hydrauliques.

*Chapitre I :*  
*Généralités sur le calcul des réseaux*  
*d'alimentation en eau potable*

## **I.1 Introduction :**

Le présent chapitre est consacré à la présentation du réseau d'AEP, à la description de ses différents éléments constitutifs, ainsi qu'à sa typologie. Un petit rappel sera également fait sur les principales équations des écoulements en charge, notamment l'équation de Bernoulli, l'équation de continuité et les pertes de charge. Enfin, les critères de performance hydraulique seront abordés.

## **I.2 Définition et composantes d'un réseau d'AEP :**

### **I.2.1. Définition d'un réseau d'AEP :**

L'alimentation d'eau potable (AEP) est un système de distribution à travers un réseau de canalisations enterrées. Ce réseau comprend un ensemble de conduites et d'équipements permettant la circulation et la distribution de l'eau potable jusqu'aux consommateurs. Il peut desservir un ou plusieurs points de distribution, que ce soit pour des branchements individuels ou des collectivités.

### **I.2.2. Les éléments constitutifs d'un réseau d'AEP :**

#### **I.2.2.1. Captage :**

Le captage est la procédure qui consiste à prélever l'eau afin de l'utiliser pour l'alimentation en eau potable. Cette eau peut être captée soit dans des nappes souterraines (eaux souterraines), soit à partir de sources où l'eau sort naturellement du sous-sol, ou encore à partir des eaux de surface, comme les rivières, les lacs ou les barrages. Et parfois même captage d'eau de pluie, notamment dans certaines zones rurales.

#### **I.2.2.2. Traitement des eaux :**

Le traitement des eaux est une étape essentielle après le captage, surtout pour les eaux de surface (comme celles des lacs ou des rivières).

Ces eaux sont souvent exposées à la pollution et ne possèdent pas les qualités physiques,

chimiques et biologiques nécessaires pour être consommées directement.

C'est pourquoi elles doivent être traitées dans des stations de traitement, où elles subissent plusieurs étapes de purification pour devenir potables et sans danger pour la santé.

### **I.2.2.3. Adduction :**

L'adduction est l'opération qui consiste à transférer l'eau depuis la zone de captage jusqu'à la zone de traitement ou vers la zone de distribution, cette étape peut se faire avant ou après le traitement.

Le transport de l'eau peut se faire soit en écoulement à surface libre (comme dans des canaux ou conduites partiellement remplies), soit en écoulement en charge (dans des conduites totalement remplies, sous pression).

### **I.2.2.4. Accumulation ou réservoir :**

Il est toujours nécessaire de mettre en réserve une partie de l'eau, soit pour régulariser le débit dans les ouvrages situés en amont, soit pour assurer une sécurité en cas de panne, d'incendie ou d'autres situations exceptionnelles.

Cette eau est stockée dans des réservoirs spécifiques, conçus non pas pour la consommation directe, mais pour assurer le bon fonctionnement du réseau et garantir un approvisionnement continu en toute circonstance.

### **I.2.2.5. Distribution :**

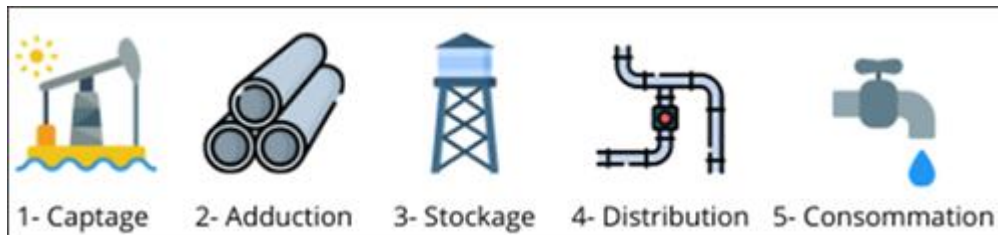
La distribution permet de fournir, en continu, aux consommateurs l'eau qu'ils nécessitent, à une pression adaptée et en débit suffisant.

Cette étape s'effectue en passant par un réseau de conduites sous pression, conçu et dimensionné de manière à assurer, en chaque point du réseau, le débit maximal prévisible, même en période de forte demande.

### **I.2.2.6. Pompes :**

Dans le parcours d'adduction et de distribution, il est souvent nécessaire d'augmenter le niveau ou la pression de l'eau, notamment pour accéder aux zones en hauteur ou faire circuler l'eau sur de longues distances.

Dans ce but, on utilise des pompes, qui fonctionnent généralement à l'aide d'un moteur électrique. En cas d'absence d'électricité ou de secours, ces pompes peuvent aussi être alimentées par un moteur diesel.[1]



**Figure I.01 : Un schéma général du cycle de l'approvisionnement en eau potable [1]**

### I.3. Typologie des réseaux d'AEP :

Il existe plusieurs types de réseaux, dont les 3 grands types de réseaux de distribution d'eau sont :

- Réseau en ramification (ou en arbre).
- Réseau en boucle (ou maillé)
- Réseau mixte

#### I.3.1 réseau ramifié:

Il est appelé ainsi en raison de sa structure en forme d'arbre, dans ce type de réseau en partant d'une conduite centrale on relie plusieurs canalisations, ces derniers ne se rejoignent jamais entre eux pour former une boucle, c'est à dire l'eau part d'un seul point (château d'eau ou une station de pompage) et circule dans un seul sens.

➤ Avantages:

- Économique (moins coûteux) et facile à construire.
- Bien adapté aux zones rurales ou avec peu de maisons.

- Calcul facile et précis.

➤ Inconvénients:

- Manque de sécurité : si la conduite principale ou autres rencontrent un problème de panne ou se cassent toute la partie en aval risquent de se retrouver sans eau.
- Pas d'autre chemin possible : comme les conduites ne se rejoignent jamais par conséquent il n'y a pas d'autre chemin pour que l'eau arrive aux utilisateurs
- Pas de souplesse : le réseau ne rend pas possible la redirection d'eau rapidement, ce qui peut causer une interruption prolongée si une conduite tombe en panne.

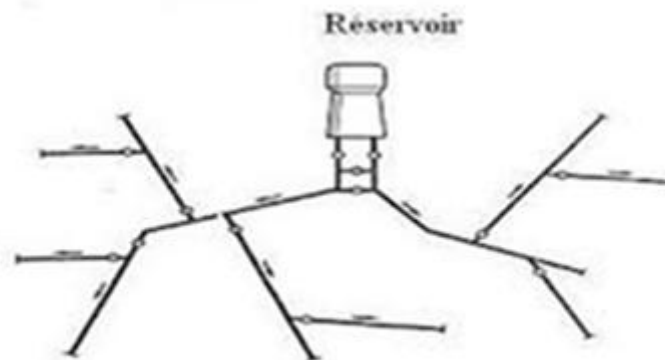


Figure I.02 : Réseau de distribution ramifié . [12]

### I.3.2. Réseau maillé :

Un réseau maillé est composé de conduites qui se rejoignent et forment ainsi des boucles (mailles), En d'autres termes les conduites forment un circuit fermé contrairement au réseau ramifié qui a un seul sens de circulation sans boucle.

➤ Avantages :

- **Alimentation en retour** : dans ce type de réseau, si une conduite tombe en panne il est possible de rediriger l'eau facilement en raison de la circulation de l'eau dans des boucles

fermées. Si un tronçon de ce réseau est endommagé l'eau est transférée par un autre chemin ce qui permet d'empêcher une interruption complète.

- **Sécurité accrue** : En cas de rupture ou de problème sur une conduite, il suffit de manoeuvrer des robinets (ou vannes) pour isoler la section défectueuse et continuer à alimenter les utilisateurs grâce aux autres parties du réseau.

➤ Inconvénients :

- **Coûteux** : construire un réseau maillé coûte plus cher qu'un réseau ramifié, car il faut plus de tuyaux et plus de vannes/robinets pour permettre cette flexibilité.

**Remarque** : bien que ce type de réseau soit coûteux, ses avantages le rendent incontournable et c'est pour cela il est préféré.

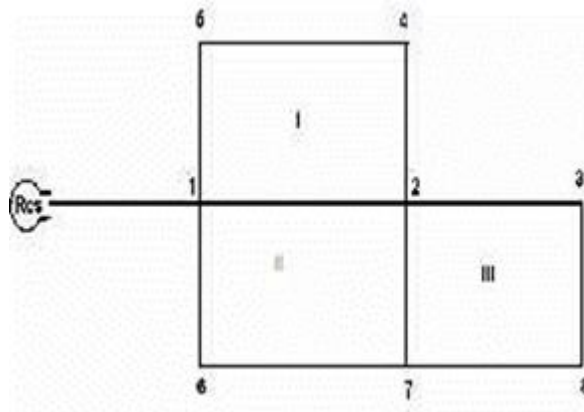


Figure I.03 : Réseau maillé. [12]

### I.3.3. Réseau mixte :

Le réseau mixte est une combinaison des deux types de réseaux pour tirer profit des avantages de chacun : sécurité dans les zones urbaines et économie dans les zones moins densément peuplées. C'est une solution idéale pour une ville qui veut gérer son réseau d'eau de manière optimale et rentable.

## I.4. Principes hydrauliques fondamentaux :

L'hydraulique étudie le comportement de l'eau qu'il soit en repos ou en circulation, ces études reposent sur ces lois :

### I.4.1. Équation de continuité :

Forme générale :

$$\sum Q_{\text{entrée}} = \sum Q_{\text{sortie}} \quad (\text{I.1})$$

Cela signifie que la somme des débits entrants égale à la somme des débits sortants

Cas simple dans une conduite :

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (\text{I.2})$$

On applique ce principe entre deux sections d'une conduite.

### I.4.2. Équation de conservation de l'énergie (Equation de Bernoulli):

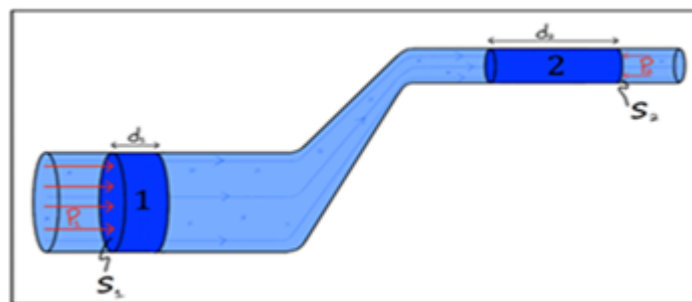


Figure I.04: théorème de Bernoulli

- On peut comprendre avec cette équation que dans une ligne de courant la somme des énergies reste constante s'il n'a pas de frottements ni de machines (pompes, turbines) Soulignons que dans un système en charge, l'équation de Bernoulli s'applique entre deux sections A et B comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessus.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z^1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z^2 \quad (\text{I.3})$$

Avec:

- P = pression (Pa)
- $\gamma$  = poids volumique du fluide (N/m<sup>3</sup>)
- V = vitesse (m/s)
- g = gravité (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- z = hauteur (m)

#### I.4.3. Pertes de charge:

La perte de charge correspond à une chute de pression causée par les frottements entre les particules du fluide et contre les parois. Il en existe deux types : les pertes linéaires, aussi appelées régulières, et les pertes singulières.

##### I.4.3.1. Pertes de charges linéaires :

Quand un fluide circule dans une conduite il perd progressivement de la pression, cette perte est causée par les frottements contre les parois, donc plus l'eau s'écoule, plus il frotte, plus la pression diminue. Cette baisse dépend de la longueur du tuyau, son diamètre, la rugosité des parois (si elles sont lisses ou rugueuses), et aussi la vitesse à laquelle le fluide se déplace.

Pour calculer ces pertes, plusieurs formules sont couramment utilisées, notamment Darcy-Weisbach, Hazen-Williams et Manning-Strickler.

##### a-Équation de Darcy-Weisbach :

$$\delta H = \lambda \frac{L}{D_h} * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$\delta H$ : pertes de charge linéaires dans une conduite.

L : longueur du tronçon examiné (m).

$D_h$  : le rayon hydraulique (m).

$V$  : vitesse moyenne (m/s).

$\lambda$ : coefficient de pertes par frottement en longueur.

### Déterminer le coefficient de frottements :

Le coefficient de frottements varie selon le régime de l'écoulement, qui lui dépend de la rugosité relative et du nombre de Reynolds.

### Régime turbulent :

Dans ce cas  $\lambda$  sera estimé avec la formule de NIKURADZE :

$$\frac{1}{\lambda} = \left[ 1.14 - 0.86 \log \frac{\varepsilon}{D} \right] \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$\varepsilon$ : coefficient de rugosité absolue des tuyaux.

$\frac{\varepsilon}{D}$  : Rugosité relative de frottement.

Régime de transition :

Dans ce régime,  $\lambda$  sera estimé avec la formule de COLEBROOK-WHITE :

$$\lambda = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right] \quad (\text{I.6})$$

### Nombre de Reynolds

C'est une valeur sans unité qui nous permet de préciser le régime de l'écoulement. Pour la déterminer on utilise la formule suivante :

$$Re = \frac{V*D}{\nu} \text{ ou } \frac{\rho*V*D}{\mu} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$V$  : vitesse d'écoulement [m/s].

$D$  : diamètre de la conduite [m].

$\nu$ : viscosité cinématique de l'eau prise égale à  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s à 200 C.

