

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministre de l'enseignement supérieure et de recherche scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou**  
**Faculté de génie de la construction**  
**Département de génie civil**



**MEMOIRE DE MASTER PROFESSIONNEL**  
**Spécialité : Génie Civil**  
**Option : Constructions Hydrauliques et Aménagements**

**Contribution a l'analyse fiabiliste d'une  
adduction gravitaire  
Cas du siphon de Oued Aissi**

**Réalisé par :**

**Mlle REZKI Melissa**

**Mr BELABES Hafidh**

**Dirigé par :**

**Mme BOUZELHA Karima**

**Mr HAMMOUM Hocine**

**Promotion 2023/2024**

---

## **REMERCIEMENT**

---

C'est avec un réel plaisir et un grand enthousiasme que nous nous livrions à la rédaction de cette page. C'est l'opportunité de remercier toutes les personnes pour nous avoir aidé et soutenu tout au long de ce travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre promotrice Madame **BOUZELHA Karima**, professeur au département génie civil pour toutes les qualités avec lesquelles elle a dirigé ce travail, mais également pour le soutien et la confiance qu'elle nous a toujours témoignée, nous sommes reconnaissants pour sa patience, sa sympathie et sa disponibilité à tout moment ; nous sommes heureux de pouvoir lui exprimer ici nos sincères remerciements.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **HAMMOUM Hocine**, professeur au département de génie civil. Sur le plan scientifique ; nous le remercions de nous avoir fait profiter de sa rigueur scientifique, de ses conseils avisés et ses connaissances qui sont une source intarissable d'enrichissant. Nous tenons à souligner surtout les aspects humains de cette collaboration.

Nous remercions également :

- Monsieur **DEHMOUS Hocine** professeur au département de génie civil, de nous avoir le grand honneur de présider notre jury de soutenance.
- Monsieur **ALLICHE Amar**, chef de département de génie civil, d'avoir pris le temps d'examiner ce mémoire et de faire partie du jury de soutenance.
- Tous les **enseignants** de département de génie civil et plus particulièrement les enseignants de notre société **CHA**, pour la qualité de leur enseignement, leur générosité et la grande patience à notre égard.

Nous tenons à présenter nos respectueux remerciements à la **Direction des Ressources en Eau** de la wilaya de TIZI -OUZOU pour avoir mis à notre disposition la documentation et les informations nécessaires.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

---

## ***DÉDICACE***

---

Je dédie ce travail :

A mes très chers **Parents**, j'avoue que je n'aurais jamais pu arriver jusque-là sans leurs sacrifices ; tous les mots du monde ne s'auraient exprimer la profonde gratitude que je leurs témoigne pour tous les efforts et sacrifices qu'ils n'ont jamais cessé de consentir pour moi instruction et mon bien être. Que vous trouviez en ces mots la profonde estime que j'ai pour eux. je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternel et infini amour.

A mes chers (es) **frères et sœurs** pour leurs présence et encouragements; les mots me manquent pour exprimer l'immense amour que je vous porte.

A ma deuxième **famille CHA**, pour tous les meilleurs moments et souvenirs que nous avons partagés, et surtout mon **binôme**.

**Melissa**

---

## *DÉDICACE*

---

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur soutien inconditionnel et leur amour tout au long de mon parcours universitaire. Leur encouragement m'a permis de surmonter les défis et de réaliser mes rêves.

A mes amis, pour leur compréhension et leur amitié précieuse.

Aux résidents de la chambre B38 REHAHLIA 2

A ma binôme

A ceux qui vont lire ce modeste travail dans le futur

**HAFIDH**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Remerciement</b>          |  |
| <b>Dédicaces</b>             |  |
| <b>Liste des tableaux</b>    |  |
| <b>Liste des figures</b>     |  |
| <b>Introduction générale</b> |  |

## **Chapitre 1 : Modèle Numérique du Terrain**

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 1  |
| 1.1 Définitions.....   | 1  |
| 1.2 . Construction du modèle numérique de terrain.....                                 | 2  |
| 1.2.1. Calage de la carte (Oued aissi – Takhoukht – Mechtras) à l'échelle 1/25000..... | 2  |
| 1.3. Génération d'un modèle numérique de terrain (MNT).....                            | 8  |
| 1.3.1. Génération d'un levé topographique à partir d'une carte d'état-major calée..... | 8  |
| 1.3.2. Analyse thématique.....   | 9  |
| 1.3.3. Réalisation du Modèle Numérique du Terrain.....                                 | 14 |
| 1.3.4. Création de modèle numérique de terrain.....                                    | 16 |
| Conclusion.....  | 18 |

## **Chapitre 2 : Calcul déterminée d'une adduction gravitaire**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 19 |
| 2.1. Description de schéma d'adduction.....                   | 19 |
| 2.2. Caractéristiques du réseau d'adduction.....              | 22 |
| 2.2.1. Débit.....   | 22 |
| 2.2.2. Longueurs des conduites.....                           | 22 |
| 2.2.3. Nœuds.....   | 22 |
| 2.3. Calcul hydraulique du réseau d'adduction gravitaire..... | 22 |
| 2.3.1. Calcul du diamètre économique.....                     | 22 |
| 2.3.2. Calcul de la vitesse.....                              | 23 |
| 2.3.3. Calcul des pertes de charge.....                       | 23 |
| Pertes de charge linéaires.....                               | 23 |
| Pertes de charges singulières $J_s$ .....                     | 24 |
| Pertes de charge totale.....                                  | 24 |
| 2.3.4. La charge aval.....                                    | 24 |
| 2.3.5. Calcul des pressions au sol.....                       | 24 |
| 2.3.6. Hauteur géométrique.....                               | 24 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.7. Calcul de la pression maximale et minimale .....        | 25        |
| a- Cas de surpression.....                                     | 25        |
| b- Cas de dépression .....                                     | 25        |
| 2.3.8. Pression nominale .....                                 | 26        |
| 2.3.9. Charge admissible .....                                 | 26        |
| 2.4. Résultats et analyse .....                                | 28        |
| 2.4.1. Analyse du réseau en service normal .....               | 36        |
| 2.4.2. Analyse du réseau à l'arrêt brusque .....               | 45        |
| 2.4.3. Analyse de la durée de vie du siphon d'Oued Aissi ..... | 47        |
| Conclusion .....   | 48        |
| <b>Chapitre 3 : Analyse Fiabiliste</b>                         |           |
| Introduction.....  | 50        |
| 3.1. Définition de la fiabilité .....                          | 50        |
| 3.2 Fonction d'état limite.....                                | 50        |
| 3.3. Variable aléatoire et loi de distribution.....            | 51        |
| 3.3.1. Variables aléatoires .....                              | 51        |
| 3.3.2. Lois de distribution.....                               | 51        |
| 3.4. Probabilité de défaillance.....                           | 53        |
| 3.5. Application à un réseau d'eau potable.....                | 55        |
| 3.5.1 :Génération de la variable aléatoire.....                | 56        |
| 3.5.2 :Choix de la fonction d'état limite .....                | 57        |
| 3.5.3 :Calcul de la probabilité de défaillance .....           | 57        |
| 3.5.4 : Résultats et discussions .....                         | 59        |
| Conclusion.....  | 61        |
| <hr/>  |           |
| <b>Conclusion générale .....</b>                               | <b>62</b> |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Coordonnées des points de calage.....                                | 7  |
| Tableau 2.1 : Débits transitant dans le réseau d'adduction.....                    | 22 |
| Tableau 2.2 : coefficient dépendant de la nature de matériau de la conduite .....  | 25 |
| Tableau 2.3 : Résultats de calcul du réseau à court terme $C_{hw}=136$ .....       | 29 |
| Tableau 2.4 : Résultat de calcul de réseau à court terme (suite). .....            | 33 |
| Tableau 2.5: Résultats de calcul du réseau à long terme ( $C_{hw} =95$ ). .....    | 37 |
| Tableau 2.6 : Résultats de calcul du réseau à long terme $C_{hw} =95$ (suite)..... | 41 |
| Tableau 3.1 : Probabilité de défaillance en fonction de temps et de $C_v$ .....    | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1 : Carte d'Etat-major.....   | 2  |
| Figure 1.2 : Image Raster non callée.....  | 3  |
| Figure 1.3 : Affichage de l'image non calée. ....  | 3  |
| Figure 1.4 : Activation d'un mode de fonctionnement spéciale de Mapinfo. ....  | 4  |
| Figure 1.5 : Choix du système de projection. ....  | 4  |
| Figure 1.6 : Unités de mesure. ....  | 5  |
| Figure 1.7 : La position des points de calage. ....  | 6  |
| Figure 1.8 : Information sur les points de calage.....   | 7  |
| Figure 1.9 : Vérification de la qualité de calage. ....  | 8  |
| Figure 1.10 : Semi des points du levé topographique. ....  | 9  |
| Figure 1.11 : Table des coordonnées des points topo. ....  | 10 |
| Figure 1.12 : Tableau des coordonnées géométrique.....   | 11 |
| Figure 1.13 : Créer carte thématique-étape 1/3. ....   | 12 |
| Figure 1. 14 : Créer carte thématique -étape 2/3.....  | 12 |
| Figure 1.15 : Créer carte thématique -étape 3/3.....   | 13 |
| Figure 1.16 : Analyse thématique des altitudes. ....   | 14 |
| Figure 1.17 : Fenêtre de surfer.....   | 14 |
| Figure 1.18 : Boite de dialogue.....   | 15 |
| Figure 1.19 : Boite de dialogue GridData. ....   | 15 |
| Figure 1.20 : Barre d 'outils.....   | 16 |
| Figure 1.21 : Boite de dialogue Open Grid. ....  | 16 |
| Figure 1.22 : Courbe de niveau.....  | 17 |
| Figure 1.23: Le modèle numérique de terrain en 3D. ....  | 17 |
| Figure 2.1 : Croquis d'itinéraire de l'adduction gravitaire, sur fond de carte d'Etat major. ....                            | 20 |
| Figure 2.2 : Profil en long de l'adduction gravitaire.....   | 21 |
| Figure 2.3: Organigramme du calcul hydraulique d'une adduction gravitaire.....   | 27 |
| Figure 2.4 : Disposition de la ligne piézométrique par rapport au profil du terrain naturel lors de la mise en service. .... | 36 |
| Figure 2.5 : Disposition de la ligne piézométrique par rapport au profil du terrain naturel à long terme.....                | 44 |
| Figure 2.6 : Pressions exercées à l'arrêt brusque du réseau. ....  | 46 |
| Figure 2.7 : Etude de variation de la cote piézométrique.....  | 47 |
| Figure 2.8 : Détermination de durée de vie de projet.....  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3.1 : La densité de probabilité (gauche) et la fonction de répartition (droite) de la loi normale (Hales et Aggar, 2023)..... | 52 |
| Figure 3.2: Méthode d'analyse fiabiliste (Lemaire, 2005).....  | 53 |
| Figure 3.3 : Illustration de la simulation de Monté Carlo (Aoues, 2008). ....  | 54 |
| Figure 3.4: Approximation FORM (Aoues, 2008) .....   | 55 |
| Figure 3.5 : Approximations FORM et SORM (Aoues, 2008).....  | 55 |
| Figure 3.6 : Fonction de densité de loi normale . ....   | 56 |
| Figure 3.7 : Fonction de répartition de la loi normale. ....   | 57 |
| Figure 3.8: Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance. ....  | 58 |
| Figure 3.9: Variation de la probabilité de défaillance en fonction de nombre de tirage.....  | 59 |
| Figure 3.10 : Probabilité de défaillance en fonction de coefficient de variation.....  | 60 |

Une adduction gravitaire est extrêmement sensible au relief topographique, particulièrement dans notre région de Kabylie où les villages sont perchés au sommet de collines ou de montagnes.

Le transfert gravitaire de l'eau via des conduites d'adduction d'un réservoir vers un autre et donc d'un sommet vers un autre conduit à suivre des itinéraires très souvent complexes et sinueux, si bien que les profils en long deviennent une succession de points bas et de points hauts. L'erreur qu'un ingénieur non expérimenté peut facilement faire est d'ignorer ces particularités et se focaliser uniquement sur les côtes de réservoirs d'arrivée et de départ.

Le problème est d'autant plus crucial que lorsque l'on a à faire à un siphon où l'eau transférée doit accomplir une très grande chute jusqu'au point bas pour enfin remonter au réservoir d'arrivée. Au niveau de ce point bas du siphon, règne une pression hydrostatique extrême mettant à rude épreuve la canalisation. Ce point est encore aggravé par le coup de bélier.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au siphon de Oued Aissi qui est une conduite d'adduction qui relie le réservoir de Larbaa Nath Irathen à celui de Béni Douala sur une longueur de 15,2482 km. Cette conduite a desservi le projet des 100 villages, qui a démarré en 1946, et est alimenté à partir du barrage de Souk El Djema (Ain El Hammam).

Ce projet a repris après l'indépendance vers 1963. La conduite au niveau du siphon de PN 100 a été emportée par la crue d'avril 1974, puis, elle a été réparée et remise en service.

Au vu de des pressions nominales importantes et la vulnérabilité de la conduite à cause de la traversée de l'oued, cette adduction a été désaffectée fin 1976 d'après le témoignage d'un ancien ingénieur à la retraite.

A travers ce modeste travail, nous tâcherons d'apporter les explications techniques et hydrauliques à ces ruptures répétées ayant amené la DHW à abandonner ce siphon. Pour ce faire, nous structurons notre mémoire comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la génération d'un modèle numérique de terrain (MNT) suivant l'itinéraire de la conduite, à partir d'un semi de point réalisé sur des cartes d'état-major en utilisant les logiciels Mapinfo et Surfer. L'objectif est de montrer les chutes importantes d'altitudes au niveau du Siphon, pouvant échapper à l'ingénieur.

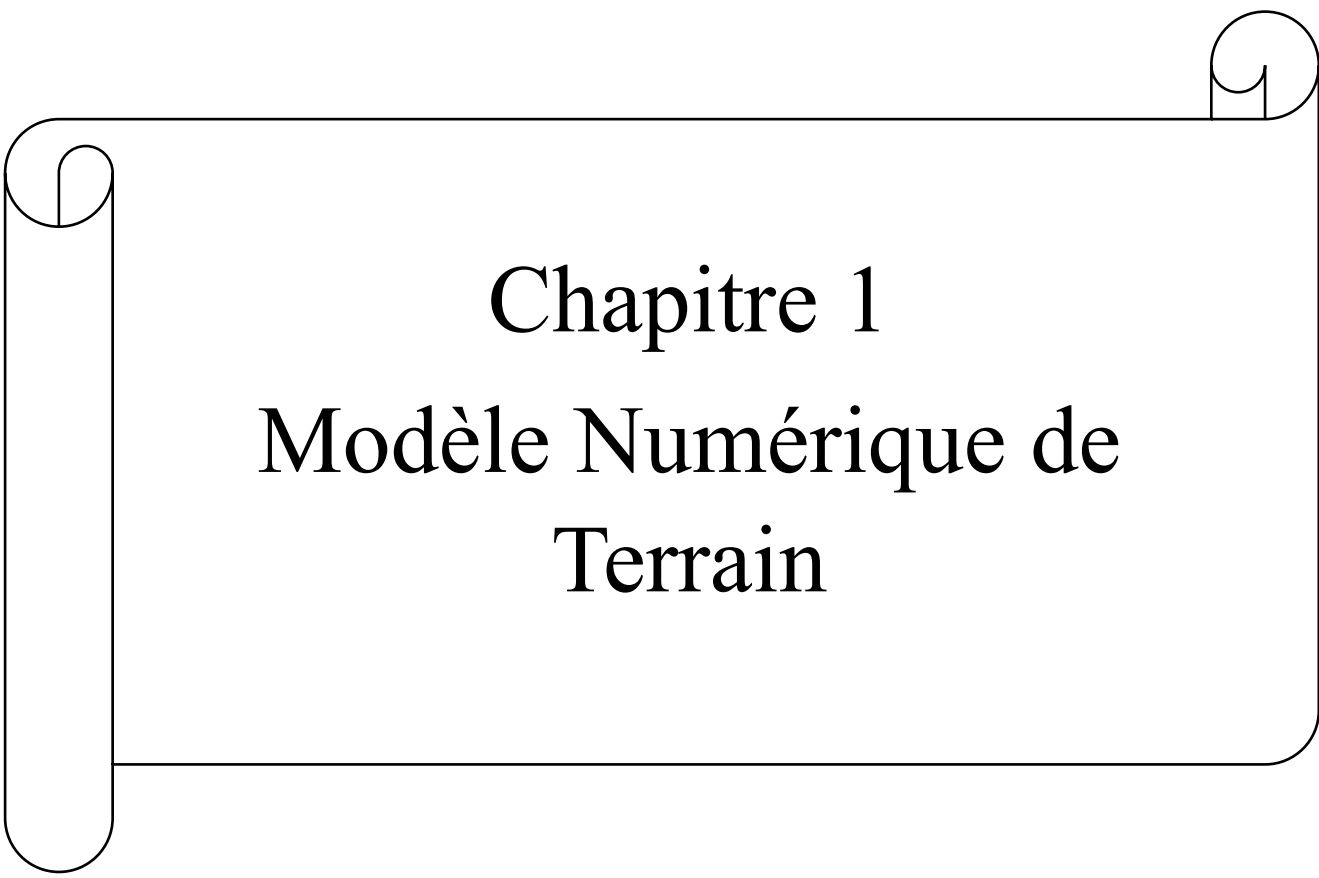
Le deuxième chapitre sera dédié au calcul déterministe du réseau d'adduction (Siphon) de Oued Aissi en service normale (court et à long terme) et à l'arrêt brusque des vannes. Une analyse de la durée de vie du réseau est effectuée

Au troisième et dernier chapitre, une analyse fiabiliste sera conduite en tenant compte de l'incertitude liée de la rugosité des conduites «  $C_{hw}$  ».

## *Introduction générale*

La fonction d'état limite sera dictée par les conditions de service normal du réseau d'adduction. La probabilité de défaillance du réseau vis-à-vis de ces états limites sera calculée par la méthode des simulations de Monté Carlo classique et sera comparée à la probabilité admise pour la structure de génie civil.

En fin, une conclusion générale relatera les principaux résultats de notre travail.



# Chapitre 1

## Modèle Numérique de Terrain

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de générer un modèle numérique de terrain (MNT) suivant l'itinéraire de la conduite (Larbaa Nath Irathen - Beni douala) à partir d'un semi de point réalisé sur la carte d'état-major (Oued Aissi-Takhoukht-Mechtras) à l'échelle 1/25000 et cela en réalisant un SIG (Système d'Informations Géographiques) sur le logiciel Mapinfo. A cet effet, l'itinéraire en question sera présenté ainsi que les étapes de calage de la carte d'état-major utilisées.

### 1.1 Définitions

Nous présentons, dans ce qui suit, quelques définitions pour la compréhension du projet en question :

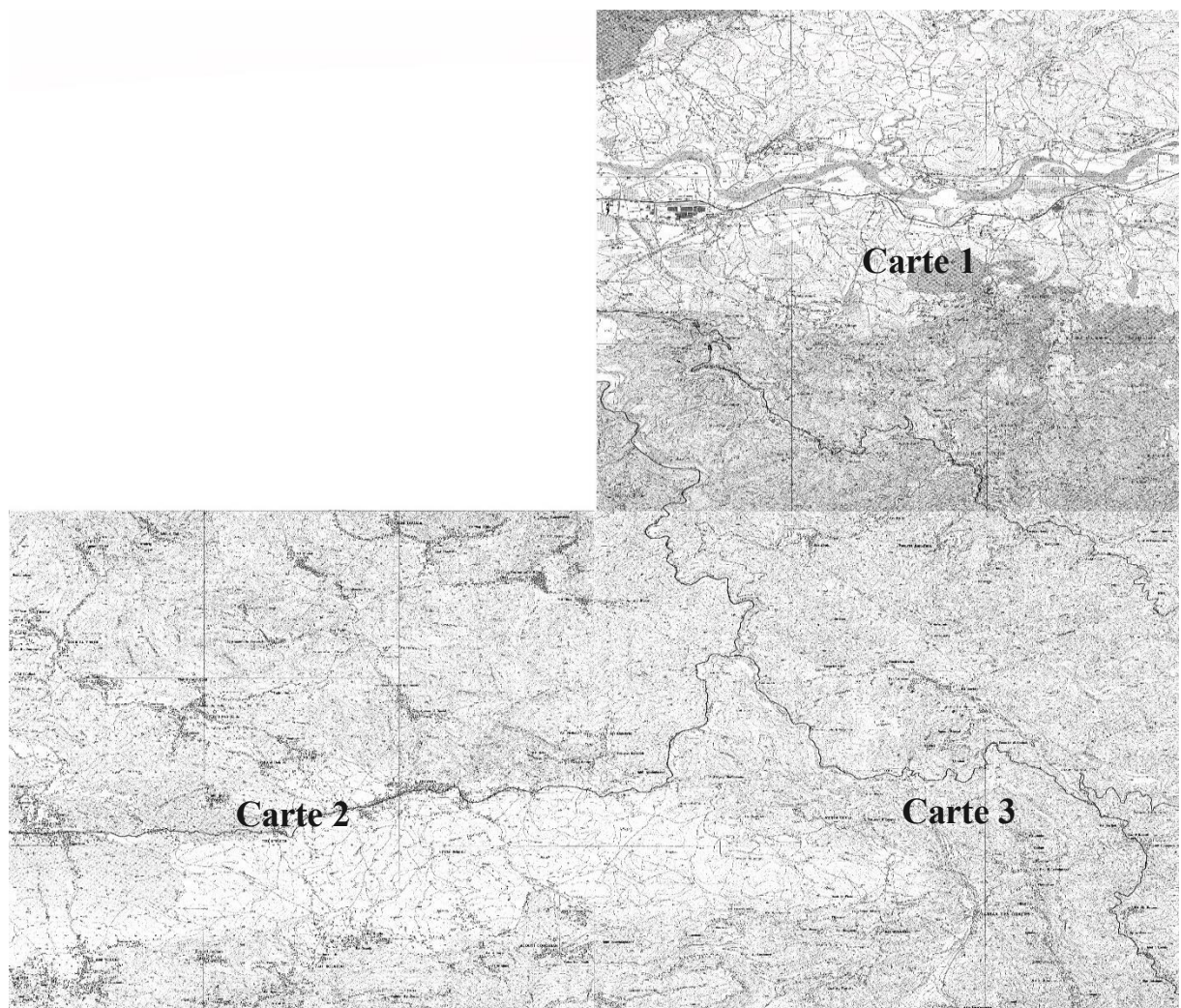
- **SIG** : Un SIG est système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes d'aménagement et de gestion (Hammoum, et Bouzida, 2010).
- **Adduction** : Acheminement de l'eau depuis la zone de captage jusqu'à proximité de la zone d'utilisation ; il peut avoir lieu avant le traitement. Cette adduction s'effectue par un écoulement en charge, autrement dit dans les conduites sous pression (Bonnin, 1982).
- **Le coup de bélier** : C'est une onde de pression, positive ou négative, provoquée par une variation du régime hydraulique, et se propageant dans le milieu constitué par l'eau et la conduite qui la contient. Cette onde est caractérisée par une vitesse de propagation ou célérité, qui ne dépend pas en première approximation de l'amplitude de l'onde lorsque celle-ci est faible (Bonnin, 1986).
- **Fiabilité** : Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée. Le terme est aussi utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou d'un pourcentage de succès (AFNOR, 1988).

## 1.2 . Construction du modèle numérique de terrain

### 1.2.1. Calage de la carte (Oued aissi – Takhoukht – Mechtras) à l'échelle 1/25000

La carte d'état-major de (Oues Aissi -Thakhoukht -Mechtras) est à l'échelle 1/25000, est importée dans le logiciel Mapinfo comme image Raster.

Sachant que, une juxtaposition de trois cartes d'état-major a été nécessaire pour couvrir la zone d'étude.

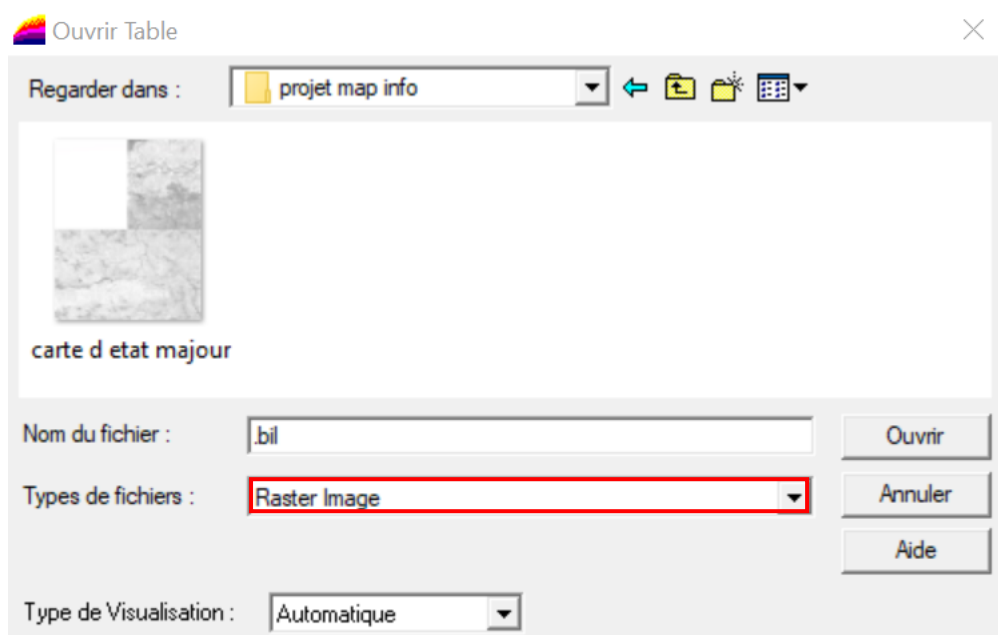


**Figure 1.1 : Carte d'Etat-major**

Pour commencer la procédure de calage de la carte, nous exécutons la commande suivante :

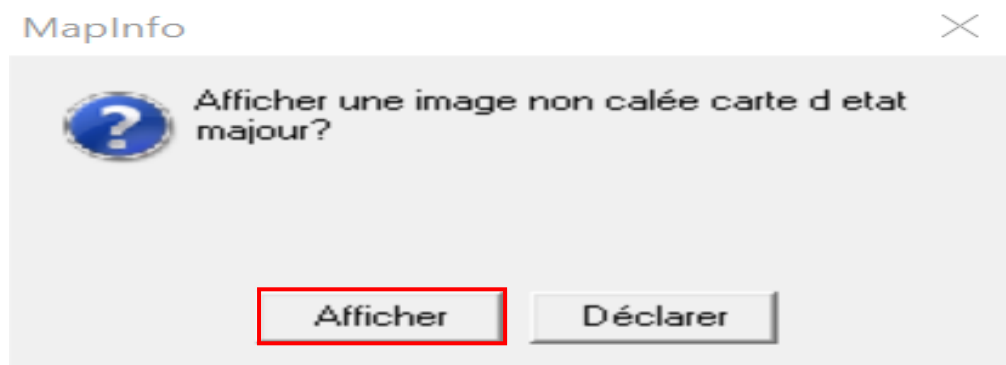
**a- Ouvrir l'image en précisant l'ouverture d'une image Raster :**

- Fichier → ouvrir Table → image Raster.