$\mu$ : viscosité dynamique [Kg/ms.].

$\rho$ : masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>].

Puis selon le nombre de Reynolds, on distingue les types d'écoulement :

- Si  $Re < 2000$  → Écoulement laminaire
- Si  $2000 < Re < 4000$  → Écoulement transitionnel
- Si  $Re > 4000$  → Écoulement turbulent

### Régime laminaire :

Le coefficient de frottement en régime laminaire est donné par une formule directe[2] :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{I.8})$$

### b-Formule de Hazen-Williams :

Cette formule est moins précise mais c'est la plus utilisée parmi les formules empiriques car elle est plus facile à appliquer à condition de connaître le Chw variable.

Elle est donnée par :

$$J = \frac{\beta * L}{C_{hw}^{1.852}} * \frac{Q^{1.852}}{D^{4.871}} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

**Q** : Débit en (l/s),

**CHW** : Coefficient de Hazen-Williams dépendant de la rugosité,

**D** : Diamètre des conduites,

**L** : Longueur des conduites.

### I.4.3.2. Pertes singulières :

Les pertes de charge singulières sont générées lorsque l'eau traverse un obstacle ou équipements du réseau comme les vannes, les coudes ou encore des sorties de réservoir. Cela entraîne la perturbation de l'écoulement ainsi cause la perte de pression.

Généralement, on estime qu'elles représentent environ 10% des pertes de charge linéaires.[2]

La formule est donnée par :

$$J_s = k \frac{V_m^2}{2g} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

**k** : coefficient de singularité,

**V<sub>m</sub>** : vitesse moyenne de l'écoulement [m/s],

**g** : accélération de la pesanteur (g=9.81 [m/s<sup>2</sup>]).

#### I.4.3.3. Pertes de charge totales :

Les pertes de charges totales sont la somme des pertes de charges linéaires et singulières. [3]

$$J_t = J_L + J_S = J_L + 10\%J_L$$

$$J_t = 1,1J_L \quad (\text{I.11})$$

### I.5. Méthodes de calcul des réseaux d'AEP :

Pour dimensionner un réseau d'eau potable on compte sur plusieurs méthodes selon la précision recherchée, la complexité du réseau et les moyens disponibles. Parmi les plus utilisés sont:

- Méthode de Hardy-Cross.
- Méthode de Newton-Raphson.
- Méthode de la théorie linéaire.

#### I.5.1. Méthode de Hardy-cross :

La méthode de Hardy-cross est une technique itérative très utilisée pour le calcul des débits dans les réseaux maillés d'eau potable. Elle se base sur deux loi :

##### 1. La conservation de la masse (loi des nœuds) :

Pour chaque nœud la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortant :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (\text{I.12})$$

## 2. Lois de conservation de l'énergie (loi des mailles) :

Sur un parcours fermé et orienté la somme des pertes de charge est nulle.

$$J_1 - J_2 = 0 \quad (\text{I.13})$$

Dans un réseau maillé les débits dans les différentes conduites ne sont pas toujours connus au début. En utilisant la méthode d'Hardy-cross nous allons pouvoir déterminer les débits dans chaque tronçon du réseau en s'assurant que la somme des pertes de charges dans une maille est nulle ce qui signifie un équilibre énergétique. La perte de charge dépend du débit Q qui circule dans la conduite, selon une formule qui les relie :

$$\sum \Delta H_{ij} = \sum R_{ij} * Q_{ij}^{1,852} \quad (\text{I.14})$$

Alors l'équilibre de perte de charge se traduit par :

$$\sum \Delta H_{ij} = \sum R_{ij} * Q_{ij}^{1,852} = 0 \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$$R_{ij} = \frac{1,812 * 10^{10}}{Chw_{ij}^{1,852}} * \frac{L_{ij}}{D_{ij}^{4,871}} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

**L** : Longueur de tuyau en (m)

**D** : Diamètre du tuyau en (mm)

**Chw**: Coefficient de rugosité de HAZEN WILLIAMS

**R<sub>ij</sub>**: La résistance hydraulique.

Le débit Q' est différent du débit réel Q d'une valeur ΔQ, qui correspond à la correction nécessaire pour satisfaire l'équilibre des pertes de charge.

D'où l'équation :

$$Q'_{ij} = Q_{ij} + \Delta Q \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$Q'_{ij}$  = débit corrigé,

$Q_{ij}$  = débit estimé,

$\Delta Q$  = débit correctif.

Le débit corrigé à l'itération :

$$Q^{(k+1)}_{ij} = Q^{(k)}_{ij} + \Delta Q^{(k)} \quad (\text{I.18})$$

- En remplaçant l'équation (6) dans l'équation de conservation des pertes de l'énergie on aura :

$$\sum_j \Delta H_{ij}^{(k+1)} = \sum_j R_{ij} [Q_{ij}^{(k+1)}]^{1.852} \quad (\text{I.19})$$

- On pose  $\alpha = 1.852$
- En remplace  $\alpha$  dans l'équation (6) en aura :

$$\sum_j R_{ij} [Q_{ij}^{(k)} + \Delta Q^{(k)}]^\alpha = 0 \quad (\text{I.20})$$

- Ou bien :

$$\sum_j R_{ij} [Q_{ij}^{(k)}]^\alpha \left[ 1 + \frac{\Delta Q^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} \right]^\alpha = 0 \quad (\text{I.21})$$

- En appliquant le développement de Taylor [10], au voisinage de  $x$  nous pouvons écrire :

$$(1 + x)^\alpha = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} x^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2) \dots (\alpha-(n-1))}{n!} x^n \quad (\text{I.22})$$

- Nous obtenons, pour  $x = \frac{\Delta Q_{ij}}{Q_{ij}}$  :

$$\left(1 + \frac{\Delta Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}\right)^\alpha = 1 + \alpha \frac{\Delta Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} \left(\frac{\Delta Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}\right)^2 + \dots$$

(I.23)

Sachant que  $\Delta Q_{ij}$  est très petites, ceci nous ramènes à négliger tous les termes de x d'ordre supérieur à deux, l'équation devient :

$$\sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha \left[1 + \alpha \frac{\Delta Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}\right] = 0$$

(I.24)

$$\sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha + \sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta Q_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}} = 0$$

(I.25)

$$\sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha + \alpha \Delta Q^{(k)} \sum_j R_{ij} \frac{(Q_{ij}^{(k)})^\alpha}{Q_{ij}^{(k)}} = 0$$

(I.26)

Ce qui donne :

$$\sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha + \alpha \Delta Q^{(k)} \sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^{\alpha-1} = 0$$

(I.27)

- Ce qui nous ramène a l'expression de la perte de charge

$$\Delta Q^{(k)} = \frac{\sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^\alpha}{\alpha \cdot \sum_j R_{ij} (Q_{ij}^{(k)})^{\alpha-1}}$$

(I.28)

D'une autre manière :

$$\Delta Q^{(k)} = \frac{\sum_j \Delta H_{ij}^{(k)}}{\sum_j \frac{\Delta H_{ij}^{(k)}}{Q_{ij}^{(k)}}}$$

(I.29)

### I.5.2. Méthode de Newton-Raphson :

la méthode de Newton ou méthode de Newton-Raphson est, dans son application la plus simple, un algorithme efficace pour trouver numériquement une approximation précise d'un zéro d'une fonction réelle d'une variable réelle. Elle est notamment utilisée dans le calcul des réseaux d'eau potable, elle nous permet de satisfaire les deux conditions suivantes :

- La **conservation de la masse** à chaque nœud : la somme des débits entrants doit être égale à la somme des débits sortants.
- La **conservation de l'énergie** dans chaque boucle fermée : la somme des pertes de charge doit être équilibrée dans l'ensemble du circuit. [4]

### I.5.3. Méthode de la théorie linéaire :

La méthode de la théorie linéaire est une technique plus simple et plus utilisée dans le calcul des réseaux hydraulique notamment en distribution d'eau potable. Elle se base sur une linéarisation

des équations de pertes de charges ce qui nous permet de résoudre plus facilement les systèmes d'équation décrivant le réseau. Le principe de cette méthode contrairement aux équations issues de la formule de Darcy Weisbach ou Hazen Williams) celle ci ne traite pas directement les équations non linéaires, on suppose que les pertes de charges changent linéairement avec le débit autour d'un point de fonctionnement arbitraire.

## I.6. Critères de performance hydraulique :

Pour le bon fonctionnement d'un système hydraulique, il doit répondre a des exigences précises. Ces exigences nous permettent d'analyser la capacité et la durabilité de notre réseau hydraulique, voici donc ces principaux critères :

### I.6.1. Débit :

Le calcul hydraulique se fait avec le débit de pointe car les conduites doivent être capables de gérer les plus gros débits d'eau (les pics d'utilisation).

$$Q_p = K_p \times Q_{mep} \quad (\text{I.30})$$

Coefficient de pointe égal :

Si  $Q_{mep} < 2,8$  L/s, alors :

$$K_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{mep}}} \quad (\text{I.31})$$

Si  $Q_{mep} > 2.8$  L/s :

$$k_p = 3$$

Avec :

$Q_p$  : débit de pointe

$K_p$  : le coefficient de pointe

$Q_{mep}$  : le débit moyen équivalent en (L/s)

**I.6.2. Pression :**

La pression ne doit pas être inférieure à 1 bar pour garantir le bon fonctionnement des appareils comme le chauffe bain la machine à laver..., et ne doit pas dépasser les 6 bar afin d'éviter toute détérioration ou endommagement du matériel. Ce calcul est seulement réalisé après avoir déterminé les différents débits susceptibles d'être évacués par chaque tronçon du réseau, ce qui nécessite d'abord une estimation des besoins en eau de l'agglomération urbaine (population, industrie, etc.).

$$PS = CP - CTN \quad (I.3)$$

**Avec:**

**PS :** pression de service

**CP :** charge de perte (la cote ou l'altitude du terrain au point considéré)

**CTN :** charge terrain naturel

**I.6.3. Vitesse d'écoulement :**

Les vitesses supérieures à 1.5 m/s peuvent causer une dégradation des parois internes de la conduites et les vitesses inférieures à 0.5 m/s favorisent la formation de dépôts à l'intérieur de celle-ci. Par conséquent, il est nécessaire de maintenir une vitesse d'écoulement entre 0,5 m/s et 1,5 m/s.

**I.6.4. Choix du diamètre :**

Pour choisir le bon diamètre nous devons d'abord effectuer un calcul et déterminer des diamètres théoriques. Ensuite, en consultant les catalogues des diamètres normalisés et commerciaux cela nous permettra de choisir le diamètre suffisant pour garantir un débit et une pression adéquats au sol. [1]

**I.7. Conclusion :**

À la fin de ce chapitre où nous avons abordé les principes hydrauliques de base et les types des réseaux et leurs principaux éléments constitutifs, nous avons choisi d'adopter un réseau maillé pour la suite de notre projet. Pour effectuer les calculs des pertes de charge la formule de Hazen-Williams sera appliquée et pour le calcul des débits de dimensionnement c'est celle d'Hardy-Cross qui sera employée. Cette méthode sera détaillée dans le deuxième chapitre et appliqué dans notre cas d'étude.

***Chapitre II :***  
***Analyse fiabiliste des réseaux maillés***

## II. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons quelques notions fondamentales sur la **fiabilité** des systèmes, ainsi que les indicateurs couramment utilisés pour la quantifier. Puis, nous introduisons les principales méthodes **d'analyse fiabiliste**, en nous concentrant particulièrement sur la méthode de **Monte Carlo**, en exposant son principe, la modélisation des **incertitudes**, et l'estimation des **probabilités de défaillance**. Par la suite, une application concrète est développée : identification des paramètres incertains dans un réseau **AEP**, modélisation de ces incertitudes, et intégration de la méthode sous **MATLAB** à travers une implémentation algorithmique et une validation des résultats. Cette démarche permettra de positionner notre travail dans une approche globale d'évaluation de la fiabilité des systèmes **hydrauliques**.

### II.1.1 Définition de la fiabilité :

La fiabilité d'un système se définit comme son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. Dans le contexte des réseaux d'AEP, la fiabilité représente la capacité du réseau à fournir un service continu d'eau potable en quantité suffisante, avec une qualité adéquate et une pression appropriée, malgré les incertitudes et les perturbations qui peuvent affecter son fonctionnement.

Mathématiquement, la fiabilité  $R(t)$  peut être exprimée comme la probabilité que le système fonctionne sans défaillance pendant une période donnée  $[0,t]$  :

$$R(t) = P(T > t) \quad (\text{II.1})$$

où  $T$  représente la durée jusqu'à la défaillance, souvent modélisée comme une variable aléatoire.

La fiabilité est également liée à la notion de défaillance, qui correspond à l'incapacité du

système à satisfaire les exigences de service. Pour un réseau d'AEP, ces défaillances peuvent être hydrauliques (pression insuffisante), structurelles (rupture de conduites), ou fonctionnelles (contamination de l'eau. [1]

## II.2 Indicateurs de fiabilité :

La fiabilité d'une structure noté R est conventionnellement définie de la façon suivante :

$$R = 1 - Pf \quad (\text{II.2})$$

Où Pf : représente la probabilité de défaillance qui correspond à la probabilité d'avoir une valeur négative d'une réalisation de la fonction d'état G.

On a donc :

$$Pf = (X) \leq 0 \quad (\text{II.3})$$

## II.3 Choix des variables aléatoires de base

Le choix des variables aléatoires constitue une étape cruciale dans l'élaboration d'un modèle de fiabilité, nécessitant une connaissance approfondie du système étudié.

À cette étape, les enjeux principaux sont les suivants :

- Identifier les paramètres incertains, appelés variables aléatoires de base.
- Quantifier les variations de ces paramètres.[6]

### a. Variable aléatoire

On considère qu'un paramètre est aléatoire lorsqu'il existe une incertitude concernant sa valeur. Ainsi, pour chaque paramètre aléatoire (variable), une loi de probabilité est définie pour décrire la distribution de ses valeurs. En général, les lois de probabilité sont définies par une fonction de densité de probabilité (loi de distribution), avec une valeur moyenne représentant la tendance centrale, et un écart-type qui reflète la dispersion des valeurs autour de cette moyenne.

### b. la moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique  $\bar{X}$  est égale au quotient de la somme de toutes les valeurs de la série par le nombre de ces valeurs  $N$ . Elle est donnée par :

$$\bar{X} = \sum xi / N \quad \text{[II.4]}$$

### c. La variance

La variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la variable aléatoire sa dispersion autour de sa moyenne. Elle est définie comme l'espérance du carré de la distance de X à sa moyenne.

$$Var(X) = (1/N) \sum (xi - \bar{X})^2 \quad \text{(II.5)}$$

### d. L'écart-type

L'écart type est une mesure de la dispersion d'une variable aléatoire ; en statistique, il est une mesure de dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance

$$\sigma(x) = \sqrt{var(X)} \quad \text{(II.6)}$$

### e. Le coefficient de variation

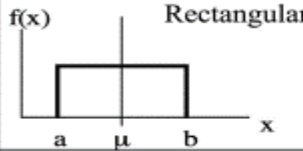
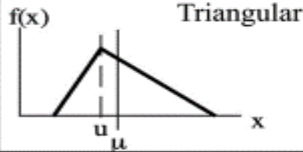
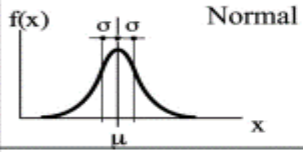
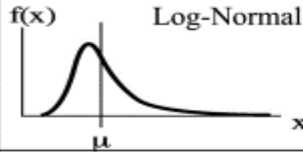
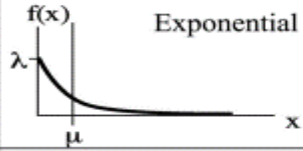
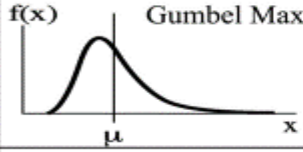
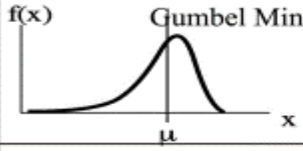
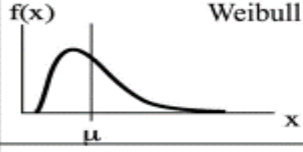
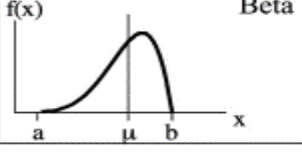
Le coefficient de variation est défini comme le rapport de l'écart type sur la moyenne. Ce facteur adimensionnel caractérise la dispersion intrinsèque de la variable aléatoire.

$$Cv = \sigma(X)/\bar{X} \quad \text{(II.7)}$$

## II.4 Lois de distribution

Il existe plusieurs types de lois de probabilité utilisées dans la littérature pour décrire les variables aléatoires. En génie civil, les plus couramment employées pour représenter les situations d'incertitude sont : la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull. Chacune de ces lois possède des caractéristiques propres qui les rendent adaptées à différents types d'analyses. Les caractéristiques de ces lois sont données dans le tableau (3.1) ci-dessous [7]

Tableau II.1 : Principales lois de distribution [7]

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
|  <p>Rectangular</p>   | $-\infty < a < b < +\infty$<br>$\mu = \frac{a+b}{2}$<br>$\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$   | $a \leq x \leq b$<br>$f(x) = \frac{1}{b-a}$<br>$F(x) = \frac{x-a}{b-a}$   |   |
|  <p>Triangular</p>    | $-\infty < a < b < +\infty$<br>$\mu = \frac{1}{3}(a+b+u)$<br>$\sigma = \sqrt{\frac{1}{18}(a^2+b^2+u^2-ab-au-bu)}$  | $a \leq x \leq u$<br>$f(x) = \frac{2}{b-a} \left( \frac{x-a}{u-a} \right)$<br>$F(x) = \frac{x^2-2ax+a^2}{(b-a)(u-a)}$   | $u \leq x \leq b$<br>$f(x) = \frac{2}{b-a} \left( \frac{b-x}{b-u} \right)$<br>$F(x) = 1 - \frac{x^2-2bx+b^2}{(b-a)(b-u)}$ |
|  <p>Normal</p>        | $-\infty < \mu < +\infty \quad \sigma > 0$<br>$\mu$<br>$\sigma$  | $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$<br>$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx$                        |   |
|  <p>Log-Normal</p>   | $\lambda, \zeta$<br>$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$<br>$\sigma = \mu \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$  | $f(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$<br>$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right) dx$          |   |
|  <p>Exponential</p> | $\lambda > 0$<br>$\mu = \frac{1}{\lambda}$<br>$\sigma = \frac{1}{\lambda}$   | $x \geq 0$<br>$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$<br>$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$  |   |
|  <p>Gumbel Max</p>  | $u, \alpha \quad \gamma = 0.577216$<br>$\mu = u + \frac{\gamma}{\alpha}$<br>$\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$  | $f(x) = \alpha \cdot \exp(-\alpha(x-u) - \exp(-\alpha(x-u)))$<br>$F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x-u)))$   |   |
|  <p>Gumbel Min</p>  | $\mu = u - \frac{\gamma}{\alpha}$<br>$\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$   | $f(x) = \alpha \cdot \exp(\alpha(x-u) - \exp(\alpha(x-u)))$<br>$F(x) = 1 - \exp(-\exp(\alpha(x-u)))$  |   |
|  <p>Weibull</p>     | $\varepsilon \leq x < +\infty \quad k > 0$<br>$\mu = \varepsilon + (u-\varepsilon)\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$<br>$\sigma^2 = (u-\varepsilon)^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$ | $f(x) = \frac{k}{u-\varepsilon} \left( \frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon} \right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right)$<br>$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right)$ |   |
|  <p>Beta</p>        | $-\infty < a < b < +\infty \quad r, s \geq 1$<br>$\mu = a + (b-a) \cdot \frac{r}{r+s}$<br>$\sigma = \frac{b-a}{r+s} \cdot \sqrt{\frac{r \cdot s}{r+s+1}}$  | $f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}$<br>$F(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \int_a^x \frac{(u-a)^{r-1} (b-u)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}} du$                      |   |

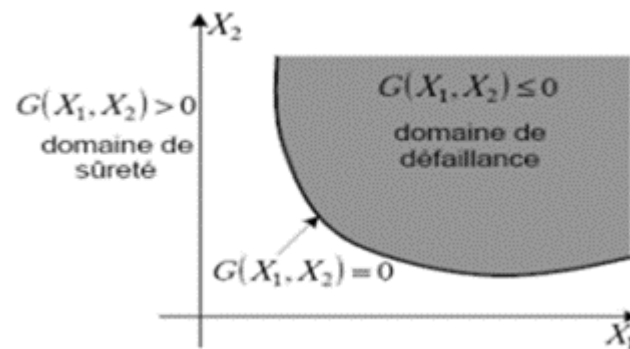
Dans le cas de notre travail nous utilisons la loi normale, qui est définie par la moyenne  $\bar{X}$  et l'écart type  $\sigma(x)$

## II.5 Choix de la fonction de performance pour les réseaux AEP

Cette étape consiste à établir un scénario de défaillance du système, c'est-à-dire à identifier l'état limite au-delà duquel le système n'est plus considéré comme fiable. Ces états limites correspondent généralement aux exigences en termes de résistance mécanique ou d'aptitude au service.

Le critère de défaillance est défini à l'aide d'une fonction d'état limite, notée  $G$ , qui dépend des variables aléatoires du modèle.

Conformément aux conventions, on définit le domaine de sécurité  $D_s$  et le domaine de défaillance  $D_f$  comme illustré dans la figure 1. [8]



**Figure II. 2 : domaines de sûreté et de défaillance dans le cas de deux variables aléatoires [8]**

**Les points essentiels concernant le critère de défaillance sont les suivants :**

- Le choix de la fonction de performance se doit d'être dicté par la cause physique de la défaillance de façon à en obtenir une représentation réaliste.
- Si la forme du critère est généralement du type :

$$G = R - S \quad (\text{II.8})$$

Avec

**R** : une caractéristique de résistance

**S** : une donnée relative à la sollicitation appliquée.

**Il faut noter que :**

- Une **valeur positive** de **G** signifie que les réalisations **des variables aléatoires** conduisent à une situation de **sécurité**,
- Une **valeur négative** signifie qu'elles conduisent à une situation de **défaillance**.
- La courbe représentant **G = 0** est appelée **courbe d'état limite** et que lorsque :
- **G (R, S) < 0** : nous sommes dans le domaine de **défaillance**,
- **G (R, S) > 0** : nous sommes dans le domaine de **sécurité**,
- **G (R, S) = 0** : nous sommes entre les 2 domaines soit dans un **état limite**.

## II .6 Principales approches pour tenir compte des incertitudes :

Parmi les méthodes disponibles dans la littérature, nous avons choisi d'en présenter deux grandes familles d'études qui nous paraissent les plus répandues dans le calcul de la fiabilité :

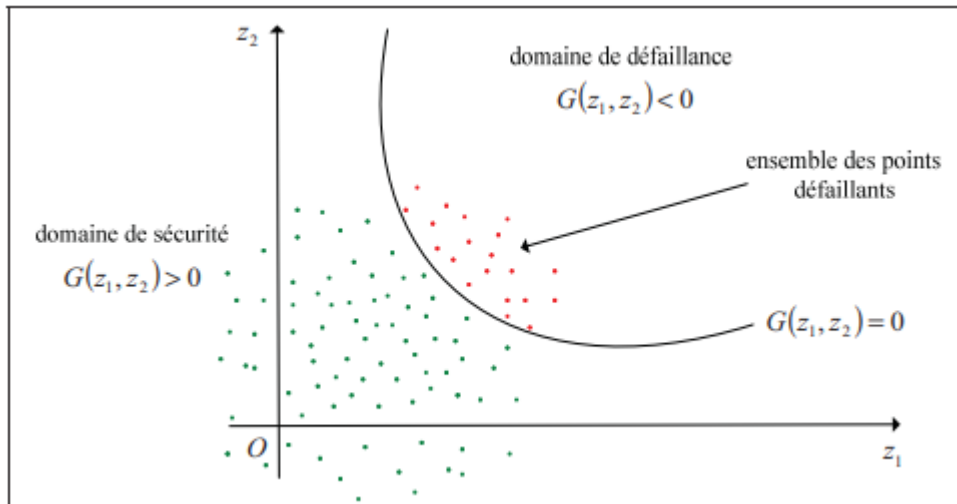
- **La première** : regroupe les méthodes de simulation, telles que la simulation de **Monte Carlo**, qui consiste à modéliser numériquement l'effet des incertitudes en générant un grand nombre de scénarios possibles.
- **La seconde** : comprend les méthodes approchées, parmi lesquelles figurent les techniques **FORM** (méthode de fiabilité au premier ordre) et **SORM** (au second ordre). Ces méthodes permettent d'estimer la probabilité de défaillance de manière plus rapide, en se basant sur une approximation locale du comportement du système autour du point critique. [9]

### II .6.1 Méthode de Monte Carlo :

En mathématiques, on appelle méthodes de Monte-Carlo (Schneider, 1997), les techniques permettant d'évaluer une quantité déterministe à l'aide de l'utilisation de tirages aléatoires. C'est de cette idée de recours au hasard que vient la dénomination «Monte-Carlo», par allusion au célèbre quartier de Monaco réputé pour son casino. Il s'agit là, de la technique la plus ancienne et la plus intuitive d'évaluation de la probabilité de défaillance. Basée sur

l'application de la loi des grands nombres, elle consiste à déterminer un estimateur de la probabilité de défaillance par succession de tirages aléatoires indépendants.