**Figure 1.2 : Image Raster non calée.**

Mapinfo demande l'affichage ou non de l'image non calée. Choisissez afficher.



**Figure 1.3 : Affichage de l'image non calée.**

### **b- Activation d'un mode de fonctionnement spéciale**

- Choisir : Table → Image raster → Modifier calage.

Afin d'activer un mode de fonctionnement spécial de Mapinfo.

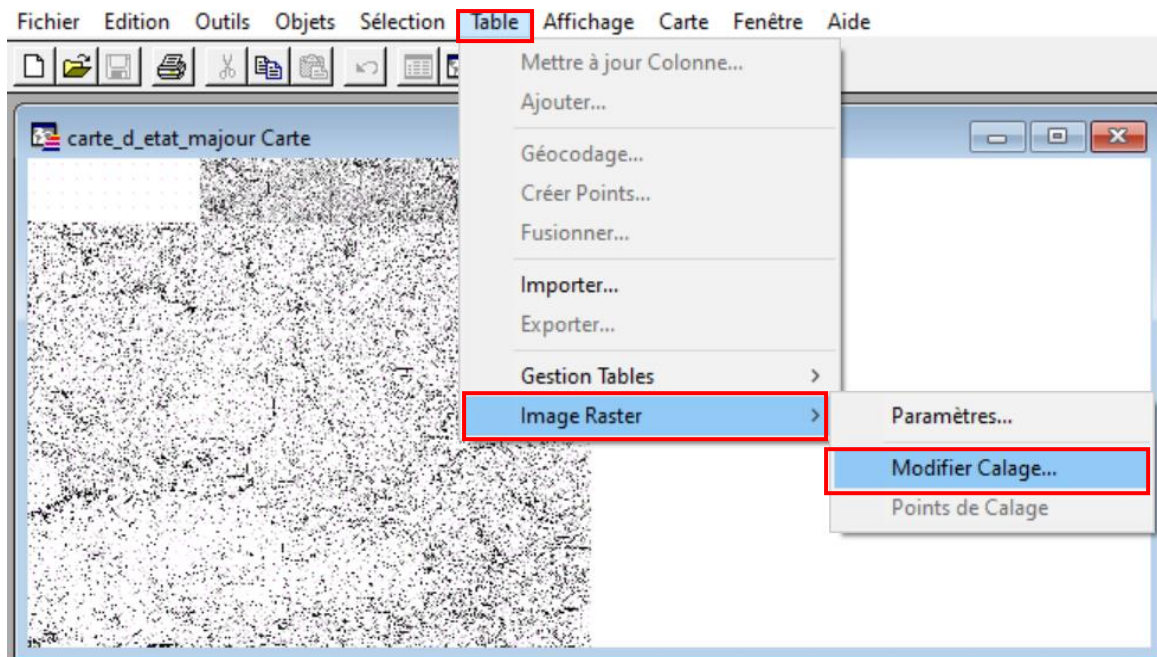


Figure 1.4 : Activation d'un mode de fonctionnement spéciale de Mapinfo.

c- **Choix du système de projection et l'unité de mesure à utiliser**

- Cliquer sur bouton →Projection, et utiliser le système de projection suivant :
  - Catégorie : Universel transverse Mercator (WGS84).
  - Projection: UTM Zone31, Northern hemisphere (WGS-84).

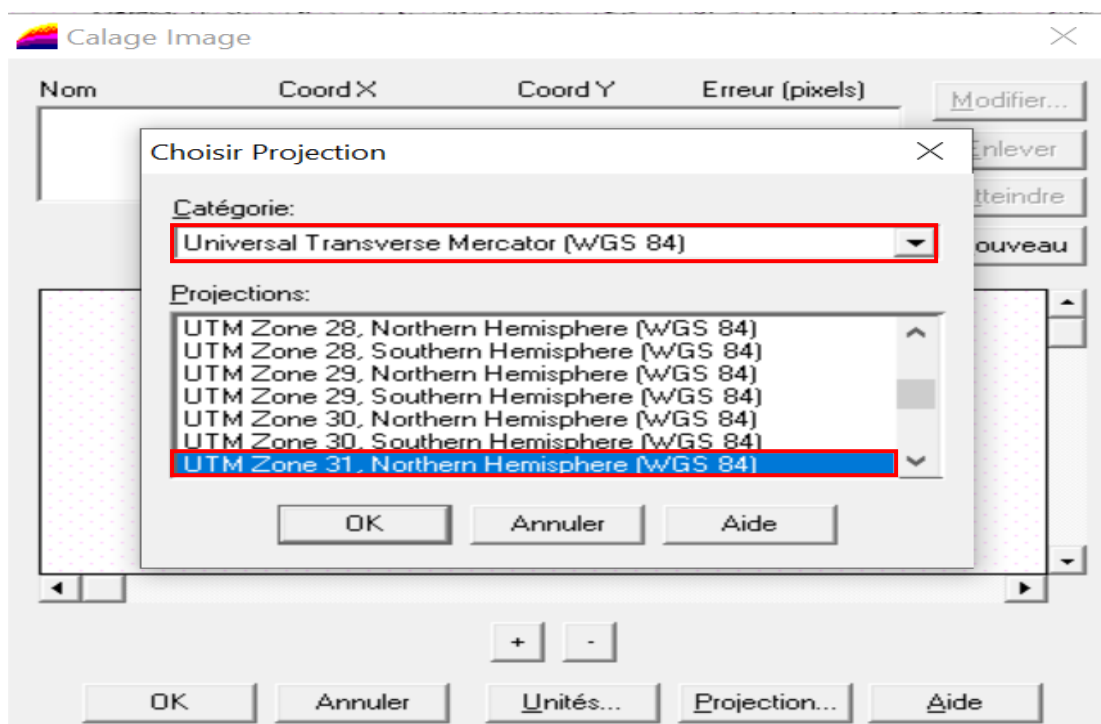


Figure 1.5 : Choix du système de projection.

- Cliquer sur Ok,
- Puis nous cloquons sur unités et nous choisissons « mètres ».

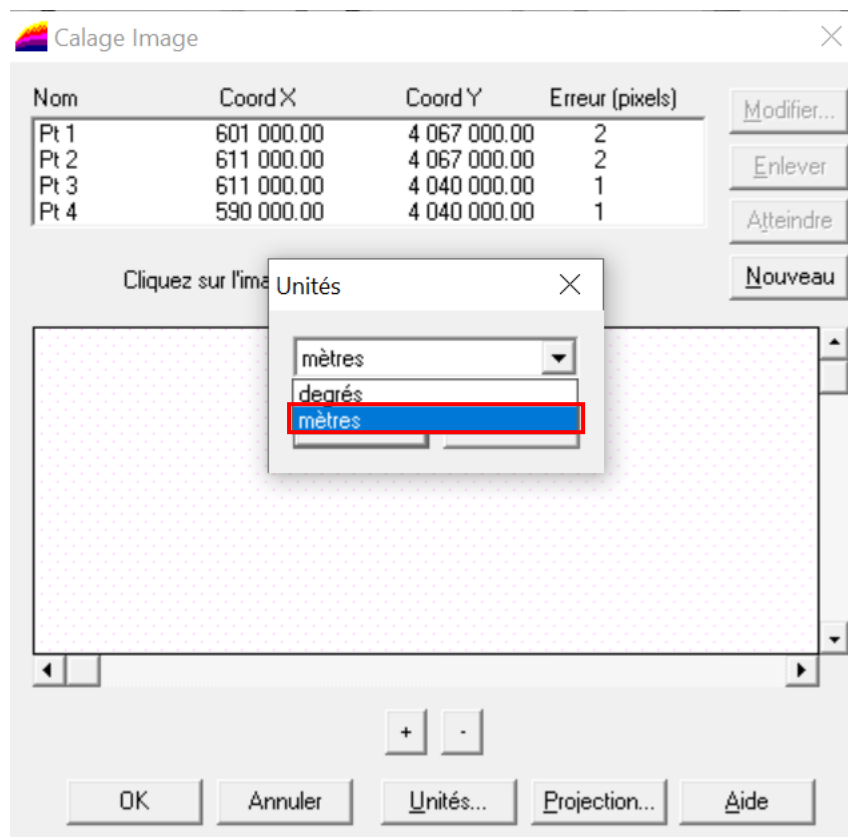
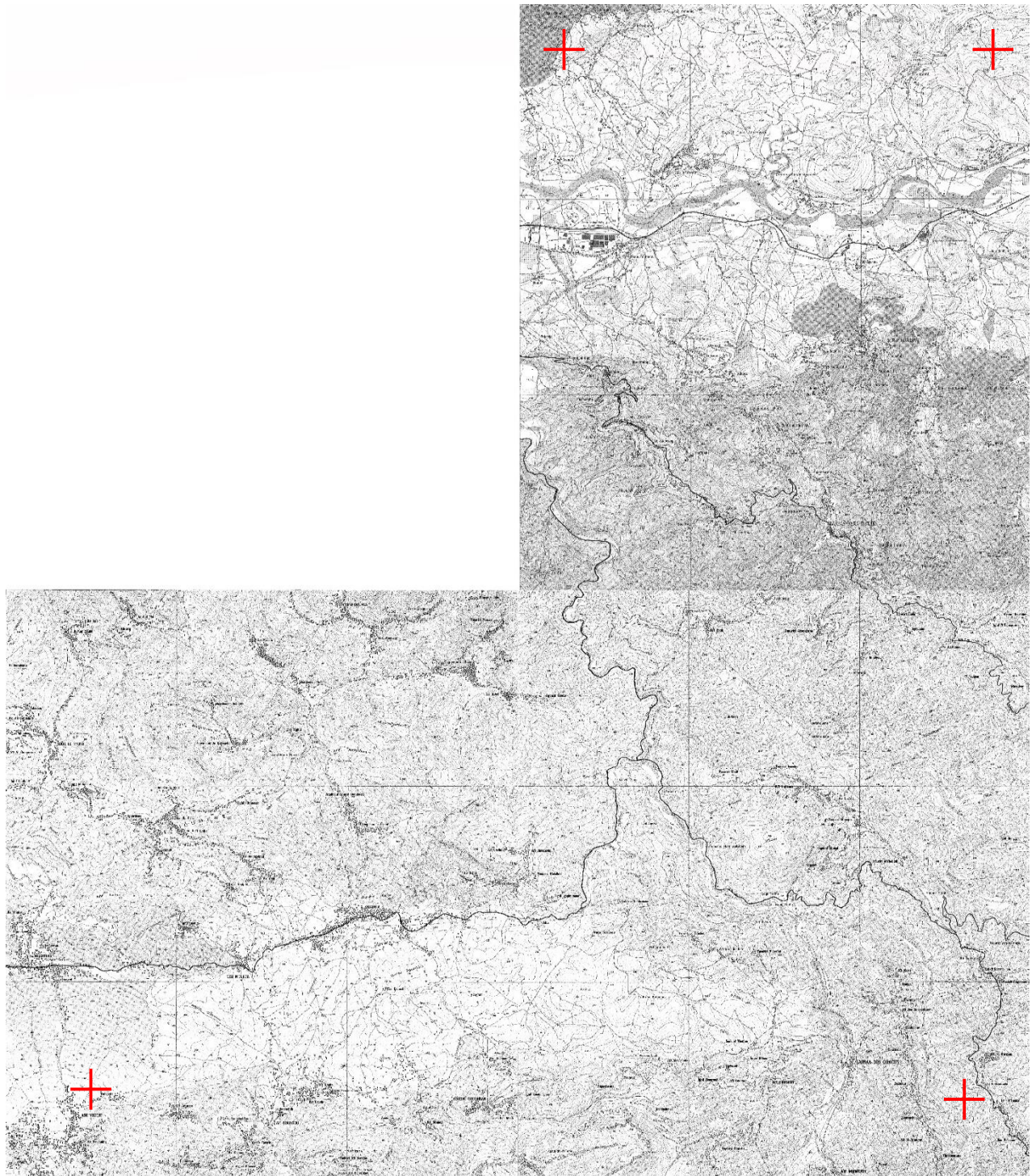


Figure 1.6 : Unités de mesure.

#### d- Choix des quatre (04) points de calage

Pour caler notre image raster, un minimum de 4 points de calage est nécessaire. Pour chaque point nous indiquons ses coordonnées dans le système de projection défini. Pour plus de précision, les points doivent être localisés de préférence au voisinage des 4 coins éloignés de la carte, et en veillant à ce que les points ne soient pas alignés.



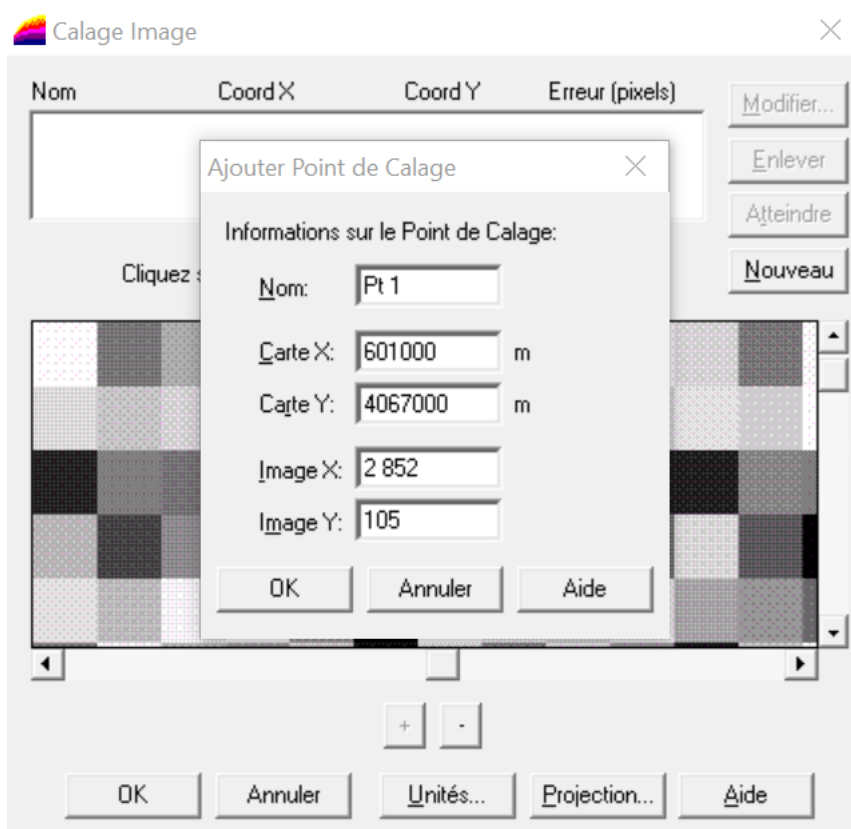
**Figure 1.7 : La position des points de calage.**

Les coordonnées des quatre points de calage sont données dans le tableau 1.1 suivant :

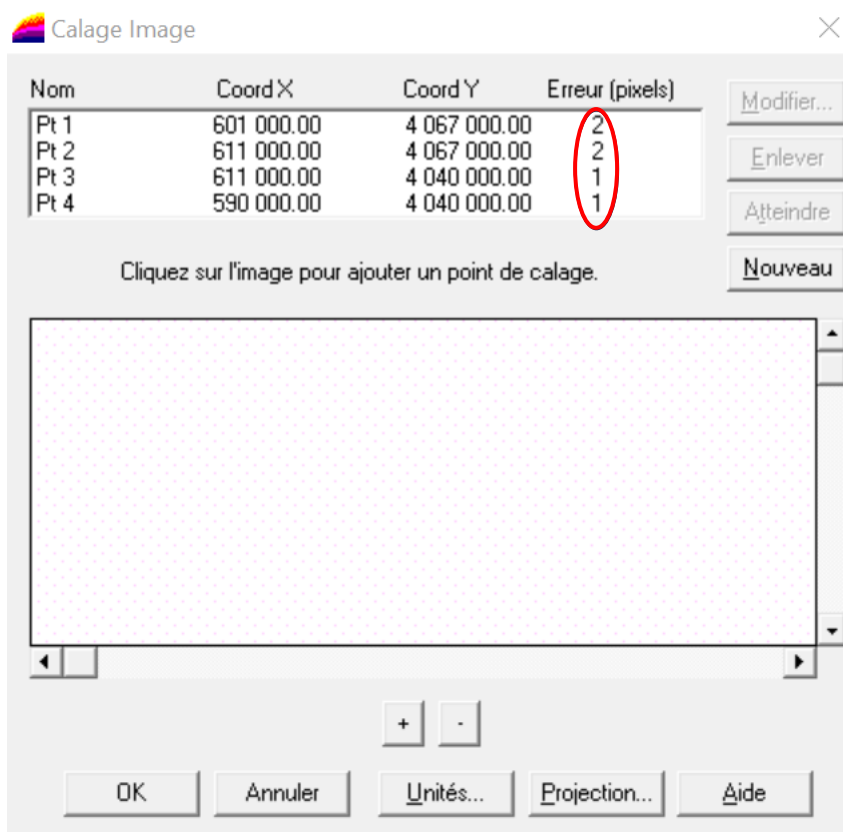
**Tableau 1.1 : Coordonnées des points de calage.**

| N° du point | X(km) | Y(km) |
|-------------|-------|-------|
| 1           | 601   | 4067  |
| 2           | 611   | 4067  |
| 3           | 611   | 4040  |
| 4           | 590   | 4040  |

- Cliquer sur le premier point et introduire ses coordonnées figure 1.7. Procéder de la même manière pour les trois autres points restants.

**Figure 1.8 : Information sur les points de calage.**

La qualité du calage est vérifiée dans la colonne erreur (Figure 1.9).



**Figure 1.9 : Vérification de la qualité de calage.**

Une fois la qualité vérifiée, la carte est considérée correctement calée.

### 1.3. Génération d'un modèle numérique de terrain (MNT)

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation 3D de la surface d'un terrain, créée à partir des données altimétriques. Nous présentons ci-dessous les étapes de génération du MNT de la conduite d'AEP (Larbaa Nath Irathen - Beni Douala).

#### 1.3.1. Génération d'un levé topographique à partir d'une carte d'état-major calée

Pour générer un levé topographique, nous ouvrons la carte calée et nous procédons à un semi de points au long de la conduite, à différentes altitudes. Le nombre de point semé est en fonction de la précision recherchée. Dans le cadre de notre projet un membre de 1406 points est généré (figure 1.10). Pour chaque point semé, ses coordonnées X, Y, Z sont relevées et portées dans un fichier Excel.

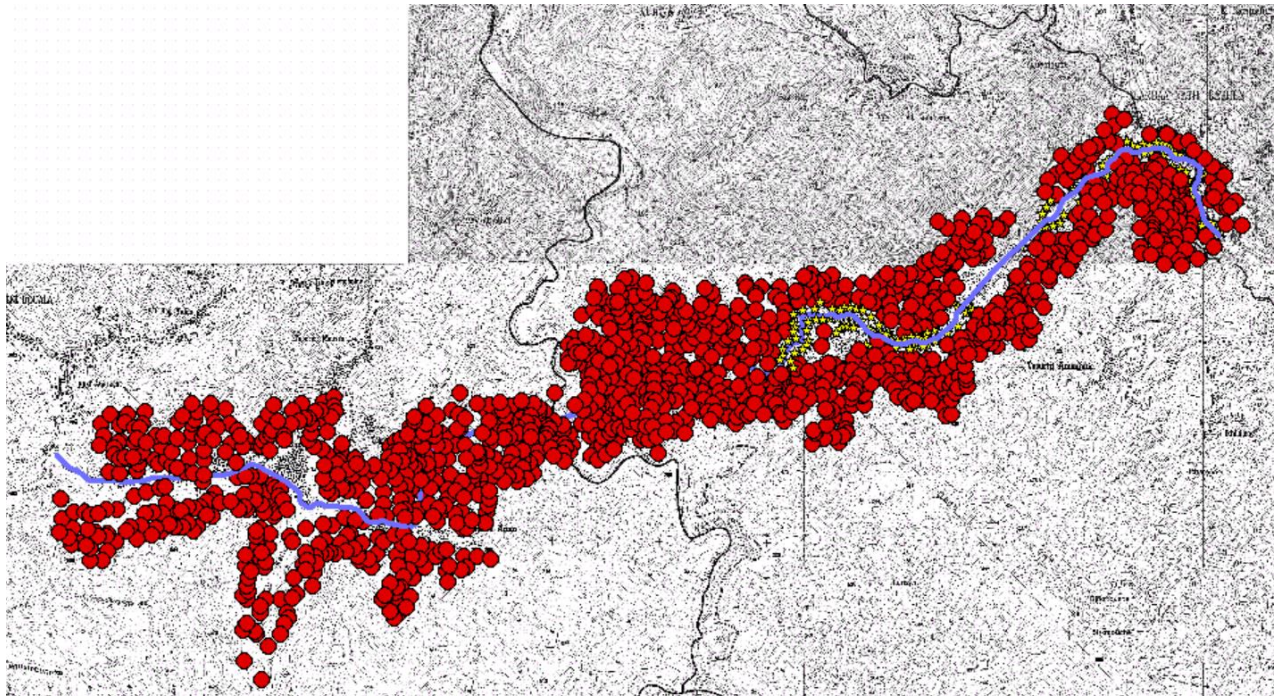


Figure 1.10 : Semi des points du levé topographique.

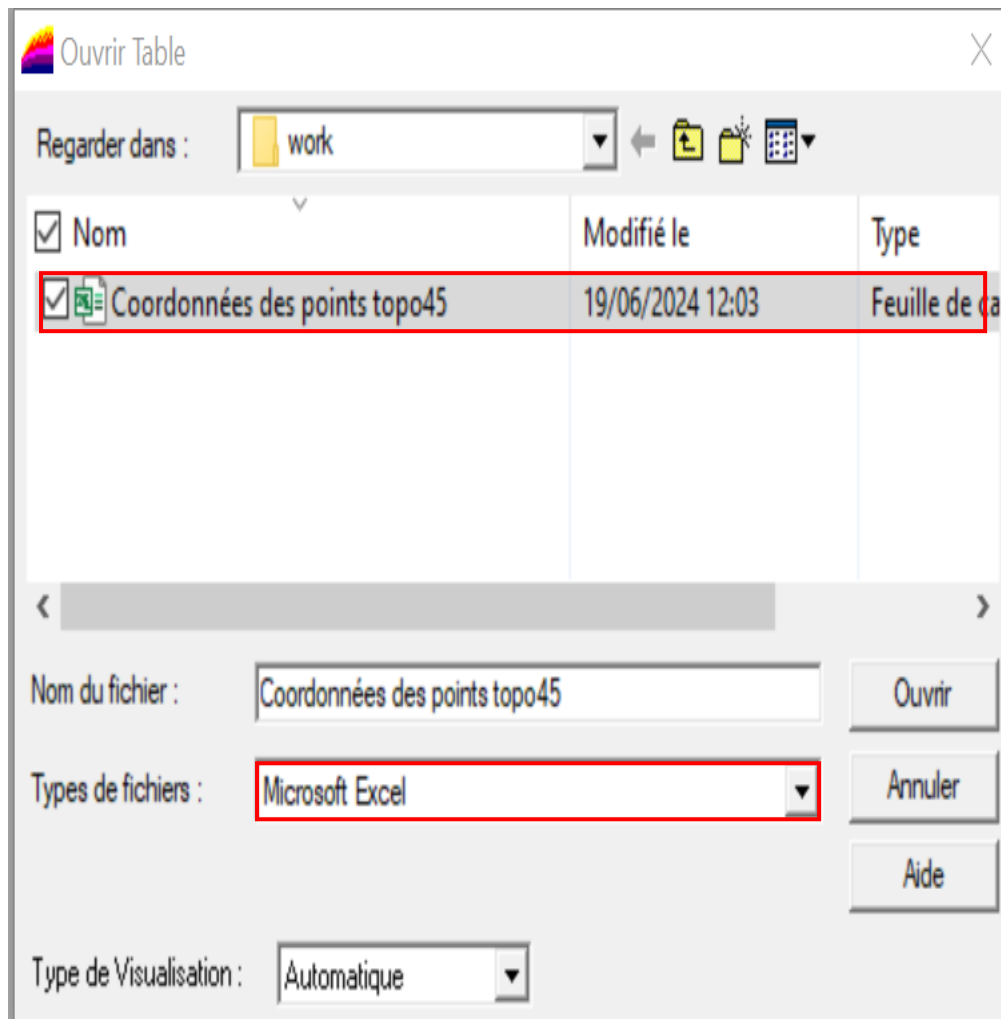
### 1.3.2. Analyse thématique

Faire une analyse thématique consiste à donner un sens à une représentation graphique. Aussi, pour rester toujours dans les cartes topographiques, nous pouvons les traiter par une analyse thématique, en considérant le type de valeurs individuelles.

Les étapes à suivre pour créer une carte analyse thématique sont les suivantes :

Pour ouvrir le fichier de données, nous exécutons la commande :

- Fichier → Ouvrir tables coordonnées des points topo ;



**Figure 1.11 : Table des coordonnées des points topo.**

- Nous sélectionnons type de fichier →Microsoft Excel →ouvrir ;
- Pour créer la carte, nous faisons : table →créer point ;

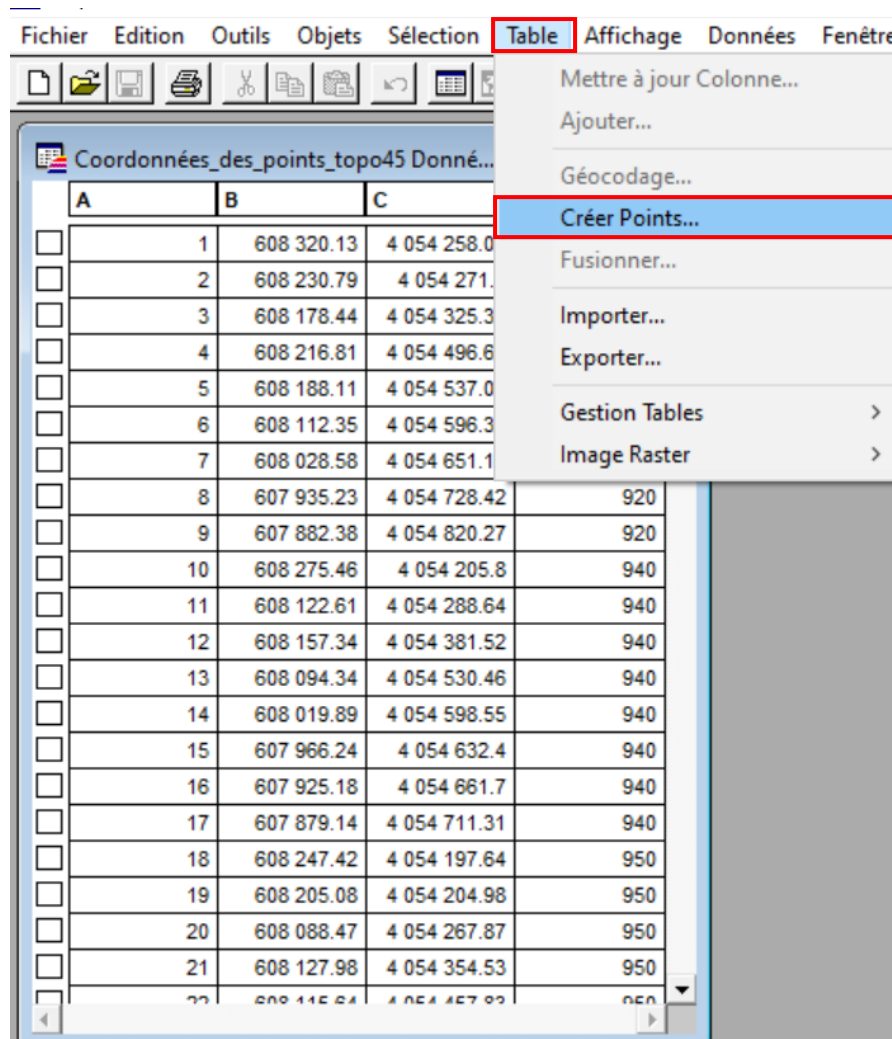


Figure 1.12 : Tableau des coordonnées géométrique.