Cette méthode, consiste à déterminer un estimateur  $Pf$  par succession de tirages aléatoires indépendants. On réalise ainsi un nombre  $N_t$  important de tirages des variables aléatoires en accord avec leur loi de distribution conjointe (loi Log Normal, loi Normal, poisson ... etc.) [9]



**Figure II .01 : Schéma d'illustration de la méthode de Monte-Carlo dans l'espace physique (X1, X2) [9]**

Les valeurs des variables de base (le vecteur  $\{X\}$  qui représente le vecteur  $\{A\}$ , Accélération de zone sismique) sont échantillonnées aléatoirement en fonction des distributions de probabilité de  $\{A\}$ . Le nombre de tirage  $N$  sortant dans le domaine de défaillance  $D_f$ , c'est-à-dire le nombre de tirage satisfaisant la condition de  $G(x) \leq 0$ , est identifié. La probabilité de défaillance  $Pf$  est alors :

$$Pf = \int_{D_f} f(x) I_{G(x) \leq 0}(x) dx_1 \dots \dots \dots dx_n = \int f(x) I_{G(x) \leq 0}(x) dx_1 \dots \dots \dots dx_n \tag{25}$$

Où  $f_{(x)}(x)$  est la densité conjointe de probabilité du vecteur aléatoire  $X$  et  $D_f$  le domaine d'intégration. La fonction  $I_d$  est une fonction d'indicateur le domaine de défaillance

Avec :

$$I_d = 1 \text{ si } G(x) \leq 0$$

$$I_d = 0 \text{ si } G(x) > 0$$

Pour  $N_t$  simulation des vecteurs aléatoires  $X$ , la probabilité de défaillance  $p_f$  est approchée par la moyenne des  $p_i = I_{G(x)} \leq 0(x_i)$

On en déduit alors la probabilité de défaillance par un traitement statique direct :

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} I_d}{N_t} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$N_t$  : nombre de tirage effectué.

## II.7 Application de l'Analyse Fiabiliste :

Dans la conception et l'exploitation des réseaux d'eau maillés, il est essentiel de prendre en compte les incertitudes inhérentes aux paramètres du système. L'analyse fiabiliste permet d'évaluer la probabilité que le réseau respecte les critères de performance requis, malgré les variations possibles de ces paramètres. [6]

### II .7.1 Identification des paramètres incertains :

Les performances d'un réseau d'eau dépendent de plusieurs paramètres, dont certains présentent des incertitudes significatives. Parmi les principaux paramètres incertains, on peut citer :

- **La rugosité des conduites (CHW) :** Elle varie en fonction du matériau, de l'âge et de l'état des conduites.
- **Les débits aux nœuds (Q) :** Ils fluctuent selon la consommation des usagers, les saisons ou les heures de la journée.
- **Les pressions mesurées :** Elles peuvent être affectées par des erreurs instrumentales ou des fluctuations temporaires. Par exemple, une étude a modélisé l'incertitude sur le débit et la rugosité des conduites en utilisant des lois normales avec des valeurs moyennes de  $Q = 2,5 \text{ l/s}$  et  $CHW = 95$  et  $135$ , afin d'évaluer la fiabilité du réseau. [10]

## II.7.2 Modélisation des incertitudes :

Une fois les paramètres incertains identifiés, il est crucial de les modéliser de manière appropriée pour effectuer une **analyse fiabiliste**. Cela implique de définir des distributions de **probabilité** pour chaque paramètre, reflétant leur variabilité et les incertitudes associées.

Par exemple :

- **Rugosité des conduites** : Peut-être modélisée par une distribution normale avec une moyenne correspondant à la valeur nominale et un écart-type reflétant la variabilité due au vieillissement ou à la fabrication.
- **Débits aux nœuds** : Souvent modélisés par des distributions log-normales ou triangulaires, en fonction des données de consommation disponibles.
- **Pressions mesurées** : Les erreurs de mesure peuvent être représentées par une distribution normale centrée sur zéro avec un écart-type déterminé par la précision des instruments.

La modélisation des incertitudes permet de simuler le comportement du réseau sous différentes conditions et d'évaluer **la probabilité de défaillance** ou de non-conformité aux critères de performance.

## II .7.3 Intégration de la méthode de Monte Carlo sous MATLAB :

La méthode de **Monte Carlo** est une technique statistique utilisée pour évaluer l'impact des incertitudes sur le comportement d'un système en réalisant un grand nombre de simulations avec des valeurs aléatoires des paramètres incertains.

- **Étapes de mise en œuvre sous MATLAB** :
  - **Définition des distributions des paramètres incertains** : Utiliser des fonctions telles que **makedist** pour créer des objets de distribution.
  - **2. Échantillonnage aléatoire** : Générer des échantillons aléatoires pour chaque paramètre à l'aide de la fonction **random**.

- **3. Simulation du modèle hydraulique** : Intégrer les échantillons dans le modèle du réseau d'eau et calculer les variables d'intérêt (pressions, débits).
- **4. Analyse des résultats** : Compiler les résultats des simulations pour estimer les statistiques (moyenne, variance) et les probabilités de dépassement des seuils critiques.

MATLAB offre des outils puissants pour effectuer ces analyses, notamment la fonction **Usample** pour générer des échantillons de modèles incertains et **usubs** pour substituer des valeurs spécifiques dans les modèles. De plus, l'utilisation de **Simulink Design Optimization** permet de réaliser des analyses de sensibilité et des simulations de **Monte Carlo** pour identifier les paramètres les plus influents et optimiser la conception du réseau. [11]

### **II.8 Conclusion :**

L'intégration de l'analyse fiabiliste dans l'étude d'un réseau d'eau maillé permet d'appréhender de manière plus réaliste les performances du système en tenant compte des incertitudes inhérentes aux paramètres clés. En identifiant les **variables aléatoires** de base, en modélisant leurs incertitudes et en utilisant des techniques telles que la simulation de **Monte Carlo** sous **MATLAB**, il est possible d'évaluer la **probabilité de défaillance** du réseau et de prendre des décisions éclairées pour sa conception, son exploitation et sa maintenance.

## *Chapitre III :*

### *Analyse probabiliste d'un réseau maillé*

### III.1 Introduction :

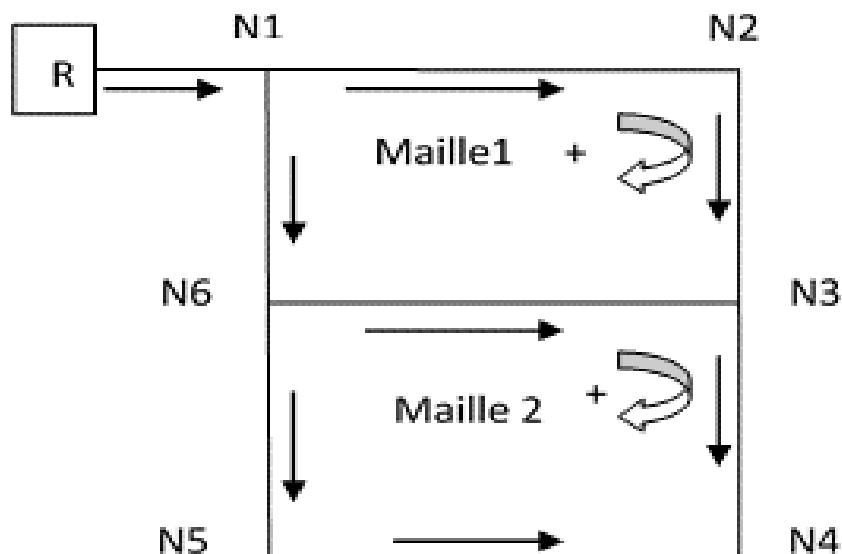
Ce chapitre est consacré à l'application des outils théoriques développés précédemment sur un cas concret de réseau d'adduction en eau potable (AEP) de type maillé. Il comprend deux grandes parties :

- Une première analyse hydraulique selon une approche déterministe à l'aide de la méthode de Hardy-Cross.
- Une deuxième partie où les incertitudes liées aux paramètres du réseau sont prises en compte selon une approche fiabiliste basée sur la méthode de simulation Monte Carlo.

Ainsi dans le cadre de ce travail un script MATLAB incluant à la fois la méthode de Hardy Cross et la méthode de simulation de Monte Carlo est mis en place. Cet outil nous permettra d'atteindre l'objectif principal de cette étude qui est l'évaluation du comportement réel du réseau sous différents scénarios, d'identifier les tronçons critiques et de comparer les performances hydrauliques d'un réseau neuf et d'un réseau ancien.

### III.2 Cas d'étude :

Le présent travail porte sur le dimensionnement d'un réseau maillé de distribution d'eau potable destiné au lotissement Ait Abdellah, implanté dans la commune de Tizirt (figure 2.2) [1], [2]. Le site étudié comprend un total de 60 lots, chacune destinée à héberger une population moyenne de 8 personnes.



**Figure III .1 : Schéma du réseau maillé**

Les caractéristiques géométriques et physiques du réseau sont présentées dans le tableau ci-après.

**Tableau III.1:** données d'entrée du réseau du réseau. [1], [2]

| Donnés                                  |        |        |
|---|--------|--------|
| Nombre de lots                          | 60     |        |
| Nombre d'habitants par lot              | 8      |        |
| Nombre d'habitants total du lotissement | 480    |        |
| Dotation par habitant                   | 150    |        |
| Coefficient de point                    | 3      |        |
| Besoins du lotissement                  | 2,55   | l/sec  |
| Longueur totale                         | 808    | ml     |
| Débit spécifique                        | 0.0031 | l/s/ml |
| CHW                                     | 95     |        |

### III.2.1 Description générale :

Le réseau étudié est un réseau maillé composé de huit tronçons principaux connectant six nœuds (N1 à N6). Il assure la distribution d'eau potable à partir d'un réservoir vers plusieurs zones de consommation.

Tableau III.2 : Caractéristiques géométrique et physiques du réseau

| Tronçon | Longueur (m) | Diamètre (mm) | Sens d'écoulement |
|---------|--------------|---------------|-------------------|
| N1-N2   | 160          | 80            | +1                |
| N2-N3   | 68           | 60            | +1                |
| N3-N6   | 207          | 50            | -1                |
| N6-N1   | 56           | 60            | -1                |
| N6-N3   | 207          | 50            | +1                |
| N3-N4   | 70           | 50            | +1                |
| N4-N5   | 197          | 30            | -1                |
| N5-N6   | 50           | 40            | -1                |

Tableau III.3: Altitudes (côtes du terrain)

| Tronçon | CTN amont (m) | CTN aval (m) |
|---------|---------------|--------------|
| N1-N2   | 87.81         | 93.63        |
| N2-N3   | 93.63         | 101.00       |
| N3-N6   | 101.00        | 101.50       |
| N6-N1   | 101.50        | 87.81        |
| N6-N3   | 101.50        | 101.00       |
| N3-N4   | 101.00        | 116.00       |
| N4-N5   | 116.00        | 117.00       |
| N5-N6   | 117.00        | 101.50       |

### III.2.2 Exigences hydrauliques de fonctionnement :

Les conditions techniques d'un réseau d'AEP exigent que la vitesse d'écoulement reste entre 0,5 m/s et 1,5 m/s, afin d'éviter les dépôts ou les pertes de charge excessives. De même, la pression doit être maintenue entre 10 m et 60 m pour garantir une distribution efficace sans risque de sous-alimentation ou de dégradation des conduites.

Tableau III. 4 : Débits imposés (en L/s)

| Tronçon | Débit(l/s) |
|---------|------------|
| N1-N2   | 3.755      |
| N2-N3   | 1.458      |
| N3-N6   | 2.297      |
| N6-N1   | 3.901      |
| N6-N3   | 2.300      |
| N3-N4   | 0.770      |
| N4-N5   | 1.090      |
| N5-N6   | 1.310      |

### III.3 Calcul déterministe du réseau maillé par la méthode d'HARDY-CROSS :

Avant tout calcul avec l'approche probabiliste, il est primordial d'effectuer un calcul déterministe. Cela permettra, d'une part, de vérifier le modèle mécanique, et d'autre part, d'identifier les points dangereux de notre réseau. Autrement dit identifier les points du réseau où les conditions de bon fonctionnement (exigences technique de performance) ne sont plus vérifiées ou risque de ne pas être vérifié.

Ainsi, l'analyse déterministe a été réalisée en utilisant la méthode de Hardy-Cross. Comme indiqué dans l'introduction, un script MATLAB de la méthode a été mis en place. Deux horizons d'études sont considérés :

- **Réseau neuf : CHW = 150**
- **Réseau ancien : CHW = 95**

### III.3.1 Analyses hydrauliques du réseau :

L'organigramme ci-dessous illustre les différentes étapes du **calcul déterministe** pour un réseau d'alimentation en eau potable maillé, en utilisant la **méthode de Hardy-Cross** :

- On commence par **lire les données d'entrée du réseau** : rugosité (CHW), diamètres, longueurs, altitudes, et débits initiaux.
- Ensuite, le programme effectue le **calcul des résistances hydrauliques** de chaque tronçon.
- Une **boucle d'itération** est lancée selon la méthode de Hardy-Cross : les pertes de charge sont calculées pour chaque maille, puis les débits sont corrigés jusqu'à atteindre un équilibre.
- À chaque itération, un **test de convergence** vérifie si l'erreur est inférieure à une tolérance fixée ; si c'est le cas, la boucle s'arrête.
- Une fois la convergence atteinte, le programme effectue les **calculs finaux** : vitesses, pressions, pertes de charge et cotes piézométriques.
- Enfin, une **vérification des critères de sécurité** est réalisée : vitesses comprises entre 0,5 et 1,5 m/s, et pressions entre 10 m et 60 m.

Ce calcul permet de valider le bon fonctionnement hydraulique du réseau avant d'aborder l'analyse probabiliste.

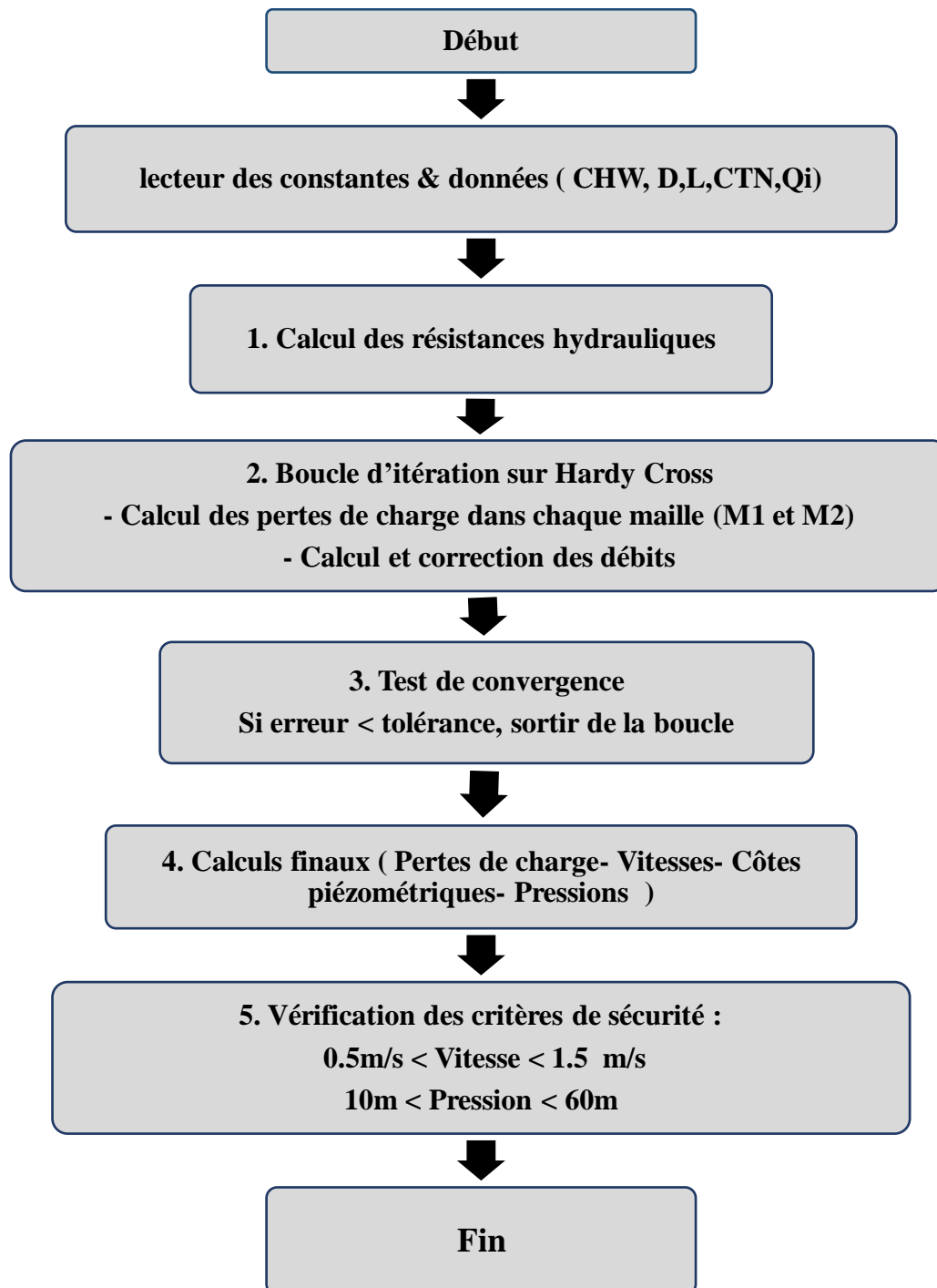


Figure III.2 : Organigramme de calcul déterministe du réseau d'AEP

Tableau III.5 : Résultats du calcul des vitesses dans le réseau.

| V (tronçon ) | Neuf (CHW= 150) | Ancien (CHW= 95) |
|--------------|-----------------|------------------|
| N1-N2        | 1.0397          | 1.0397           |
| N2-N3        | 1.0356          | 1.0356           |
| N3-N6        | 0.7574          | 0.7574           |
| N6-N1        | 0.8607          | 0.8607           |
| N6-N3        | 0.7589          | 0.7589           |
| N3-N4        | 0.7276          | 0.7276           |
| N4-N5        | 0.6115          | 0.6115           |
| N5-N6        | 0.5191          | 0.5191           |

Tableau III.6 : Résultats du calcul des pressions dans le réseau. (à court et à long terme)

| tronçon | Neuf CHW=150 |         | Ancien CHW=95 |         |
|---------|--------------|---------|---------------|---------|
|         | P amont      | P aval  | P amont       | P aval  |
| N1-N2   | 59.560       | 51.3407 | 59.560        | 48.1495 |
| N2-N3   | 51.340       | 42.5547 | 48.149        | 37.48   |
| N3-N6   | 42.554       | 45.0422 | 37.480        | 43.9411 |
| N6-N1   | 45.042       | 59.5600 | 43.941        | 59.5601 |
| N6-N3   | 45.042       | 42.5435 | 43.941        | 37.4539 |
| N3-N4   | 42.543       | 26.6055 | 37.453        | 20.2683 |
| N4-N5   | 26.605       | 29.0772 | 20.268        | 27.3575 |
| N5-N6   | 29.077       | 45.0422 | 27.357        | 43.9412 |

- La comparaison des résultats montre une baisse significative des performances dans le réseau ancien (CHW = 95), en particulier au niveau des tronçons N3-N4 et N5-N6.
- Certaines vitesses sont proches des limites recommandées (0.5 - 1.5 m/s), ce qui pose des risques de dépôts lorsque la vitesse d'écoulement est faible et des risques d'érosion lorsque la vitesse d'écoulement est trop grande.

Court terme CHW=150:

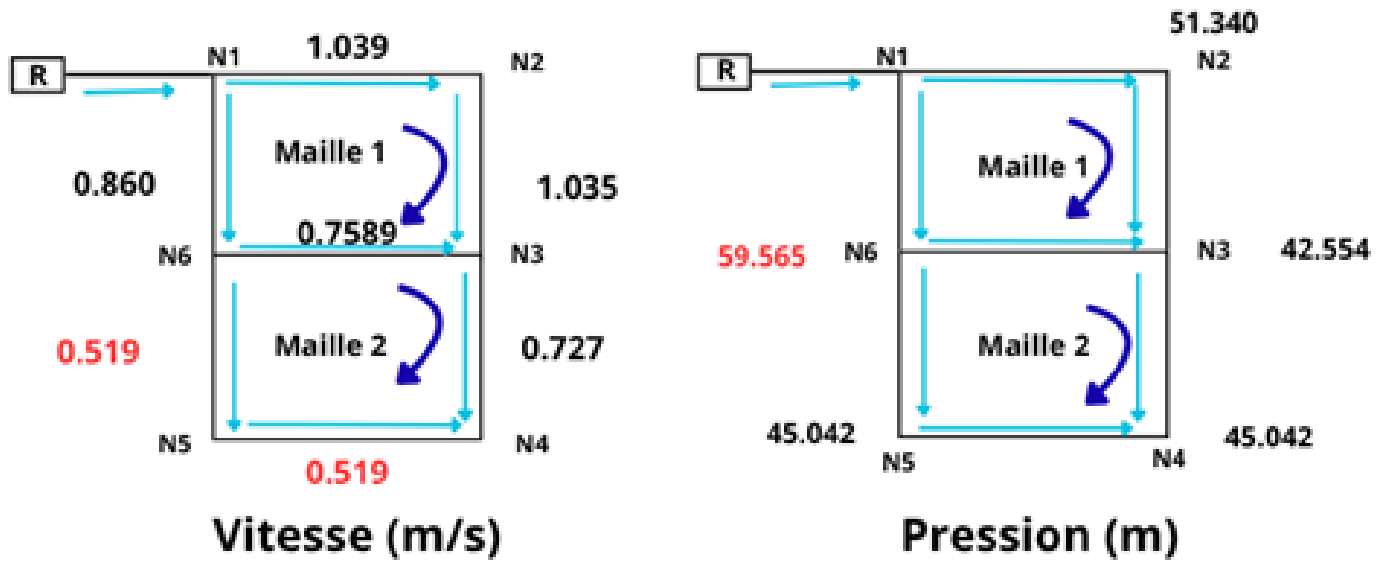


Figure III.3 : valeur des vitesse et pression calculée (à court terme CHW =150)

long terme CHW=95:

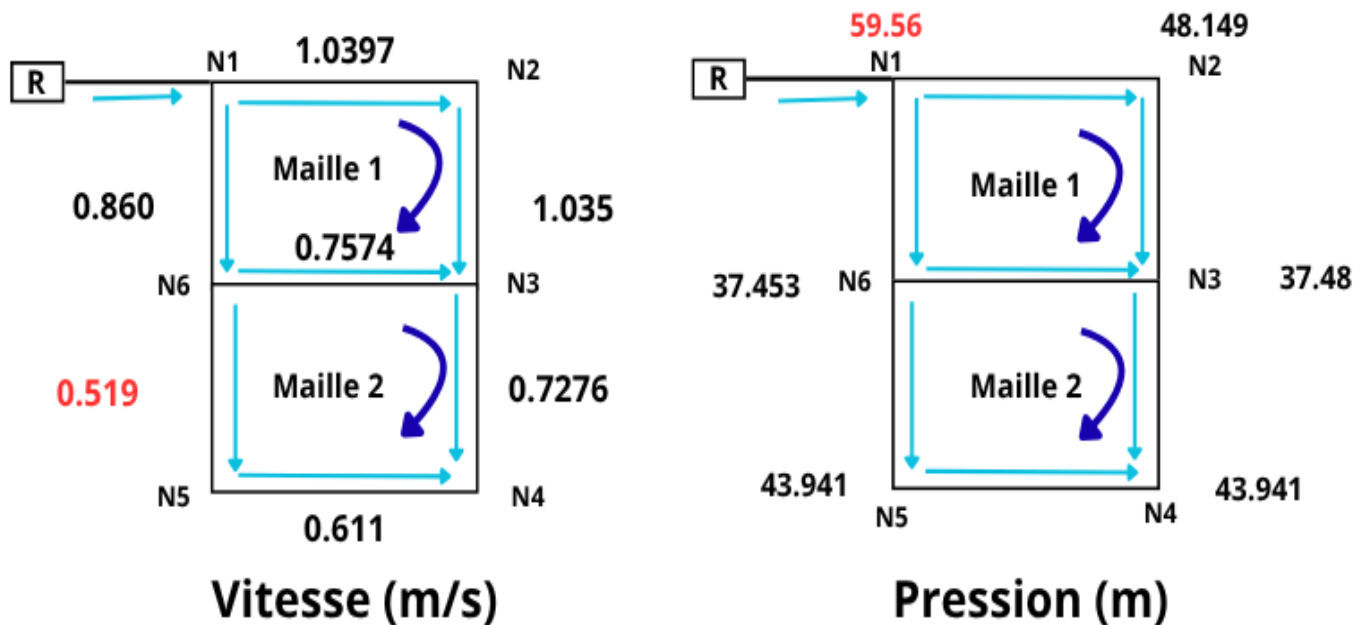


Figure III.4 : valeur des vitesse et pression calculée (à long terme CHW =95)

### III.4 Données d'entrée pour l'analyse probabiliste :

Pour réaliser une analyse probabiliste (voir chapitre II) nous rappelons que :

Nous devons définir les points suivants :

#### III.4.1 Choix des variables aléatoires :

Dans notre cas d'étude, le paramètre d'incertitude est relatif au coefficient de Hazen Williams, ce dernier est pris comme variable aléatoire dont les caractéristiques sont présentées dans le **tableau III.7**

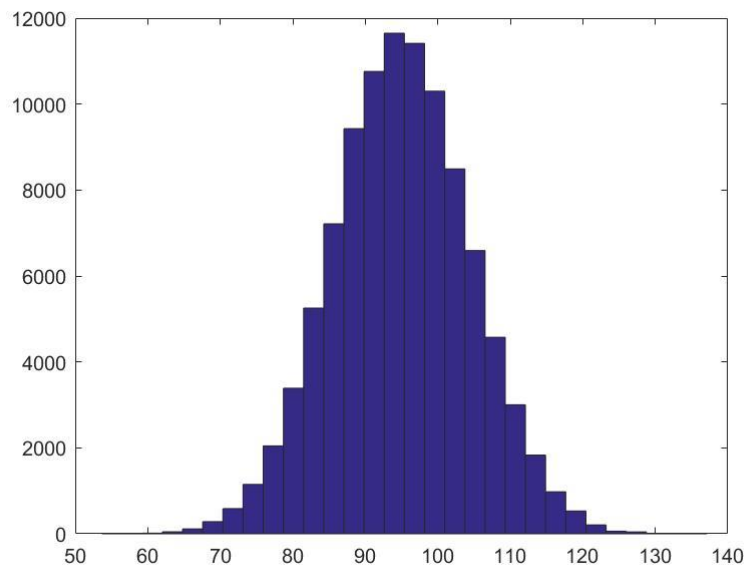
**Tableau III.7. Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres.**

| variable | moyenne | CV  | Loi de distribution |
|----------|---------|-----|---------------------|
| CHW      | 95      | 10% | Loi normal          |

#### III.4.2 Modélisation de la variabilité des paramètre d'entrée et de sortie :

Un système mécanique est caractérisé par une sollicitation (variable d'entrée) et une réponse (paramètre de sortie). Dans la cadre de ce travail, nous avons analysé l'effet du coefficient de Hazem Wiliams **CHW** sur le comportement du réseau. Sur **la figure III.5**, nous présentons la modélisation de la variabilité du coefficient de Hazem Wiliam **CHW** par **une loi normale** de moyenne 95 et d'un coefficient de variation de 10% qui représente une variabilité modérée. Comme nous pouvons le constater, la distribution générer sur **MATLAB** suit bien une loi

normale ce qui indique sur notre générateur de variable aléatoire est assez fiable. La question que l'on se pose est la suivante : comment va être la forme de la réponse de notre réseau.