Pour l'identification des colonnes :

- Nous faisons correspondre les coordonnées X avec la case de la colonne B de la base de données attributaire ;
- Nous faisons correspondre les coordonnées Y avec la case de la colonne C de la base de données attributaire ;
- Nous choisissons le symbole des points, la couleur ainsi que la police ;
- Nous cliquons sur le bouton projection pour choisir le système de projection ;
- Pour les besoins de notre application nous choisissons dans le listing :
  - . **Catégorie : Universal** Transverse Mercator WGS84.
  - . **Projection: UTMzone31**, Northern hemisphere (WGS84).

Pour semer les points topographiques et représenter la carte, nous exécutons la commande suivante :

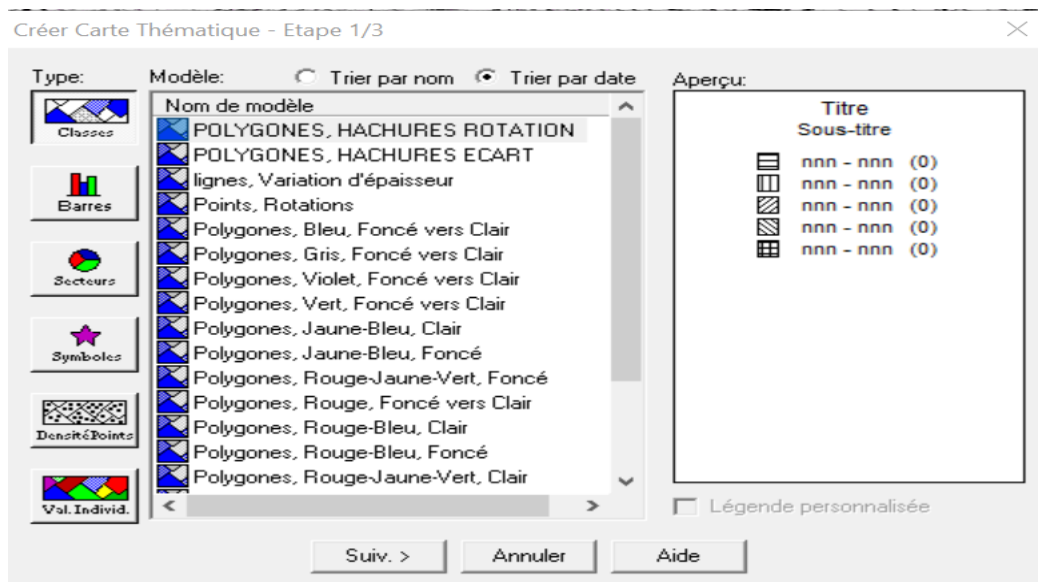
- Fenêtre →carte ;

Et le semi des points topographiques apparaît le long du cheminement.

Maintenant que le semi est réalisé, nous nous intéressons à l’analyse thématique du levé topographique.

- Nous exécutons la commande suivante : Carte → Analyse thématique ;

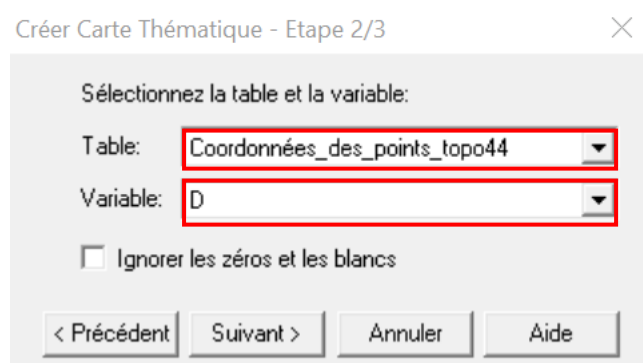
La fenêtre de dialogue (Créer carte thématique -étape 1/3) apparaît.



**Figure 1.13 : Créer carte thématique-étape 1/3.**

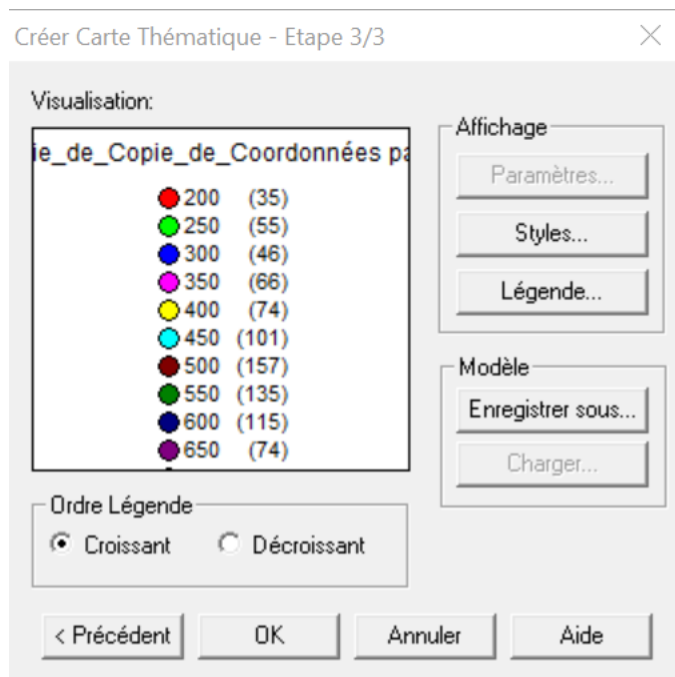
Nous choisissons le type d’analyse (valeurs individuelles par défaut) et nous cliquons sur le bouton suivant pour passer à l’étape suivante.

La fenêtre de dialogue (créer carte thématique -étape 2/3) apparaît.



**Figure 1.14 : Créer carte thématique -étape 2/3.**

A ce stade, nous choisissons la table « Coordonnées des points topo » et la variable qui nous permettra d'analyser les points topographiques semés, qui dans notre cas est la colonne D (les altitudes). Nous cliquons sur le bouton suivant et la fenêtre de dialogue (créer carte thématique -étape 3/3) apparaît.



**Figure 1.15 : Créer carte thématique -étape 3/3.**

- Nous visualisons la variable D (altitudes), et nous lui choisissons un style (forme), des couleurs et une légende.
- Une fois les choix effectués, le levé topographique change de couleur et les points changent de forme. Il s'agit d'une carte analyse thématique.
- L'analyse thématique fait apparaître immédiatement une nouvelle fenêtre dans la session de travail Mapinfo, il s'agit de la fenêtre Légende.

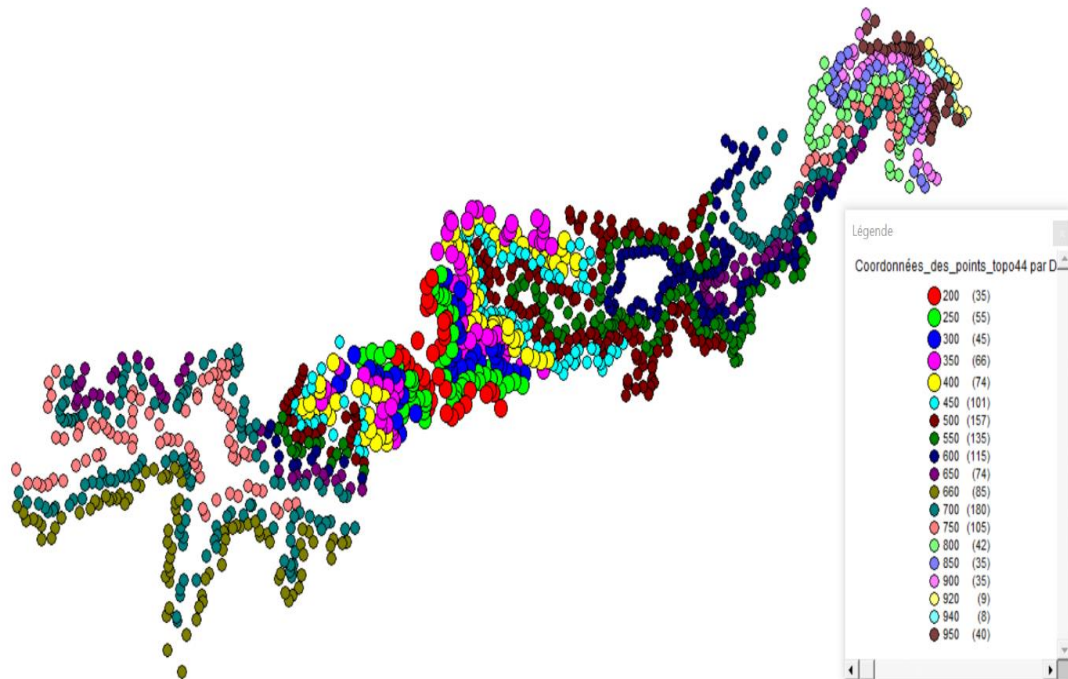


Figure 1.16 : Analyse thématique des altitudes.

### 1.3.3. Réalisation du Modèle Numérique du Terrain

Le MNT de l'itinéraire Larbaa Nath Irathen – Beni Douala est réalisée avec le logiciel Surfer. Les différentes étapes sont présentées ci-après :

- Ouvrir le logiciel Surfer ;

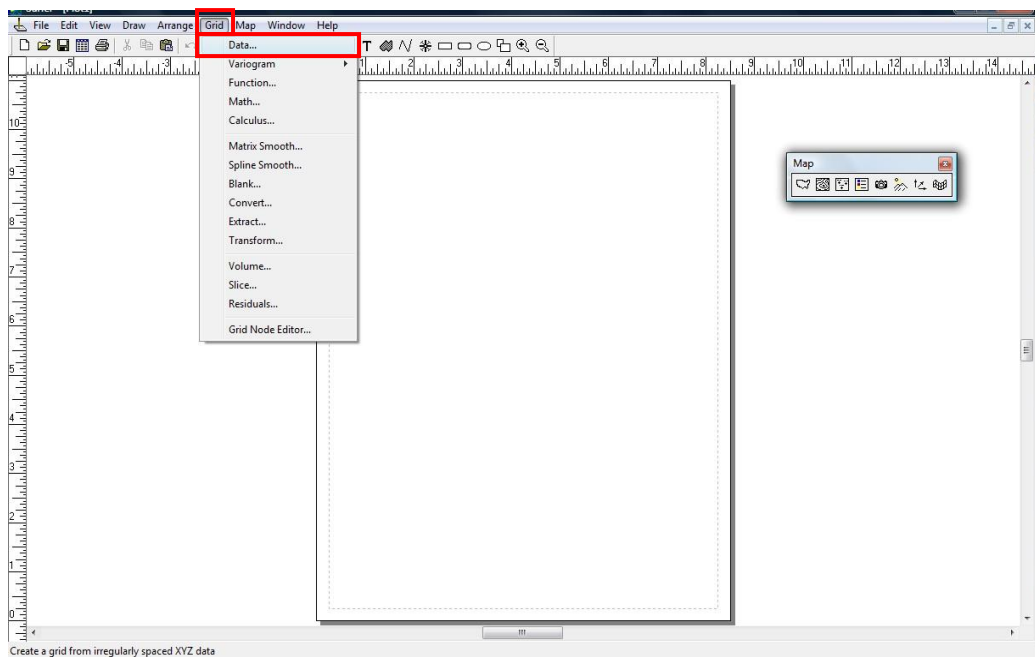
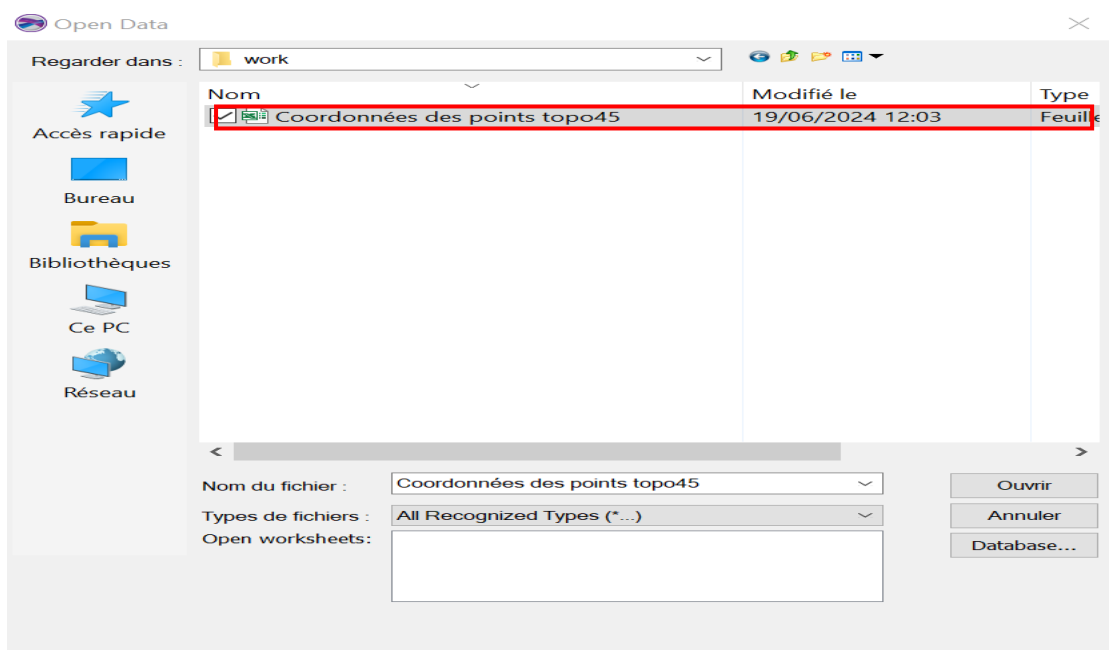


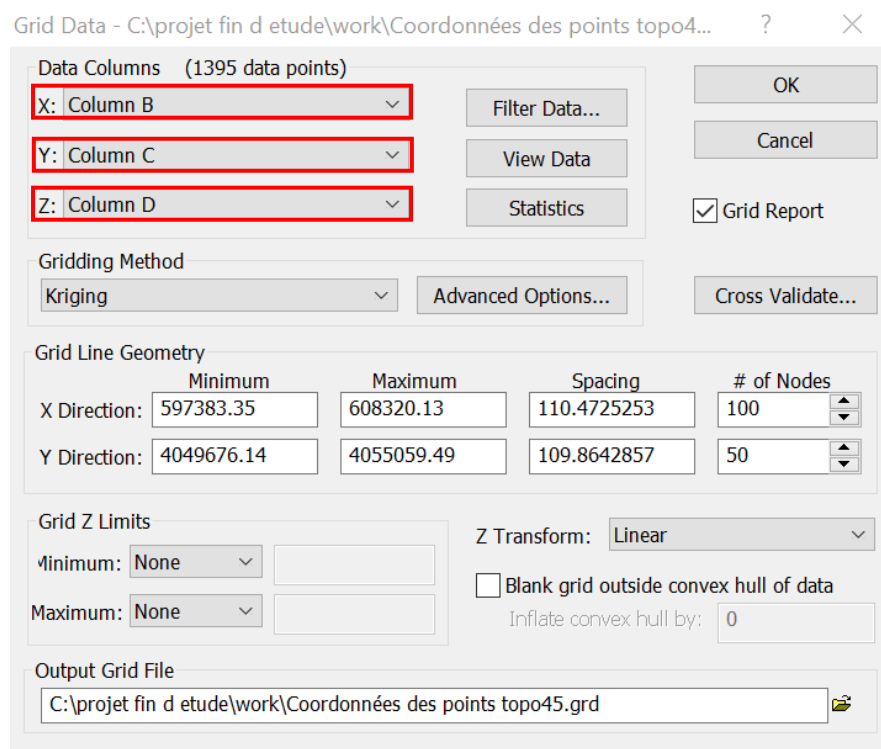
Figure 1.17 : Fenêtre de surfer.

- Importé le fichier EXCEL ;
- Barre d'outils →GRID DATA → Boite de dialogue « Open » on choisit le fichier à importer.



**Figure 1.18 : Boite de dialogue.**

- Boite de Dialogue « Grid Data » on fait correspondre les colonnes de la feuille Excel avec celle du logiciel



**Figure 1.19 : Boite de dialogue GridData.**

### 1.3.4. Création de modèle numérique de terrain

- Barre d'outils « MAP » → « New Contour MAP »

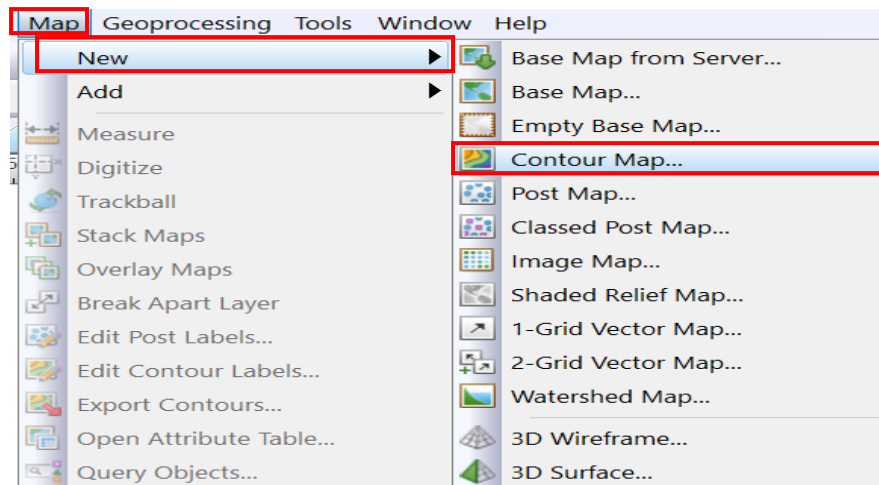


Figure 1.20 : Barre d'outils.

- Boite de Dialogue « Open Grid » on choisit les fichiers coordonnés des points topo2 → ouvrir (figure 1.21).

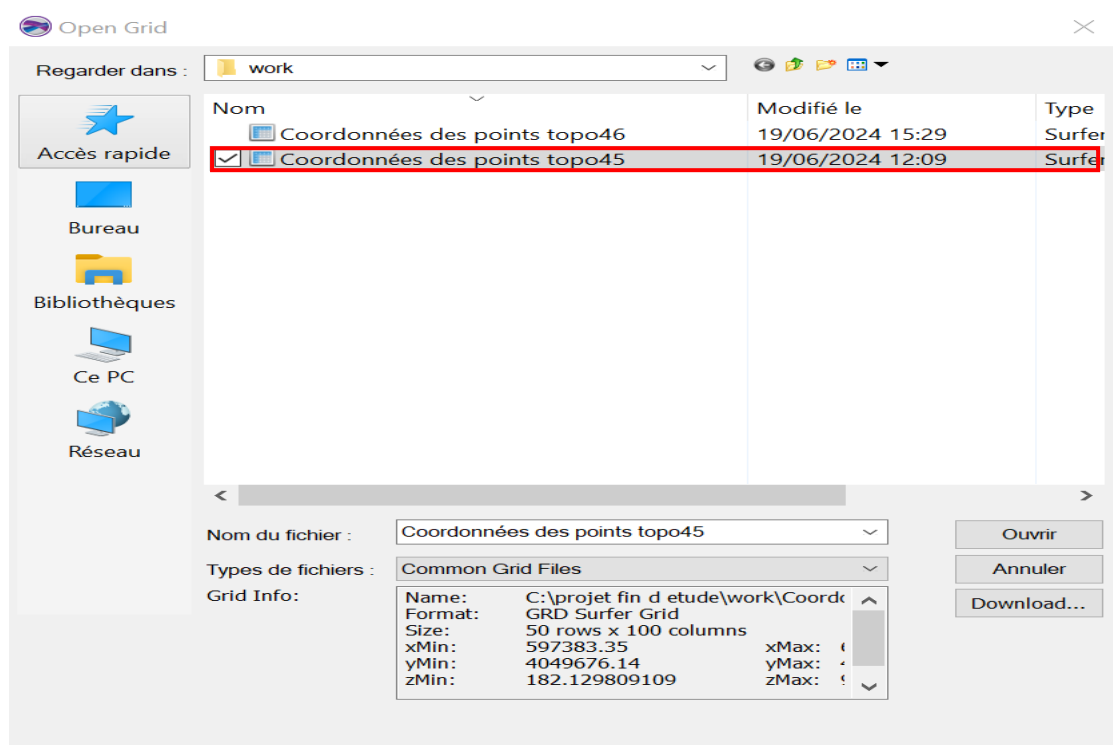
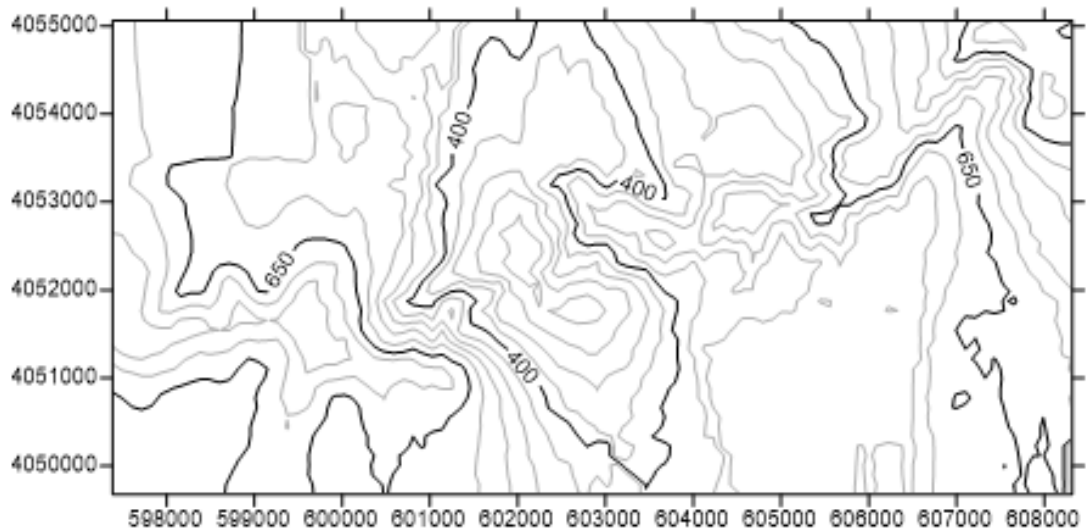


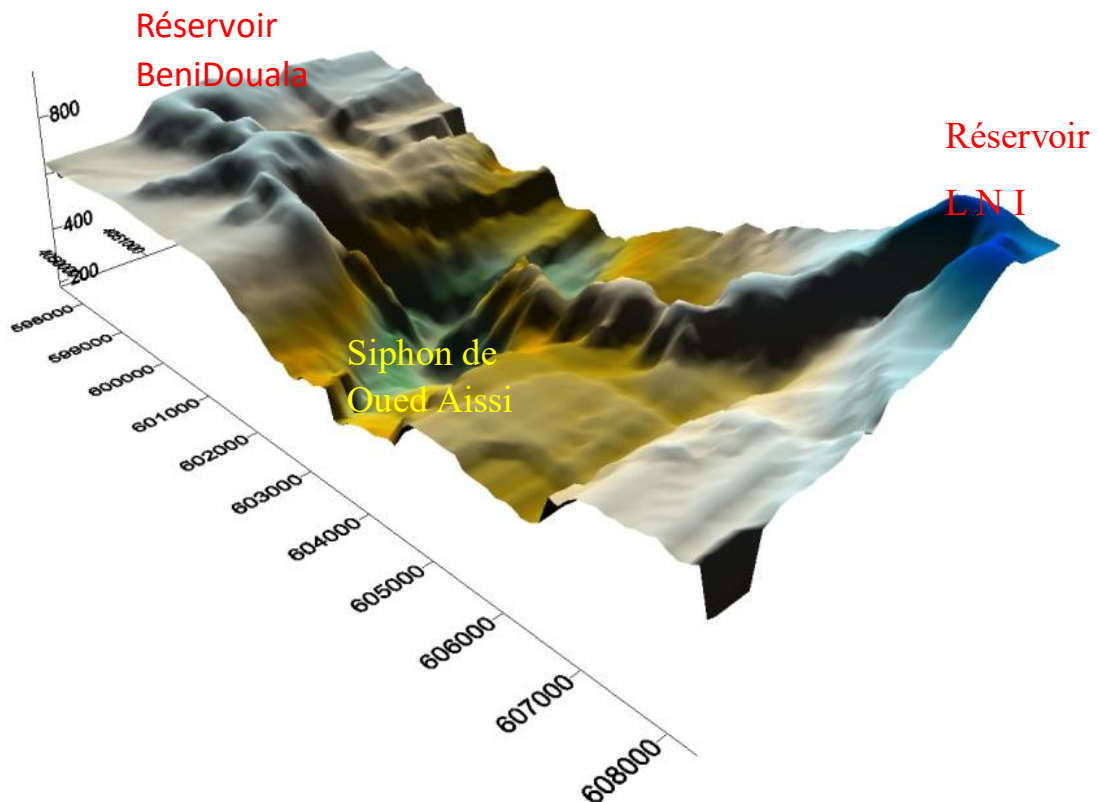
Figure 1.21 : Boite de dialogue Open Grid.

Le MNT ainsi généré est représenté dans la figure 1.22.