**Figure III.5: Histogramme illustrant la variabilité du coefficient de Hazem Williams moyenne=95 et coefficient de variation=10%**

En introduisant ces paramètres dans notre script MATLAB, nous obtenons comme sortie plusieurs paramètres. Nous présentons dans la **figure III .4**, la variabilité de la pression minimale dans le réseau. Comme nous pouvons le constater, la forme de la distribution de la réponse du réseau ressemble plus à une loi log normal qui présente une asymétrie vers les plus grandes valeurs.

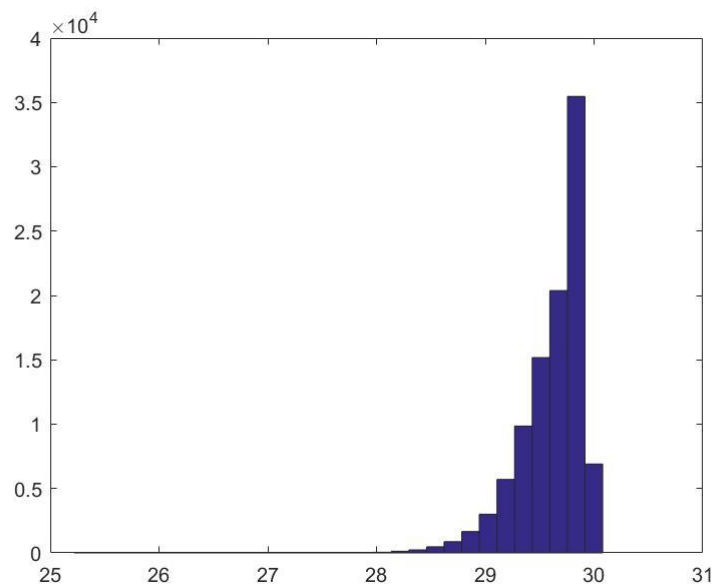


Figure III.6 : Histogramme illustrant la variabilité de la pression minimale dans le réseau

### III.4.3 Fonction d'état limite $G$ :

Une fonction d'état limite notée  $G$  est définie selon la relation suivante :

$$G = R - S$$

où  $R$  représente une caractéristique de **résistance** du système, et  $S$  une grandeur relative à la **sollicitation** appliquée.

Dans le cadre de l'analyse du comportement hydraulique d'un réseau maillé, les fonctions d'état limite sont établies en fonction des conditions normales d'exploitation, notamment les seuils admissibles de **pression** et de **vitesse**.

Le réseau est considéré comme **fonctionnel** lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

- **Conditions normales de pression :**

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = P_{\max} - P \\ G_2 = P - P_{\min} \end{array} \right.$$

- **Conditions normales de vitesse :**

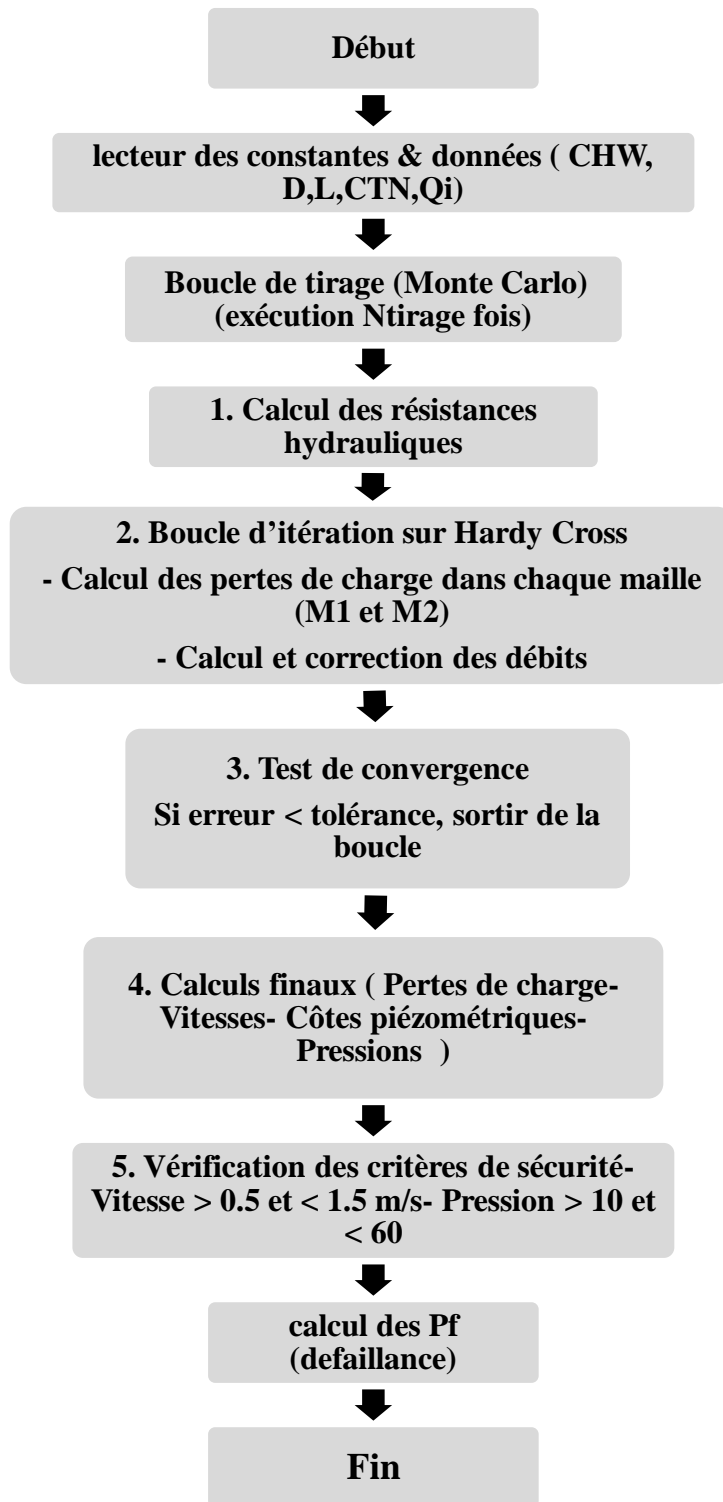
$$\left\{ \begin{array}{l} G_3 = V_{\max} - V \\ G_4 = V - V_{\min} \end{array} \right.$$

Toute situation où une fonction  $G$  devient négative ( $G < 0$ ) est considérée comme une **défaillance**, traduisant un écart par rapport aux **exigences hydrauliques** de fonctionnement normal du réseau.

### III.4.4 Calcul de la probabilité de défaillance :

L'organigramme illustre les différentes étapes du calcul de la probabilité de défaillance pour un réseau maillé d'alimentation en eau potable, en utilisant la méthode de Monte Carlo :

- On commence par lire les données du réseau : longueurs, diamètres, pertes de charge, débits, etc.
- Ensuite, le programme génère des valeurs aléatoires pour certains paramètres (comme la rugosité), en suivant des lois de probabilité prédéfinies.
- Pour chaque simulation, Le programme calcule les pressions maximales, les pressions minimales, les vitesses maximales et les vitesses minimales.
- À chaque tirage, un test est effectué pour vérifier si le réseau fonctionne correctement ou non (défaillance ou non).
- A la fin le programme estime la probabilité de défaillance.



**Figure III.7 :** Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance du réseau d'AEP

maillé par la méthode de Monté Carlo.

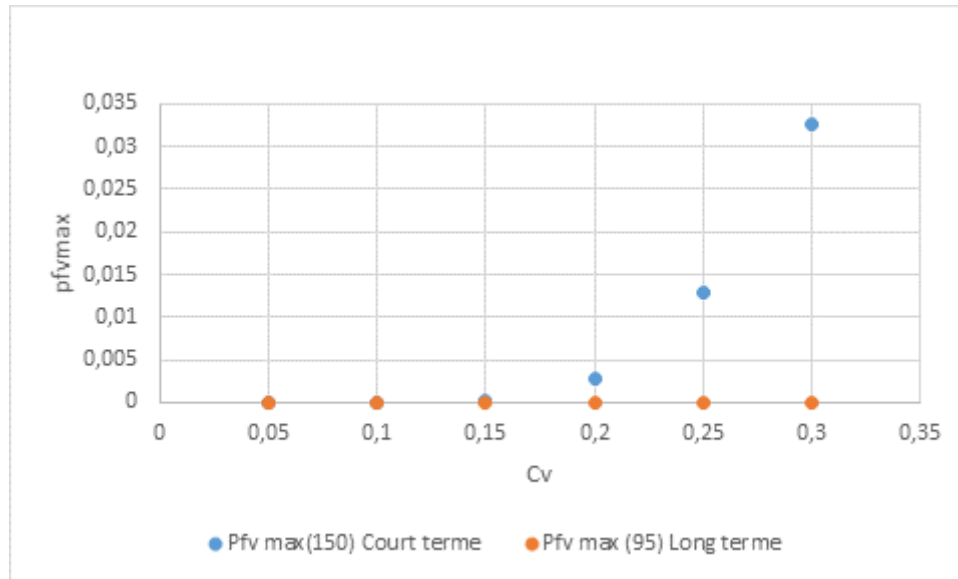
### III.5 Résultats et discussions :

Cette section présente les résultats de l'analyse probabiliste en termes de probabilité de défaillance (Pf) pour les principales grandeurs hydrauliques du réseau : **pression** et **vitesse**. Les données ont été obtenues à partir des simulations Monte Carlo effectuées sous MATLAB. Pour chaque scénario étudié, les résultats sont organisés en tableaux accompagnés de courbes représentatives, suivis d'une interprétation.

L'évaluation de la fiabilité repose sur la comparaison des valeurs de Pf aux **seuils critiques** définis dans l'intervalle [ $10^{-6}$  ;  $10^{-3}$ ] : en dessous de  $10^{-6}$ , le système est considéré comme **surdimensionné** engendrant un surcout économique, tandis qu'au-delà de  $10^{-3}$ , la défaillance devient **inacceptable** du point de vue hydraulique (une incertitude excessive et perte de fiabilité hydraulique).

**Tableau III.8 : la probabilité de défaillance sous critère de la vitesse maximale**

| Cv (%) | Pfv max(150)<br>Court terme | Pfv max (95)<br>Long terme |
|--------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.05   | 0                           | 0                          |
| 0.1    | 0                           | 0                          |
| 0.15   | 0.000118                    | 0                          |
| 0.2    | 0.0027                      | 0                          |
| 0.25   | 0.0129                      | 0,000004                   |
| 0.3    | 0.0326                      | 0,000068                   |



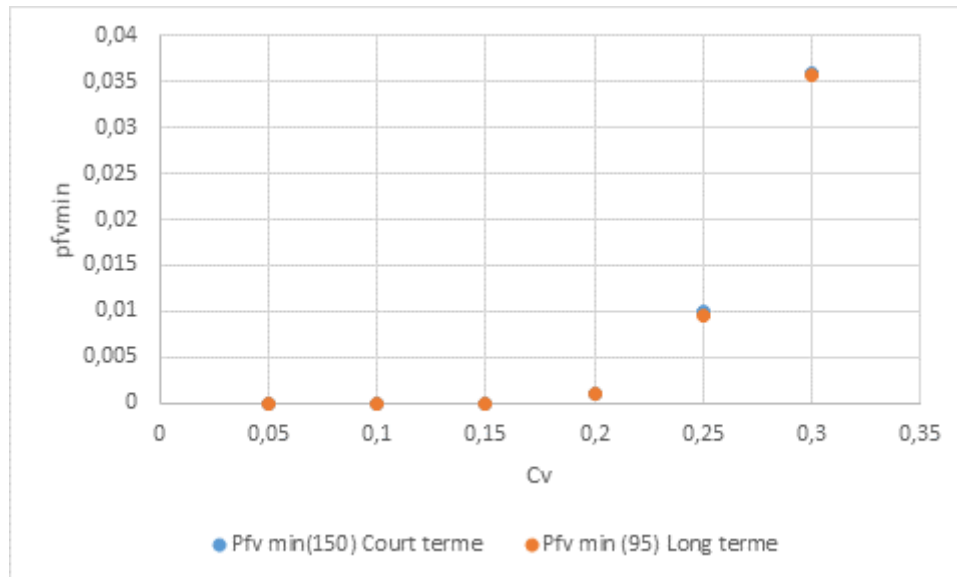
**Figure III. 8 :** Courbe de probabilités **Pfvmax** en fonction de Coefficient de variation (**Cv**)  
(CHW a long et court terme)

➤ **Interprétation :**

À court terme, les probabilités de défaillance restent nulles jusqu'à  $Cv = 0.1$ , mais dépassent rapidement le seuil critique de  $10^{-3}$  dès  $Cv = 0.25$ , traduisant une forte sensibilité du réseau neuf à l'incertitude. À long terme, bien que les valeurs de  $Pfv_{max}$  augmentent avec  $Cv$ , elles demeurent inférieures à  $10^{-3}$ , ce qui indique un comportement plus tolérant du réseau ancien vis-à-vis de l'incertitude, probablement lié à une diminution générale des vitesses dans les conduites.