**Figure 1.22 : Courbe de niveau.**

Pour obtenir une vue 3D de notre levé topographique, nous activons l'icône « New 3d surface ». La vue en 3D est représentée dans la figure ci-après :



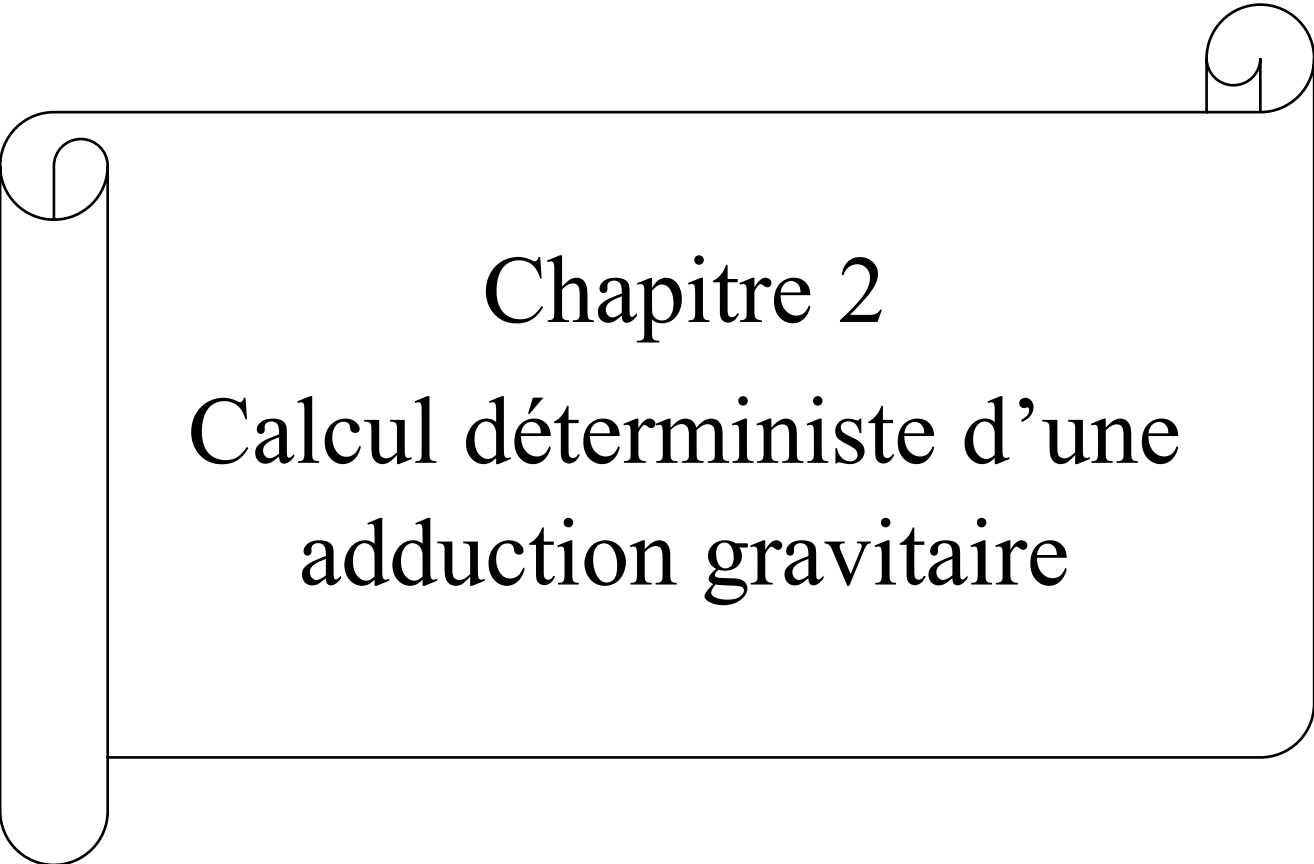
**Figure 1.23: Le modèle numérique de terrain en 3D.**

## **Conclusion**

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) s'avère être un outil précieux pour appréhender la difficulté du relief sur le tracé étudié. Il permet de visualiser clairement les dénivelés importants présents entre le réservoir de départ (LNI), le siphon de (OA) et le réservoir d'arrivée (BD).

En effet, le MNT met en lumière une différence d'altitude conséquente entre ces points stratégiques du réseau hydraulique.

En somme, le MNT fournit une représentation précise et détaillée du relief, facilitant ainsi l'analyse du tracé et la prise de décision éclairée pour mener à bien le projet d'installation ou de maintenance du réseau hydraulique.



# Chapitre 2

## Calcul déterministe d'une adduction gravitaire

## Introduction

Ce chapitre est consacré au calcul déterministe du siphon d'Oued Aissi. Ce réseau d'adduction gravitaire est présenté en chapitre 2. Après la présentation du schéma d'adduction, et des caractéristiques géométriques du réseau, nous présentons le calcul hydraulique ayant pour objectif la détermination des vitesses et des pressions dans les différents tronçons de la conduite. Enfin, nous procédons aux vérifications du réseau en service normal et à l'arrêt brusque. Deux coefficients de rugosité seront considérés,  $C_{hw} = 136$  à la mise en service (conduites neuves) et  $C_{hw} = 95$  à long terme (conduites vétustes).

### 2.1. Description de schéma d'adduction

La conduite d'adduction de Oued Aissi débute à partir du réservoir de LNI de capacité  $1000 \text{ m}^3$ , situé à la cote de  $1035 \text{ m}$  au lieu dit Abouidid. L'eau sera acheminée jusqu'au réservoir de Beni Douala de capacité  $1000 \text{ m}^3$  implanté à une altitude de  $880,27 \text{ m}$  au lieu-dit Djouad. La longueur totale de la conduite d'adduction est de  $15248,2 \text{ m}$ . Sur le long de cette conduite, plusieurs piquages sont réalisés successivement pour alimenter 7 villages. Les figures 2.1 et 2.2 illustrent respectivement le croquis d'itinéraire et le profil en long de cette adduction.

La figure 2.2, met en évidence la configuration topographique du projet que l'on qualifie de siphon.

Si la différence d'altitude entre le réservoir de départ et le réservoir d'arrivée n'est que de  $1035 - 880,27 = 154,73 \text{ m}$ , l'eau doit subir une chute de  $1035 - 163,38 = 871,62 \text{ m}$  pour pouvoir remonter jusqu'au réservoir d'arrivée.

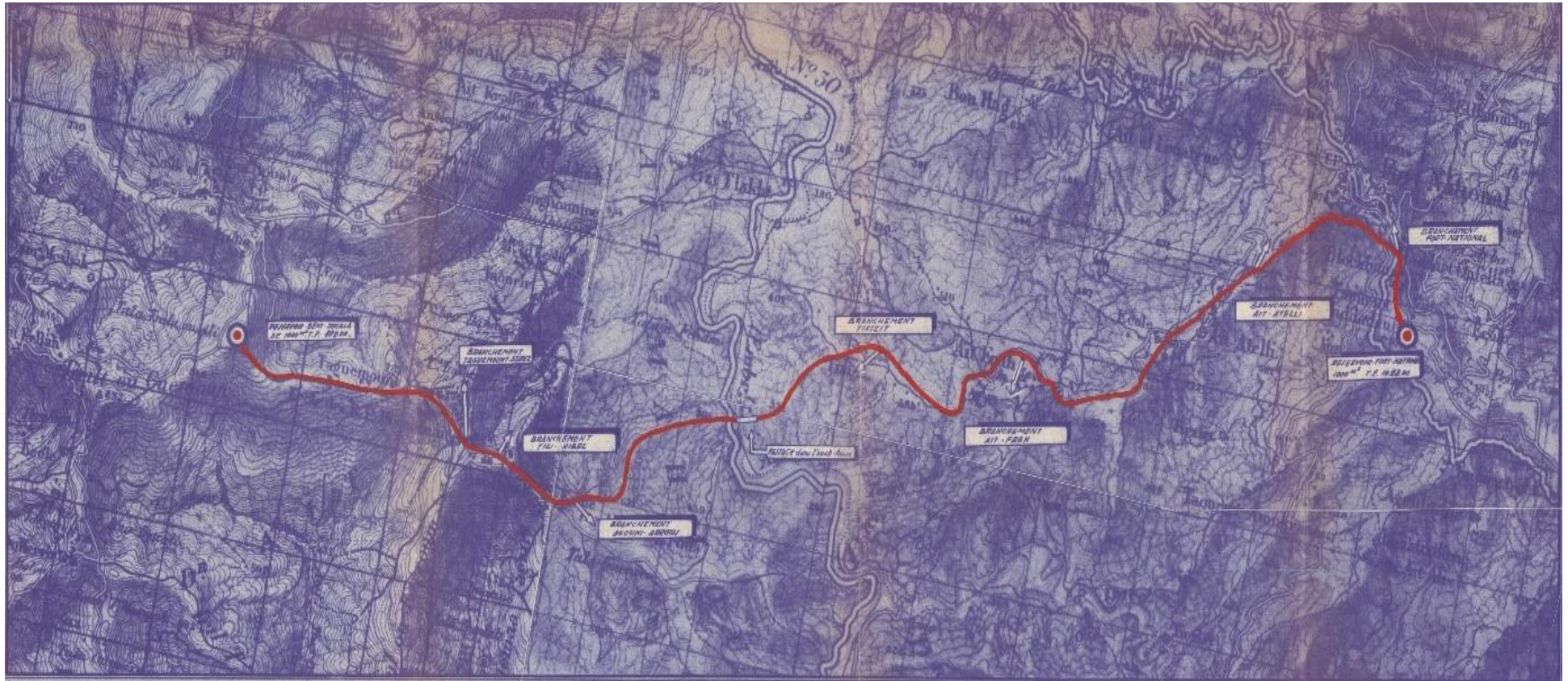


Figure 2.1 : Croquis d'itinéraire de l'adduction gravitaire, sur fond de carte d'Etat major.



## 2.2. Caractéristiques du réseau d'adduction

### 2.2.1. Débit

Le débit qui transite dans le réseau varie en fonction des différents piquages effectués, tels qu'illustrés dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1 : Débits transitant dans le réseau d'adduction.**

| Tronçons               | 1,00            | 2,00            | 3,00       | 4,00       | 5,00             | 6,00             |
|------------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------------|------------------|
| Départ                 | Réservoir LNI   | Gendarmerie LNI | Ait Atelli | Ait Ferah  | Tizi Hibel       | Taguemount Azouz |
| Arrivée                | Gendarmerie LNI | Ait Atelli      | Ait Ferah  | Tizi Hibel | Taguemount Azouz | Réservoir BD     |
| Débit transité (l/s)   | 99,00           | 71,00           | 68,32      | 64,54      | 61,13            | 52,07            |
| Débit de piquage (l/s) | 28,00           | 2,68            | 3,78       | 3,41       | 9,06             | -                |

### 2.2.2. Longueurs des conduites

Le réseau d'adduction d'Oued Aissi est constitué de 64 tronçons de conduite en acier. Les longueurs correspondantes sont tirées à partir du profil en long du réseau (figure 2.2). Les résultats des longueurs des différents tronçons de notre réseau sont donnés dans la colonne 8 du tableau 2.4.

### 2.2.3. Nœuds

Les nœuds représentent des points de jonction des conduites, ils correspondent à des points d'entrée ou de sortie des débits. Ces nœuds sont caractérisés par des débits connus. Par ailleurs les pressions aux nœuds restent les inconnues à déterminer. Les altitudes des nœuds représentant les cotes amont et aval de chaque tronçon. Les résultats de ces altitudes sont donnés dans la colonne 1 du tableau 2.4.

## 2.3. Calcul hydraulique du réseau d'adduction gravitaire

### 2.3.1. Calcul du diamètre économique

Le diamètre économique est calculé à partir de la formule de Bonin, en fonction du débit. Soit :

$$D_{\text{éco}} = \sqrt{Q} \quad (2.1)$$

Avec :

$D_{\text{éco}}$  : diamètre de la conduite en mètre (m) ;

Q : débit en (m<sup>3</sup> /s)

Après avoir calculé le diamètre économique, on procède au choix du diamètre normalisé sur catalogue.

### 2.3.2. Calcul de la vitesse

La vitesse de l'écoulement  $v(m/s)$  est déduite à partir de l'équation de conservation de débit, telle que :

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_N^2} \quad (2.2)$$

Avec :

$D_N$  : le diamètre normalisé de la conduite en (m).

Dans la pratique des adductions d'eau, nous veillerons toujours à ce que les vitesses correspondantes aux diamètres optimums répondent à la condition suivante :

$$0,5 \text{ m/s} < V < 1,5 \text{ m/s} \quad (2.3)$$

En effet, si la vitesse est trop grande il peut en résulter certains inconvénients d'ordre pratique (risque de coup de bélier trop violent en cas de changement brusque du régime d'écoulement, difficultés d'alimenter correctement les branchements) et risque de dépôts solides pour de faibles vitesses entraînant ainsi l'obturation de la conduite.

### 2.3.3. Calcul des pertes de charge

On rencontre deux types de pertes de charge dans les conduites ; à savoir les pertes de charge linéaires et les pertes de charge singulières.

- **Pertes de charge linéaires**

Les pertes de charge linéaires sont induites par les frottements le long de la conduite. Les pertes unitaires sont obtenues à partir de l'équation de HAZEN WILLIAMS :

$$j = 1,218 \times 10^{10} \times \frac{Q^{1,852}}{C_{hw}^{1,852} \times D_N^{4,871}} \quad (m/ml) \quad (2.4)$$

$Q$  : débit en (l/s) ;

$D_N$  : diamètre intérieure de la conduite (mm) ;

$C_{hw}$  : coefficient de HAZEN WILLIAMS qui dépend de la nature de la paroi interne de la conduite. Pour une conduite neuve  $C_{hw}=136$ , et pour une conduite vétuste  $C_{hw}=95$ .

Les Pertes de charge linéaires  $J_L$  (m) sont déduites par l'équation suivante :

$$J_L = j * L \quad (2.5)$$

- **Pertes de charges singulières  $J_s$**

Elles sont causées par les singularités  $J_s$  (m) tels que les coudes, les vannes et les branchements... etc. Elles sont estimées à 15% des pertes de charges linéaire, soit :

$$J_s = 0,15 * J_L \quad (2.6)$$

- **Pertes de charge totale**

Les pertes de charges totales  $J_T$  représentent la somme des pertes de charges linéaires et les pertes de charges singulières :

$$J_T = 1,15 * J_L \quad (2.7)$$

#### 2.3.4. La charge aval

$$H^{i+1} = H^i - J_T \quad (2.8)$$

$H^{i+1}$  : la charge en amont du nœud  $i$  (m).

#### 2.3.5. Calcul des pressions au sol

La vérification des pressions au niveau de chaque nœud d'ordre ( $i$ ) sera obtenue à partir des cotes piézométriques, conformément aux relations (2.24) et (2.25) :

$$P_{sol}^i = H^i - CTN^i \quad (2.9)$$

Avec :

$H^i$  : cote piézométrique (m) ;

$P_{sol}^i$  : Pression au sol (m).

Notons que la cote piézométrique  $H^1$  du réservoir de départ est donnée par la relation suivante :

$$H^1 = CTN^1 + 4m \quad (2.10)$$

Avec :

$CTN^1$  : cote du trop -plein du réservoir de départ (m)

4m : représente la hauteur de l'eau dans le réservoir jusqu'au trop -plein

#### 2.3.6. Hauteur géométrique

La hauteur géométrique est définie par la relation suivante :

$$H_{geo}^i = CTN^1 - CTN^i \quad (2.11)$$

Avec :

CTN<sup>i</sup> : cote du terrain du nœud (i)

### 2.3.7. Calcul de la pression maximale et minimale

#### a- Cas de surpression

La valeur maximale de la pression P<sub>max</sub> (m) au niveau d'un nœud (i) de la conduite est calculée en fonction du béliet (B<sub>i</sub>) et de la hauteur géométrique (H<sub>geo</sub><sup>i</sup>) par la relation suivante :

$$P_{\max}^i = H_{\text{geo}}^i + B^i \quad (2.12)$$

#### b- Cas de dépression

La valeur minimale de la pression P<sub>min</sub><sup>i</sup> au niveau d'un nœud de la conduite est calculée par la relation suivante :

$$P_{\min}^i = H_{\text{geo}}^i - B^i \quad (2.13)$$

Le Béliet est un phénomène de surpression ou de dépression qui apparait au moment de la variation brusque de la vitesse d'un liquide, par suite d'une fermeture /ouverture rapide d'une vanne. La pression du béliet est donnée par la relation suivante :

$$B = a \cdot \frac{v}{g} \quad (2.14)$$

g : accélération de pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

a : célérité des ondes (m) donnée par la relation d'Allievi

v : vitesse d'écoulement de l'eau dans la conduite (m/s)

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,9 + k \cdot \frac{DN}{e}}} \quad (2.15)$$

e : épaisseur de la conduite (m)

k : coefficient dépendant de la nature de matériau de la conduite est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 2.2 : coefficient dépendant de la nature de matériau de la conduite**

| Nature de conduite | Coefficient k |
|--------------------|---------------|
| Acier              | 0,5           |
| PEHD               | 0,66          |
| Fonte              | 1             |
| PVC                | 33            |
| Amiante            | 4,4           |

### 2.3.8. Pression nominale

Les pressions nominales sont adoptées sur la base des pressions maximales.

### 2.3.9. Charge admissible

- **Charge maximale admissible**

La charge maximale admissible au niveau d'un nœud (i) de la conduite est obtenue à partir de la relation suivante :

$$H_{\max \text{ adm}}^i = CTN^i + PN \quad (2.16)$$

PN étant la pression nominale de la conduite en mètre (m).

- **Charge minimale admissible**

La charge minimale admissible de service, est vérifiée pour s'assurer que l'eau puisse rentrer dans le réservoir. Celle-ci est obtenue par :

$$H_{\min \text{ adm}}^i = CTN^i + 10\text{m} \quad (2.17)$$

Où les 10 m représentent la pression minimale de service.

Pour assurer le bon fonctionnement du réseau, il faut vérifier que la cote piézométrique  $H^i$  au niveau d'un nœud (i) soit :

$$H_{\min \text{ adm}} < H^i \leq H_{\max \text{ adm}} \quad (2.18)$$

Un organigramme récapitulant les différentes étapes du calcul déterministe d'un réseau d'adduction est donné ci-après :

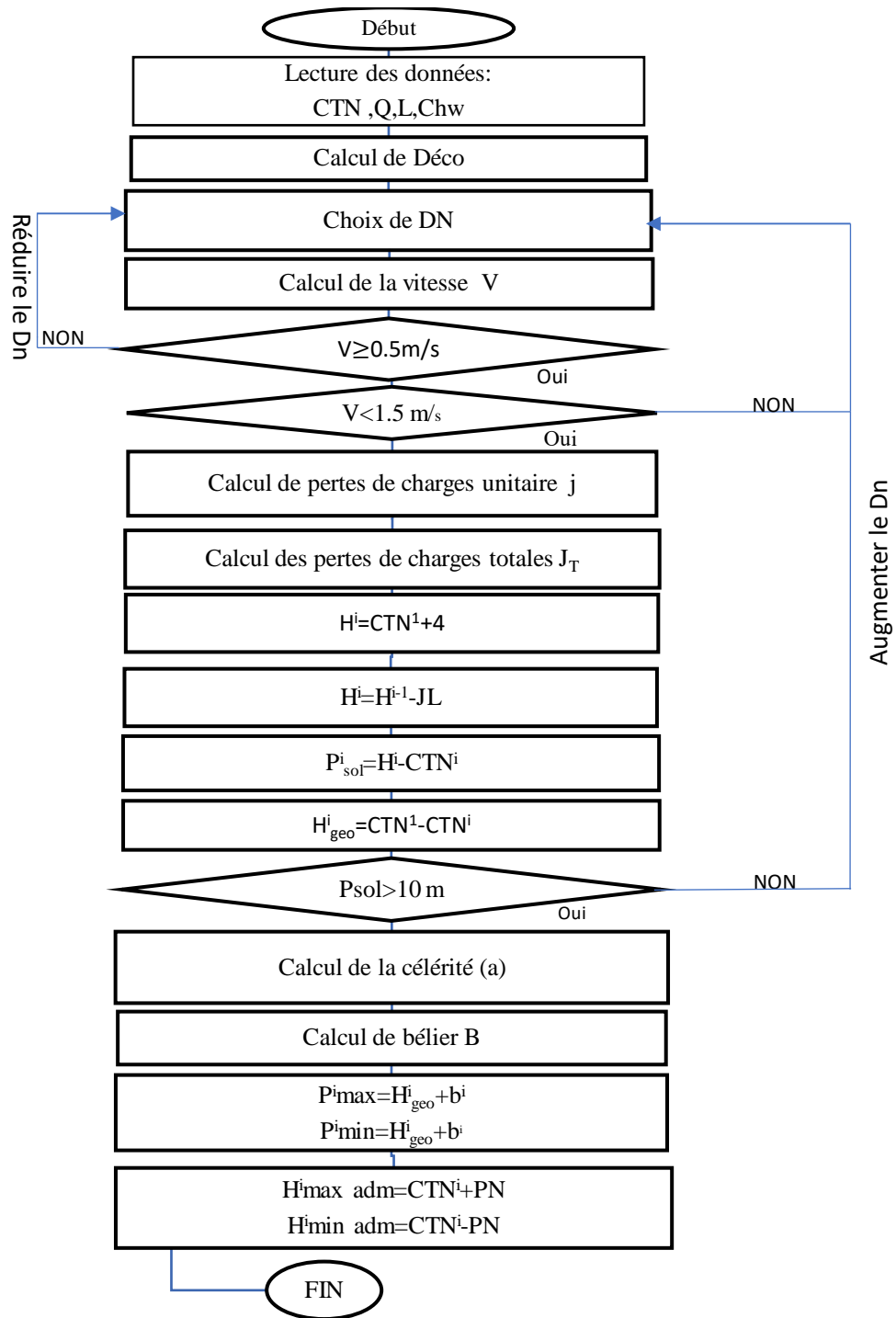


Figure 2.3. Organigramme du calcul hydraulique d'une adduction gravitaire.

## 2.4. Résultats et analyse

Les résultats de calcul des diamètres économique ainsi que le choix des diamètres normalisés sont présentés dans le tableau 2.4, colonne 6 et 7. *Notons que deux diamètres normalisés sont adoptés, à savoir DN300 et DN250.*

La colonne 8 du tableau 2.4 illustre les résultats de calcul des vitesses dans les conduites. *Il y'a lieu de constater que toutes les vitesses sont admises ; celles-ci sont comprises entre 0.5m/s et 1.5m/s conformément à la condition (2.3). Autrement dit, il n'y aura pas de risque de dépôts (obturation de la conduite) et de risque de rupture de joints.*

*Au vu des résultats de la pression au sol donnés en colonnes 15, les pressions sont toutes supérieures à 10 m sauf pour les 3 premiers tronçons. Néanmoins, ceci ne pose aucun problème de fonctionnement.*

Tableau 2.3 : Résultats de calcul du réseau à court terme  $C_{hw}=136$ .

| 1                       | 2            | 3           | 4            | 5        | 6      | 7        | 8                   | 9      | 10      | 11                 | 12                 | 13                 | 14       | 15                 | 16                                   | 17                                     |
|-------------------------|--------------|-------------|--------------|----------|--------|----------|---------------------|--------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------------------------|--|
| Trançon                 | CTN<br>amont | CTN<br>aval | L<br>part(m) | L cum(m) | Q(l/s) | Deco(mm) | D <sub>N</sub> (mm) | V(m/s) | j(m/ml) | J <sub>L</sub> (m) | J <sub>s</sub> (m) | J <sub>L</sub> (m) | Hamont   | H <sup>i</sup> (m) | P <sup>i</sup> <sub>sol</sub><br>(m) | P <sup>i</sup> <sub>sol</sub><br>(bar) |
| R(LNI)-1                | 1<br>028,11  | 999,00      | 159,15       | 159,15   | 99,00  | 314,64   | 300,00              | 1,40   | 0,01    | 0,92               | 0,14               | 1,06               | 1 032,11 | 1 031,05           | 32,05                                | 3,20                                   |
| 1_2                     | 999,00       | 959,37      | 146,40       | 305,55   | 99,00  | 314,64   | 300,00              | 1,40   | 0,01    | 0,85               | 0,13               | 0,98               | 1 031,05 | 1 030,07           | 70,70                                | 7,07                                   |
| 2_3                     | 959,37       | 927,92      | 517,30       | 822,85   | 99,00  | 314,64   | 300,00              | 1,40   | 0,01    | 3,01               | 0,45               | 3,46               | 1 030,07 | 1 026,61           | 98,69                                | 9,87                                   |
| 3_4(Gendarmerie<br>LNI) | 927,92       | 926,00      | 81,60        | 904,45   | 99,00  | 314,64   | 300,00              | 1,40   | 0,01    | 0,47               | 0,07               | 0,55               | 1 026,61 | 1 026,07           | 100,07                               | 10,01                                  |
| 4_5                     | 926,00       | 876,00      | 742,00       | 1 646,45 | 71,00  | 266,46   | 300,00              | 1,00   | 0,00    | 2,33               | 0,35               | 2,68               | 1 026,07 | 1 023,39           | 147,39                               | 14,74                                  |
| 5_6                     | 876,00       | 826,00      | 636,20       | 2 282,65 | 71,00  | 266,46   | 300,00              | 1,00   | 0,00    | 2,00               | 0,30               | 2,30               | 1 023,39 | 1 021,09           | 195,09                               | 19,51                                  |
| 6_7(Ait Atelli)         | 826,00       | 797,67      | 447,55       | 2 730,20 | 71,00  | 266,46   | 300,00              | 1,00   | 0,00    | 1,40               | 0,21               | 1,62               | 1 021,09 | 1 019,48           | 221,81                               | 22,18                                  |
| 7_8                     | 797,67       | 776,00      | 232,45       | 2 962,65 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 1,65               | 0,25               | 1,90               | 1 019,48 | 1 017,58           | 241,58                               | 24,16                                  |
| 8_9                     | 776,00       | 762,64      | 133,70       | 3 096,35 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 0,95               | 0,14               | 1,09               | 1 017,58 | 1 016,48           | 253,84                               | 25,38                                  |
| 9_10                    | 762,64       | 769,53      | 127,02       | 3 223,37 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 0,90               | 0,14               | 1,04               | 1 016,48 | 1 015,45           | 245,92                               | 24,59                                  |
| 10_11                   | 769,53       | 746,30      | 358,96       | 3 582,33 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 2,55               | 0,38               | 2,93               | 1 015,45 | 1 012,51           | 266,21                               | 26,62                                  |
| 11_12                   | 746,30       | 760,43      | 105,35       | 3 687,68 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 0,75               | 0,11               | 0,86               | 1 012,51 | 1 011,65           | 251,22                               | 25,12                                  |
| 12_13                   | 760,43       | 726,00      | 102,02       | 3 789,70 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 0,72               | 0,11               | 0,83               | 1 011,65 | 1 010,82           | 284,82                               | 28,48                                  |
| 13_14                   | 726,00       | 671,18      | 115,04       | 3 904,74 | 68,32  | 261,38   | 250,00              | 1,39   | 0,01    | 0,82               | 0,12               | 0,94               | 1 010,82 | 1 009,88           | 338,70                               | 33,87                                  |

|                   |        |        |        |          |       |        |        |      |      |      |      |      |          |          |        |       |
|-------------------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|----------|----------|--------|-------|
| 14_15             | 671,18 | 626,00 | 735,07 | 4 639,81 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 5,22 | 0,78 | 6,01 | 1 009,88 | 1 003,87 | 377,87 | 37,79 |
| 15_16             | 626,00 | 599,74 | 414,58 | 5 054,39 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 2,95 | 0,44 | 3,39 | 1 003,87 | 1 000,49 | 400,75 | 40,07 |
| 16_17             | 599,74 | 601,86 | 194,30 | 5 248,69 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 1,38 | 0,21 | 1,59 | 1 000,49 | 998,90   | 397,04 | 39,70 |
| 17_18(Ait Ferah)  | 601,86 | 597,94 | 205,15 | 5 453,84 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 1,46 | 0,22 | 1,68 | 998,90   | 997,22   | 399,28 | 39,93 |
| 18_19             | 597,94 | 576,00 | 334,35 | 5 788,19 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,14 | 0,32 | 2,46 | 997,22   | 994,76   | 418,76 | 41,88 |
| 19_20             | 576,00 | 561,31 | 228,50 | 6 016,69 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,46 | 0,22 | 1,68 | 994,76   | 993,08   | 431,77 | 43,18 |
| 20-21             | 561,31 | 526,00 | 754,55 | 6 771,24 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 4,82 | 0,72 | 5,55 | 993,08   | 987,54   | 461,54 | 46,15 |
| 21_22             | 526,00 | 472,50 | 323,57 | 8 094,81 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 8,46 | 1,27 | 9,73 | 987,54   | 977,80   | 505,30 | 50,53 |
| 22-23(Ag Tizizit) | 472,50 | 514,78 | 156,54 | 8 251,35 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,00 | 0,15 | 1,15 | 977,80   | 976,65   | 461,87 | 46,19 |
| 23-24             | 514,78 | 476,00 | 147,83 | 8 399,18 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,95 | 0,14 | 1,09 | 976,65   | 975,57   | 499,57 | 49,96 |
| 24-25             | 476,00 | 426,00 | 171,71 | 8 570,89 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,10 | 0,16 | 1,26 | 975,57   | 974,30   | 548,30 | 54,83 |
| 25-26             | 426,00 | 400,62 | 62,14  | 8 633,03 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,40 | 0,06 | 0,46 | 974,30   | 973,85   | 573,23 | 57,32 |
| 26-27             | 400,62 | 376,00 | 114,86 | 8 747,89 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,73 | 0,11 | 0,84 | 973,85   | 973,00   | 597,00 | 59,70 |
| 27-28             | 376,00 | 326,00 | 241,35 | 8 989,24 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,54 | 0,23 | 1,77 | 973,00   | 971,23   | 645,23 | 64,52 |
| 28-29             | 326,00 | 306,73 | 125,40 | 9 114,64 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,80 | 0,12 | 0,92 | 971,23   | 970,30   | 663,57 | 66,36 |
| 29-30             | 306,73 | 276,00 | 48,85  | 9 163,49 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,31 | 0,05 | 0,36 | 970,30   | 969,95   | 693,95 | 69,39 |
| 30-31             | 276,00 | 176,00 | 214,65 | 9 378,14 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,37 | 0,21 | 1,58 | 969,95   | 968,37   | 792,37 | 79,24 |

|                      |        |        |        |           |       |        |        |      |      |      |      |      |        |        |        |       |
|----------------------|--------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| 31-32                | 176,00 | 163,38 | 21,65  | 9 399,79  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,14 | 0,02 | 0,16 | 968,37 | 968,21 | 804,83 | 80,48 |
| <b>32-Siphon O.A</b> | 163,38 | 161,87 | 91,55  | 9 491,34  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,59 | 0,09 | 0,67 | 968,21 | 967,53 | 805,66 | 80,57 |
| 33-34                | 161,87 | 176,00 | 82,27  | 9 573,61  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,53 | 0,08 | 0,60 | 967,53 | 966,93 | 790,93 | 79,09 |
| 34-35                | 176,00 | 226,00 | 107,16 | 9 680,77  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,69 | 0,10 | 0,79 | 966,93 | 966,14 | 740,14 | 74,01 |
| 35-36                | 226,00 | 276,00 | 111,45 | 9 792,22  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,71 | 0,11 | 0,82 | 966,14 | 965,32 | 689,32 | 68,93 |
| 36-37                | 276,00 | 326,00 | 74,75  | 9 866,97  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,48 | 0,07 | 0,55 | 965,32 | 964,77 | 638,77 | 63,88 |
| 37-38                | 326,00 | 352,38 | 38,35  | 9 905,32  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,25 | 0,04 | 0,28 | 964,77 | 964,49 | 612,11 | 61,21 |
| 38-39                | 352,38 | 374,67 | 133,90 | 10 039,22 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,86 | 0,13 | 0,98 | 964,49 | 963,51 | 588,84 | 58,88 |
| 39-40                | 374,67 | 376,00 | 6,15   | 10 045,37 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 963,51 | 963,46 | 587,46 | 58,75 |
| 40-41                | 376,00 | 421,32 | 225,65 | 10 271,02 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,44 | 0,22 | 1,66 | 963,46 | 961,80 | 540,48 | 54,05 |
| 41-42                | 421,32 | 426,00 | 11,55  | 10 282,57 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,08 | 961,80 | 961,72 | 535,72 | 53,57 |
| 42-43                | 426,00 | 473,02 | 111,75 | 10 394,32 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,71 | 0,11 | 0,82 | 961,72 | 960,89 | 487,87 | 48,79 |
| 43-44                | 473,02 | 476,00 | 12,10  | 10 406,42 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 0,09 | 960,89 | 960,81 | 484,81 | 48,48 |
| 44-45                | 476,00 | 516,16 | 265,05 | 10 671,47 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,69 | 0,25 | 1,95 | 960,81 | 958,86 | 442,70 | 44,27 |
| 45-46                | 516,16 | 526,00 | 64,40  | 10 735,87 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,41 | 0,06 | 0,47 | 958,86 | 958,38 | 432,38 | 43,24 |
| 46-47                | 526,00 | 576,00 | 167,00 | 10 902,87 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,07 | 0,16 | 1,23 | 958,38 | 957,16 | 381,16 | 38,12 |
| 47-48                | 576,00 | 625,98 | 141,10 | 11 043,97 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,90 | 0,14 | 1,04 | 957,16 | 956,12 | 330,14 | 33,01 |

|                               |        |        |        |           |       |        |        |      |      |      |      |      |        |        |        |       |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| <b>48-49</b>                  | 625,98 | 676,00 | 253,20 | 11 297,17 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,62 | 0,24 | 1,86 | 956,12 | 954,26 | 278,26 | 27,83 |
| <b>49-50(Agouni Arous)</b>    | 676,00 | 686,75 | 59,45  | 11 356,62 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,38 | 0,06 | 0,44 | 954,26 | 953,82 | 267,07 | 26,71 |
| <b>50-51</b>                  | 686,75 | 708,18 | 195,55 | 11 552,17 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,25 | 0,19 | 1,44 | 953,82 | 952,38 | 244,20 | 24,42 |
| <b>51-52(Tizi Hibel)</b>      | 708,18 | 713,57 | 50,25  | 11 602,42 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,32 | 0,05 | 0,37 | 952,38 | 952,01 | 238,44 | 23,84 |
| <b>52-53</b>                  | 713,57 | 726,00 | 102,65 | 11 705,07 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 0,59 | 0,09 | 0,68 | 952,01 | 951,33 | 225,33 | 22,53 |
| <b>53-54</b>                  | 726,00 | 776,00 | 617,00 | 12 322,07 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 3,57 | 0,54 | 4,10 | 951,33 | 947,23 | 171,23 | 17,12 |
| <b>54-55</b>                  | 776,00 | 779,84 | 39,27  | 12 361,34 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 0,23 | 0,03 | 0,26 | 947,23 | 946,96 | 167,12 | 16,71 |
| <b>55-56</b>                  | 779,84 | 784,66 | 141,00 | 12 502,34 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 0,82 | 0,12 | 0,94 | 946,96 | 946,03 | 161,37 | 16,14 |
| <b>56-57(Taguemout Azouz)</b> | 784,66 | 795,95 | 184,85 | 12 687,19 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 1,07 | 0,16 | 1,23 | 946,03 | 944,80 | 148,85 | 14,88 |
| <b>57-58</b>                  | 795,95 | 776,00 | 286,62 | 12 973,81 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 1,23 | 0,18 | 1,42 | 944,80 | 943,38 | 167,38 | 16,74 |
| <b>58-59</b>                  | 776,00 | 762,77 | 151,63 | 13 125,44 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 0,65 | 0,10 | 0,75 | 943,38 | 942,63 | 179,86 | 17,99 |
| <b>59-60</b>                  | 762,77 | 747,81 | 459,35 | 13 584,79 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 1,97 | 0,30 | 2,27 | 942,63 | 940,36 | 192,55 | 19,26 |
| <b>60-61</b>                  | 747,81 | 776,06 | 975,20 | 14 559,99 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 4,19 | 0,63 | 4,82 | 940,36 | 935,55 | 159,49 | 15,95 |
| <b>61-62</b>                  | 776,06 | 826,00 | 294,30 | 14 854,29 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 1,26 | 0,19 | 1,45 | 935,55 | 934,09 | 108,09 | 10,81 |
| <b>62-63</b>                  | 826,00 | 858,83 | 214,10 | 15 068,39 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 0,92 | 0,14 | 1,06 | 934,09 | 933,03 | 74,20  | 7,42  |
| <b>63-64</b>                  | 858,83 | 861,68 | 82,75  | 15 151,14 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 0,36 | 0,05 | 0,41 | 933,03 | 932,62 | 70,94  | 7,09  |
| <b>64-R(BD)</b>               | 861,68 | 880,25 | 96,50  | 15 247,64 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,00 | 0,41 | 0,06 | 0,48 | 932,62 | 932,15 | 51,90  | 5,19  |

Tableau 2.4 : Résultat de calcul de réseau à court terme (suite).

| 18       | 19           | 20          | 21         | 22        | 23             | 24   | 25         | 26   | 27            | 28   | 29        | 30   |
|----------|--------------|-------------|------------|-----------|----------------|------|------------|------|---------------|------|-----------|------|
|          |              |             |            |           | Service normal |      |            |      | Arrêt brusque |      |           |      |
| Hgeo,(m) | b(bélier)(m) | Pmax (bars) | Pmin(bars) | PN (bars) | Hmax adm(m)    | Test | Hminadm(m) | Test | H'max (m)     | Test | H'min (m) | Test |
| 33,11    | 1,64         | 3,47        | 3,15       | 4,00      | 1 039,00       | -    | 1 009,00   | -    | 1 029,75      | -    | 1 026,47  | -    |
| 72,74    | 3,14         | 7,59        | 6,96       | 10,00     | 1 059,37       | -    | 969,37     | -    | 1 031,25      | -    | 1 024,97  | -    |
| 104,19   | 8,46         | 11,26       | 9,57       | 16,00     | 1 087,92       | -    | 937,92     | -    | 1 036,57      | -    | 1 019,65  | -    |
| 106,11   | 9,30         | 11,54       | 9,68       | 16,00     | 1 086,00       | -    | 936,00     | -    | 1 037,41      | -    | 1 018,81  | -    |
| 156,11   | 16,92        | 17,30       | 13,92      | 20,00     | 1 076,00       | -    | 886,00     | -    | 1 045,03      | -    | 1 011,19  | -    |
| 206,11   | 23,46        | 22,96       | 18,27      | 40,00     | 1 226,00       | -    | 836,00     | -    | 1 051,57      | -    | 1 004,65  | -    |
| 234,44   | 28,06        | 26,25       | 20,64      | 40,00     | 1 197,67       | -    | 807,67     | -    | 1 056,17      | -    | 1 000,05  | -    |
| 256,11   | 30,45        | 28,66       | 22,57      | 40,00     | 1 176,00       | -    | 786,00     | -    | 1 058,56      | -    | 997,66    | -    |
| 269,47   | 31,82        | 30,13       | 23,76      | 40,00     | 1 162,64       | -    | 772,64     | -    | 1 059,93      | -    | 996,29    | -    |
| 262,58   | 33,13        | 29,57       | 22,95      | 40,00     | 1 169,53       | -    | 779,53     | -    | 1 061,24      | -    | 994,98    | -    |
| 285,81   | 36,82        | 32,26       | 24,90      | 40,00     | 1 146,30       | -    | 756,30     | -    | 1 064,93      | -    | 991,29    | -    |
| 271,68   | 37,90        | 30,96       | 23,38      | 40,00     | 1 160,43       | -    | 770,43     | -    | 1 066,01      | -    | 990,21    | -    |
| 306,11   | 38,95        | 34,51       | 26,72      | 40,00     | 1 126,00       | -    | 736,00     | -    | 1 067,06      | -    | 989,16    | -    |
| 360,93   | 40,13        | 40,11       | 32,08      | 40,00     | 1 071,18       | -    | 681,18     | -    | 1 068,24      | -    | 987,98    | -    |
| 406,11   | 47,69        | 45,38       | 35,84      | 60,00     | 1 226,00       | -    | 636,00     | -    | 1 075,80      | -    | 980,42    | -    |
| 432,37   | 51,95        | 48,43       | 38,04      | 60,00     | 1 199,74       | -    | 609,74     | -    | 1 080,06      | -    | 976,16    | -    |
| 430,25   | 53,94        | 48,42       | 37,63      | 60,00     | 1 201,86       | -    | 611,86     | -    | 1 082,05      | -    | 974,17    | -    |
| 434,17   | 56,05        | 49,02       | 37,81      | 60,00     | 1 197,94       | -    | 607,94     | -    | 1 084,16      | -    | 972,06    | -    |
| 456,11   | 59,49        | 51,56       | 39,66      | 60,00     | 1 176,00       | -    | 586,00     | -    | 1 087,60      | -    | 968,62    | -    |
| 470,80   | 61,84        | 53,26       | 40,90      | 60,00     | 1 161,31       | -    | 571,31     | -    | 1 089,95      | -    | 966,27    | -    |
| 506,11   | 69,59        | 57,57       | 43,65      | 60,00     | 1 126,00       | -    | 536,00     | -    | 1 097,70      | -    | 958,52    | -    |
| 559,61   | 83,19        | 64,28       | 47,64      | 80,00     | 1 272,50       | -    | 482,50     | -    | 1 111,30      | -    | 944,92    | -    |
| 517,33   | 84,80        | 60,21       | 43,25      | 80,00     | 1 314,78       | -    | 524,78     | -    | 1 112,91      | -    | 943,31    | -    |
| 556,11   | 86,32        | 64,24       | 46,98      | 80,00     | 1 276,00       | -    | 486,00     | -    | 1 114,43      | -    | 941,79    | -    |

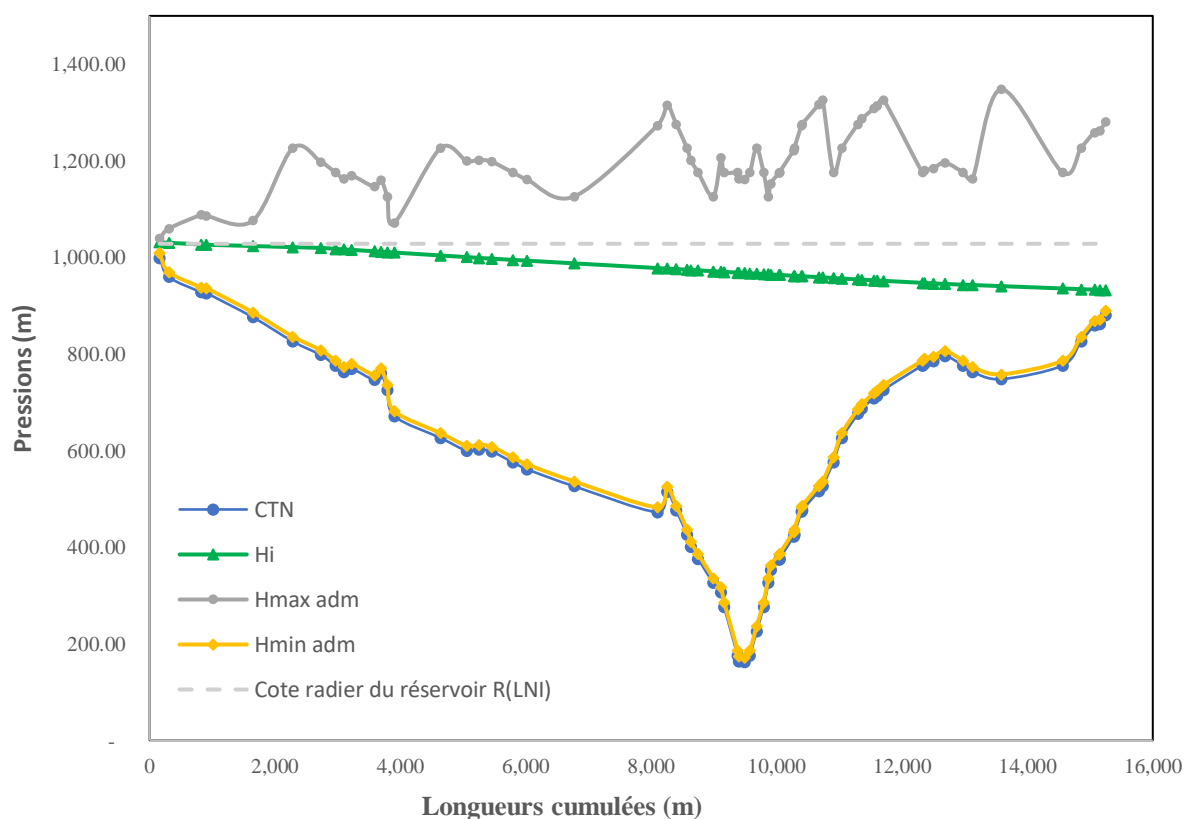
|        |        |       |       |        |          |   |        |   |          |      |        |   |
|--------|--------|-------|-------|--------|----------|---|--------|---|----------|------|--------|---|
| 606,11 | 88,09  | 69,42 | 51,80 | 80,00  | 1 226,00 | - | 436,00 | - | 1 116,20 | -    | 940,02 | - |
| 631,49 | 88,73  | 72,02 | 54,28 | 80,00  | 1 200,62 | - | 410,62 | - | 1 116,84 | -    | 939,38 | - |
| 656,11 | 89,91  | 74,60 | 56,62 | 80,00  | 1 176,00 | - | 386,00 | - | 1 118,02 | -    | 938,20 | - |
| 706,11 | 92,39  | 79,85 | 61,37 | 80,00  | 1 126,00 | - | 336,00 | - | 1 120,50 | -    | 935,72 | - |
| 725,38 | 93,68  | 81,91 | 63,17 | 90,00  | 1 206,73 | - | 316,73 | - | 1 121,79 | -    | 934,43 | - |
| 756,11 | 94,18  | 85,03 | 66,19 | 90,00  | 1 176,00 | - | 286,00 | - | 1 122,29 | -    | 933,93 | - |
| 856,11 | 96,38  | 95,25 | 75,97 | 100,00 | 1 176,00 | - | 186,00 | - | 1 124,49 | -    | 931,73 | - |
| 868,73 | 96,61  | 96,53 | 77,21 | 100,00 | 1 163,38 | - | 173,38 | - | 1 124,72 | -    | 931,50 | - |
| 870,24 | 97,55  | 96,78 | 77,27 | 100,00 | 1 161,87 | - | 171,87 | - | 1 125,66 | -    | 930,56 | - |
| 856,11 | 98,39  | 95,45 | 75,77 | 100,00 | 1 176,00 | - | 186,00 | - | 1 126,50 | -    | 929,72 | - |
| 806,11 | 99,49  | 90,56 | 70,66 | 100,00 | 1 226,00 | - | 236,00 | - | 1 127,60 | -    | 928,62 | - |
| 756,11 | 100,64 | 85,67 | 65,55 | 90,00  | 1 176,00 | - | 286,00 | - | 1 128,75 | -    | 927,47 | - |
| 706,11 | 101,41 | 80,75 | 60,47 | 80,00  | 1 126,00 | - | 336,00 | - | 1 129,52 | 1,00 | 926,70 | - |
| 679,73 | 101,80 | 78,15 | 57,79 | 80,00  | 1 152,38 | - | 362,38 | - | 1 129,91 | -    | 926,31 | - |
| 657,44 | 103,18 | 76,06 | 55,43 | 80,00  | 1 174,67 | - | 384,67 | - | 1 131,29 | -    | 924,93 | - |
| 656,11 | 103,24 | 75,94 | 55,29 | 80,00  | 1 176,00 | - | 386,00 | - | 1 131,35 | -    | 924,87 | - |
| 610,79 | 105,56 | 71,64 | 50,52 | 80,00  | 1 221,32 | - | 431,32 | - | 1 133,67 | -    | 922,55 | - |
| 606,11 | 105,68 | 71,18 | 50,04 | 80,00  | 1 226,00 | - | 436,00 | - | 1 133,79 | -    | 922,43 | - |
| 559,09 | 106,83 | 66,59 | 45,23 | 80,00  | 1 273,02 | - | 483,02 | - | 1 134,94 | -    | 921,28 | - |
| 556,11 | 106,95 | 66,31 | 44,92 | 80,00  | 1 276,00 | - | 486,00 | - | 1 135,06 | -    | 921,16 | - |
| 515,95 | 109,68 | 62,56 | 40,63 | 80,00  | 1 316,16 | - | 526,16 | - | 1 137,79 | -    | 918,43 | - |
| 506,11 | 110,34 | 61,64 | 39,58 | 80,00  | 1 326,00 | - | 536,00 | - | 1 138,45 | -    | 917,77 | - |
| 456,11 | 112,05 | 56,82 | 34,41 | 60,00  | 1 176,00 | - | 586,00 | - | 1 140,16 | -    | 916,06 | - |
| 406,13 | 113,50 | 51,96 | 29,26 | 60,00  | 1 225,98 | - | 635,98 | - | 1 141,61 | -    | 914,61 | - |
| 356,11 | 116,11 | 47,22 | 24,00 | 60,00  | 1 276,00 | - | 686,00 | - | 1 144,22 | -    | 912,00 | - |
| 345,36 | 116,72 | 46,21 | 22,86 | 60,00  | 1 286,75 | - | 696,75 | - | 1 144,83 | -    | 911,39 | - |
| 323,93 | 118,73 | 44,27 | 20,52 | 60,00  | 1 308,18 | - | 718,18 | - | 1 146,84 | -    | 909,38 | - |
| 318,54 | 119,24 | 43,78 | 19,93 | 60,00  | 1 313,57 | - | 723,57 | - | 1 147,35 | -    | 908,87 | - |

|        |        |       |        |       |          |   |        |   |          |      |        |      |
|--------|--------|-------|--------|-------|----------|---|--------|---|----------|------|--------|------|
| 306,11 | 120,30 | 42,64 | 18,58  | 60,00 | 1 326,00 | - | 736,00 | - | 1 148,41 | -    | 907,81 | -    |
| 256,11 | 126,64 | 38,28 | 12,95  | 40,00 | 1 176,00 | - | 786,00 | - | 1 154,75 | -    | 901,47 | -    |
| 252,27 | 127,04 | 37,93 | 12,52  | 40,00 | 1 179,84 | - | 789,84 | - | 1 155,15 | -    | 901,07 | -    |
| 247,45 | 128,49 | 37,59 | 11,90  | 40,00 | 1 184,66 | - | 794,66 | - | 1 156,60 | -    | 899,62 | -    |
| 236,16 | 130,39 | 36,66 | 10,58  | 40,00 | 1 195,95 | - | 805,95 | - | 1 158,50 | -    | 897,72 | -    |
| 256,11 | 133,34 | 38,94 | 12,28  | 40,00 | 1 176,00 | - | 786,00 | - | 1 161,45 | -    | 894,77 | -    |
| 269,34 | 134,90 | 40,42 | 13,44  | 40,00 | 1 162,77 | - | 772,77 | - | 1 163,01 | 1,00 | 893,21 | -    |
| 284,30 | 139,62 | 42,39 | 14,47  | 60,00 | 1 347,81 | - | 757,81 | - | 1 167,73 | -    | 888,49 | -    |
| 256,05 | 149,64 | 40,57 | 10,64  | 40,00 | 1 176,06 | - | 786,06 | - | 1 177,75 | 1,00 | 878,47 | -    |
| 206,11 | 152,67 | 35,88 | 5,34   | 40,00 | 1 226,00 | - | 836,00 | - | 1 180,78 | -    | 875,44 | -    |
| 173,28 | 154,87 | 32,81 | 1,84   | 40,00 | 1 258,83 | - | 868,83 | - | 1 182,98 | -    | 873,24 | -    |
| 170,43 | 155,72 | 32,61 | 1,47   | 40,00 | 1 261,68 | - | 871,68 | - | 1 183,83 | -    | 872,39 | -    |
| 151,86 | 156,71 | 30,86 | - 0,48 | 40,00 | 1 280,25 | - | 890,25 | - | 1 184,82 | -    | 871,40 | 1,00 |

### 2.4.1. Analyse du réseau en service normal

- **Court terme ( $C_{hw}=136$ )**

En suivant la même démarche, nous avons simulé le réseau à la mise en service, en considérant les conduites neuves. Ainsi, les calculs ont été effectués en considérant le coefficient de Hazen-Williams  $C_{hw}=136$ . Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.4 (colonnes 23 et 25) et illustrés par la figure 2.3. Nous constatons que la courbe piézométrique, est circonscrite à l'intérieur du fuseau des pressions max et min admissible pour tous les tronçons. *Ce qui signifie que le réseau est bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées par les règlements. Aussi, il faut signaler que les pressions au niveau du Siphon sont très importantes. A cet effet, nous avons adopté des conduites PN90 et PN100.*



**Figure 2.4 : Disposition de la ligne piézométrique par rapport au profil du terrain naturel lors de la mise en service.**

Tableau 2.5: Résultats de calcul du réseau à long terme ( $C_{hw} = 95$ ).