**Tableau III.9: la probabilité de défaillance sous critère de la vitesse minimale**

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfv min(150)<br/>Court terme</b> | <b>Pfv min (95)<br/>Long terme</b> |
|---------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                            | <b>0</b>                           |
| <b>0.1</b>    | <b>0</b>                            | <b>0</b>                           |
| <b>0.15</b>   | <b>0,000024</b>                     | <b>0,000000000000066</b>           |
| <b>0.2</b>    | <b>0.0011</b>                       | <b>0,0011</b>                      |
| <b>0.25</b>   | <b>0.0099</b>                       | <b>0,0096</b>                      |
| <b>0.3</b>    | <b>0.0359</b>                       | <b>0,0356</b>                      |



**Figure III .9 :** Courbe de probabilités **Pfvmin** en fonction de Coefficient de variation (**Cv**) (**CHW a long et court terme**)

➤ **Interprétation :**

La probabilité de défaillance selon la vitesse minimale (Pfvmin) augmente fortement à partir de  $Cv = 0.2$ , dépassant le seuil critique de  $10^{-3}$  pour les deux réseaux, neuf et ancien. Cela traduit un risque élevé de vitesses trop faibles, propices aux dépôts et à la stagnation. Le comportement est similaire pour les deux états du réseau.

Cela souligne la vulnérabilité accrue du système en présence de rugosité élevée et de conditions incertaines, notamment vis-à-vis du critère de vitesse minimale.

Tableau III.10 : la probabilité de défaillance sous critère de la pression maximale

| Cv (%) | Pfp max(CHW=150) | Pfp max (CHW=95) |
|--------|------------------|------------------|
|        | Court terme      | Long terme       |
| 0.05   | 0                | 0                |
| 0.1    | 0                | 0,0015           |
| 0.15   | 0,000004         | 0.0236           |
| 0.2    | 0,000596         | 0,0687           |
| 0.25   | 0.0057           | 0,1162           |
| 0.3    | 0.0228           | 0,1602           |

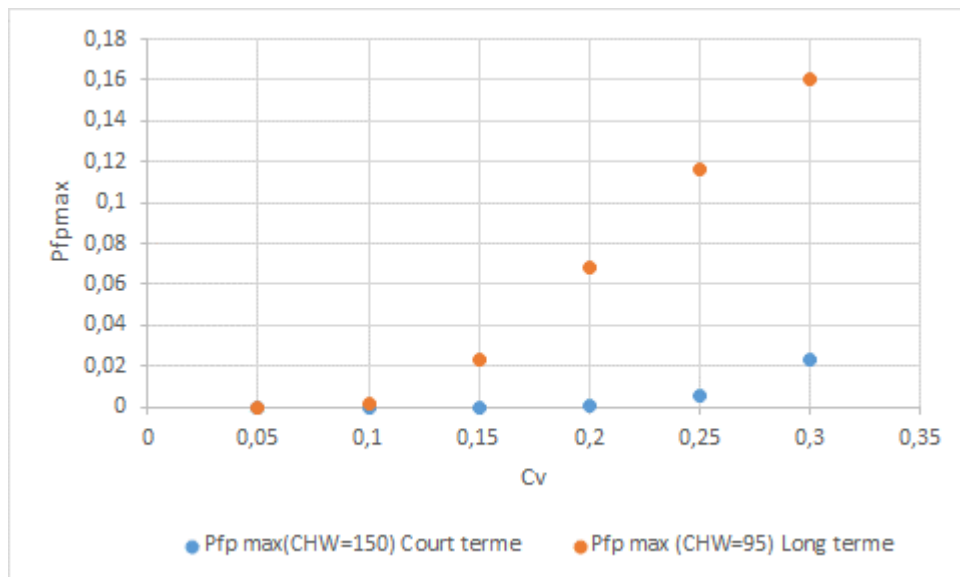


Figure III .10 : Courbe de probabilités **Pfpmax** en fonction de Coefficient de variation (**Cv**)  
(CHW a long et court terme)

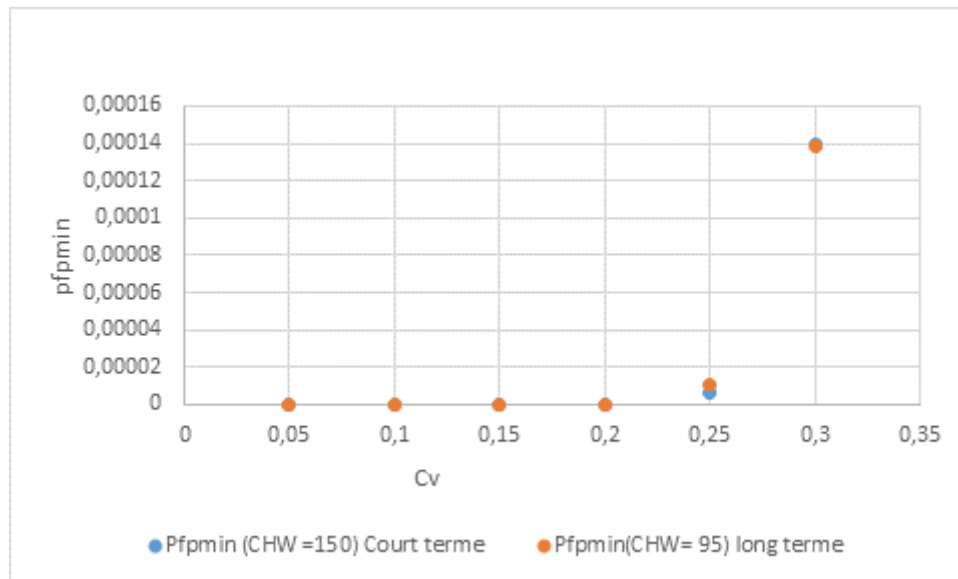
➤ **Interprétation :**

Jusqu'à  $C_v = 0.1$ , la défaillance est nulle dans le réseau neuf, et commence à apparaître faiblement dans le réseau ancien ( $P_{fpmax} = 0.0015$ ). À partir de  $C_v = 0.15$ , la probabilité de défaillance augmente rapidement dans les deux cas, atteignant des valeurs critiques dès  $C_v = 0.25$  ( $P_{fpmax} = 0.0057$  pour  $CHW = 150$  et  $0.1162$  pour  $CHW = 95$ ), et culminant à  $0.1602$  à  $C_v = 0.3$  pour le réseau vétuste.

Cette évolution montre que **le critère de pression maximale est très sensible à l'incertitude**, en particulier dans un réseau ancien. L'augmentation de la rugosité (baisse de  $CHW$ ) accentue les déséquilibres de pression, notamment dans les zones amont du réseau, provoquant des dépassements du seuil admissible.

**Tableau III.11 : la probabilité de défaillance sous critère de la pression minimale**

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfpmin (CHW =150)</b> | <b>Pfpmin(CHW= 95)</b> |
|---------------|--------------------------|------------------------|
|               | <b>Court terme</b>       | <b>long terme</b>      |
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                 | <b>0</b>               |
| <b>0.1</b>    | <b>0</b>                 | <b>0</b>               |
| <b>0.15</b>   | <b>0</b>                 | <b>0</b>               |
| <b>0.2</b>    | <b>0</b>                 | <b>0</b>               |
| <b>0.25</b>   | <b>0,000006</b>          | <b>0,00001</b>         |
| <b>0.3</b>    | <b>0,00014</b>           | <b>0,000138</b>        |



**Figure III .11 : Courbe de probabilités  $P_{f_{pmin}}$  en fonction de Coefficient de variation (Cv) (CHW a long et court terme)**

➤ **Interprétation :**

Jusqu'à  $Cv = 0.2$ , les deux réseaux présentent une **probabilité de défaillance nulle**, ce qui témoigne d'une bonne robustesse hydraulique vis-à-vis du critère de pression minimale dans des conditions faiblement incertaines.

À partir de  $Cv = 0.25$ , de faibles valeurs de défaillance apparaissent ( $6.10^{-6}$  et  $1.10^{-5}$ ), mais elles restent largement **inférieures au seuil critique de  $10^{-3}$** , considéré comme limite acceptable. Même à  $Cv = 0.3$ , les probabilités demeurent **proches de  $10^{-4}$** , indiquant un **niveau de sécurité élevé**, même sous incertitude modérée à forte.

De plus, les courbes des deux états du réseau sont très proches, ce qui suggère que la **vétusté du réseau (baisse de CHW)** a un **impact très limité** sur le maintien de la pression minimale.

### III.6 Probabilité de défaillance en intégrant les variables spatiales :

L'analyse de la probabilité de défaillance dans un réseau hydraulique peut être affinée en intégrant les **variables spatiales**, c'est-à-dire les caractéristiques propres à chaque tronçon du réseau (longueur, pente, altitude, diamètre, état de vétusté, etc.)

Dans notre étude, l'intégration des **variables spatiales** consiste à affecter un **coefficient de rugosité (CH)** propre à chaque tronçon du réseau. Cette prise en compte des différences locales permet de mieux représenter l'état réel du réseau et d'évaluer la **probabilité de défaillance** de manière plus précise, en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale.

**Tableau III.12** probabilité de défaillances sous critère de la pression maximale avec variables spatiales

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfpmax (CHW =95)<br/>Long terme</b> | <b>Pfpmax(CHW=<br/>variable spatiale)<br/>long terme</b> |
|---------------|--|--|
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.1</b>    | <b>0.0015</b>                          | <b>0.3131</b>  |
| <b>0.15</b>   | <b>0.0236</b>                          | <b>0.0088</b>  |
| <b>0.2</b>    | <b>0.0687</b>                          | <b>0.0445</b>  |
| <b>0.25</b>   | <b>0.1162</b>                          | <b>0.1039</b>  |
| <b>0.3</b>    | <b>0.1602</b>                          | <b>0.1746</b>  |

➤ **Interprétation :**

L'intégration des variables spatiales, notamment en attribuant un **CHW propre à chaque tronçon**, modifie sensiblement la probabilité de défaillance sous le critère de pression maximale. Contrairement au cas où CHW est constant (95), les résultats montrent une **variabilité non linéaire** :

À **Cv = 0.1**, la défaillance est nettement plus élevée avec CHW variable (0.3131), indiquant une sensibilité accrue liée à des tronçons très rugueux. Mais à **Cv = 0.15**, la probabilité chute à 0.0088, révélant un **effet de compensation hydraulique** entre tronçons.

Au-delà de **Cv = 0.2**, les deux courbes convergent, montrant que **l'incertitude domine progressivement l'effet spatial**, et que la fiabilité globale du réseau reste affectée dans les deux cas dès que Cv dépasse 0.2.

**Tableau III.13** probabilité de défaillances sous critère de la pression minimale avec variables spatiales

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfpmin (CHW =95)<br/>Long terme</b> | <b>Pfpmin(CHW=<br/>variable spatiale)<br/>long terme</b> |
|---------------|--|--|
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.1</b>    | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.15</b>   | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.2</b>    | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.25</b>   | <b>0.00001</b>                         | <b>0.00001</b>   |
| <b>0.3</b>    | <b>0.000138</b>                        | <b>0.0001380</b>   |

➤ **Interprétation :**

L'introduction des **variables spatiales** (CHW spécifique à chaque tronçon) n'a pas d'impact significatif sur la **probabilité de défaillance liée à la pression minimale**.

Dans les deux cas (CHW constant ou variable), **aucune défaillance** n'est observée jusqu'à **Cv=0.2**.

Au-delà, les probabilités restent **faibles et identiques** (0.00001 à Cv = 0.25 et 0.000138 à Cv = 0.3), bien **inférieures au seuil critique de  $10^{-3}$** , ce qui confirme une **bonne résilience** du réseau pour ce critère, même en présence d'incertitudes et d'hétérogénéité spatiale.

**Tableau III.14** probabilité de défaillances sous critère de la vitesse maximale avec variables spatiales

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfvmax (CHW =95)<br/>Long terme</b> | <b>Pfvmax(CHW=<br/>variable spatiale)<br/>long terme</b> |
|---------------|--|--|
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                               | <b>0.1725</b>  |
| <b>0.1</b>    | <b>0</b>                               | <b>0.3131</b>  |
| <b>0.15</b>   | <b>0</b>                               | <b>0.3677</b>  |
| <b>0.2</b>    | <b>0</b>                               | <b>0.4025</b>  |
| <b>0.25</b>   | <b>0.000004</b>                        | <b>0.4466</b>  |
| <b>0.3</b>    | <b>0.000068</b>                        | <b>0.5066</b>  |

➤ **Interprétation :**

L'introduction des **variables spatiales** entraîne une **hausse marquée de la probabilité de défaillance** sous le critère de vitesse maximale.