| 1                       | 2            | 3           | 4         | 5           | 6      | 7        | 8          | 9      | 10      | 11        | 12        | 13        | 14       | 15          | 16              | 17                   |
|-------------------------|--------------|-------------|-----------|-------------|--------|----------|------------|--------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|-----------------|----------------------|
| Trançon                 | CTN<br>amont | CTN<br>aval | L part(m) | L<br>cum(m) | Q(l/s) | Deco(mm) | $D_N$ (mm) | V(m/s) | j(m/ml) | $J_L$ (m) | $J_s$ (m) | $J_L$ (m) | Hamont   | $H^i$ (m)   | $P^i_{sol}$ (m) | $P^i_{sol}$<br>(bar) |
| R(LNI)-1                | 1<br>028,11  | 999,00      | 159,15    | 159,15      | 99,00  | 314,64   | 300,00     | 1,40   | 0,01    | 1,80      | 0,27      | 2,07      | 1 032,11 | 1<br>030,04 | 31,04           | 3,10                 |
| 1_2                     | 999,00       | 959,37      | 146,40    | 305,55      | 99,00  | 314,64   | 300,00     | 1,40   | 0,01    | 1,65      | 0,25      | 1,90      | 1 030,04 | 1<br>028,14 | 68,77           | 6,88                 |
| 2_3                     | 959,37       | 927,92      | 517,30    | 822,85      | 99,00  | 314,64   | 300,00     | 1,40   | 0,01    | 5,84      | 0,88      | 6,72      | 1 028,14 | 1<br>021,42 | 93,50           | 9,35                 |
| 3_4(Gendarmerie<br>LNI) | 927,92       | 926,00      | 81,60     | 904,45      | 99,00  | 314,64   | 300,00     | 1,40   | 0,01    | 0,92      | 0,14      | 1,06      | 1 021,42 | 1<br>020,37 | 94,37           | 9,44                 |
| 4_5                     | 926,00       | 876,00      | 742,00    | 1 646,45    | 71,00  | 266,46   | 300,00     | 1,00   | 0,01    | 4,53      | 0,68      | 5,21      | 1 020,37 | 1<br>015,16 | 139,16          | 13,92                |
| 5_6                     | 876,00       | 826,00      | 636,20    | 2 282,65    | 71,00  | 266,46   | 300,00     | 1,00   | 0,01    | 3,88      | 0,58      | 4,46      | 1 015,16 | 1<br>010,70 | 184,70          | 18,47                |
| 6_7(Ait Atelli)         | 826,00       | 797,67      | 447,55    | 2 730,20    | 71,00  | 266,46   | 300,00     | 1,00   | 0,01    | 2,73      | 0,41      | 3,14      | 1 010,70 | 1<br>007,56 | 209,89          | 20,99                |
| 7_8                     | 797,67       | 776,00      | 232,45    | 2 962,65    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 3,21      | 0,48      | 3,69      | 1 007,56 | 1<br>003,87 | 227,87          | 22,79                |
| 8_9                     | 776,00       | 762,64      | 133,70    | 3 096,35    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 1,85      | 0,28      | 2,12      | 1 003,87 | 1<br>001,74 | 239,10          | 23,91                |
| 9_10                    | 762,64       | 769,53      | 127,02    | 3 223,37    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 1,75      | 0,26      | 2,02      | 1 001,74 | 999,73      | 230,20          | 23,02                |
| 10_11                   | 769,53       | 746,30      | 358,96    | 3 582,33    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 4,96      | 0,74      | 5,70      | 999,73   | 994,03      | 247,73          | 24,77                |
| 11_12                   | 746,30       | 760,43      | 105,35    | 3 687,68    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 1,45      | 0,22      | 1,67      | 994,03   | 992,35      | 231,92          | 23,19                |
| 12_13                   | 760,43       | 726,00      | 102,02    | 3 789,70    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 1,41      | 0,21      | 1,62      | 992,35   | 990,73      | 264,73          | 26,47                |
| 13_14                   | 726,00       | 671,18      | 115,04    | 3 904,74    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 1,59      | 0,24      | 1,83      | 990,73   | 988,91      | 317,73          | 31,77                |
| 14_15                   | 671,18       | 626,00      | 735,07    | 4 639,81    | 68,32  | 261,38   | 250,00     | 1,39   | 0,01    | 10,15     | 1,52      | 11,67     | 988,91   | 977,23      | 351,23          | 35,12                |

|                   |        |        |          |          |       |        |        |      |      |       |      |       |        |        |        |       |
|-------------------|--------|--------|----------|----------|-------|--------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 15_16             | 626,00 | 599,74 | 414,58   | 5 054,39 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 5,72  | 0,86 | 6,58  | 977,23 | 970,65 | 370,91 | 37,09 |
| 16_17             | 599,74 | 601,86 | 194,30   | 5 248,69 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 2,68  | 0,40 | 3,09  | 970,65 | 967,57 | 365,71 | 36,57 |
| 17_18(Ait Ferah)  | 601,86 | 597,94 | 205,15   | 5 453,84 | 68,32 | 261,38 | 250,00 | 1,39 | 0,01 | 2,83  | 0,42 | 3,26  | 967,57 | 964,31 | 366,37 | 36,64 |
| 18_19             | 597,94 | 576,00 | 334,35   | 5 788,19 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 4,15  | 0,62 | 4,78  | 964,31 | 959,53 | 383,53 | 38,35 |
| 19_20             | 576,00 | 561,31 | 228,50   | 6 016,69 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,84  | 0,43 | 3,27  | 959,53 | 956,26 | 394,95 | 39,50 |
| 20-21             | 561,31 | 526,00 | 754,55   | 6 771,24 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 9,38  | 1,41 | 10,78 | 956,26 | 945,48 | 419,48 | 41,95 |
| 21_22             | 526,00 | 472,50 | 1 323,57 | 8 094,81 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 16,45 | 2,47 | 18,91 | 945,48 | 926,57 | 454,07 | 45,41 |
| 22-23(Ag Tizizit) | 472,50 | 514,78 | 156,54   | 8 251,35 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,95  | 0,29 | 2,24  | 926,57 | 924,33 | 409,55 | 40,96 |
| 23-24             | 514,78 | 476,00 | 147,83   | 8 399,18 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,84  | 0,28 | 2,11  | 924,33 | 922,22 | 446,22 | 44,62 |
| 24-25             | 476,00 | 426,00 | 171,71   | 8 570,89 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,13  | 0,32 | 2,45  | 922,22 | 919,76 | 493,76 | 49,38 |
| 25-26             | 426,00 | 400,62 | 62,14    | 8 633,03 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,77  | 0,12 | 0,89  | 919,76 | 918,88 | 518,26 | 51,83 |
| 26-27             | 400,62 | 376,00 | 114,86   | 8 747,89 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,43  | 0,21 | 1,64  | 918,88 | 917,24 | 541,24 | 54,12 |
| 27-28             | 376,00 | 326,00 | 241,35   | 8 989,24 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 3,00  | 0,45 | 3,45  | 917,24 | 913,79 | 587,79 | 58,78 |
| 28-29             | 326,00 | 306,73 | 125,40   | 9 114,64 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,56  | 0,23 | 1,79  | 913,79 | 911,99 | 605,26 | 60,53 |
| 29-30             | 306,73 | 276,00 | 48,85    | 9 163,49 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,61  | 0,09 | 0,70  | 911,99 | 911,30 | 635,30 | 63,53 |
| 30-31             | 276,00 | 176,00 | 214,65   | 9 378,14 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,67  | 0,40 | 3,07  | 911,30 | 908,23 | 732,23 | 73,22 |
| 31-32             | 176,00 | 163,38 | 21,65    | 9 399,79 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,27  | 0,04 | 0,31  | 908,23 | 907,92 | 744,54 | 74,45 |
| 32-Siphon O.A     | 163,38 | 161,87 | 91,55    | 9 491,34 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,14  | 0,17 | 1,31  | 907,92 | 906,61 | 744,74 | 74,47 |
| 33-34             | 161,87 | 176,00 | 82,27    | 9 573,61 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,02  | 0,15 | 1,18  | 906,61 | 905,44 | 729,44 | 72,94 |

|                     |        |        |        |           |       |        |        |      |      |      |      |      |        |        |        |       |
|---------------------|--------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| 34-35               | 176,00 | 226,00 | 107,16 | 9 680,77  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,33 | 0,20 | 1,53 | 905,44 | 903,90 | 677,90 | 67,79 |
| 35-36               | 226,00 | 276,00 | 111,45 | 9 792,22  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,38 | 0,21 | 1,59 | 903,90 | 902,31 | 626,31 | 62,63 |
| 36-37               | 276,00 | 326,00 | 74,75  | 9 866,97  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,93 | 0,14 | 1,07 | 902,31 | 901,24 | 575,24 | 57,52 |
| 37-38               | 326,00 | 352,38 | 38,35  | 9 905,32  | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,48 | 0,07 | 0,55 | 901,24 | 900,70 | 548,32 | 54,83 |
| 38-39               | 352,38 | 374,67 | 133,90 | 10 039,22 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,66 | 0,25 | 1,91 | 900,70 | 898,78 | 524,11 | 52,41 |
| 39-40               | 374,67 | 376,00 | 6,15   | 10 045,37 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 0,09 | 898,78 | 898,69 | 522,69 | 52,27 |
| 40-41               | 376,00 | 421,32 | 225,65 | 10 271,02 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,80 | 0,42 | 3,22 | 898,69 | 895,47 | 474,15 | 47,41 |
| 41-42               | 421,32 | 426,00 | 11,55  | 10 282,57 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,14 | 0,02 | 0,17 | 895,47 | 895,30 | 469,30 | 46,93 |
| 42-43               | 426,00 | 473,02 | 111,75 | 10 394,32 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,39 | 0,21 | 1,60 | 895,30 | 893,71 | 420,69 | 42,07 |
| 43-44               | 473,02 | 476,00 | 12,10  | 10 406,42 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,15 | 0,02 | 0,17 | 893,71 | 893,53 | 417,53 | 41,75 |
| 44-45               | 476,00 | 516,16 | 265,05 | 10 671,47 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 3,29 | 0,49 | 3,79 | 893,53 | 889,75 | 373,59 | 37,36 |
| 45-46               | 516,16 | 526,00 | 64,40  | 10 735,87 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,80 | 0,12 | 0,92 | 889,75 | 888,83 | 362,83 | 36,28 |
| 46-47               | 526,00 | 576,00 | 167,00 | 10 902,87 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,08 | 0,31 | 2,39 | 888,83 | 886,44 | 310,44 | 31,04 |
| 47-48               | 576,00 | 625,98 | 141,10 | 11 043,97 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 1,75 | 0,26 | 2,02 | 886,44 | 884,42 | 258,44 | 25,84 |
| 48-49               | 625,98 | 676,00 | 253,20 | 11 297,17 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 3,15 | 0,47 | 3,62 | 884,42 | 880,81 | 204,81 | 20,48 |
| 49-50(Agouni Arous) | 676,00 | 686,75 | 59,45  | 11 356,62 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,74 | 0,11 | 0,85 | 880,81 | 879,96 | 193,21 | 19,32 |
| 50-51               | 686,75 | 708,18 | 195,55 | 11 552,17 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 2,43 | 0,36 | 2,79 | 879,96 | 877,16 | 168,98 | 16,90 |
| 51-52(Tizi Hibel)   | 708,18 | 713,57 | 50,25  | 11 602,42 | 64,54 | 254,05 | 250,00 | 1,31 | 0,01 | 0,62 | 0,09 | 0,72 | 877,16 | 876,44 | 162,87 | 16,29 |
| 52-53               | 713,57 | 726,00 | 102,65 | 11 705,07 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 1,15 | 0,17 | 1,33 | 876,44 | 875,12 | 149,12 | 14,91 |

|                        |        |        |        |           |       |        |        |      |      |      |      |      |        |        |        |       |
|------------------------|--------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| 53-54                  | 726,00 | 776,00 | 617,00 | 12 322,07 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 6,93 | 1,04 | 7,97 | 875,12 | 867,14 | 91,14  | 9,11  |
| 54-55                  | 776,00 | 779,84 | 39,27  | 12 361,34 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 0,44 | 0,07 | 0,51 | 867,14 | 866,64 | 86,80  | 8,68  |
| 55-56                  | 779,84 | 784,66 | 141,00 | 12 502,34 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 1,58 | 0,24 | 1,82 | 866,64 | 864,81 | 80,15  | 8,02  |
| 56-57(Taguemout Azouz) | 784,66 | 795,95 | 184,85 | 12 687,19 | 61,13 | 247,24 | 250,00 | 1,25 | 0,01 | 2,08 | 0,31 | 2,39 | 864,81 | 862,42 | 66,47  | 6,65  |
| 57-58                  | 795,95 | 776,00 | 286,62 | 12 973,81 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 2,39 | 0,36 | 2,75 | 862,42 | 859,67 | 83,67  | 8,37  |
| 58-59                  | 776,00 | 762,77 | 151,63 | 13 125,44 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 1,27 | 0,19 | 1,46 | 859,67 | 858,22 | 95,45  | 9,54  |
| 59-60                  | 762,77 | 747,81 | 459,35 | 13 584,79 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 3,84 | 0,58 | 4,41 | 858,22 | 853,81 | 106,00 | 10,60 |
| 60-61                  | 747,81 | 776,06 | 975,20 | 14 559,99 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 8,14 | 1,22 | 9,36 | 853,81 | 844,44 | 68,38  | 6,84  |
| 61-62                  | 776,06 | 826,00 | 294,30 | 14 854,29 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 2,46 | 0,37 | 2,83 | 844,44 | 841,62 | 15,62  | 1,56  |
| 62-63                  | 826,00 | 858,83 | 214,10 | 15 068,39 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 1,79 | 0,27 | 2,06 | 841,62 | 839,56 | -19,27 | -1,93 |
| 63-64                  | 858,83 | 861,68 | 82,75  | 15 151,14 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 0,69 | 0,10 | 0,79 | 839,56 | 838,77 | -22,91 | -2,29 |
| 64-R(BD)               | 861,68 | 880,25 | 96,50  | 15 247,64 | 52,07 | 228,19 | 250,00 | 1,06 | 0,01 | 0,81 | 0,12 | 0,93 | 838,77 | 837,84 | -42,41 | -4,24 |

Tableau 2.6 : Résultats de calcul du réseau à long terme  $C_{hw} = 95$  (suite).

| 18       | 19           | 20          | 21         | 22        | 23             | 24   | 25              | 26   | 27            | 28   | 29           | 30   |
|----------|--------------|-------------|------------|-----------|----------------|------|-----------------|------|---------------|------|--------------|------|
|          |              |             |            |           | Service normal |      |                 |      | Arrêt brusque |      |              |      |
| Hgeo,(m) | b(bélier)(m) | Pmax (bars) | Pmin(bars) | PN (bars) | Hmax adm(m)    | Test | Hminadm fonc(m) | Test | Hbélier (m)   | Test | H bélier (m) | Test |
| 33,11    | 1,64         | 3,47        | 3,15       | 4,00      | 1 039,00       | -    | 1 009,00        | -    | 1 029,75      | -    | 1 026,47     | -    |
| 72,74    | 3,14         | 7,59        | 6,96       | 10,00     | 1 059,37       | -    | 969,37          | -    | 1 031,25      | -    | 1 024,97     | -    |
| 104,19   | 8,46         | 11,26       | 9,57       | 16,00     | 1 087,92       | -    | 937,92          | -    | 1 036,57      | -    | 1 019,65     | -    |
| 106,11   | 9,30         | 11,54       | 9,68       | 16,00     | 1 086,00       | -    | 936,00          | -    | 1 037,41      | -    | 1 018,81     | -    |
| 156,11   | 16,92        | 17,30       | 13,92      | 20,00     | 1 076,00       | -    | 886,00          | -    | 1 045,03      | -    | 1 011,19     | -    |
| 206,11   | 23,46        | 22,96       | 18,27      | 40,00     | 1 226,00       | -    | 836,00          | -    | 1 051,57      | -    | 1 004,65     | -    |
| 234,44   | 28,06        | 26,25       | 20,64      | 40,00     | 1 197,67       | -    | 807,67          | -    | 1 056,17      | -    | 1 000,05     | -    |
| 256,11   | 30,45        | 28,66       | 22,57      | 40,00     | 1 176,00       | -    | 786,00          | -    | 1 058,56      | -    | 997,66       | -    |
| 269,47   | 31,82        | 30,13       | 23,76      | 40,00     | 1 162,64       | -    | 772,64          | -    | 1 059,93      | -    | 996,29       | -    |
| 262,58   | 33,13        | 29,57       | 22,95      | 40,00     | 1 169,53       | -    | 779,53          | -    | 1 061,24      | -    | 994,98       | -    |
| 285,81   | 36,82        | 32,26       | 24,90      | 40,00     | 1 146,30       | -    | 756,30          | -    | 1 064,93      | -    | 991,29       | -    |
| 271,68   | 37,90        | 30,96       | 23,38      | 40,00     | 1 160,43       | -    | 770,43          | -    | 1 066,01      | -    | 990,21       | -    |
| 306,11   | 38,95        | 34,51       | 26,72      | 40,00     | 1 126,00       | -    | 736,00          | -    | 1 067,06      | -    | 989,16       | -    |
| 360,93   | 40,13        | 40,11       | 32,08      | 40,00     | 1 071,18       | -    | 681,18          | -    | 1 068,24      | -    | 987,98       | -    |
| 406,11   | 47,69        | 45,38       | 35,84      | 60,00     | 1 226,00       | -    | 636,00          | -    | 1 075,80      | -    | 980,42       | -    |
| 432,37   | 51,95        | 48,43       | 38,04      | 60,00     | 1 199,74       | -    | 609,74          | -    | 1 080,06      | -    | 976,16       | -    |
| 430,25   | 53,94        | 48,42       | 37,63      | 60,00     | 1 201,86       | -    | 611,86          | -    | 1 082,05      | -    | 974,17       | -    |
| 434,17   | 56,05        | 49,02       | 37,81      | 60,00     | 1 197,94       | -    | 607,94          | -    | 1 084,16      | -    | 972,06       | -    |
| 456,11   | 59,49        | 51,56       | 39,66      | 60,00     | 1 176,00       | -    | 586,00          | -    | 1 087,60      | -    | 968,62       | -    |
| 470,80   | 61,84        | 53,26       | 40,90      | 60,00     | 1 161,31       | -    | 571,31          | -    | 1 089,95      | -    | 966,27       | -    |
| 506,11   | 69,59        | 57,57       | 43,65      | 60,00     | 1 126,00       | -    | 536,00          | -    | 1 097,70      | -    | 958,52       | -    |
| 559,61   | 83,19        | 64,28       | 47,64      | 80,00     | 1 272,50       | -    | 482,50          | -    | 1 111,30      | -    | 944,92       | -    |

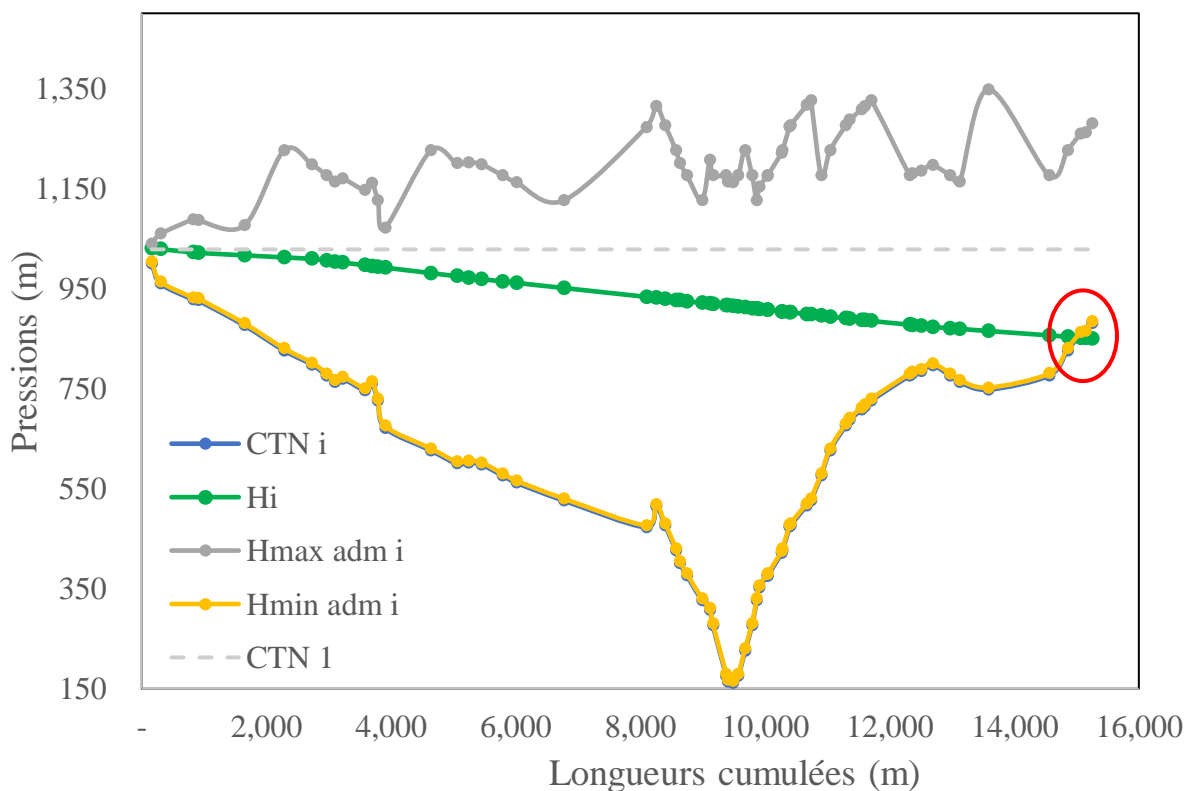
|        |        |       |       |        |          |   |        |   |          |      |        |   |
|--------|--------|-------|-------|--------|----------|---|--------|---|----------|------|--------|---|
| 517,33 | 84,80  | 60,21 | 43,25 | 80,00  | 1 314,78 | - | 524,78 | - | 1 112,91 | -    | 943,31 | - |
| 556,11 | 86,32  | 64,24 | 46,98 | 80,00  | 1 276,00 | - | 486,00 | - | 1 114,43 | -    | 941,79 | - |
| 606,11 | 88,09  | 69,42 | 51,80 | 80,00  | 1 226,00 | - | 436,00 | - | 1 116,20 | -    | 940,02 | - |
| 631,49 | 88,73  | 72,02 | 54,28 | 80,00  | 1 200,62 | - | 410,62 | - | 1 116,84 | -    | 939,38 | - |
| 656,11 | 89,91  | 74,60 | 56,62 | 80,00  | 1 176,00 | - | 386,00 | - | 1 118,02 | -    | 938,20 | - |
| 706,11 | 92,39  | 79,85 | 61,37 | 80,00  | 1 126,00 | - | 336,00 | - | 1 120,50 | -    | 935,72 | - |
| 725,38 | 93,68  | 81,91 | 63,17 | 90,00  | 1 206,73 | - | 316,73 | - | 1 121,79 | -    | 934,43 | - |
| 756,11 | 94,18  | 85,03 | 66,19 | 90,00  | 1 176,00 | - | 286,00 | - | 1 122,29 | -    | 933,93 | - |
| 856,11 | 96,38  | 95,25 | 75,97 | 100,00 | 1 176,00 | - | 186,00 | - | 1 124,49 | -    | 931,73 | - |
| 868,73 | 96,61  | 96,53 | 77,21 | 100,00 | 1 163,38 | - | 173,38 | - | 1 124,72 | -    | 931,50 | - |
| 870,24 | 97,55  | 96,78 | 77,27 | 100,00 | 1 161,87 | - | 171,87 | - | 1 125,66 | -    | 930,56 | - |
| 856,11 | 98,39  | 95,45 | 75,77 | 100,00 | 1 176,00 | - | 186,00 | - | 1 126,50 | -    | 929,72 | - |
| 806,11 | 99,49  | 90,56 | 70,66 | 100,00 | 1 226,00 | - | 236,00 | - | 1 127,60 | -    | 928,62 | - |
| 756,11 | 100,64 | 85,67 | 65,55 | 90,00  | 1 176,00 | - | 286,00 | - | 1 128,75 | -    | 927,47 | - |
| 706,11 | 101,41 | 80,75 | 60,47 | 80,00  | 1 126,00 | - | 336,00 | - | 1 129,52 | 1,00 | 926,70 | - |
| 679,73 | 101,80 | 78,15 | 57,79 | 80,00  | 1 152,38 | - | 362,38 | - | 1 129,91 | -    | 926,31 | - |
| 657,44 | 103,18 | 76,06 | 55,43 | 80,00  | 1 174,67 | - | 384,67 | - | 1 131,29 | -    | 924,93 | - |
| 656,11 | 103,24 | 75,94 | 55,29 | 80,00  | 1 176,00 | - | 386,00 | - | 1 131,35 | -    | 924,87 | - |
| 610,79 | 105,56 | 71,64 | 50,52 | 80,00  | 1 221,32 | - | 431,32 | - | 1 133,67 | -    | 922,55 | - |
| 606,11 | 105,68 | 71,18 | 50,04 | 80,00  | 1 226,00 | - | 436,00 | - | 1 133,79 | -    | 922,43 | - |
| 559,09 | 106,83 | 66,59 | 45,23 | 80,00  | 1 273,02 | - | 483,02 | - | 1 134,94 | -    | 921,28 | - |
| 556,11 | 106,95 | 66,31 | 44,92 | 80,00  | 1 276,00 | - | 486,00 | - | 1 135,06 | -    | 921,16 | - |
| 515,95 | 109,68 | 62,56 | 40,63 | 80,00  | 1 316,16 | - | 526,16 | - | 1 137,79 | -    | 918,43 | - |
| 506,11 | 110,34 | 61,64 | 39,58 | 80,00  | 1 326,00 | - | 536,00 | - | 1 138,45 | -    | 917,77 | - |
| 456,11 | 112,05 | 56,82 | 34,41 | 60,00  | 1 176,00 | - | 586,00 | - | 1 140,16 | -    | 916,06 | - |
| 406,13 | 113,50 | 51,96 | 29,26 | 60,00  | 1 225,98 | - | 635,98 | - | 1 141,61 | -    | 914,61 | - |
| 356,11 | 116,11 | 47,22 | 24,00 | 60,00  | 1 276,00 | - | 686,00 | - | 1 144,22 | -    | 912,00 | - |
| 345,36 | 116,72 | 46,21 | 22,86 | 60,00  | 1 286,75 | - | 696,75 | - | 1 144,83 | -    | 911,39 | - |

|        |        |       |       |       |          |          |        |        |          |          |        |        |      |
|--------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|------|
| 323,93 | 118,73 | 44,27 | 20,52 | 60,00 | 1 308,18 | -        | 718,18 | -      | 1 146,84 | -        | 909,38 | -      |      |
| 318,54 | 119,24 | 43,78 | 19,93 | 60,00 | 1 313,57 | -        | 723,57 | -      | 1 147,35 | -        | 908,87 | -      |      |
| 306,11 | 120,30 | 42,64 | 18,58 | 60,00 | 1 326,00 | -        | 736,00 | -      | 1 148,41 | -        | 907,81 | -      |      |
| 256,11 | 126,64 | 38,28 | 12,95 | 40,00 | 1 176,00 | -        | 786,00 | -      | 1 154,75 | -        | 901,47 | -      |      |
| 252,27 | 127,04 | 37,93 | 12,52 | 40,00 | 1 179,84 | -        | 789,84 | -      | 1 155,15 | -        | 901,07 | -      |      |
| 247,45 | 128,49 | 37,59 | 11,90 | 40,00 | 1 184,66 | -        | 794,66 | -      | 1 156,60 | -        | 899,62 | -      |      |
| 236,16 | 130,39 | 36,66 | 10,58 | 40,00 | 1 195,95 | -        | 805,95 | -      | 1 158,50 | -        | 897,72 | -      |      |
| 256,11 | 133,34 | 38,94 | 12,28 | 40,00 | 1 176,00 | -        | 786,00 | -      | 1 161,45 | -        | 894,77 | -      |      |
| 269,34 | 134,90 | 40,42 | 13,44 | 40,00 | 1 162,77 | -        | 772,77 | -      | 1 163,01 | 1,00     | 893,21 | -      |      |
| 284,30 | 139,62 | 42,39 | 14,47 | 60,00 | 1 347,81 | -        | 757,81 | -      | 1 167,73 | -        | 888,49 | -      |      |
| 256,05 | 149,64 | 40,57 | 10,64 | 40,00 | 1 176,06 | -        | 786,06 | -      | 1 177,75 | 1,00     | 878,47 | -      |      |
| 206,11 | 152,67 | 35,88 | 5,34  | 40,00 | 1 226,00 | -        | 836,00 | -      | 1 180,78 | -        | 875,44 | -      |      |
| 173,28 | 154,87 | 32,81 | 1,84  | 40,00 | 1 258,83 | -        | 868,83 | 1,00   | 1 182,98 | -        | 873,24 | -      |      |
| 170,43 | 155,72 | 32,61 | 1,47  | 40,00 | 1 261,68 | -        | 871,68 | 1,00   | 1 183,83 | -        | 872,39 | -      |      |
| 151,86 | 156,71 | 30,86 | -     | 0,48  | 40,00    | 1 280,25 | -      | 890,25 | 1,00     | 1 184,82 | -      | 871,40 | 1,00 |

|        |        |       |       |       |          |          |        |        |          |          |        |        |      |
|--------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|------|
| 323,93 | 118,73 | 44,27 | 20,52 | 60,00 | 1 308,18 | -        | 718,18 | -      | 1 146,84 | -        | 909,38 | -      |      |
| 318,54 | 119,24 | 43,78 | 19,93 | 60,00 | 1 313,57 | -        | 723,57 | -      | 1 147,35 | -        | 908,87 | -      |      |
| 306,11 | 120,30 | 42,64 | 18,58 | 60,00 | 1 326,00 | -        | 736,00 | -      | 1 148,41 | -        | 907,81 | -      |      |
| 256,11 | 126,64 | 38,28 | 12,95 | 40,00 | 1 176,00 | -        | 786,00 | -      | 1 154,75 | -        | 901,47 | -      |      |
| 252,27 | 127,04 | 37,93 | 12,52 | 40,00 | 1 179,84 | -        | 789,84 | -      | 1 155,15 | -        | 901,07 | -      |      |
| 247,45 | 128,49 | 37,59 | 11,90 | 40,00 | 1 184,66 | -        | 794,66 | -      | 1 156,60 | -        | 899,62 | -      |      |
| 236,16 | 130,39 | 36,66 | 10,58 | 40,00 | 1 195,95 | -        | 805,95 | -      | 1 158,50 | -        | 897,72 | -      |      |
| 256,11 | 133,34 | 38,94 | 12,28 | 40,00 | 1 176,00 | -        | 786,00 | -      | 1 161,45 | -        | 894,77 | -      |      |
| 269,34 | 134,90 | 40,42 | 13,44 | 40,00 | 1 162,77 | -        | 772,77 | -      | 1 163,01 | 1,00     | 893,21 | -      |      |
| 284,30 | 139,62 | 42,39 | 14,47 | 60,00 | 1 347,81 | -        | 757,81 | -      | 1 167,73 | -        | 888,49 | -      |      |
| 256,05 | 149,64 | 40,57 | 10,64 | 40,00 | 1 176,06 | -        | 786,06 | -      | 1 177,75 | 1,00     | 878,47 | -      |      |
| 206,11 | 152,67 | 35,88 | 5,34  | 40,00 | 1 226,00 | -        | 836,00 | -      | 1 180,78 | -        | 875,44 | -      |      |
| 173,28 | 154,87 | 32,81 | 1,84  | 40,00 | 1 258,83 | -        | 868,83 | 1,00   | 1 182,98 | -        | 873,24 | -      |      |
| 170,43 | 155,72 | 32,61 | 1,47  | 40,00 | 1 261,68 | -        | 871,68 | 1,00   | 1 183,83 | -        | 872,39 | -      |      |
| 151,86 | 156,71 | 30,86 | -     | 0,48  | 40,00    | 1 280,25 | -      | 890,25 | 1,00     | 1 184,82 | -      | 871,40 | 1,00 |

- Long terme ( $C_{hw}=95$ )

Les résultats de calcul des pressions dans le réseau, en situation long terme, sont donnés dans le tableau 2.6 (colonnes 23 et 25) et illustrés par la figure 2.4. On note que la courbe piézométrique (pression en tout point du réseau) est circonscrite à l'intérieur du fuseau des pressions max et min admissible pour les 61 premiers tronçons. Néanmoins, les résultats révèlent qu'au niveau des nœuds 63,64 et,65 la cote piézométrique passe en-dessous de la pression minimale admissible ; *ceci conduirait à des problèmes d'alimentation du réservoir d'arrivé (Beni-Douala) et donc du fonctionnement de ce dernier. Ce qui signifié que le réseau n'est pas bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées par les règlements. Ces nœuds doivent être donc des points d'attention pour l'organisme de gestion.*



**Figure 2.5 : Disposition de la ligne piézométrique par rapport au profil du terrain naturel à long terme**

### 2.4.2. Analyse du réseau à l'arrêt brusque

Pour analyser le réseau d'adduction gravitaire à l'arrêt instantané (fermeture brusque) de la vanne, nous avons calculé les surpressions et dépressions induites par le bélier (b) dans nœud, soient :

$$H_{\max}^i = CTN^1 + b^i \quad (2.19)$$

Et 
$$H_{\min}^i = CTN^1 - b^i \quad (2.20)$$

$CTN^1$  : cote du terrain naturel du réservoir de LNI, en amont du réseau.

$b^i$  : étant le bélier au niveau de chaque tronçon ;

A cet effet, nous avons considéré une variation linéaire du bélier tel qu'exprimé par l'équation (2. 21) :

$$b^i = \frac{B * l^i}{L} \quad (2.21)$$

Avec :

$l^i$  : longueur cumulée des tronçons jusqu'au nœud (i)

L : longueur totale de la conduite (m)

B<sup>i</sup> : bélier total donné dans la formule (2.14)

Les résultats de calcul des surpressions et dépressions sont donnés dans le tableau 2.6 (colonnes 27 et 29) et présentés en figure 2.5. *Les résultats révèlent qu'à la de la fermeture brusque instantanée de la vanne, les surpressions dépassent les pressions admissibles aux nœuds 37, 59 et 61 ; ce qui peut être nuisible pour les canalisations et peuvent entraîner des fuites, affaiblir les joints et les raccords des tuyaux. Une attention particulière doit être accordée à ces nœuds, particulièrement au voisinage de siphon.*

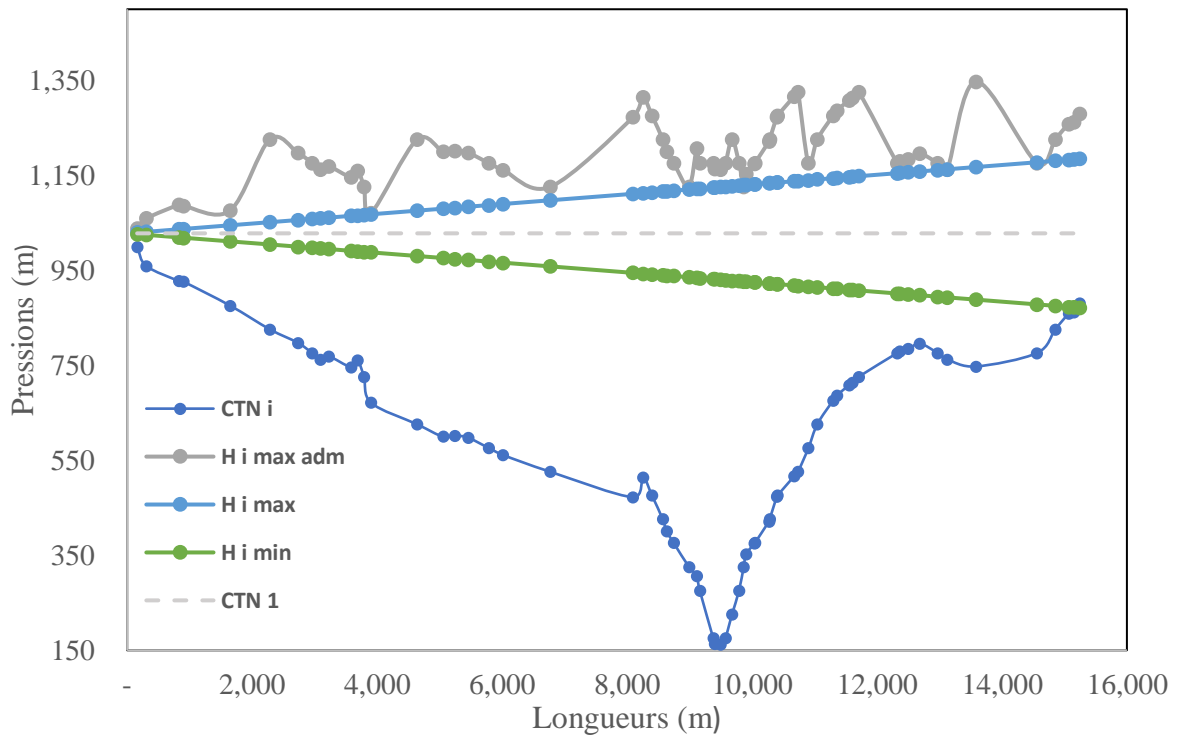


Figure 2.6 : Pressions exercées à l'arrêt brusque du réseau.

### 2.4.3. Analyse de la durée de vie du siphon d'Oued Aissi

Pour analyser la durée de vie du siphon d'Oued Aissi, nous avons représenté la cote piézométrique en fonction du temps figure 2.7. Pour ce faire, nous avons exprimé le coefficient  $C_{hw}$  comme suit :

$$C_{hw}(t) = at + b \quad (2.22)$$

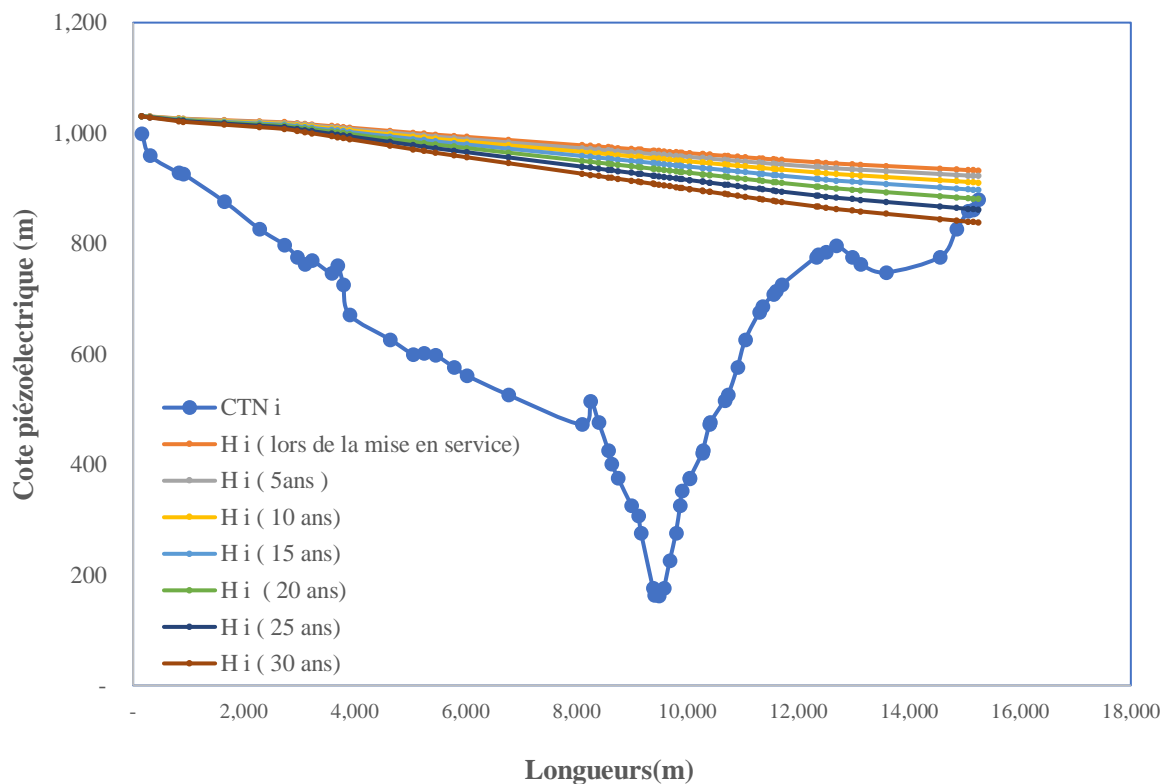
Les constantes a et b sont déterminées avec les conditions initiales suivante :

- à  $t=0$ ,  $C_{hw}=136$
- à  $t=30$  ans,  $C_{hw}=95$

Ce qui donne :

$$C_{hw}(t) = -\frac{41}{30}t + 136 \quad (2.23)$$

L'analyse est effectuée sur la durée de vie potentielle du projet, à savoir 30 ans. Les résultats illustrés dans la figure 2.6 montrent que la cote piézométrique diminue avec le temps et donc avec coefficient de de Hazen williams et passe en dessous de la CTN<sup>i</sup> à environ 20 ans de service.



**Figure 2.7 : Etude de variation de la cote piézométrique**

Pour obtenir l'année exacte de la défaillance du réseau, nous avons superposé l'évolution dans le temps de la cote piézométrique aval du réseau avec la cote du trop-plein du réservoir d'arrivée,

telles qu'illustrées dans la figure 2.8. Les résultats révèlent que finalement à partir de 19ans de service le débit initial de dimensionnement (99 l/s) ne peut être assuré. Ceci conduirait à un déficit en débit et donc une diminution de la dotation. Dans ces conditions, après avoir effectuée une simulation à 30 ans, il s'avère que la conduite ne pourrait assurer que 90l/s.

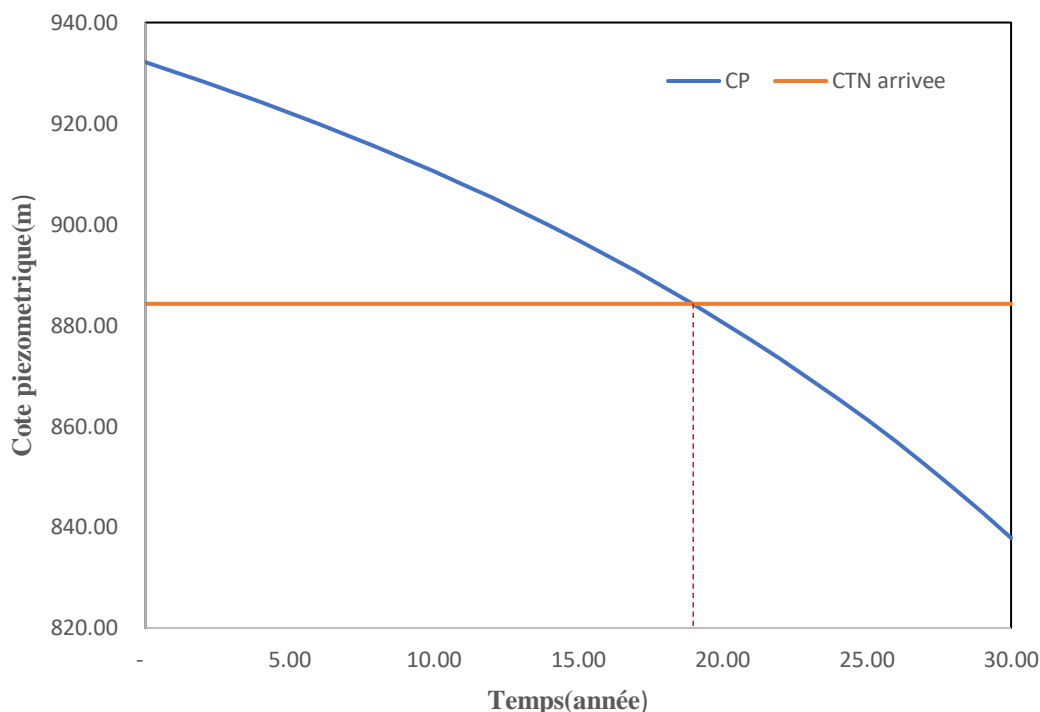


Figure 2.8 : Détermination de durée de vie de projet.

## Conclusion

L'analyse déterministe du réseau d'adduction gravitaire d'Oued Aissi est effectuée en service normale à court terme ( $C_{hw}=136$ ) et à long terme ( $C_{hw}=95$ ) et en à l'arrêt instantané de la vanne. Les conclusions retenues sont les suivantes :

- *Toutes les vitesses sont comprises entre 0.5m/s et 1.5m/s dans le réseau ;*
- *A court terme ( $C_{hw}=136$ ), le réseau est bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées par le standard ;*
- *A long terme ( $C_{hw}=95$ ) le réseau n'est pas bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées par le standard. Les nœuds avals (63, 64 et 65) doivent être des points d'attention pour l'organisme de gestion.*

- *A la fermeture brusque instantanée de la vanne, des surpressions apparaissent au niveau des nœuds 37, 59 et 61 pouvant entraîner des fuites dans le réseau et rupture de. Une attention particulière doit être accordée à ces nœuds particuliers ;*
- *L'analyse de la durée de vie du réseau a révélé le dysfonctionnement du siphon d'Oued Aissi à partir de 19ans.*

*Enfin, pour une meilleure analyse de la défaillance du réseau, nous proposons une étude de fiabilité au chapitre 3, compte tenu de l'aspect incertain de la rugosité des canalisations, donc*

*$C_{hw}$ .*



**Chapitre 3**  
**Analyse Fiabiliste**

## Introduction

Traditionnellement, l'analyse et le dimensionnement des ouvrages de génie civil sont fondés sur des approches déterministes. Les aléas et incertitudes des différents paramètres de calcul (caractéristiques des matériaux, chargements, ...etc.) sont pris en compte de manière simplifiée sous la forme d'un facteur de sécurité global. Celui-ci est souvent appelé facteur d'ignorance car il représente notre ignorance des incertitudes sur les différents paramètres. Pour tenir compte des aléas et incertitudes inhérents aux différents paramètres suscités, la théorie de la fiabilité est actuellement de plus en plus utilisée. Cette démarche scientifique conduit à l'estimation de la probabilité de défaillance l'ouvrage.

Dans ce chapitre, nous appliquons cette approche fiabiliste pour analyser la fiabilité du réseau d'adduction gravitaire d'Oued Aissi ayant déjà fait l'objet du calcul déterministe au deuxième chapitre. La variable aléatoire retenue est la rugosité des conduites qui est traduite par le coefficient de Hazen-Williams «  $C_{hw}$  ». Etant donné l'absence de données expérimentales sur l'aspect interne des conduites, la loi de distribution normale est adoptée pour générer cette variable aléatoire. La fonction d'état limite est définie à l'état limite de service et la probabilité de défaillance est calculée par la méthode de simulation de Monté Carlo.

### 3.1. Définition de la fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à assurer des fonctions requises dans des conditions données pendant un temps donné (Mortureux, 2016).

L'analyse de la fiabilité du système se résume au calcul de la probabilité de ruine associée à une fonction de performance, ou d'état limite, du système prenant en compte toutes les variables aléatoires de base (solllicitations et résistances) (Lemaire, et al, 2005).

### 3.2 Fonction d'état limite

Il s'agit de préciser l'état limite au-delà duquel le système physique n'est plus considéré comme fiable. Ces états limites correspondent principalement à des exigences en termes de tenue mécanique (la défaillance est associée à la ruine du système étudié) ou d'aptitude au service (la défaillance est associée à des dépassements excessifs de la capacité).

Appelée aussi fonction de défaillance et notée  $G(x)$ , elle définit la frontière entre le domaine de sécurité et le domaine de défaillance. Une valeur positive de  $G(x)$  signifie que les réalisations des variables aléatoires conduisent à une situation de sécurité et une valeur négative signifie qu'elles conduisent à une situation de défaillance. La courbe représentant  $G(x) = 0$  est appelée courbe d'état limite ( Mansouri, 2013).

La forme du critère est généralement du type :

$$G(x) = R(x) - S(x) \quad (3.1)$$

Avec :

$R(X)$  : Une caractéristique de résistance ;

$S(X)$  : Une donnée relative à la sollicitation appliquée ;

$X$  ; Vecteur de variable aléatoires.

### 3.3. Variable aléatoire et loi de distribution

L'enjeu à ce stade est de préciser les paramètres incertains pouvant jouer un rôle significatif sur la fiabilité de la structure, appelés variables aléatoires de base ou variables de conception, et de quantifier leur variabilité.

La sélection des variables aléatoires est une étape cruciale pour le modèle fiabiliste qui nécessite une connaissance fine de la physique du système étudié.

#### 3.3.1. Variables aléatoires

Définies comme aléatoires pour tenir compte des incertitudes qui planent sur leur valeur. On les appelle alors variables aléatoires et on leur affecte une loi de probabilité qui décrit leur variabilité. On caractérise généralement les lois de probabilité par leur valeur moyenne, leur écart-type et le coefficient de variation.

#### 3.3.2. Lois de distribution

Ils existent dans la littérature plusieurs types de lois de distribution décrivant les variables aléatoires. Les plus utilisées pour décrire les incertitudes en génie civil sont : loi normale, loi log normale, loi de Wei bull.

##### ➤ Loi normale

En théorie des probabilités et en statistique, la loi normale est l'une des lois de probabilité les plus adaptées pour modéliser des phénomènes naturels issus de plusieurs événements aléatoires. Le graphique de cette distribution se présente sous forme de cloche et la courbe résultante est appelée courbe normale. Elle est également appelée loi gaussienne. Plus formellement, c'est une loi de probabilité absolument continue qui dépend de deux paramètres : son espérance (moyenne), un nombre réel noté  $\mu$ , et son écart type, un nombre réel positif noté  $\sigma$ , définis comme suit :

- **Moyenne arithmétique  $\mu$**

C'est la tendance centrale de l'échantillon, elle est donnée par :

$$\mu = \frac{\sum xi}{N} \quad (3.2)$$

- **Ecart type  $\sigma$**

C'est le paramètre qui mesure la dispersion de l'échantillon autour de sa moyenne. Plus l'écart type est grand plus l'échantillon est étalé (ou dispersé) l'écart type est généralement noté  $\sigma$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - mx)^2}{N-1}} \quad (3.3)$$

le rapport de la moyenne et l'écart type définit le coefficient de variation :

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.4)$$

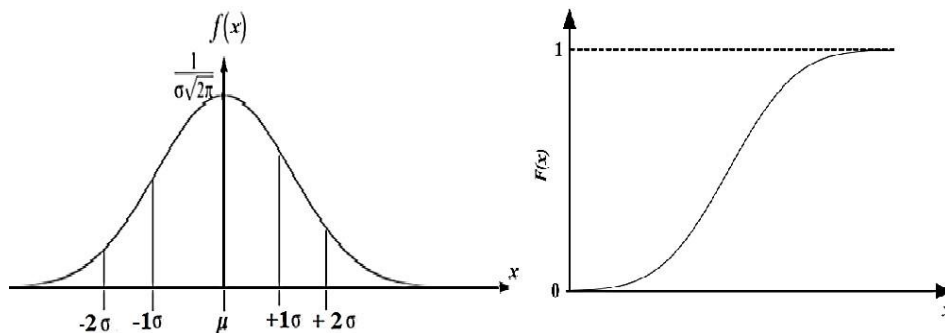
Par ailleurs, la densité de probabilité de la loi normale est donnée par la relation (3.5) (Figure 3.1) :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

La fonction densité de probabilité de la loi normale est continue et strictement positive. Elle est strictement croissante sur l'intervalle  $[-\infty, \mu]$ , et strictement décroissante sur l'intervalle  $[\mu, +\infty]$ , elle vérifie  $f(\mu+x) = f(\mu-x)$ .

La fonction de répartition d'une variable aléatoire normale est définie par la relation (3.6) (Figure 3.1).

$$F_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad (3.6)$$



**Figure 3.1 : La densité de probabilité (gauche) et la fonction de répartition (droite) de la loi normale (Hales et Aggar, 2023).**

### 3.4. Probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance  $P_f$  correspond à la probabilité d'occurrence de l'évènement, en d'autres termes la probabilité d'avoir une valeur négative d'une réalisation de la fonction d'état  $G(X)$  (Mebarki, et Valencia N, 2003) :

$$P_f = P (G (\{ X \}) \leq 0) \quad (3.7)$$

L'évaluation de la probabilité de défaillance peu se ramener essentiellement à l'étude de l'intégrale (3.8) (Lemaire, 2005) :

$$P_f = \int_{D_f} f_X(x) dx \quad (3.8)$$

$f_{\{X\}}$  : densité de probabilité conjointe des variables aléatoires  $\{X\}$  du modèle, dont les réalisations sont  $\{x\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^t$ ,

La résolution analytique de l'intégrale (3.8) est très difficile, voire impossible (Aliche , 2016). Toutes fois, il existe des méthodes qui simplifient la résolution de cette intégrale, pour estimer la probabilité de défaillance  $P_f$ . Nous distinguons les méthodes de simulation dont la plus célèbre est celle de Monté Carlo, et les méthodes d'approximation (par gradient) de type FORM et SORM, tel que l'illustre la figure 3.2 (Lemaire,et al, 2005).

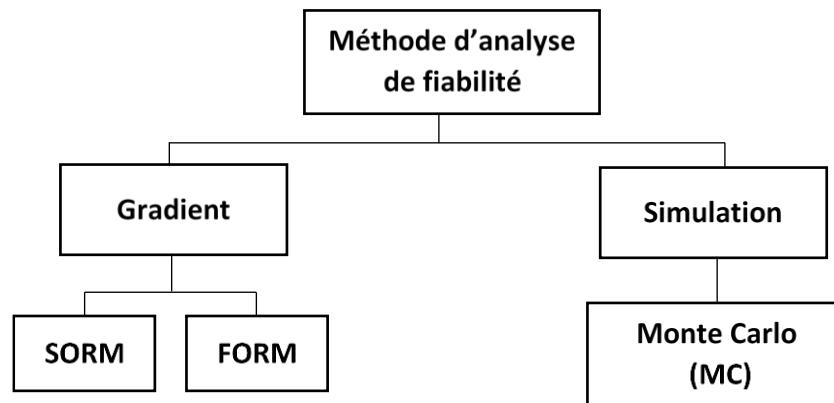


Figure 3.2: Méthode d'analyse fiabiliste (Lemaire, 2005).

- **Méthode de Monté Carlo**

La méthode de simulation de Monté Carlo est considérée comme étant la technique la plus simple pour estimer l'intégrale (3.8). Elle est basée sur l'application de la loi des grands nombres. Elle consiste à réaliser un grand nombre de tirages aléatoires (variables d'entrée), en accord avec leur loi de distribution conjointe. Pour chaque tirage la réponse de la fonction d'état limite est calculée, et un traitement statistique de cette réponse est exécuté pour en déduire la probabilité de défaillance (Lemaire, 2005). Le nombre de tirage  $N$  tombant 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 par une fonction d'indicateur  $I_{Df}(\cdot)$  tel que (Mébarki, 2003) :

$$I_{Df} = \begin{cases} 1 & \text{si } G(x) \leq 0 \\ 0 & \text{si } G(x) > 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Pour  $N$  simulations du vecteur aléatoire, la probabilité de défaillance  $P_f$  est approchée :

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} I_{di}}{N_t} \quad (3.10)$$

Pour une probabilité de défaillance de  $10^{-n}$ , il faut réaliser entre  $10^{n+2}$  à  $10^{n+3}$  tirages (Aoues, 2008). La figure 3.3 illustre la méthode de Monte-Carlo.

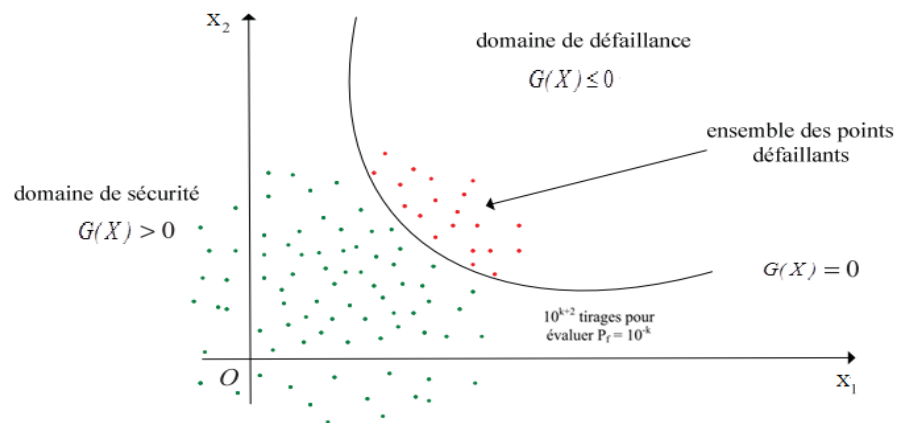


Figure 3.3 : Illustration de la simulation de Monté Carlo (Aoues, 2008).

#### • Méthode FORM

La méthode FORM consiste à approcher la fonction d'état limite par une fonction linéaire pour calculer de manière simple la probabilité de défaillance (figure 3.4). L'approximation linéaire est un développement de Taylor au premier ordre au point de l'état limite, dont la densité de probabilité est la plus élevée. Dans cette approche au premier ordre, la surface d'état limite est approximée par un hyperplan tangent au point de fonctionnement (Aoues, 2008). L'approximation de l'indice de fiabilité  $\beta$  est donnée par l'expression suivante :

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \quad (3.11)$$

Où  $\Phi$  est la fonction de répartition normale centrée réduite et  $\Phi^{-1}$  sa fonction inverse.

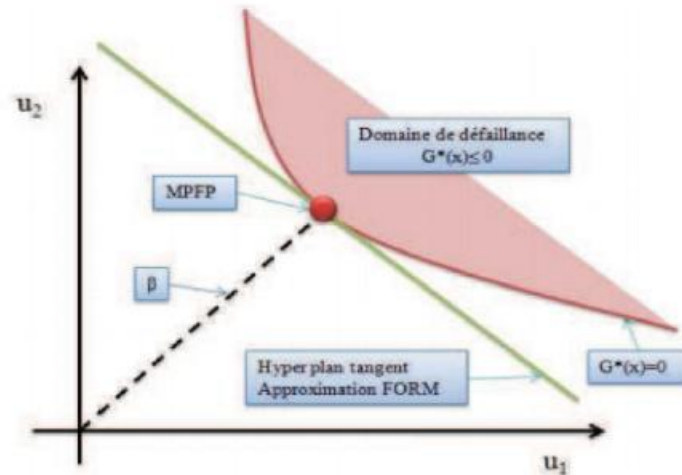


Figure 3.4: Approximation FORM (Aoues, 2008)

- **Méthode SORM**

Son appellation vient de « Second Order Reliability Méthode ». Elle est basée sur un développement de Taylor au deuxième ordre de la fonction d'état  $G(X_i)$ . Sa représentation dans l'espace des variables de base est remplacée par une hyper-surface d'ordre 2. Comme le montre la figure 3.5, la méthode FORM est utilisée pour ajuster une fonction d'état de faible concavité au voisinage du point de conception. Par contre, la méthode SORM est utilisée pour une forte concavité de cette fonction au voisinage du même point (Aoues, 2008)

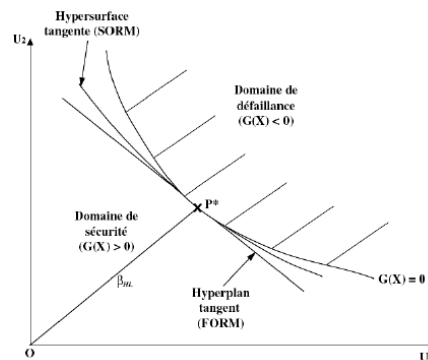


Figure 3.5 : Approximations FORM et SORM (Aoues, 2008)

### 3.5. Application à un réseau d'eau potable

La méthode fiabiliste est appliquée, dans cette section, pour l'analyse du réseau d'adduction gravitaire ayant fait l'objet d'une étude déterministe au deuxième chapitre. Les caractéristiques géométriques et hydrauliques du réseau sont données dans le tableau 3.4 colonnes 1,2,3,4,5,6,7,8,9.

Notons que le coefficient de rugosité  $C_{hw}$  est considéré le même pour toutes les conduites du réseau.

### 3.5.1 : Génération de la variable aléatoire

Le comportement du réseau d'adduction est affecté par de nombreuses incertitudes liées à la géométrie des conduites, aux caractéristiques des matériaux et aux caractéristiques hydrauliques. La source d'incertitude, retenue dans notre cas d'étude est prédominante. Elle est liée à la rugosité des conduites qui s'usent dans le temps, affectant ainsi les pertes de charges et surtout les pressions dans le réseau. Cette rugosité est traduite par le coefficient de Hazen-williams. Cette variable aléatoire est générée avec la loi normale conformément à la littérature (Hales et Aggar, 2023). Notons que nous ne disposons d'aucun échantillon de mesure expérimentale. La fonction de densité et la fonction de répartition de la variable aléatoire  $C_{hw}$  sont représentées dans les figures 3.6 et 3.7, en fonction du coefficient de variation. Il y'a lieu de noter que plus  $C_v$  augmente plus on s'éloige de la valeur moyenne de  $C_{hw}$ .

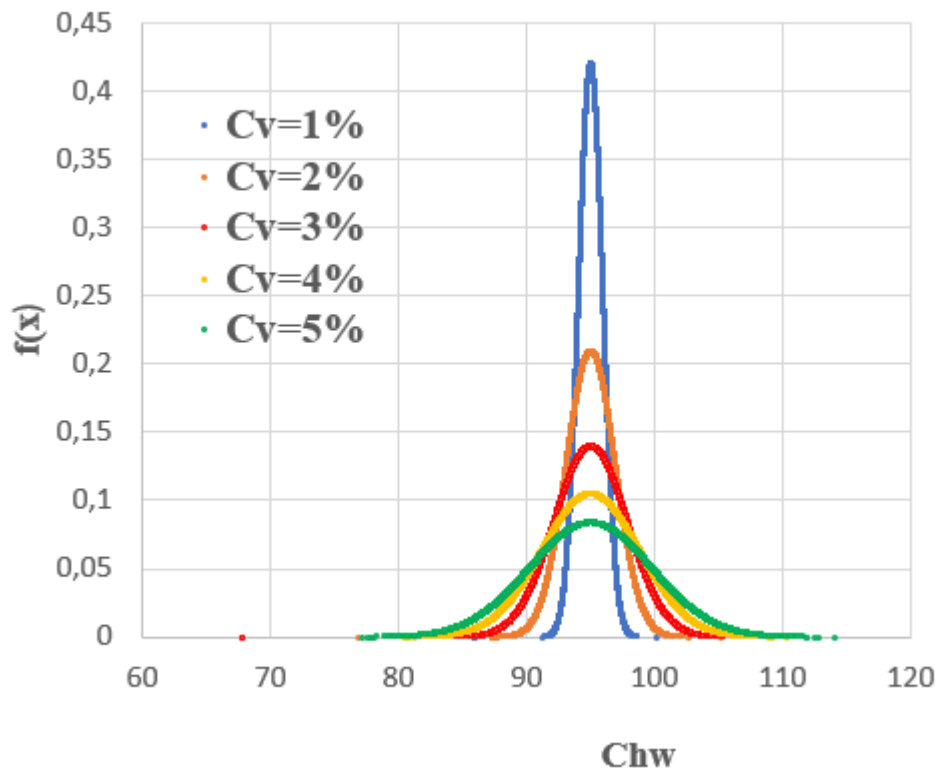


Figure 3.6 : Fonction de densité de loi normale .

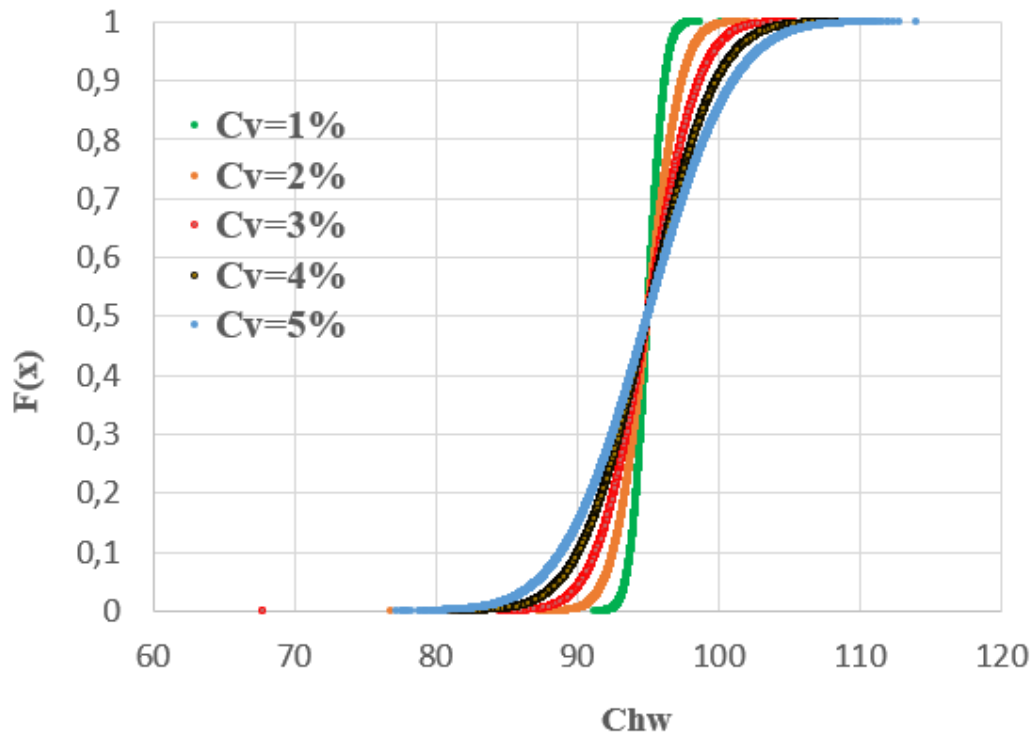


Figure 3.7 : Fonction de répartition de la loi normale.

- **3.5.2 : Choix de la fonction d'état limite**

Pour définir cette fonction d'état limite, nous avons considéré le modèle mécanique de notre réseau traduisant la condition de service normale :

$$G = H^i - H_{\min \text{ adm}}^i \quad (3.12)$$

$H^i$  : Cote piézométrique (m) ;

$H_{\min \text{ adm}}^i$  : Charge minimale admissible (m) ;

- **3.5.3 : Calcul de la probabilité de défaillance**

La probabilité de défaillance est obtenue par la méthode de simulation de Monté Carlo. Un organigramme de calcul résumant les étapes de la méthode de calcul est présenté ci après :

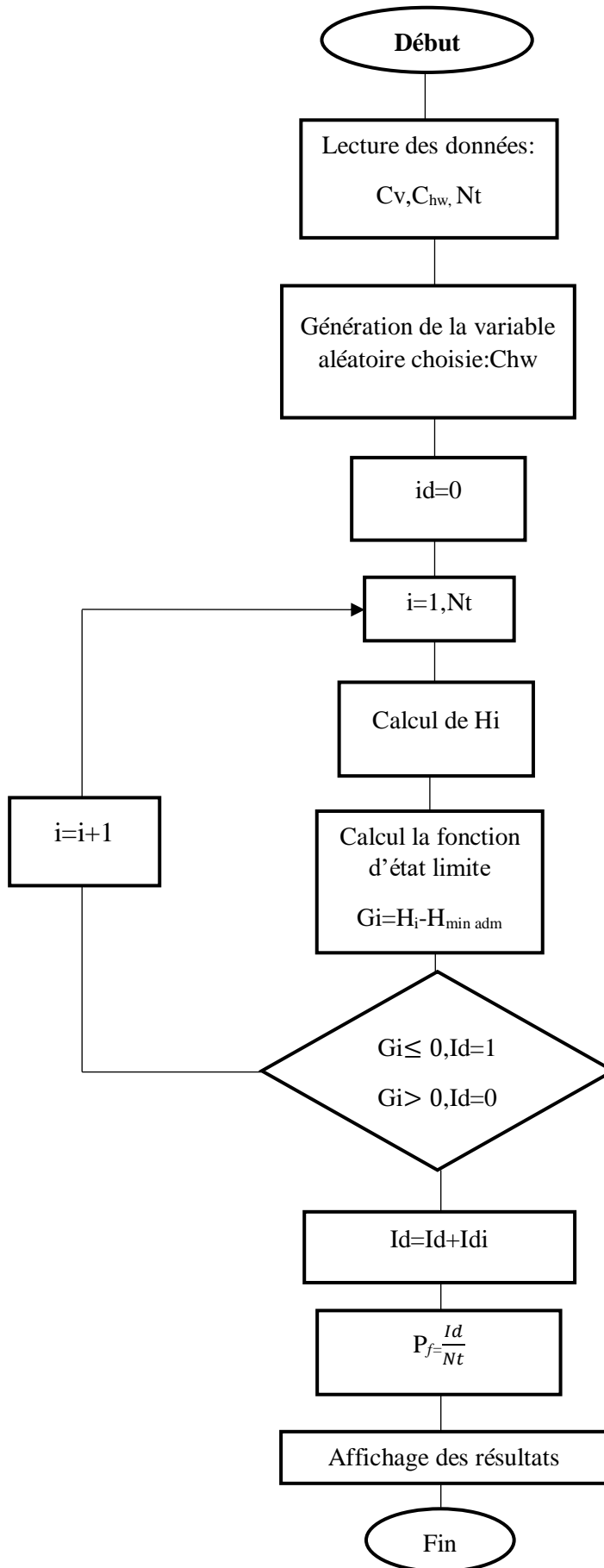
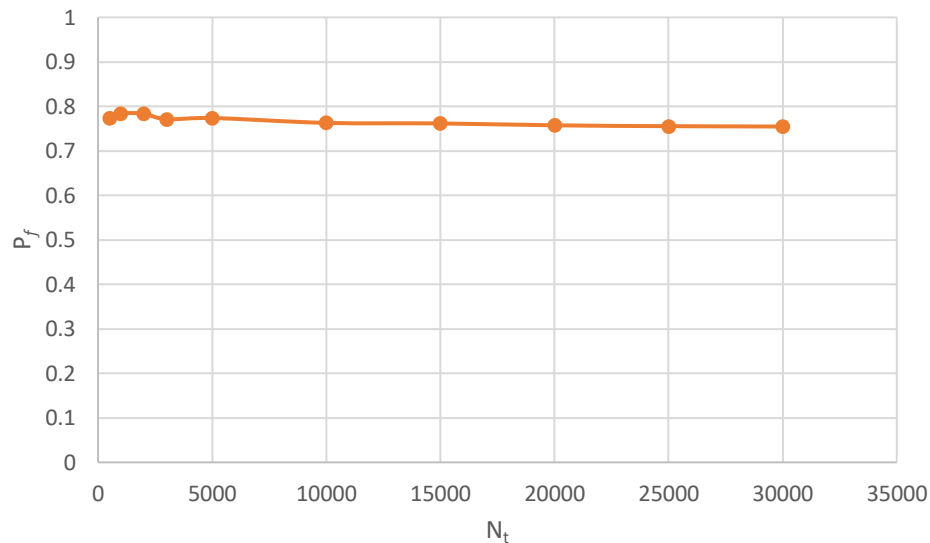


Figure 3.8: Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance.

### 3.5.4 : Résultats et discussions

La probabilité de défaillance  $P_f$  est déterminée par la méthode de simulations de Monté Carlo. Pour fixer le nombre de tirage ( $N_t$ ), nous avons effectué un test de convergence (figure 3.9). La figure montre que  $P_f$  converge et se stabilise à partir 15000 itérations. Sachant que la méthode de Monté Carlo est une loi des grands nombre, nous avons fixé le nombre de tirage à  $N_t$  à 30000.



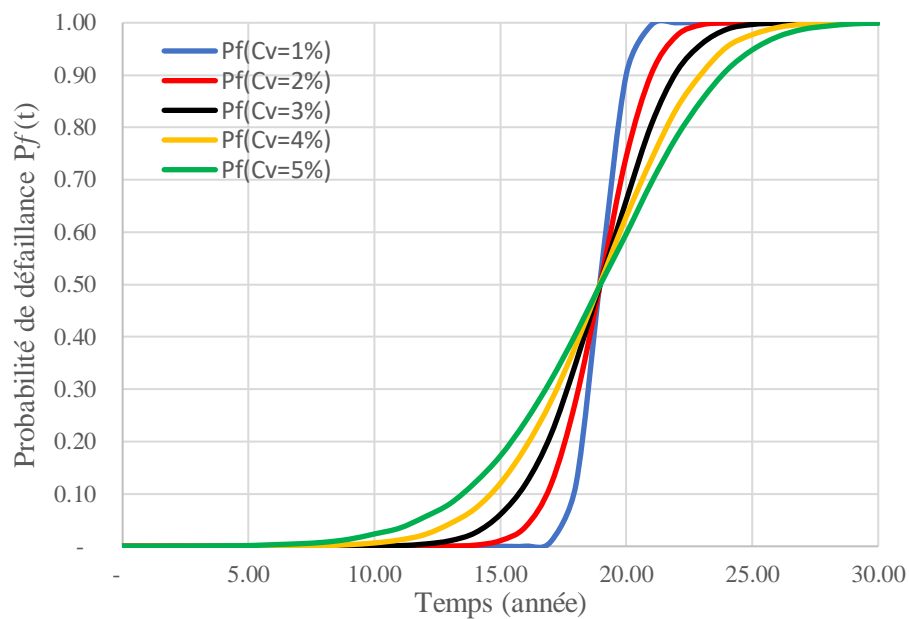
**Figure 3.9: Variation de la probabilité de défaillance en fonction de nombre de tirage.**

L'évolution de la probabilité de défaillance en fonction du temps et pour différents  $C_v$  est illustrée dans le tableau 3.1 et la figure 3.10. Nous constatons que :

- La probabilité de défaillance est nulle durant les dix premières années de service ;
- Entre dix et treize ans,  $P_f$  est inférieur à la probabilité admissible ( $P_{fadm}=10^{-3}$ ) ;
- Au-delà de treize ans, la probabilité de défaillance augmente en augmentant le coefficient de variation  $C_v$  et dépasse la probabilité admissible ;
- La probabilité de défaillance augmentant avec le temps, à mesure que le réseau vieillit
- La probabilité admissible est atteinte entre 13 et 16 ans en fonction de  $C_v$ . Autrement dit, le risque de défaillance du réseau est probable plutôt que ce qui est prédit par le calcul déterministe (19ans), compte tenu des incertitudes liées à la rugosité ;
- Pour  $P_f < 0.5$ , les probabilités augmentent avec l'augmentation de  $C_v$  donc le risque de rupture augmente. Au-delà la tendance s'inverse et la probabilité diminue avec l'augmentation de  $C_v$  ; ceci n'a pas de sens physique autre que la sollicitation dépasse la résistance.

**Tableau 3.1 : Probabilité de défaillance en fonction du temps et de Cv.**

| Temps (Année) | $C_{hw, moy}$ | Coefficient de variation |         |         |         |         |
|---------------|---------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
|               |               | 0,01                     | 0,02    | 0,03    | 0,04    | 0,05    |
| 0             | 136,00        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 1             | 134,63        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 2             | 133,27        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 3             | 131,90        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 4             | 130,53        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 5             | 129,17        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 6             | 127,80        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 7             | 126,43        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 8             | 125,07        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 9             | 123,70        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 10            | 122,33        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 11            | 120,97        | 0                        | 0       | 0       | 0       | 0,00003 |
| 12            | 119,60        | 0                        | 0       | 0       | 0,00003 | 0,00027 |
| 13            | 118,23        | 0                        | 0       | 0,00003 | 0,00027 | 0,00883 |
| 14            | 116,87        | 0                        | 0,00003 | 0,00027 | 0,00883 | 0,11823 |
| 15            | 115,50        | 0,00003                  | 0,00027 | 0,00883 | 0,11823 | 0,52533 |
| 16            | 114,13        | 0,00027                  | 0,00883 | 0,11823 | 0,52533 | 0,90217 |
| 17            | 112,77        | 0,00883                  | 0,11823 | 0,52533 | 0,90217 | 0,99607 |
| 18            | 111,40        | 0,11823                  | 0,52533 | 0,90217 | 0,99607 | 0,99997 |
| 19            | 110,03        | 0,52533                  | 0,90217 | 0,99607 | 0,99997 | 1,00000 |
| 20            | 108,67        | 0,90217                  | 0,99607 | 0,99997 | 1,00000 | 1,00000 |
| 21            | 107,30        | 0,99607                  | 0,99997 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 22            | 105,93        | 0,99997                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 23            | 104,57        | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 24            | 103,20        | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 25            | 101,83        | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 26            | 100,47        | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 27            | 99,10         | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 28            | 97,73         | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 29            | 96,37         | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 30            | 95,00         | 1,00000                  | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |



**Figure 3.10 : Probabilité de défaillance en fonction de coefficient de variation.**

## Conclusion

L'analyse fiabiliste d'un réseau d'adduction a été effectuée, dans ce chapitre, en considérant la variable aléatoire de la rugosité des conduites à travers le coefficient de Hazen Williams  $C_{hw}$  à long terme et à court terme. La loi normale est adoptée pour générer cette variable aléatoire à partir des valeurs moyennes. La fonction d'état limite est dictée par les conditions de bon fonctionnement ; à savoir la pression minimale de service. La probabilité de défaillance est évaluée par la méthode classique de Monté Carlo, pour un nombre de tirage arrêté à 30000 valeurs, dictée par la capacité du logiciel Excel. Le réseau a été simulé à long terme et vérifié à court terme. Les résultats ont mis en évidence la sensibilité du critère de pression à la variabilité aléatoire du paramètre.

- Notons que  $P_f$  augmente avec le temps donc le risque de rupture augmente.

Au voisinage de  $P_f = 50\%$  qui est ici un point d'inflexion, nous constatons ce qui suit :

- $P_f < 50\%$  : Pour un temps donné le  $P_f$  augmente en fonction de  $C_v$
- $P_f > 50\%$  : Pour un temps donné, la probabilité est inversement proportionnelle à  $C_v$ , ceci n'a pas de sens physique autre que la sollicitation dépasse la résistance.

Au terme de ce mémoire, se dégagent plusieurs enseignements pour l'ingénieur praticiens :

Le modèle numérique de terrain généré nous a permis de visualiser clairement les dénivelées importantes présentes entre le réservoir de départ (Larbaa Nath Irathen), le siphon de Oued Aissi et le réservoir d'arrivée (Beni Douala). Il a permis de mettre en évidence la complexité du relief avec les grandes chutes d'altitudes jusqu'au siphon. L'usage du MNT qui est un rapport visuel de la réalité est une étape importante dans la compréhension du comportement de l'adduction et attire l'attention de l'ingénieur avant d'appréhender ses calculs.

L'analyse déterministe du réseau d'adduction gravitaire du siphon de Oued Aissi est effectuée en service normal à court terme, à long terme et à l'arrêt brusque de la vanne.

. À court terme ( $C_{hw}=136$ ), Les résultats du calcul des vitesses et des pressions ont montré que le réseau est bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées par les règlements. Cependant, à long terme ( $C_{hw}=95$ ) le réseau n'est pas bien dimensionné eu égard aux conditions hydrauliques exigées, quelques nœuds présentent des risques de défaillance à la mise en service. Ces nœuds doivent être des points d'attention pour l'organisme de gestion, car ils représentent des points faibles du réseau. Ceci révèle que des incertitudes sur le réseau en termes de rugosité peuvent éventuellement impacter directement les pressions de service aux nœuds et ainsi engendrer des désagréments aux abonnés.

En considérant une modélisation linéaire du vieillissement de la conduite ( $C_{hw}(t)$ ), nous avons pu mettre en évidence le cycle de vie de la conduite où il ressort que le risque de défaillance de fonction apparaît au bout de 19 ans, ceci pose le problème d'incertitude sur la rugosité.

L'approche fiabiliste est proposée pour tenir compte justement de cette incertitude. Ainsi, nous avons considéré comme variable aléatoire le coefficient de Hazen Williams ( $C_{hw}$ ).

La fonction d'état limite est dictée par les conditions de bon fonctionnement, à savoir la pression minimale de service. Le réseau a été simulé à long terme et vérifié à court terme. Les résultats ont révélé la sensibilité du critère de la pression à la variabilité aléatoire de paramètre. La défaillance de fonction tenant compte de l'incertitude est identifiée entre 13 ans et 16 ans en fonction du  $C_v$ , lequel est un paramètre de dispersion important à cerner. La défaillance arrive donc plus tôt que prévu par le calcul déterministe. D'où l'apport et la précision du calcul probabiliste. En perspectives d'autres paramètres incertains doivent être pris en considération (dotation, population, coefficient de pointe, taux d'accroissement...).

**AOUES Y.**, Optimisation fiabiliste de la conception et de la maintenance des structures. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont 2, 2008.

**ALLICHE A.**, Contribution à l'analyse de l'évolution de la vulnérabilité des réservoirs en béton dans leur cycle de vie. Thèse de doctorat, 2016.

**BONNIN J.**, Aide-mémoire d'hydraulique urbaine. Paris, Ed. Eyrolles, 1982.

**BONNIN J.**, Hydraulique urbaine appliquée aux agglomérations de petite et moyenne importance. Paris, Ed. Eyrolles, 1986.

**DITLEVSEN O et MADSEN H. O.**, Structural reliability methods, New York, Wiley, 1996.

**HALES S. et AGGAR L.**, Analyse de la variable aléatoire de la rugosité sur la fiabilité d'un réseau d'eau. Thèse de master. Département de génie civil, UMMTO, 2023.

**HAMMOUM H. et BOUZIDA R.**, Pratique des Systèmes d'information Géographiques (SIG) 'Application sous Mapinfo'. Algérie, Ed. Pages Bleues, 2010.

**LEMAIRE M, CHATEAUNEUF A, et MITTEAU J C.**, Fiabilité des structures. Ed. Lavoisier, France, 2005.

**MANSOURI M.**, Étude mécano-fiabiliste et réduction du modèle des problèmes vibro-acoustiques à paramètres aléatoires. Thèse de doctorat. Institut des Sciences Appliquées Rouen, 2013.

**Mebarki A., et Valencia N.**, Vulnérabilité sismique des ouvrages en maçonnerie. Revue Française de Génie Civil, 7 (4), 471-498, (2003).