Alors que le réseau avec CHW constant (95) présente une **défaillance quasi nulle jusqu'à**

**Cv = 0.25**, le réseau avec CHW variable atteint des **valeurs très élevées dès**

**Cv = 0.05** (0.1725) et dépasse **0.5 à Cv = 0.3**.

Cette forte sensibilité s'explique par la **disparité des pertes de charge** entre tronçons, induisant localement des **vitesse excessives**.

Ainsi, le critère de vitesse maximale apparaît comme le **plus pénalisé** par l'effet spatial, soulignant la nécessité de **contrôler finement l'hétérogénéité du réseau** dans les zones critiques.

**Tableau III.15** probabilité de défaillances sous critère de la vitesse minimale avec variables spatiales

| <b>Cv (%)</b> | <b>Pfvmin (CHW =95)<br/>Long terme</b> | <b>Pfvmin(CHW=<br/>variable spatiale)<br/>long terme</b> |
|---------------|--|--|
| <b>0.05</b>   | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.1</b>    | <b>0</b>                               | <b>0</b>   |
| <b>0.15</b>   | <b>0.0000000000006</b>                 | <b>0.000006</b>  |
| <b>0.2</b>    | <b>0.0011</b>                          | <b>0.0011</b>  |
| <b>0.25</b>   | <b>0.0096</b>                          | <b>0.0096</b>  |
| <b>0.3</b>    | <b>0.0356</b>                          | <b>0.03860</b>   |

### ➤ Interprétation :

L'intégration des **variables spatiales** a un **impact limité** sur la probabilité de défaillance liée à la vitesse minimale.

Jusqu'à  $C_v = 0.15$ , les valeurs de  $P_{fvmin}$  restent très faibles dans les deux cas, bien **en dessous du seuil critique de  $10^{-3}$** .

À partir de  $C_v = 0.2$ , la probabilité atteint **0.0011**, franchissant légèrement le seuil, puis augmente progressivement jusqu'à **0.0356 (CHW = 95)** et **0.0386 (CHW variable)** à

$C_v = 0.3$ .

La **faible différence entre les deux courbes** montre que la **distribution spatiale du CHW** n'affecte que marginalement ce critère. Cependant, la tendance à la hausse avec  $C_v$  indique que la **maîtrise de l'incertitude** reste essentielle pour garantir des vitesses suffisantes dans toutes les branches du réseau.

### III.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'appliquer la méthode de Hardy-Cross sur un réseau maillé d'adduction en eau potable, dans deux configurations : un réseau neuf ( $CHW = 150$ ) et un réseau ancien ( $CHW = 95$ ), en intégrant une incertitude sur la rugosité via une simulation de Monte Carlo à 500 000 itérations.

Les résultats montrent que le réseau neuf conserve une bonne fiabilité de fonctionnement, avec des vitesses généralement comprises entre 0,5 et 1,5 m/s, et des pressions qui restent au-dessus de 60mCE dans tous les tronçons. La probabilité de fonctionnement fiable reste proche de 1, même en tenant compte des incertitudes.

En revanche, dans le réseau ancien, la diminution du CHW induit une augmentation significative des pertes de charge, entraînant une baisse des pressions, parfois en dessous de 15 mCE dans certains tronçons critiques. La probabilité de fonctionnement chute alors à environ 0,65 dans certaines simulations, révélant une sensibilité accrue du réseau à la dégradation.

Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer les incertitudes dans les analyses hydrauliques pour évaluer les risques réels de dysfonctionnement et orienter les priorités de renouvellement des conduites.

En effet, dans un calcul déterministe classique, l'ingénieur s'attèle juste à vérifier si le réseau est conforme aux exigences technique en considérant les valeurs moyennes des paramètres hydraulique. Cette manière de faire ne nous permet pas d'estimer le risque encourus. C'est justement le rôle des approches probabilistes qui permettent d'estimer la probabilité de tel ou tel évènements.

### ***Conclusion générale :***

Dans un contexte où les réseaux d'alimentation en eau potable jouent un rôle essentiel pour répondre aux besoins des populations, leur dimensionnement et leur fiabilité deviennent des enjeux majeurs en hydraulique urbaine. Ce travail s'est inscrit dans cette logique, en combinant une approche déterministe et une approche fiabiliste pour évaluer le comportement d'un réseau maillé d'AEP.

La première partie de l'étude a permis de poser les fondements théoriques indispensables : typologies de réseaux (ramifiés, maillés, mixtes), principes hydrauliques (équations de continuité et d'énergie, pertes de charge) et méthodes de calcul classiques, notamment la méthode de Hardy-Cross, utilisée pour résoudre le réseau étudié. Les résultats déterministes ont montré que les vitesses restaient dans l'intervalle recommandé de 0,5 à 1,5 m/s, et que la pression dans le réseau, bien qu'acceptable, pouvait localement approcher les seuils critiques (par exemple, une pression de 20,26 m observée en aval du tronçon N3-N4 en réseau ancien).

Dans un second temps, nous avons appliqué une démarche fiabiliste visant à tenir compte de l'incertitude liée à un paramètre hydraulique sensible, à savoir le coefficient de rugosité Hazen-Williams (CHW). Ce choix s'explique par l'impact significatif que peut avoir cette variable sur les pressions de service au sein du réseau. L'objectif principal de ce travail était donc d'évaluer la sensibilité du réseau aux incertitudes sur cette donnée, et de mesurer les conséquences sur les performances hydrauliques du système.

En intégrant cette incertitude dans l'analyse, nous avons mis en évidence que même une variation modérée du CHW pouvait entraîner une dégradation notable des conditions de service, notamment en termes de pression minimale. Par exemple, pour un coefficient de variation de 0,3, la probabilité de défaillance sous ce critère atteignait 0,00014 pour le réseau neuf et 0,000138 pour l'ancien. En revanche, sous le critère de la pression maximale, le réseau ancien présentait une probabilité de défaillance bien plus élevée à long terme (17,5 %), traduisant une sensibilité accrue à la rugosité dans les canalisations vieillissantes.

Cela souligne l'intérêt d'adopter une vision probabiliste dans le dimensionnement des réseaux, afin de garantir un niveau de sécurité et de fiabilité acceptable dans le temps.

Ainsi, ce travail a permis de mieux comprendre l'apport de l'analyse fiabiliste dans le domaine de l'hydraulique, en montrant que le recours à une seule variable aléatoire bien

## *Conclusion générale*

---

choisie peut suffire à révéler les limites d'un dimensionnement purement déterministe. Cette démarche ouvre la voie à des conceptions plus robustes et mieux adaptées aux incertitudes réelles du terrain.

**Résumé :**

Ce mémoire porte sur l'analyse hydraulique et fiabiliste d'un réseau d'alimentation en eau potable (AEP). Il s'inscrit dans un contexte où la fiabilité des infrastructures hydrauliques devient une exigence essentielle pour garantir une distribution continue et sûre de l'eau.

Dans un premier temps, une étude théorique a été réalisée pour présenter les bases du calcul hydraulique des réseaux : typologies de réseaux (ramifiés, maillés, mixtes), principes de conservation (débit et énergie), méthodes de calcul classiques (comme Hardy-Cross) ainsi que les critères de performance hydraulique (pression, débit, vitesse, etc.).

Ensuite, le mémoire introduit la notion de fiabilité dans les systèmes d'AEP, en mettant en œuvre la méthode de simulation de Monte Carlo pour modéliser les incertitudes liées aux paramètres du réseau (demande en eau, rugosité, etc.).

Enfin, une application a été menée sur un cas d'étude réel modélisé sous MATLAB. Les calculs déterministes ont été comparés aux résultats fiabilistes à travers des courbes de probabilité de défaillance (pression et vitesse), permettant d'évaluer le comportement du réseau sous incertitudes. Cette approche aide à mieux orienter les choix de conception, d'exploitation et de maintenance des réseaux d'eau.

**Mots-clés :** Alimentation en eau potable, fiabilité, Hardy-Cross, Monte Carlo, réseau maillé, simulation, MATLAB.

## ملخص

يتناول هذا البحث تحليلاً هيدروليكيًا وتحليلاً للموثوقية لشبكة توزيع مياه الشرب. ويأتي في ظل الحاجة المتزايدة لضمان استمرارية وجودة توزيع المياه.

في البداية، تم تقديم دراسة نظرية شاملة للأسس العلمية لتصميم الشبكات، بما في ذلك أنواع الشبكات (المتشعبة، المتداخلة المختلطة)، ومبادئ حفظ التدفق والطاقة، وطرق الحساب التقليدية مثل طريقة هاردي كروس، بالإضافة إلى معايير الأداء مثل الضغط، السرعة، والتدفق.

ثم تم التطرق إلى مفهوم الموثوقية في شبكات المياه، وتطبيق طريقة مونتي كارلو لمحاكاة العشوائية وعدم اليقين في المعطيات، مثل الطلب على المياه وخصائص الأنابيب.

، حيث تمت مقارنة النتائج الحتمية MATLAB وأخيرًا، تم تطبيق هذا التحليل على حالة دراسية حقيقية باستخدام برنامج بالنائج الاحتمالية من خلال منحنيات توضح احتمالية الفشل في الضغط والسرعة، مما يسمح بتقييم أداء الشبكة في ظل ظروف غير مؤكدة، ودعم اتخاذ القرارات المتعلقة بالتصميم والتشغيل والصيانة.

.الكلمات المفتاحية: شبكة مياه الشرب، الموثوقية، هاردي كروس، مونتي كارلو، شبكة متداخلة، المحاكاة، ماتلاب

.الكلمات المفتاحية: شبكة مياه الشرب، الموثوقية، هاردي كروس، مونتي كارلو، شبكة متداخلة، المحاكاة، ماتلاب

### **Abstract**

This thesis focuses on the hydraulic and reliability analysis of a drinking water distribution network (WDS), in a context where the robustness and continuity of water services are increasingly vital.

The work begins with a theoretical overview of WDS design, including network typologies (branched, looped, mixed), fundamental hydraulic principles (flow and energy conservation), classical calculation methods (e.g., Hardy-Cross), and key performance indicators (pressure, flow rate, velocity, etc.).

Then, the concept of system reliability is introduced, and the Monte Carlo simulation method is applied to model uncertainties related to network parameters such as water demand and pipe characteristics.

Finally, a real case study is implemented in MATLAB. Deterministic results are compared with probabilistic outcomes through failure probability curves (pressure and velocity), providing a better understanding of network behavior under uncertainty. This approach supports more informed decisions in the design, operation, and maintenance of water systems.

**Keywords:** Water distribution network, reliability, Hardy-Cross, Monte Carlo, looped network, simulation, MATLAB.

## Références bibliographiques :

[1] **Saidani, F., & Belacel, S.** (2019). *Analyse mécano-fiabiliste d'un réseau d'alimentation en eau potable* [Mémoire de Master]. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[2] **Mecaflux.** (s.d.). *Pertes de charge singulières – Définitions et exemples.*  
[https://www.mecaflux.com/pertes\\_de\\_charge\\_singulieres.htm](https://www.mecaflux.com/pertes_de_charge_singulieres.htm)

[3] **Le Garrec.** (s.d.). *Perte de charge – Présentation des phénomènes.*  
<https://www.legarrec.com/entreprise/perde-charge/>

[4] **Wikipedia.** (s.d.). *Méthode de Newton.*  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_de\\_Newton](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_de_Newton)

[5] **BELLAOUAR, A., & BELEULMI, S.** (2014). *Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité (FMD).* Polycopié pédagogique, Département de Génie des Transports, Faculté des Sciences de la Technologie, Université Constantine 1, Année académique 2013-2014.

[6] **HALES, S. & AGGAR, L.** (2022). *Analyse de la variabilité aléatoire de la rugosité sur la fiabilité d'un réseau d'eau : Cas du réseau de la nouvelle ville d'El Menéa.* Mémoire de fin d'études, encadré par Mme BOUZELHA Karima et M. DEHMOUS Hocine, [UMMTO].

[7] **SCHNEIDER, J.** (2006). *Introduction to Safety and Reliability of Structures.* IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering), Zurich.

[8] **YONNET, P., TOSCANO, R., MAISONNEUVE, P., et al.** (2006). *Modélisation de la fiabilité des macro-composants mécaniques à partir de modèles mathématiques et de réseaux – Comparaisons des méthodes.* In : **24<sup>e</sup> Machinery Vibration Seminar**

[9] **FAHSI, A.** (2009). *Application des techniques de fiabilité pour l'estimation des incertitudes des résultats de simulations numériques en hydrodynamique des rivières.* Mémoire de maîtrise en génie mécanique, M.Eng., Université de Montréal, 1<sup>er</sup> décembre 2009.

[11]MathWorks. (2023). Simulation Monte Carlo - MATLAB&Simulink.[]

[12]SEMAALI, S., & BEN AISSA, Y. (2019–2020). *Modélisation et renouvellement du réseau de distribution d'eau potable de la commune de Besbes, wilaya d'El Tarf* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba].