

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**  
**Département d'Hydraulique**

*Filière : Hydraulique*

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

Présenté pour Obtenir le Diplôme de **Master**

*Spécialité : Ouvrages Hydrauliques*

Thème

***Contribution à l'optimisation d'un réseau de distribution  
d'alimentation en eau potable par algorithmes génétiques***

Réalisé par :

***Mlle BOUZERD Sabrina***

***Mlle CHIBANE Lydia***

Encadré Par :

***Mr DEHMOUS Hocine***

***Soutenu le 01/07/2024***





# *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers notre encadreur **Mr Dehmous .H**, pour son encadrement, ses conseils, ainsi que pour toutes ses corrections, sans lesquelles la réalisation de ce mémoire aurait été plus délicate.*

*Nous sommes également reconnaissantes envers tous nos enseignants pour leur soutien, leurs conseils et leur encouragement qui ont été inestimables tout au long de notre parcours académique, leurs contributions ont enrichi notre travail*

*Enfin, nous voudrions exprimer notre gratitude envers nos familles et nos amis pour leur soutien indéfectible et leur patience tout au long de cette période, leur amour et leur encouragement ont été nos sources d'inspiration.*

*Merci du fond du cœur à tous ceux qui ont rendu ce moment possible."*



## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Introduction à l'optimisation</b>	
<b>I. Introduction.....</b>	<b>04</b>
<b>II. Les algorithmes .....</b>	<b>04</b>
<b>III. Les métaheuristiques .....</b>	<b>05</b>
<b>III.1. Définition des métaheuristiques.....</b>	<b>05</b>
<b>III.2. La terminologie.....</b>	<b>05</b>
<b>III.3. Revue bibliographique .....</b>	<b>05</b>
<b>III.4. Les objectifs des métaheuristiques .....</b>	<b>06</b>
<b>III.5. Organisation générale des métaheuristiques.....</b>	<b>07</b>
<b>III.6. Classification des métaheuristiques .....</b>	<b>07</b>
<b>III.6.1. Les méthodes de recherche locale .....</b>	<b>09</b>
<b>III.6.2. Les méthodes à populations.....</b>	<b>13</b>
<b>IV. Conclusion .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre II : Généralités sur les réseaux d'alimentation en eau potable</b>	
<b>I. Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II. Généralités .....</b>	<b>22</b>
<b>III. Les contraintes d'un réseau de distribution d'AEP .....</b>	<b>23</b>
<b>IV. Classification des réseaux de distribution .....</b>	<b>28</b>
<b>V. Hypothèse de calcul .....</b>	<b>30</b>
<b>V.1. Choix du diamètre des conduites .....</b>	<b>30</b>
<b>V.2. La pression au sol .....</b>	<b>31</b>
<b>V.3. La vitesse d'écoulement .....</b>	<b>31</b>
<b>V.4. Conditions spéciales d'incendie .....</b>	<b>32</b>

<b>VI.</b>	Principe de calcul des réseaux de distribution.....	<b>33</b>
<b>IV.1.</b>	Débit spécifique .....	<b>33</b>
<b>IV.2.</b>	Débit en route .....	<b>33</b>
<b>IV.3.</b>	Les débits aux nœuds.....	<b>34</b>
<b>VII.</b>	Calcul des réseaux maillés.....	<b>35</b>
<b>VIII.</b>	Méthode Hardy Cross.....	<b>35</b>
<b>IX.</b>	Conclusion.....	<b>40</b>

### **Chapitre III : calcul des réseaux de distribution par la méthode Hardy Cross**

<b>I.</b>	Introduction.....	<b>41</b>
<b>II.</b>	Présentation du projet.....	<b>41</b>
<b>III.</b>	Dimensionnement du réseau de distribution .....	<b>42</b>
<b>III.1.</b>	Calcul des diamètres des conduites et des vitesses d'écoulement .....	<b>42</b>
<b>IV.</b>	Equilibre de mailles .....	<b>44</b>
<b>V.</b>	Calcul des pressions .....	<b>49</b>
<b>VI.</b>	Conclusion.....	<b>53</b>

### **Chapitre IV : Optimisation des réseaux de distribution**

<b>I.</b>	Introduction.....	<b>55</b>
<b>II.</b>	Optimisation d'un réseau de distribution d'eau potable .....	<b>56</b>
<b>II .1.</b>	Optimisation de l'aspect technique.....	<b>56</b>
<b>II .1. 1.</b>	Définition du <i>solveur</i> .....	<b>56</b>
<b>II .1.2.</b>	Fonctionnement du <i>solveur</i> .....	<b>57</b>
<b>II .1.3.</b>	Problématique 01 .....	<b>58</b>
<b>II .2.</b>	Optimisation de l'aspect économique.....	<b>62</b>
<b>II .3.</b>	Résolution du problème d'optimisation.....	<b>63</b>
<b>II .3.1</b>	présentations de MATLAB .....	<b>63</b>
<b>II .4.</b>	Problématique 02 .....	<b>64</b>

II .4.1. Présentation de notre problème d'optimisation .....	64
II .4.2. Modélisation du problème d'optimisation d'un réseau d'AEP.....	65
II .4.3. Résolution du problème d'optimisation.....	66
II .4.4. Application de l'algorithme génétique au réseau étudié.....	66
III. Conclusion .....	74
Conclusion générale .....	76

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des notations et indices**

**Annexes**

## Liste des figures

<b>Figure I.01</b> « Visualisation de l'optimum global et de l'optimum local » .....	<b>06</b>
<b>Figure I.02</b> « Classification des métaheuristiques » .....	<b>08</b>
<b>Figure I.03</b> « Principe générale des algorithmes génétiques » .....	<b>20</b>
<b>Figure II.01</b> « Schéma général d'un système d'alimentation en eau potable » .....	<b>21</b>
<b>Figure II.02</b> « Diagramme de Moody Stanton » .....	<b>26</b>
<b>Figure II.03</b> « Réseau ramifié » .....	<b>29</b>
<b>Figure II.04</b> « Réseau maillé » .....	<b>29</b>
<b>Figure II.05</b> « Réseau étagé » .....	<b>30</b>
<b>Figure II.06</b> « Réserve d'incendie » .....	<b>33</b>
<b>Figure II.07</b> « Répartition uniforme du débit en route sur la longueur du tronçon » .....	<b>34</b>
<b>Figure II.08</b> « Sens supposé de l'écoulement dans une maille » .....	<b>35</b>
<b>Figure II.09</b> « La 01 <sup>ère</sup> répartition des débits » .....	<b>37</b>
<b>Figure II.10</b> « Organigramme de calcul » .....	<b>39</b>
<b>Figure III.01</b> « Schéma du réseau maillé étudié » .....	<b>41</b>
<b>Figure III.02</b> « La dernière répartition des débits » .....	<b>48</b>
<b>Figure IV.01</b> « Les Différents aspects de l'optimisation d'un réseau d'alimentation en eau potable » .....	<b>55</b>
<b>Figure IV.02</b> « Paramétrage du solveur-Excel en fonction de nos données » .....	<b>59</b>
<b>Figure IV.03</b> « Résolution d'un problème d'optimisation » .....	<b>63</b>
<b>Figure IV.04</b> « Organigramme des différentes étapes de calcul du réseau de distribution d'eau potable » .....	<b>65</b>
<b>Figure IV.05</b> « La variation de la vitesse d'écoulement (maximale et minimale) des individus sélectionnés » .....	<b>70</b>

<b>Figure IV.06</b> « La variation de la pression au sol (minimale et maximale) pour les individus sélectionnés » .....	<b>70</b>
<b>Figure IV.07</b> « Visualisation de l'optimum global et les optimums locaux » .....	<b>73</b>
<b>Figure IV.08</b> « Pourcentage des gains » .....	<b>74</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.01</b> « Caractéristiques géométriques et physiques du réseau étudié » .....	<b>42</b>
<b>Tableau III.02</b> « Récapitulatif des diamètres des conduites et des vitesses d'écoulement » ..	<b>44</b>
<b>Tableau III.03</b> « Equilibre de mailles , 01 <sup>ère</sup> itération ; CHW=150 » .....	<b>45</b>
<b>Tableau III.04</b> « Equilibre de mailles , 07 <sup>ème</sup> itération ; CHW=150 » .....	<b>46</b>
<b>Tableau III.05</b> « Equilibre de mailles , 01 <sup>ère</sup> itération ; CHW=130 » .....	<b>47</b>
<b>Tableau III.06</b> « Equilibre de mailles ; 07 <sup>ème</sup> itération ; CHW=130 » .....	<b>47</b>
<b>Tableau III.07</b> « Calcul des pressions dans le réseau ; CHW=150 » .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.08</b> « Récapitulatif du calcul des pressions dans le réseau ; CHW 150 » .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.09</b> « Calcul des pressions dans le réseau ; CHW=130 » .....	<b>51</b>
<b>Tableau III.10</b> « Récapitulatif du calcul des pressions dans le réseau ; CHW 130 » .....	<b>52</b>
<b>Tableau IV.01</b> « Résultats d'optimisation du réseau à la mise en service » .....	<b>60</b>
<b>Tableau IV.02</b> « Récapitulatif des résultats d'optimisation ; CHW 150 » .....	<b>60</b>
<b>Tableau IV.03</b> « Résultats de la vérification du réseau à long terme » .....	<b>61</b>
<b>Tableau IV.04</b> « Récapitulatif des résultats d'optimisation ; CHW=130 » .....	<b>62</b>
<b>Tableau IV.05</b> « 1 <sup>ère</sup> population » .....	<b>67</b>
<b>Tableau IV.06</b> « Sélection (parents) » .....	<b>69</b>
<b>Tableau IV.07</b> « Individu i1 ; parent 01 » .....	<b>71</b>
<b>Tableau IV.08</b> « Individu i6 ; parent 02 » .....	<b>72</b>
<b>Tableau IV.09</b> « Individu croisé ; enfant E1 » .....	<b>72</b>

## Liste des notations et indices

$\Delta H_L$  : Les pertes de charge linéaires

$\Delta H_S$  : Pertes de charge singulières

**AEP** : Alimentation en eau potable

**CHW** : Coefficient de Hazen-Williams

**CP** : Cote piézométrique

**CTN**: cote de terrain naturel

**GRASP**: Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

**H<sub>am</sub>** : Cote piézométrique amont

**H<sub>av</sub>** : Cote piézométrique aval

**P<sub>am</sub>**: pression amont

**P<sub>av</sub>** : pression Aval

**Q<sub>n</sub>** : Débit en route

**Q<sub>t</sub>** : Débit de transit

**RCL** : Restricted Candidate List

**RLG** : Recherche Locale Guidée

**RVV** : Recherche à Voisinages Variables

**K<sub>p</sub>**: Coefficient de pointe

**Q<sub>p</sub>**: Débit de pointe

**Q<sub>c</sub>** : Débit de calcul

# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

Les réserves d'eau sur la terre subissent et continueront à subir la pression accrue de la croissance de la demande mondiale en eau potable. En effet, selon les estimations des spécialistes, cette demande d'eau potable augmentera de 30 % d'ici à 2030.

A travers le monde, les réseaux de distribution d'eau potable nécessitent des investissements importants de la part des pouvoirs publics. A titre d'information, le World Resources Institute prévoit que le coût mondial de la gestion durable de l'eau s'élèvera à 1,04 milliards de dollars par an d'ici l'année 2030. Cela traduit l'importance d'une conception optimale, d'un entretien et d'un renouvellement continu de ces réseaux, et ce, dans le but de pérenniser au mieux ces investissements stratégiques.

L'objectif de l'ingénieur concepteur d'un projet de réseau de distribution d'eau potable est trouver un compromis entre deux éléments essentiels le *Technique* et l'*Economie*

- Le technique se traduit par la conception et la réalisation d'ouvrages techniquement satisfaisants. Autrement dit, ces ouvrages doivent satisfaire les exigences du bon fonctionnement en service.
- L'économie se traduit par la recherche d'un coût du projet qui soit le plus bas possible (recherche d'une conception à moindre coût).

Pour aboutir à ce compromis, deux chemins de conception sont suivis ; D'une part, l'ingénieur procède à une analyse des conditions de fonctionnement du réseau en service. Cela est rendu possible par l'utilisation de méthodes et d'outils de simulation numérique. Cela permet d'une part de réaliser le dimensionnement du réseau et par la suite cela permet d'analyser tous les paramètres techniques entre autres la mesure des vitesses et des pressions dans tout le réseau et ce en considérant la variabilité journalière (pic de consommation en 24 heures...) et la variabilité temporaire (réseau neuf et vétuste, évolution de la demande...). Les principales conclusions de ce type d'analyse sont l'évaluation du réseau sur la base d'indicateur technique (pression, vitesse...). Cette évaluation va permettre d'apprécier en fonction de l'évolution de la demande, les possibilités d'intervention sur le réseau soit en procédant à une rénovation partielle ou totale, soit en procédant à un renforcement. D'autre part, comme tout projet se traduit par un coût financier, l'ingénieur procède à la recherche de la conception optimale qui correspond à la conception à moindre coût. Cela est rendu possible par l'utilisation de méthodes d'optimisation mathématiques.

## Introduction générale

---

Le travail réalisé dans cette étude consacrée à l'optimisation d'un réseau de distribution d'eau potable s'inscrit dans ce cadre. En effet, l'approche technique et l'approche économique sont utilisées dans cette étude pour résoudre ce problème d'optimisation.

Le problème d'optimisation traité dans cette étude se présente comme tout problème général d'optimisation d'un système mécanique avec une *fonction objectif* et des *contraintes* sur les *variables de conception* et des *contraintes* sur la *réponse de ce système*.

Le réseau de distribution d'eau potable traité dans cette étude est sujet à différentes contraintes à savoir :

- Les contraintes physiques qui se traduisent par la loi de la conservation de la masse et la loi de la conservation d'énergie (loi des nœuds et la loi des mailles – méthode Hardy-Cross).
- Les contraintes techniques qui se traduisent par :
  - La topographie du site (cote terrain naturel)
  - Les débits de consommation.
  - Les bornes limites des pressions aux nœuds (pression minimale et maximale).
  - Les bornes limites sur les vitesses d'écoulement dans les différents tronçons du réseau (vitesse minimale et maximale dans les conduites).
- Les contraintes commerciales qui se traduisent par la gamme des diamètres commerciaux des conduites disponibles sur le marché.

D'un point de vue mathématiquement, le problème d'optimisation de notre réseau peut être représenté par une fonction coût du réseau à minimiser (recherche d'une conception à moindre coût). Cette fonction sera minimisée dans un domaine délimité par un ensemble d'équations et d'inéquations définissant le champ des solutions réalisables [1].

L'exemple traité dans ce travail, consiste en un réseau maillé constitué d'un réservoir et de huit conduites réparties sur deux mails. L'approche d'optimisation a été appliquée selon deux objectifs à savoir : Dans un premier temps il s'agit d'optimiser la position du réservoir afin d'assurer une pression minimale satisfaisante. Dans un second temps, l'approche d'optimisation a concerné l'aspect économique en minimisant le prix de revient du réseau (coût de la réalisation).

## Introduction générale

---

Pour mener à bien ce travail, nous avons suivi le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre est consacré à une introduction à l'optimisation.
- Le deuxième chapitre est consacré à des généralités sur les réseaux de distribution en eau potable.
- Le troisième chapitre est consacré au calcul du réseau de distribution retenu dans cette étude avec la méthode d'Hardy Cross.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation de ce réseau de distribution d'eau potable par application de l'algorithme génétique.
- Enfin, une conclusion générale consacrée à une synthèse des principaux résultats obtenus et à quelques perspectives.

**CHAPITRE I :**  
**Introduction à l'optimisation**

## I. Introduction

Les ingénieurs, les économistes, les décideurs se heurtent quotidiennement, quel que soit leur secteur d'activité, à des problèmes **d'optimisation**. Il peut s'agir de minimiser un coût de production, d'optimiser le parcours d'un véhicule ou le rendement d'un portefeuille boursier, d'optimiser des réseaux d'alimentation en eau potable ...etc.

L'optimisation par définition est le processus de **maximisation** ou de **minimisation** d'une **fonction objectif**, souvent sous **contraintes**, afin de trouver la meilleure solution possible.

En d'autres termes, il s'agit de trouver la valeur **optimale** d'une ou d'un ensemble de variables qui satisfait les conditions spécifiées. [2]

Nous allons voir dans ce qui suit un petit aperçu sur les **algorithmes** d'une manière générale et nous allons nous intéresser à une famille de techniques d'optimisation, appelées "**Métaheuristiques**", adaptées à la résolution de problèmes pour lesquels il est difficile de trouver un **optimum global** ou de bons **optimums locaux** par des méthodes plus classiques.

## II. Les algorithmes

Le terme « **algorithme** » dérive du nom du grand mathématicien perse **Al Khawarizmi**, qui a vécu vers **l'an 820** et qui a introduit en Occident la **numération décimale** (venue d'Inde) et enseigné les règles **arithmétiques élémentaires** qui y sont liées.

Par la suite, le concept d'algorithme s'est étendu à des objets de plus en plus complexes : textes, photos, formules logiques et objets physiques, entre autres.

Les algorithmes sont caractérisés par leur précision, leur fiabilité, leur efficacité ainsi que leur universalité.

Ils ont pour objectif principale de produire une sortie souhaitée en traitant les données d'entrées d'une manière spécifique.

Il existe différents types d'algorithmes tels que **les algorithmes de tri**, de **recherche**, de **graphe** etc... Et **d'optimisation** qu'on peut classer sous deux grandes familles dites **heuristiques** et

**métaheuristiques** qui sont utilisées dans le but de résoudre des problèmes **d'optimisation** difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

### III. Les métaheuristiques

#### III.1. Définition des métaheuristiques

Les métaheuristiques sont généralement des **algorithmes itératifs**, qui progressent vers un optimum global. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution.

Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple **Recherche Locale** à des algorithmes complexes de **recherche globale**.

Le but visé par les métaheuristiques est d'explorer **l'espace de recherche** efficacement afin de déterminer des solutions (presque) **optimales**. [3]

#### III.2. La terminologie

Le terme **méta**, du grec « au-delà », comprendre ici « à un plus haut niveau », heuristique, du grec εϋρισκειν / heuriskein, signifie « trouver ». Le terme méta est donc pris au sens où les algorithmes peuvent regrouper plusieurs heuristiques

#### III.3. Revue bibliographique

Vu leur puissance dans la résolution des problèmes difficiles, les méthodes métaheuristiques ne cessent de gagner du terrain dans le domaine de la recherche. Leur utilisation devient primordiale surtout lorsque l'objectif est d'optimiser

Nous avons là un petit aperçu sur l'historique d'évolution des métaheuristiques

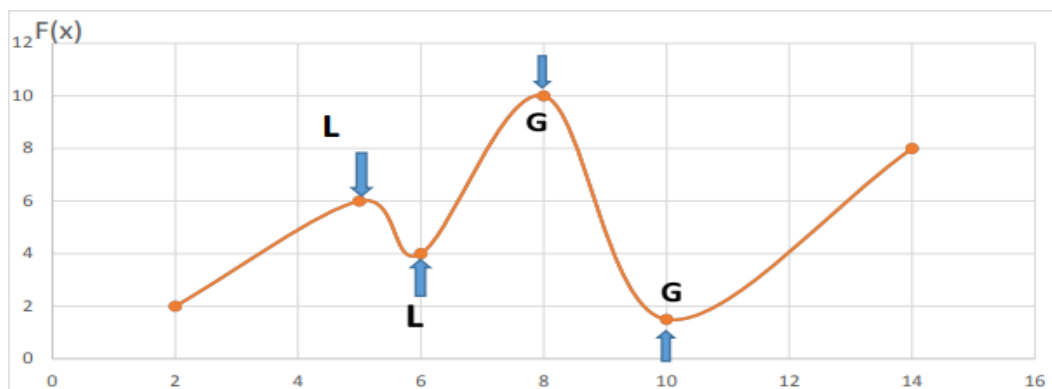
- **Début des années 1960** : Les premières idées de métaheuristiques ont commencé à émerger, avec des travaux sur la méthode de Monte-Carlo et l'optimisation stochastique.
- **Années 1980** : La recherche en métaheuristiques s'est intensifiée avec le développement de techniques telles que le recuit simulé, proposé par Kirk Patrick, Gelatt et Vecchi en 1983, et l'algorithme génétique, popularisé par John Holland
- **Années 1990** : Cette décennie a vu une expansion significative des métaheuristiques, avec le développement de nombreuses nouvelles techniques telles que la recherche

tabou, l'optimisation par essaim de particules, l'optimisation par colonies de fourmis et la recherche de voisinage variable.

- **Années 2000** : Les métaheuristiques ont continué à être largement étudiées et appliquées dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie, l'informatique, la recherche opérationnelle, l'intelligence artificielle et bien d'autres.
- **Années 2010 et au-delà** : Avec l'avènement de la révolution numérique et la disponibilité croissante de puissantes ressources informatiques, les métaheuristiques sont devenues des outils essentiels pour résoudre des problèmes d'optimisation de grande envergure et de complexité croissante.

### III.4. Les objectifs des métaheuristiques

L'objectif d'une métaheuristique est la résolution d'un problème d'optimisation donné en cherchant une solution de meilleure qualité en fonction de ce critère (on parle d'optimum global). Les itérations successives de l'algorithme permettent de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, qui est généralement soit un temps d'exécution imposé soit une précision demandée. [4].



*Figure I.01 « Visualisation de l'optimum global et de l'optimum local »*

### III.5. Organisation générale des métaheuristiques

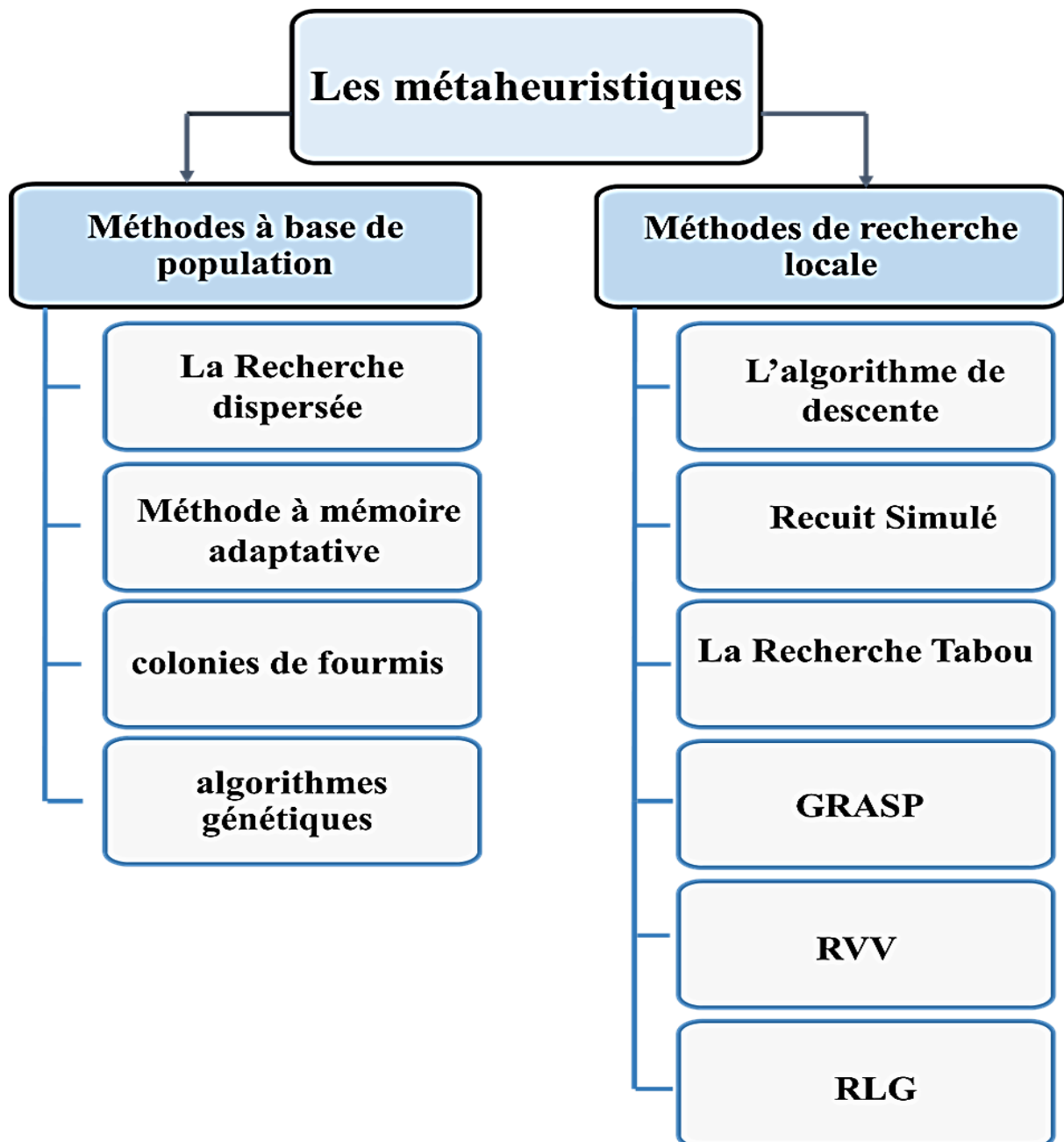
Les métaheuristiques cherchent des objets mathématiques (une permutation, un vecteur, etc.) minimisant (ou maximisant) une fonction objectif qui décrit la qualité d'une solution au problème. L'ensemble de solutions possibles forme l'espace de recherche qui peut être limité par un ensemble de contraintes. Une métaheuristique exploite une ou plusieurs solutions afin d'aboutir à la meilleure solution, ou tout simplement l'optimum. Si une nouvelle solution est construite à partir d'une solution existante, elle est sa voisine. Lorsqu'une solution est associée à une seule valeur, on parle de problème mono-objectif, lorsqu'elle est associée à plusieurs valeurs, le problème multi-objectifs (ou multicritères).

D'une façon globale les métaheuristiques s'articulent sur les notions suivantes

- **Voisinage** : Un voisinage est une **fonction N** qui associe un sous-ensemble de **S** à toute solution  $s \in S$ . Une solution  $s' \in N(s)$  est dite **voisine de s**. Une solution  $s \in S$  est un **minimum local** relativement à  $N$  si  $f(s) \leq f(s')$  pour tout  $s' \in N(s)$ , alors qu'il s'agit d'un **minimum global** si  $f(s) \leq f(s')$  pour tout  $s \in S$ .
- **Diversification** : Par diversification, on entend généralement une **exploration** très large de l'**espace de recherche** visant à récolter l'information sur le problème à optimiser.
- **Intensification** : L'intensification, ou **exploitation**, vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.
- **Mémoire et apprentissage** : la mémoire est le support de l'apprentissage qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'**optimum global** est susceptible de se trouver afin d'éviter les optima locaux. [5]

### III.6. Classification des métaheuristiques

Les métaheuristiques peuvent être classées selon divers critères tels que ; **le type de solution** (à **solution unique** ou à **base de population**), l'utilisation de la **mémoire** ou pas et l'**inspiration naturelle** ou non, les métaheuristiques **itératives** ou **constructives**. [6]



*Figure I.02 « Classification des métaheuristiques »*

La figure (I.02) représente un schéma récapitulatif sur la classification des métaheuristiques, et maintenant nous allons détailler chaque type en expliquant le fonctionnement de chaque méthode.

### A. III.6.1. Les méthodes de recherche locale

Autrement appelées « **méthodes trajectoires** » ; Ce sont des méthodes qui tentent itérativement d'améliorer une solution. Ces méthodes construisent une trajectoire dans l'espace **S** des **solutions** en tentant de se diriger vers des **solutions optimales**. [6]

Et on distingue différentes méthodes telles que :

#### A. L'algorithme de descente

Cet algorithme peut être décrit comme suit :

1. choisir une solution  $s \in S$  ;
2. déterminer une solution  $s'$  qui minimise  $f$  dans  $N(s)$ ;
3. **si**  $f(s') < f(s)$  **alors** poser  $s \leftarrow s'$  et retourner à 2. **Sinon STOP**.

Une variante consiste à parcourir  $N(s)$  au point 2. Et à choisir la première solution  $s'$  rencontrée telle que  $f(s') < f(s)$  (pour autant qu'une telle solution existe).

Le principal inconvénient des méthodes de descente est qu'elles s'arrêtent dès qu'elles rencontrent un minimum local. Comme mentionné précédemment, un minimum local dans une certaine structure de voisinage n'est pas nécessairement un minimum local dans une autre structure. Ainsi, le choix de la structure de voisinage  $N$  peut avoir une influence significative sur l'efficacité d'une méthode de descente

#### B. Recuit Simulé

Le recuit simulé est une métaheuristique inspirée d'un processus utilisé en métallurgie. Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (d'où le nom recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau. Une telle technique est aujourd'hui utilisée pour trouver les extrema d'une fonction.

Elle peut être décrite comme suit

Choisir une solution  $s \in S$  ainsi qu'une température initiale  $T$  ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

Choisir aléatoirement une solution  $s' \in N(s)$  ;

Générer un nombre réel aléatoire  $r \in [0, 1]$  ;

Si  $r < p(T, s, s')$  alors poser  $s \leftarrow s'$  ;

Mettre à jour  $T$  ;

**Fin du tant que**

La méthode du **Recuit Simulé** est une méthode **sans mémoire**. Mais elle peut être améliorée en ajoutant une mémoire à **long terme** qui enregistre la meilleure solution trouvée. En effet, l'algorithme du Recuit Simulé décrit ci-dessus peut atteindre une solution  $s^*$  après avoir rencontré une solution  $s$  dont la valeur  $f(s) < f(s^*)$ . Il est donc logique de conserver en mémoire la meilleure solution rencontrée au cours de la recherche.

Le critère d'arrêt de l'algorithme peut être basé sur une limite de temps ou un nombre d'itérations.

### C. La Recherche Tabou

Cette méthode a été proposée par **Glover en 1986** son principe est de choisir à chaque itération la meilleure solution  $s' \in N(s)$ , même si  $f(s') > f(s)$ . Lorsqu'on atteint un minimum local  $s$  par rapport au voisinage  $N$ , la **Recherche Tabou** va donc se déplacer vers une solution  $s'$  de valeur  $f(s') \geq f(s)$ . Le danger est alors de revenir à  $s$  puisque, en général,  $s \in N(s')$  et  $f(s) \leq f(s')$ .

Pour éviter de tourner ainsi en rond, on crée une liste  $T$  qui mémorise les dernières solutions visitées et interdit tout déplacement vers une solution de cette liste. Cette liste  $T$  est appelée **liste Tabou**. Les solutions ne demeurent dans  $T$  que pour un nombre limité d'itérations. La **liste T** est donc **une mémoire à court terme**. Si une solution  $s'$  est dans  $T$  on dit que  $s'$  est une **solution taboue**. De même, tout mouvement qui nous mène de la solution courante à une solution de  $T$  est appelé **mouvement tabou**.

La mémorisation des solutions dans  $T$  nécessite généralement beaucoup de mémoire, et il peut être difficile de vérifier si une solution donnée se trouve dans  $T$ . c'est pourquoi certains

préfèrent enregistrer des attributs ou des modifications de solution. De cette manière, on peut interdire de visiter une solution possédant un attribut appartenant à  $T$ .

L'algorithme de Recherche Tabou peut être décrit comme suit :

Choisir une solution  $s \in S$ , poser  $T \leftarrow \emptyset$  et  $s^* \leftarrow s$  ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

Déterminer une solution  $s_0$  qui minimise  $f$  dans  $NT(S)$ ;

**Si**  $f(s_0) < f(s^*)$  **alors** poser  $s^* \leftarrow s_0$  ;

Poser  $s \leftarrow s_0$  et mettre à jour  $T$  ;

**Fin du tant que**

Comme critère d'arrêt on peut par exemple fixer un nombre maximum d'itérations sans amélioration de  $s^*$ , ou on peut fixer un temps limite après lequel la recherche doit s'arrêter.

#### D. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)

A été proposée par **Feo** et **Resende** en **1995**. C'est une procédure **itérative** composée de deux phases : **une phase constructive et une phase d'amélioration**.

- En supposant qu'une solution est constituée d'un ensemble de composantes, la phase constructive génère une solution pas à pas, en ajoutant à chaque étape une nouvelle composante. La composante rajoutée est choisie dans une liste de candidats. Chaque composante est évaluée à l'aide d'un critère heuristique qui permet de mesurer le bénéfice qu'on peut espérer en rajoutant cette composante à la solution partielle courante.

La liste de candidats, notée **RCL** (pour **Restricted Candidate List**) contient les **R** meilleures composantes selon ce critère.

- La phase d'amélioration consiste généralement en l'application de l'algorithme de descente, du Recuit Simulé ou de la Recherche Tabou.

L'algorithme **GRASP** peut être décrit comme suit :

Poser  $f^* \leftarrow \infty$  (valeur de la meilleure solution rencontrée)

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

Poser  $s \leftarrow \emptyset$  ;

**Tant que** la solution courante  $s$  est partielle (et donc non complète) **faire**

Déterminer la liste RCL des  $R$  meilleures composantes pouvant être rajoutées à  $s$  ;

Choisir aléatoirement une composante dans RCL et la rajouter à  $s$  ;

**Fin du tant que**

Appliquer une Recherche Locale, en partant de  $s$ , pour obtenir une solution  $s'$ ;

**Si**  $f(s) < f^*$  alors poser  $s^* \leftarrow s'$  et  $f^* \leftarrow f(s')$ ;

**Fin du tant que**

Pour assurer l'efficacité de la méthode **GRASP**, il est crucial d'adopter une méthode constructive capable de générer des solutions dans diverses régions de l'espace de recherche. Cela garanti que la méthode explore de manière exhaustive les possibilités offertes par le problème, améliorant ainsi les chances de trouver des solutions de qualité optimale.

### E. Recherche à Voisins Variables (RVV)

Proposée par **Mladenovic et Hansen en 1997**. Cet algorithme utilise méthodiquement **plusieurs types de voisinages**.

Soit  $L = (N^1, \dots, N^\ell)$  une liste finie de voisinages, où  $N^t(s)$  est l'ensemble des solutions dans le  $t^{\text{e}}$  voisinage de  $s$ .

Dans la plupart des méthodes de Recherche Locale, on a  $\ell = 1$ , alors que  $\ell > 1$  pour la RVV.

Les voisinages de la liste  $L$  sont utilisés comme suit. Étant donnée une solution initiale  $s$ , on génère une solution voisine  $s' \in N^1(s)$  et on lui applique une procédure de Recherche Locale afin d'obtenir une solution  $s''$ . Si  $f(s'') < f(s)$ , alors  $s''$  devient la nouvelle solution courante  $s$  et on génère une nouvelle solution voisine dans  $N^1(s)$ . Sinon, la solution courante  $s$  n'est pas modifiée et on change de voisinage en générant une solution  $s' \in N^2(s)$ . Plus généralement, on change de voisinage à chaque fois que l'un d'entre eux n'est pas parvenu, après application de la procédure de Recherche Locale, à améliorer la solution courante  $s$ . Par contre, dès qu'un voisinage permet d'améliorer  $s$ , alors on recommence le processus avec le premier voisinage de la liste  $L$ .

La **RVV** peut donc être décrite comme suit.

Choisir une solution  $s \in S$  et poser  $t = 1$  ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire

Choisir aléatoirement une solution  $s' \in N_t(s)$  ;

Appliquer une Recherche Locale en partant de  $s'$  pour obtenir une solution  $s''$  ;

Si  $f(s'') < f(s)$  alors poser  $s \leftarrow s''$  et  $t \leftarrow 0$  ;

Si  $t < \ell$  alors poser  $t \leftarrow t + 1$ , sinon poser  $t \leftarrow 1$  ;

**Fin du tant que**

Pour maximiser l'efficacité d'une recherche à voisinage variable, il est recommandé d'utiliser des structures de voisinages complémentaires. Cela signifie que les voisinages devraient être conçus de manière à ce qu'un minimum local trouvé dans l'un ne soit pas nécessairement un minimum local dans un autre. Cette diversité favorise une exploration plus robuste de l'espace de recherche, augmentant ainsi les chances de découvrir des solutions de haute qualité.

### F. Recherche Locale Guidée (RLG)

Elle a été proposée par Voudouris en 1997, elle consiste à faire varier la fonction objective durant le processus de recherche, le but étant de rendre les minima locaux déjà visités moins attractifs.

La Recherche Locale Guidée peut être décrite comme suit.

Choisir une solution  $s \in S$  et poser  $s^* \leftarrow s$  ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

Appliquer une Recherche Locale en partant de  $s$ , avec  $g$  comme fonction objectif ;

Soit  $s'$  la solution résultant de cette recherche. Mettre à jour les points ; poser  $s \leftarrow s'$  ;

Si  $f(s) < f(s^*)$  **Alors** poser  $s^* \leftarrow s$  ;

**Fin du tant que**

### III.6.2. Les méthodes à populations

Les méthodes à populations de solutions, aussi appelées méthodes évolutives, font évoluer une population d'individus selon des règles bien précises.

Ces méthodes alternent entre des périodes d'adaptation individuelle et des périodes de coopération durant lesquelles les individus échangent de l'information. [6]

Une méthode évolutive peut être décrite comme suit.

Générer une population initiale d'individus ;  
**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**  
Exécuter une procédure de coopération ;  
Exécuter une procédure d'adaptation individuelle ;  
**Fin du tant que**

Les principales caractéristiques qui permettent de faire la différence entre diverses méthodes évolutives sont les suivantes :

- **Types d'individus** : Des individus qui évoluent selon une méthode populationnelle ne sont pas nécessairement des solutions. Il peut s'agir de morceaux de solutions ou d'objets que l'on peut facilement transformer en solutions.
- **Type d'évolution** : chaque itération d'une méthode évolutive, de nouveaux individus sont créés et la population de la prochaine itération sera donc constituée d'anciens individus (ceux qui auront survécu) et de nouveaux individus. La méthode évolutive doit indiquer comment décider de la survie des individus et comment choisir les nouveaux qui entreront en population. Lorsque toute la population est modifiée d'une itération à l'autre (c'est-à-dire que seuls les nouveaux individus sont conservés pour l'itération suivante), on parle de **remplacement générationnel**. Par contre, si une partie seulement de la population varie d'une itération à la suivante, on parle de **remplacement stationnaire** (steady state).
- **Structure de voisinage** : À chaque individu on associe un sous-ensemble d'autres individus avec lesquels il peut échanger de l'information. Si chaque individu peut communiquer avec tous les autres individus de la population, on parle de **population non structurée**. Par contre, si chaque individu ne peut communiquer qu'avec un sous-ensemble d'individus, on parle de **population structurée**.
- **Sources d'information** : Le nombre d'individus qui coopèrent pour créer un nouvel individu est souvent égal à 2. On parle alors de **parents** qui génèrent des enfants. On peut cependant également combiner plus de 2 solutions pour créer des enfants

- **Irréalisabilité** : Un individu est un objet défini avec des règles bien précises. En combinant des individus pour en créer de nouveaux, il se peut que le nouvel objet résultant de l'échange d'information ne soit pas un individu **admissible**.

Dans une telle situation, nous pouvons réagir d'au moins 3 manières :

- Rejeter le nouvel individu
  - Accepter le nouvel individu en pénalisant l'interdiction de territoire dans la fonction objective
  - Utiliser une procédure de combinaison qui évite la création d'individus inacceptables. Individus à en créer de nouveaux, il est possible que le nouvel objet issu de l'échange l'information ne soit pas une personne éligible.
- 
- **Intensification** : Quand nous pouvons localiser des informations pertinentes qui rendent un individu meilleur qu'un autre, il est nécessaire de développer des procédures coopératives qui créent des enfants en combinant de manière adéquate les informations pertinentes de chaque parent. Il est donc important d'utiliser une bonne procédure d'adaptation individuelle. Cependant, pour de nombreux problèmes, ces informations pertinentes sont difficiles à localiser.
- 
- **Diversification** : Une difficulté majeure rencontrée lors de l'utilisation des méthodes évolutives est leur **convergence prématurée**. Certains utilisent des procédures de **bruitage** qui modifient légèrement les individus de manière aléatoire. Ce bruitage est appliqué indépendamment sur chaque individu. Il diffère de l'utilisation d'une Recherche Locale par le fait que son effet sur la qualité de la solution n'est pas prévisible. L'opérateur de bruitage le plus connu est **la mutation** des algorithmes génétiques. Au lieu de modifier les individus aléatoirement, certains préfèrent créer de nouveaux individus différents de ceux déjà rencontrés en faisant usage d'une mémoire à long terme basée, par exemple, sur la **récence** ou la **fréquence**.

On distingue plusieurs méthodes basées sur des populations telles que :

### A. La Recherche dispersée

Cette méthode a été proposée par Glover en 1977, elle consiste à générer un ensemble  $D_i$  de points dispersés à partir d'un ensemble  $R_i$  de points de références. Ces points dispersés sont obtenus en effectuant tout d'abord des combinaisons linéaires des points de référence, avec possiblement des coefficients négatifs (ce qui veut dire que les points résultants peuvent être à l'extérieur de l'enveloppe convexe des  $R_i$ ).

Si des points de l'ensemble  $C_i$  résultant de ces combinaisons linéaires ne sont pas admissibles, on leur applique une procédure de réparation pour obtenir un ensemble  $A_i$  de points admissibles. Les points de  $A_i$  sont finalement optimisés à l'aide d'une Recherche Locale pour obtenir l'ensemble  $D_i$  des points dispersés. Le nouvel ensemble  $R_{i+1}$  de points de référence est obtenu en sélectionnant des points dans  $R_i \cup D_i$ . Le pseudo-code et les caractéristiques de cette méthode sont donnés ci-dessous :

Générer une population initiale  $R_0$  de  $p \geq 2$  individus et poser  $i \leftarrow 0$  ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

Créer un ensemble  $C_i$  de points en effectuant des combinaisons linéaires des points de  $R_i$  ;

Réparer les points non admissibles de  $C_i$  pour obtenir un ensemble  $A_i$  admissible ;

Appliquer une Recherche Locale sur chaque point de  $A_i$  ; soit  $D_i$  l'ensemble résultant ;

Créer  $R_{i+1}$  en sélectionnant  $p$  points dans  $R_i \cup D_i$ , et poser  $i \leftarrow i + 1$  ;

**Fin du tant que**

Types d'individus : des solutions admissibles ;

Type d'évolution : remplacement stationnaire avec une population de taille constante ;

Structure de voisinage : population non structurée ;

Sources d'information : au moins deux parents ;

Irréalisabilité : les points non admissibles sont réparés ;

Intensification : Recherche Locale ;

Diversification : combinaison non convexe des points de référence.

### B. Méthode à mémoire adaptative

Elle a été proposée par **Rochat** et **Taillard** en **1995**, Elle fonctionne avec **une mémoire centrale** chargée de stocker les composantes des meilleures solutions rencontrées.

Ces composantes sont combinées dans le but de créer de nouvelles solutions qui sont réparées si elles ne sont pas admissibles. Une Recherche Locale est ensuite appliquée et les composantes de la solution ainsi obtenue sont considérées pour éventuellement faire partie de la mémoire centrale. Au début de la recherche, la mémoire centrale contient des composantes provenant de solutions très diverses et le processus de combinaison aura donc tendance à créer une diversité de nouvelles solutions. Plus la recherche avance, et plus la mémoire centrale aura tendance à ne mémoriser que les composantes d'un sous-ensemble très restreint de solutions. La recherche devient donc petit à petit un processus d'intensification.

Le pseudo-code et les caractéristiques de la méthode à mémoire adaptative sont donnés ci-dessous.

Générer un ensemble de solutions et introduire leurs composantes dans la mémoire centrale ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait **faire**

    Combiner les composantes de la mémoire centrale pour créer de nouvelles solutions ;

    Réparer, si nécessaire, les solutions non admissibles ainsi générées ;

    Appliquer une Recherche Locale sur chaque nouvelle solution admissible ;

    Mettre à jour la mémoire centrale en ôtant certaines composantes et en y insérant certaines provenant des nouvelles solutions générées ;

**Fin du tant que**

Types d'individus : des composantes de solutions admissibles ;

Type d'évolution : remplacement stationnaire avec une population de taille constante ;

Structure de voisinage : population non structurée ;

Sources d'information : au moins deux parents ;

Irréalisabilité : les solutions non admissibles sont réparées ;

Intensification : Recherche Locale et intensification implicite durant les dernières itérations ;

Diversification : diversification implicite durant les premières itérations.

### C. L'optimisation par colonies de fourmis

C'est une méthode **évolutive** inspirée du comportement des **fourmis** à la recherche de nourriture. Cet algorithme a été proposé par **Dorigo en 1992**. Il est connu que les fourmis sont capables de déterminer le chemin le plus court entre leur nid et une source de nourriture ceci est possible grâce à la phéromone, une substance que les fourmis déposent sur le sol lorsqu'elles

de déplacent. Lorsqu'une fourmi doit choisir entre deux directions, elle choisit avec une plus grande probabilité celle comportant une plus forte concentration de phéromone. C'est ce processus coopératif qu'on tente d'imiter. [7]

Chaque fourmi est un algorithme constructif qui génère des solutions.

Soit  $D(s)$  l'ensemble des décisions possibles que peut prendre une fourmi pour compléter une solution partielle  $s$ .

La décision  $d \in D(s)$  qu'elle choisira dépendra de deux facteurs, à savoir la force **gloutonne** et **la trace**.

- La force **gloutonne** est une valeur  $\eta_d(s)$  qui représente l'intérêt qu'a la fourmi à prendre la décision  $d$  étant donnée la solution partielle  $s$ .
- **La trace**  $\tau_d$  représente l'intérêt historique qu'a la fourmi de prendre la décision  $d$ . Plus cette quantité est grande, plus il a été intéressant dans le passé de prendre cette décision.

Le pseudo-code et les caractéristiques d'une optimisation par colonies de fourmis sont donnés ci-dessous.

Poser  $\tau_d \leftarrow 0$  pour toute décision  $d$  possible ;

**Tant que** aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire

Construire  $|A|$  solutions en tenant compte de la force gloutonne et de la trace ;

Mettre à jour les traces  $\tau_d$  ainsi que la meilleure solution rencontrée ;

**Fin du tant que**

Types d'individus : solutions admissibles obtenues à l'aide d'un algorithme constructif

Type d'évolution : remplacement générationnel avec une population de taille constante

Structure de voisinage : population non structurée

Sources d'information : historique de la recherche (mémorisé dans la trace)

Irréalisabilité : l'algorithme constructif ne produit pas de solution non admissible

Intensification : aucune

Diversification : aucune.

## D. Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc.

Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. [8]

### 1. Historique

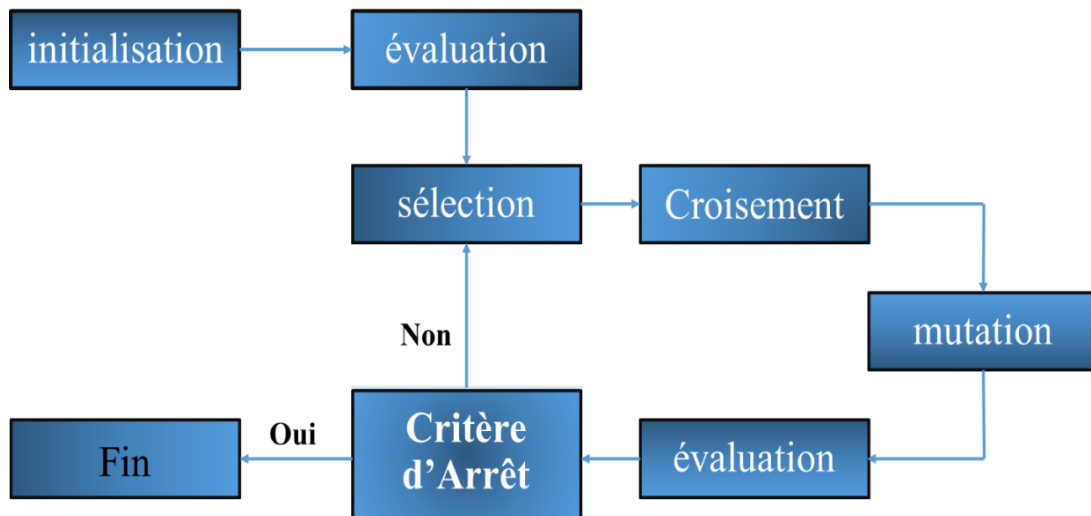
Dans son livre « De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle », *Charles Darwin* développa les premiers principes de la théorie de l'évolution. D'après lui, l'évolution des systèmes vivants au cours des générations s'opère en deux étapes importantes : la **sélection** et la **reproduction**. [9]

Ces deux principes sont définis comme suit :

- a. **La sélection naturelle** est un opérateur au niveau des populations qui mène à la mort sélective des plus faibles et la survie des individus les mieux adaptés à leur environnement.
  
- b. **La reproduction** est un opérateur de modification successive aux individus de la population par mutation et recombinaison, chose qui entraîne une grande diversité entre deux populations d'une même espèce.

Les principes fondamentaux de la génétique énoncés par **John Mendel** en **1865**, expliquant la transmission des caractères à travers les générations par le biais de la reproduction. Les caractères héréditaires, contenus dans les gènes localisés dans le génome, constituent le patrimoine génétique de chaque individu.

Lorsque deux parents combinent leurs génomes à travers des mécanismes de croisement et de mutation, ils engendrent deux enfants distincts, chacun possédant des traits hérités de leurs parents respectifs. Ces concepts ont permis aux chercheurs d'adopter une nouvelle perspective sur les problèmes d'optimisation, introduisant une approche de résolution basées sur des conditions spécifiques et des étapes méthodiques pour parvenir à des solutions optimales.



*Figure I.03 « Principe générale des algorithmes génétiques »*

#### IV. Conclusion

Les métaheuristiques sont des algorithmes itératifs stochastiques utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

Leur principal avantage réside dans leur capacité à trouver des solutions de qualité, voire optimales, pour une large gamme de problèmes, sans nécessiter de modifications profondes dans l'algorithme employé.

En conclusion, les métaheuristiques jouent un rôle crucial dans l'optimisation et la résolution de problèmes, offrant des solutions efficaces même dans des environnements complexes et en évolution constante.

## CHAPITRE II :

# Généralités sur les réseaux d'alimentation en eau potable

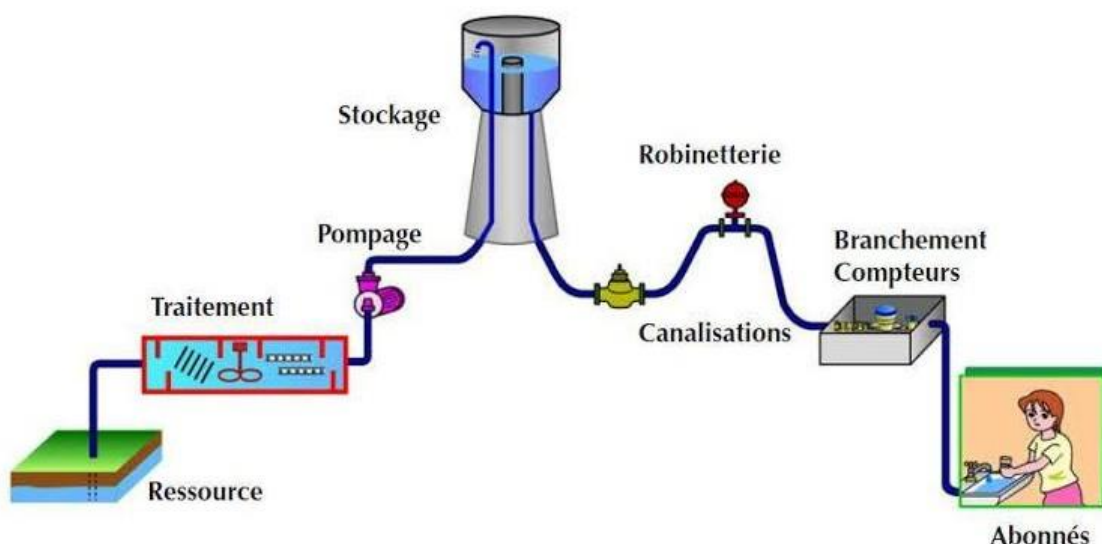
## I. Introduction

Au sens large, nous définissons un système de distribution d'eau potable comme étant l'ensemble des équipements, de services et d'actions qui permettent à partir d'une eau brute, de produire une eau conforme aux normes de potabilité en vigueur, de la transporter, de la stocker et enfin de la distribuer aux consommateurs. Ainsi, d'une manière générale, nous pouvons distinguer cinq étapes distinctes dans ce système de distribution (d'alimentation) d'eau potable à savoir : le captage, le traitement pour potabiliser l'eau captée, l'adduction, le stockage (l'accumulation), et enfin la distribution aux consommateurs.

À partir d'un ou plusieurs réservoirs, l'eau est distribuée à travers un réseau de canalisation (conduites) sur lesquelles les branchements seront réalisés (piquages) en vue de faire parvenir l'eau aux consommateurs (abonnés).

Ces canalisations ou conduites, constituant notre réseau de distribution, devront en conséquence présenter un diamètre suffisant, de façon à assurer :

- D'une part, le débit maximal qui est en fonction des besoins en eau.
- D'autre part, cette eau doit arriver au consommateur avec une pression au sol compatible avec le cahier des charges du projet (topographie du site, hauteur des immeubles...).



*Figure II.01 « Schéma général d'un système d'alimentation en eau potable »*

L'objectif principal de notre travail est une introduction à l'optimisation des réseaux de distribution d'eau potable. Cependant, avant d'entamer notre travail proprement dit, nous avons jugé utile de présenter des notions de base de l'hydraulique urbaine qui seront nécessaires à la réalisation de ce travail. C'est pourquoi nous présenterons dans ce chapitre des généralités sur les réseaux de distribution en eau potable. Un rappel sur les relations de l'hydraulique générale en particulier les écoulements en charge. Le principe du calcul des réseaux d'AEP, en particulier les réseaux maillés objet de notre étude.

Les méthodes les plus significatives dans ce sens sont : la méthode de **Newton Raphson**, la méthode **de linéarisation des pertes de charges**, la méthode de **Featherstone et El Djumail** ainsi que la méthode de **Hardy Cross** que nous allons voir en détail dans ce chapitre.

## II. Généralités

Les réseaux de distribution d'eau mobilisent la part la plus importante des capitaux nécessaires à l'alimentation en eau potable, soit environ quatre-vingt pour cent des coûts, contre vingt pour cent pour les autres installations. Ces chiffres montrent l'importance d'une conception optimale, un entretien et un renouvellement continu des réseaux d'alimentation en eau potable, et ce, afin de pérenniser au mieux cet investissement décisif.

L'objectif d'un projeteur entreprenant l'étude d'un réseau d'alimentation en eau potable, est la réalisation d'ouvrage techniquement satisfaisant, vis-à-vis des fonctions à assumer et d'un prix de revient aussi réduit que possible.

Pour atteindre cet objectif, trois sortes d'études sont généralement envisagées :

- Une étude des conditions de fonctionnement d'un réseau en service, comportant des mesures de débit en charge en divers points du réseau, de topographie et de dimensionnement connus. Les résultats obtenus d'une telle étude permettent d'apprécier l'opportunité d'un remplacement ou d'un renforcement en fonction de la demande.
- Etude de la programmation des travaux à entreprendre, en fonction de la hiérarchie et de la chronologie des besoins ainsi que des disponibilités financières des maitres d'ouvrages.
- Etude du dimensionnement optimal, que ce soit d'un réseau neuf à créer, d'une extension ou d'un renforcement d'un réseau en service.

Cette dernière fait l'objet du présent travail. Elle présente le cadre de base pour l'élaboration d'un modèle pouvant être utilisé pour définir le concept optimal, d'un système de distribution d'eau, sujet à des contraintes multiples d'ordre : physique, technique et commerciale.

### III. Les contraintes d'un réseau de distribution d'AEP

On appelle contraintes dans un système physique, toutes les conditions exigées à savoir : la vérification des différentes lois de la physique spécifiques, les conditions techniques, la vérification des conditions de performance et de son bon fonctionnement, les conditions pratiques...etc. Dans le cas d'un réseau d'alimentation en eau potable, nous distinguons :

**A. Les contraintes physiques** : sont traduites par ces deux lois :

- Lois de la conservation de la masse (équation de continuité aux nœuds)

$$\text{En un nœud : } \sum Q_{\text{entrant}} = \sum Q_{\text{sortant}} \quad (01)$$

- La conservation d'énergie (équation de pertes des charges pour chaque maille)

$$\sum \Delta h_{\text{maille}} = 0 \quad (02)$$

Avec

**$\Delta h$**  : Perte de charge

### ❖ Rappel hydraulique

Le passage d'un débit dans une conduite se traduit par des pertes d'énergie, ces pertes d'énergie se présentent sous formes de pertes de charge linéaires et pertes de charge singulières. [10]

La perte de charge totale dans une canalisation est égale à :

$$\Delta H_T = \Delta H_l + \Delta H_s \quad (03)$$

#### 1. Les pertes de charge linéaires : $\Delta H_l$

Elles sont des pertes d'énergie hydraulique dues aux frottements de l'eau le long des parois des conduites et en présence du coefficient de viscosité.

À l'heure actuelle, il existe différentes méthodes et formules pour le calcul des pertes de charges linéaires dans les conduites sous pression ; *DARCY-WEISBACH*, *HAZEN-WILLIAMS* et *CHEZY-MANNING*

##### A. Formule de DARCY-WEISBACH [11]

$$\Delta H_l = \lambda \frac{L}{Dh} * \frac{v^2}{2g} \quad (04)$$

$\Delta H_l$  : Pertes de charge linéaires dans une conduite.

$L$  : longueur du tronçon examiné (m).

$Dh$  : le diamètre hydraulique (m).

$Dh = 4Rh$  : Diamètre hydraulique

$$Rh = \frac{S}{p_m} = \frac{\text{section}}{\text{périmètre mouillé}} \quad (05)$$

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

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

➤ **Détermination le coefficient de pertes par frottement  $\lambda$**

Le coefficient de frottement  $\lambda$  dépend de la nature du régime d'écoulement que lui est en fonction de la rugosité relative et du nombre de **Reynolds** [12]

- **En régime Laminaire** :  $\lambda$  sera calculé avec la formule de **Hagen poiseuille** :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (06)$$

- **En régime de transition** :  $\lambda$  sera calculé avec la formule de **COLEBROOK-WHITE** [13]

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right] \quad (07)$$

- **En régime turbulent** :  $\lambda$  sera calculé avec la formule de **NIKURADZE** :

$$\frac{1}{\lambda} = \left[ 1,14 - 0,86 \log \frac{\varepsilon}{D} \right] \quad (08)$$

Avec :

$\varepsilon$  : coefficient de rugosité absolue des tuyaux

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

**Re** : nombre de Reynolds

On peut également déterminer le coefficient des pertes de charges avec le diagramme de **Moody**

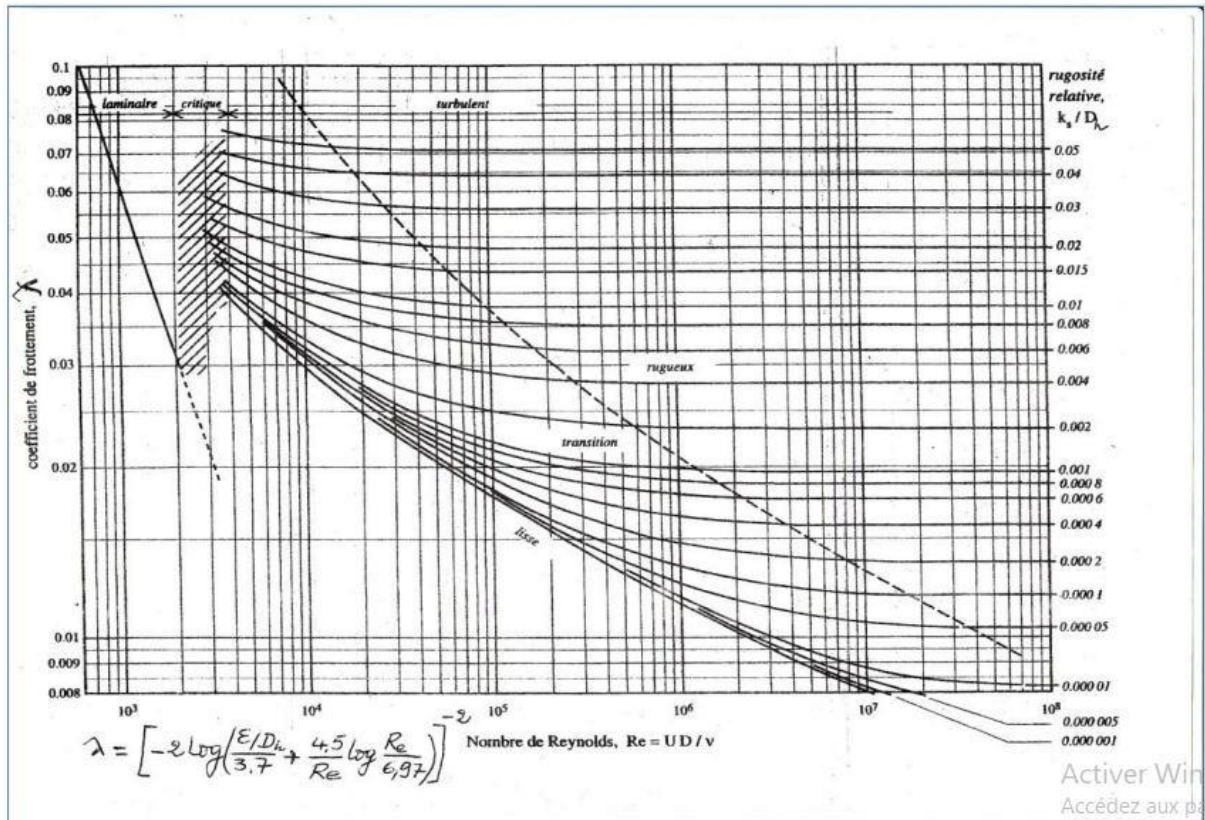


Figure II.02 « Diagramme de Moody Stanton »

- **Nombre de Reynolds** : C'est une valeur adimensionnelle, qui nous permet d'avoir une idée sur la nature du régime d'écoulement. [14]

Il est donné par la formule suivante :

$$Re = \frac{v*d}{\nu} \quad (09)$$

Avec :

$\nu$ : vitesse d'écoulement [m/s]

$d$  : diamètre de la conduite [m]

**v**: viscosité cinématique de l'eau prise égale à  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s à 20°C

En fonction du nombre de Reynolds, nous avons la classification suivante :

Si  $Re < 2100 \rightarrow$  régime laminaire

Si  $2100 < Re < 4000 \rightarrow$  régime transitoir

Si  $Re > 4000 \rightarrow$  régime turbulent

## 2. Les pertes de charges singulières : $\Delta H_s$

Le long d'une canalisation, il se produit des pertes de charges accidentelles dues aux diverses singularités qui peuvent être placées le long de la canalisation. La perte de charge provoquée par une singularité, dans notre cas, on les prend 10%. Elles sont formulées comme suit : [15]

$$\Delta H_s = k * \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Avec :

**k** : Coefficient de singularité

**v**: vitesse moyenne de l'écoulement [m/s]

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

## 3. le gradient de pertes de charges

➤ Formule de *Hazen Williams* :

- **La vitesse d'écoulement :**

$$v = 0.849 C R_h^{0.63} I^{0.54} \quad (11)$$

- **Le débit :**

$$Q = v * A \quad \text{Donc } Q = 0.849 A C R_h^{0.63} I^{0.54} \quad (12)$$

- **Le gradient de pertes de charges :**

$$I = \left( \frac{4^{1.63} Q}{0.849 \pi C d^{2.63}} \right)^{\frac{1}{0.54}} \quad (13)$$

$$\Delta H = I * L \quad (14)$$

Avec

$v$  : vitesse en m/s

$Rh$  : Rayon hydraulique en m

$C$  : Coefficient de Hazen-Williams

$I$  : gradient de perte de charges

$A$  : section

$d$  : diamètre

**B. Les contraintes techniques** : sont imposées par la topographie du site, la consommation journalière, les bornes des pressions nodales et des vitesses d'écoulement dans les conduites.

**C. Les contraintes commerciales** : sont en fonction de la gamme des pompes et celle des diamètres commerciaux disponible sur le marché.

#### IV. Classification des réseaux de distribution [16]

Les réseaux peuvent être classés comme suit :

➤ **Les réseaux ramifiés**

Dans lesquels les conduites ne comportent aucune alimentation en retour, présentent l'avantage d'être économiques, mais ils manquent de sécurité et de souplesse en cas de rupture : un accident sur la conduite principale prive d'eau tous les abonnés d'aval.

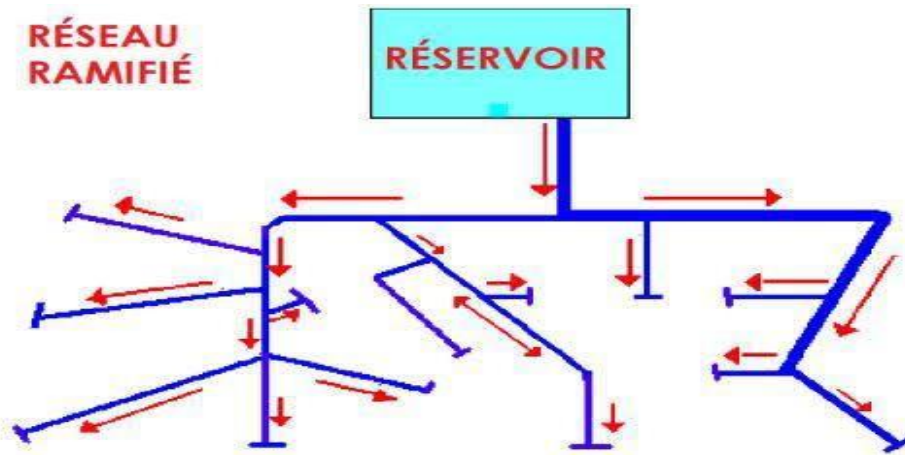


Figure II.03 « Réseau ramifié »

➤ Les réseaux maillés

Permettent une alimentation en retour, une simple manœuvre de robinets permet d'isoler le tronçon accidenté et de poursuivre l'alimentation des abonnés d'aval. Ils sont, plus coûteux d'établissement, mais en raison de la sécurité qu'ils procurent, ils sont toujours préférés aux réseaux ramifiés

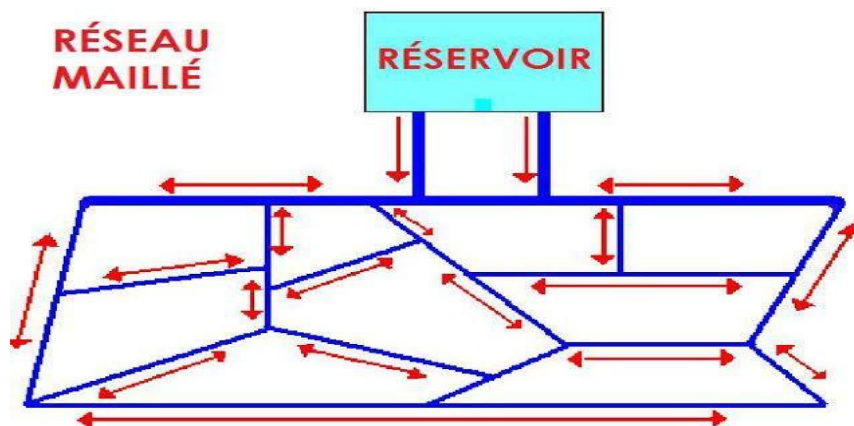
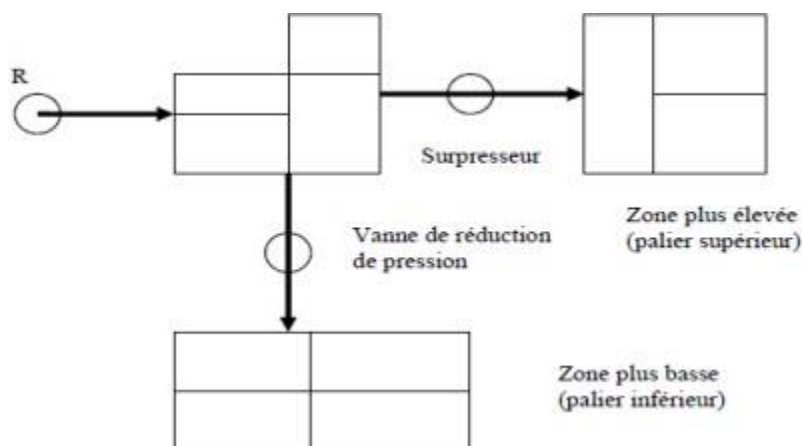


Figure II.04 « Réseau maillé »

### ➤ Les réseaux étagés

Dans le cas où la topographie est très tourmentée, la distribution peut se faire par paliers



*Figure II.05 « Réseau étagé »*

### ➤ Les réseaux à alimentations distinctes

Ils distribuent, l'un, de l'eau potable destinée à tous les besoins domestiques et l'autre, de l'eau non potable réservée aux usages industriels et aux lavages, arrosage des rues et plantations. Ces réseaux ne se justifient que dans les installations extrêmement importantes

### ➤ Réseaux mixtes

Ce sont des réseaux maillés comportant, en cas de besoin, quelques ramifications permettant d'alimenter quelques zones isolées de la ville (zones industrielles ou zones rurales).

## V. Hypothèse de calcul

### V.1. Choix du diamètre des conduites

Pour le choix du diamètre des conduites on se réfère aux diamètres normalisés (commerciaux) donnés dans les catalogues.

Dans les tronçons sur lesquelles il est prévu l'installation de bouches d'incendie, le diamètre minimal sera de **0,100 m** ou mieux encore **0,150 m**. [17]

### V.2. La pression au sol

Le réseau doit être calculé pour satisfaire, les conditions de pression suivantes :

- Une charge minimale de **3,00 m** doit être prévue sur les orifices de puisage les plus élevés (**5,00 m** dans le cas de chauffe-eau instantané)
- En vue de la bonne tenue de canalisations et notamment de leur joint, il y a lieu d'éviter des pressions supérieures à **60 m** qui risquent d'apporter des désordres (fuite notamment) et certains bruits désagréables dans les installations intérieures d'abonnés. Si, néanmoins de telles pressions devaient se manifester, il y aurait lieu, en vue de les diminuer, soit d'envisager une distribution étagée, soit de prévoir l'installation sur le réseau d'appareilles réducteurs de pression.

A titre indicatifs, selon la hauteur des immeubles, on prévoit les pressions maximales suivantes, au sol, exprimées en mètres d'eau :

12 à 15 m Pour les immeubles plus élevés	29 à 32 m pour 5 étages
16 à 19 m pour un étage pour 2 étages	33 à 36 m pour 6 étages
20 à 23 m pour 3 étages	37 à 40 m pour 7 étages
24 à 27 m pour 4 étages	

Leurs propriétaires se trouvent obligés d'installer, dans les sous-sols, des groupes surpresseurs. [18]

### V.3. La vitesse d'écoulement

La vitesse de l'eau dans les conduites sera de l'ordre de **0,50 à 1.5 m/s**. il faut donc éviter que les vitesses soient **supérieures à 1.5 m/s**, et **inférieures à 0,50 m/s**.

Les faibles vitesses favorisent la formation de dépôts qu'ils sont parfois difficiles à évacuer, aussi dans les voies secondaires il est nécessaire parfois de prévoir des décharges systématiques en certain points : bouche de lavage ou d'arrosage, manœuvre des pompiers, et..., car les vitesses restent souvent inférieures à 0,50 m/s. [19]

#### V.4. Conditions spéciales d'incendie

Les dispositions à prendre en vue de la lutte contre les incendies étaient régies par *la circulaire interministérielle du 10 décembre 1951*, les répercussions de cette circulaire sur les réseaux de distribution sont les suivantes :

- Les canalisations alimentant les appareils d'incendie devront pouvoir fournir un débit minimal de **17 l/s** avec une pression au sol d'au moins **1 bar**, toutefois, exceptionnellement, cette pression pourra descendre jusqu'à **0.600 bars**.
- Les appareils hydrauliques utilisés par les pompiers sont, soit des bouches d'incendie, soit des poteaux d'incendie, mieux visible l'hiver par temps de neige.  
Ces appareils doivent être espacés de **200 à 300 m** les uns des autres et être repartis suivant l'importance des risques à défendre.

Si le risque est faible, l'écartement pourra être porté à **400 m**, l'appareil normalisé est la bouche d'incendie de **0.100 m**.

Dans certaines grandes villes, ou les pompiers disposent d'engins à grande puissance, des bouches d'incendie de **0.150 m** pourront être prévues à proximité de risques importants.

Ces bouches seront installées sur des canalisations maitresses d'un débit en rapport avec l'engin.

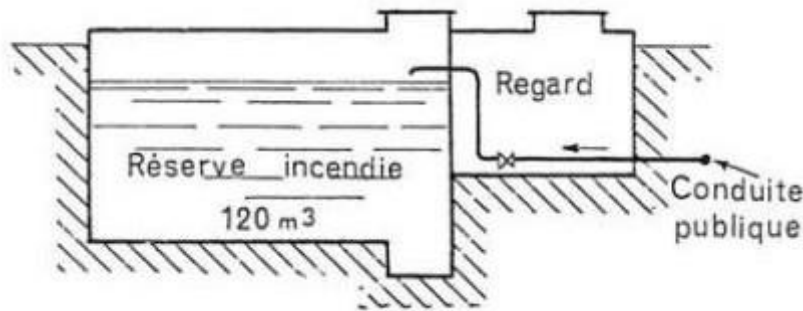
La condition d'incendie (17l/s) est souvent difficile à satisfaire dans les petites installations et oblige parfois à prévoir des diamètres surabondants pour les besoins normaux.

En conséquence, la vitesse de l'eau, en distribution normale, risque d'être faible dans certains traçons.

Dans les petites agglomérations on peut éviter d'avoir recours directement au réseau en utilisant :

- Soit des points d'eau naturels (cours d'eau, mares, étangs) à condition, toutefois, que les débits nécessaires puissent en être extraits en toute saison et que ces points d'eau soient situés à **400 m** au maximum des risques à défendre et qu'en plus, la hauteur d'aspiration soit inférieure à **6m** et l'accès doit, en outre, faire l'objet d'un aménagement en accord avec les sapeurs-pompiers.

- Soit des points d'eau artificiels en des emplacements judicieusement choisis de façon à assurer une défense suffisante contre un risque situé dans un rayon de **400 m**, la capacité de cette réserve doit être d'au moins de **120m<sup>3</sup>**, son installation peut parfois présenter quelques difficultés étant donné ses dimensions, elle peut être envisagée, par exemple, sous une place publique. [20]



*Figure II.06 « Réserve d'incendie »*

## VI. Principe de calcul des réseaux de distribution [21]

### VI.1. Débit spécifique

Le débit spécifique est défini comme étant le rapport entre les débits en route et la somme des longueurs de tous les tronçons :

$$Q_{sp} = \frac{\sum Q_r}{\sum L_i} \quad (15)$$

Avec :

**Q<sub>sp</sub>** : débit spécifique (l/s/ml)

$\sum Q_r$  : somme des débits en route (l/s)

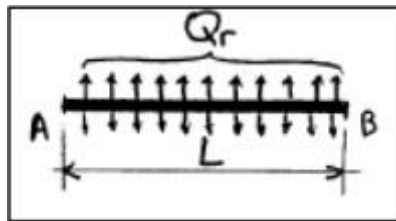
$\sum L_i$  : somme des longueurs des tronçons du réseau (ml).

### VI.2. Débit en route

Dans une conduite d'adduction, le débit d'eau est constant. Dans les canalisations de distribution la situation est tout à fait différente. En effet, les conduites de distribution sont destinées à distribuer l'eau aux abonnés.

Chaque tronçon de distribution, matérialisé par deux nœuds, est alors caractérisé par deux débits : un débit d'extrémité (qui doit, tout simplement, transiter par le tronçon, appelé débit de transit et noté  $Q_t$ ) et un débit consommé par les branchements raccordés sur ce tronçon (appelé débit en route et noté  $Q_r$ ).

Le débit en route est un débit qui entre à l'amont du tronçon et ne sort pas à l'aval puisque, par définition, il est consommé par les abonnés tout le long du tronçon.



*Figure II.07 « Répartition uniforme du débit en route sur la longueur du tronçon »*

Ce débit en route, supposé uniformément réparti sur toute la longueur du tronçon peut être calculé par la méthode suivante :

$$Q_{r_{AB}} = Q_{sp} * L_{AB} \quad (16)$$

Avec

$Q_{sp}$  : débit spécifique

$L_{AB}$  : longueur totale

Où : Le débit spécifique est donné par :

$$Q_{sp} = \frac{Q_{tot}}{L_{tot}} \quad (17)$$

### VI.3. Les débits aux nœuds

Le débit au nœud est la somme des moitiés des débits des tronçons concentrés à chaque point de jonction du réseau ; il doit être déterminé à partir de la relation suivante :

$$Q_{ni} = \sum \left( \frac{Q_{ri}}{2} \right) \quad (18)$$

Avec :

$Q_{ni}$  : débit en un nœud

$Q_{ri}$  : débit en route

## VII. Calcul des réseaux maillés

Pour un réseau maillé, après le calcul des débits en route de tous les tronçons, on utilise l'expression (18) pour répartir ces débits aux nœuds du réseau.

Le calcul des réseaux maillés est plus compliqué, Plusieurs méthodes ont été utilisées pour réaliser ce calcul.

Une des méthodes les plus utilisées est celle de **Hardy Cross**, par approximations successives, et que nous allons présenter

## VIII. Méthode Hardy Cross :

La méthode Hardy Cross est une méthode itérative pour déterminer les débits dans les conduites d'un réseau maillé (ou le/les débits entrant (s) et sortant (s) sont connus mais ou les débits circulants dans les canalisations du réseau sont inconnus)

Elle a été publiée en Novembre 1936 par le professeur en ingénierie de structure du même nom HARDY CROSS. [22]

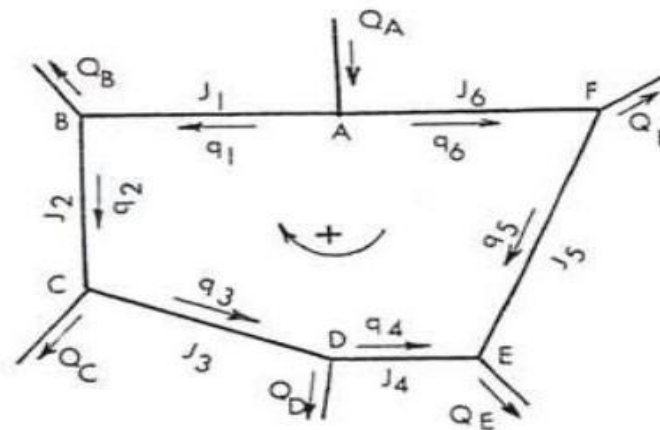


Figure II.08 « Sens supposé de l'écoulement dans une maille »

Cette méthode repose sur les deux lois suivantes :

➤ **La loi des nœuds :**

En un nœud quelconque d'une conduite, la somme des débits qui arrivent à ce nœud est égale à la somme des débits qui en partent. [23]

C'est ainsi que l'on a pour le nœud **A**, de la figure (II.08) et pour le sens d'écoulement supposé indiqué par les flèches, donne :

$$Q_A = q_6 + q_1 \quad (19)$$

Cette loi est similaire à la loi de Kirchhoff en électricité

➤ **La loi des mailles :**

Le long d'un parcours orienté et fermé, la somme algébrique des pertes de charges est nulle

Cette loi, appliquée au contour **ABCDEF**, où l'orientation positive est donnée par le sens du déplacement des aiguilles d'une montre. [24]

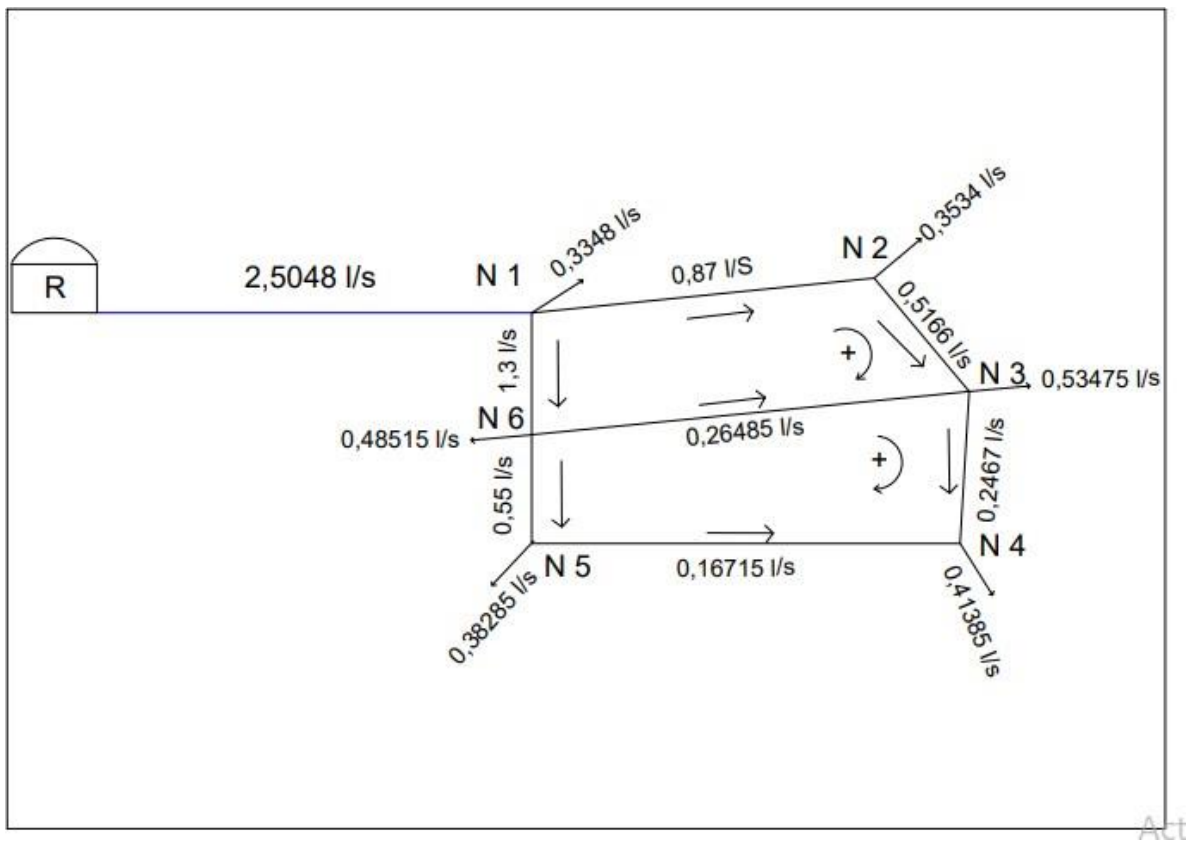
Donne :

$$J_6 + J_5 - J_4 - J_3 - J_2 - J_1 = 0 \quad (20)$$

La deuxième loi revient à écrire que, le long du parcours de deux écoulements en sens inverse ; AFE et ABCDE, les pertes de charges engendrées par les débits qui y circulent sont égales

➤ **Le principe de calcul de la méthode Hardy Cross**

Pour chaque maille, on se fixera une répartition arbitraire (figure II.09) provisoire des débits ainsi qu'un sens d'écoulement, tout en respectant la première loi. Ainsi, pour chaque maille, l'orientation positive est donnée par le sens des aiguilles d'une montre et pour le sens d'écoulement de l'eau indiqué par les flèches ; cette première distribution nous permet de calculer les diamètres initiaux, tout en ayant des vitesses d'écoulement acceptables (0.5, 1.5m/s), et après ça, calculer les pertes de charges et vérifier la deuxième loi, Si celle-ci n'est pas vérifiée, une correction ( $\Delta$ ) pour chaque maille est appliquée. [25]



*Figure II.09 « La 1<sup>ère</sup> répartition des débits »*

L'expression de la correction ( $\Delta Q$ ) pour chaque maille est :

$$\Delta_Q = - \frac{\sum \Delta H}{n \sum \frac{\Delta H}{Q_0}} \quad (21)$$

La correction  $\Delta$  se calcul pour chaque boucle du réseau. Son unité est celle du débit  $Q_0$

Si nous utilisons la formule de *Manning* :

$$\Delta_Q = - \frac{\sum \Delta H}{2 \sum \frac{\Delta H}{Q_0}} \quad (22)$$

Si nous utilisons la formule de *Hazen-Williams* :

$$\Delta_Q = - \frac{\sum \Delta H}{1.85 \sum \frac{\Delta H}{Q_0}} \quad (23)$$

Et ainsi le débit corrigé peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q' = Q_0 + \Delta Q \quad (24)$$

Avec

$Q'$  : débit corrigé

$Q_0$  : débit initial

$\Delta Q$  : correction

Le processus itératif s'arrête lorsque la contrainte de vitesse est vérifiée sur tous les tronçons du réseau.

## ➤ Organigramme de calcul

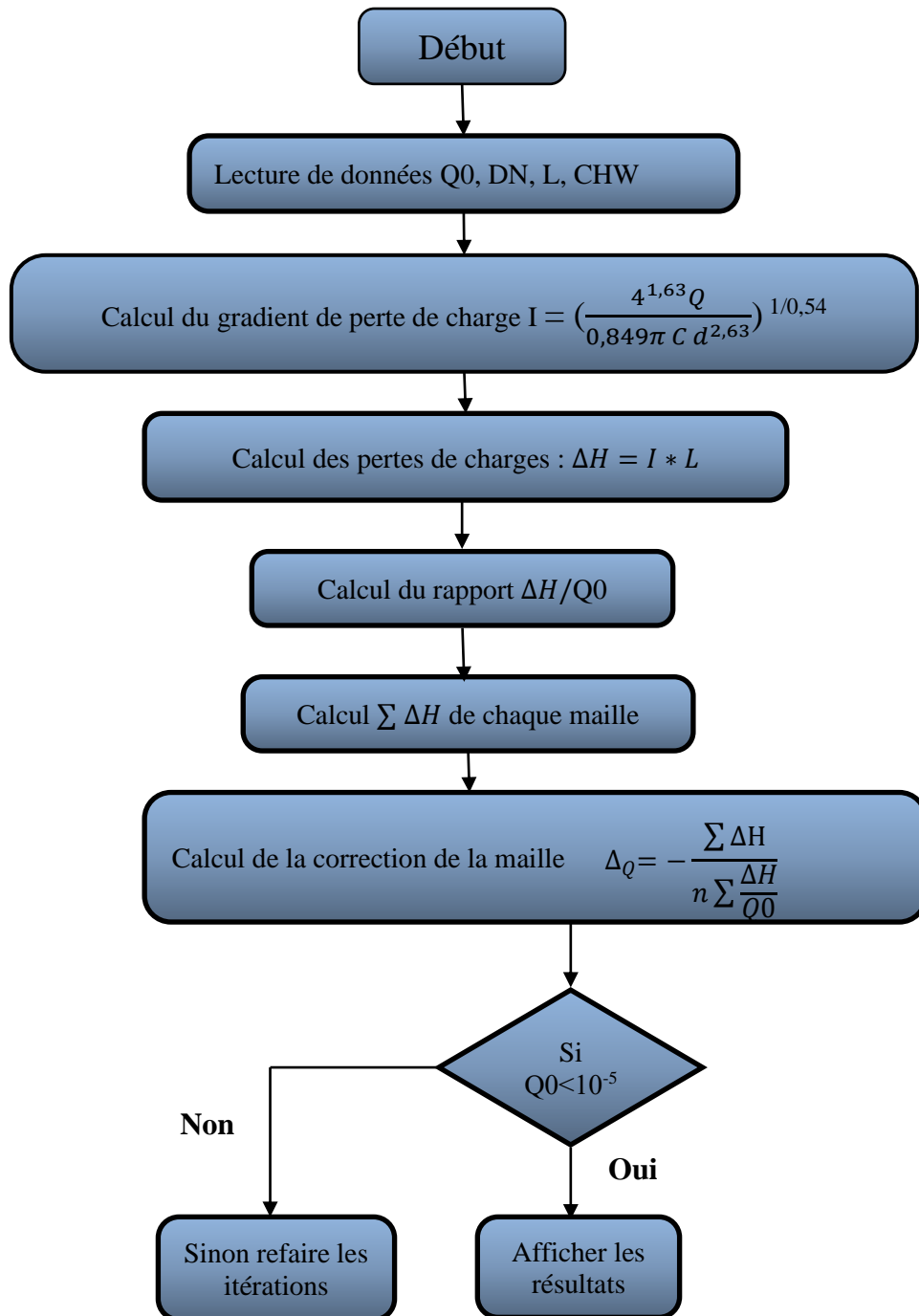


Figure II.10 « Organigramme de calcul »

## **IX. Conclusion :**

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter quelques notions de bases essentielles de l'hydraulique urbaine qui permettent à l'ingénieur de pouvoir dimensionner un réseau d'alimentation en eau potable. Ces notions de base couvrent les différentes notions de l'hydraulique générale en charge, la conception et les méthodes de calcul des réseaux d'alimentation en eau potable.

En ce qui concerne le travail qui sera développé par la suite dans ce mémoire et qui est consacré à l'optimisation d'un réseau maillé, notre choix s'est porté sur :

- La méthode de Hardy-Cross pour le dimensionnement du réseau.
- La formule de Hazen-Williams pour l'estimation des pertes de charges dans les conduites.

Les détails de notre démarche seront présentés dans le chapitre qui suit à travers une application à un exemple concret.

## CHAPITRE III :

Calcul des réseaux de distribution  
par la méthode Hardy Cross

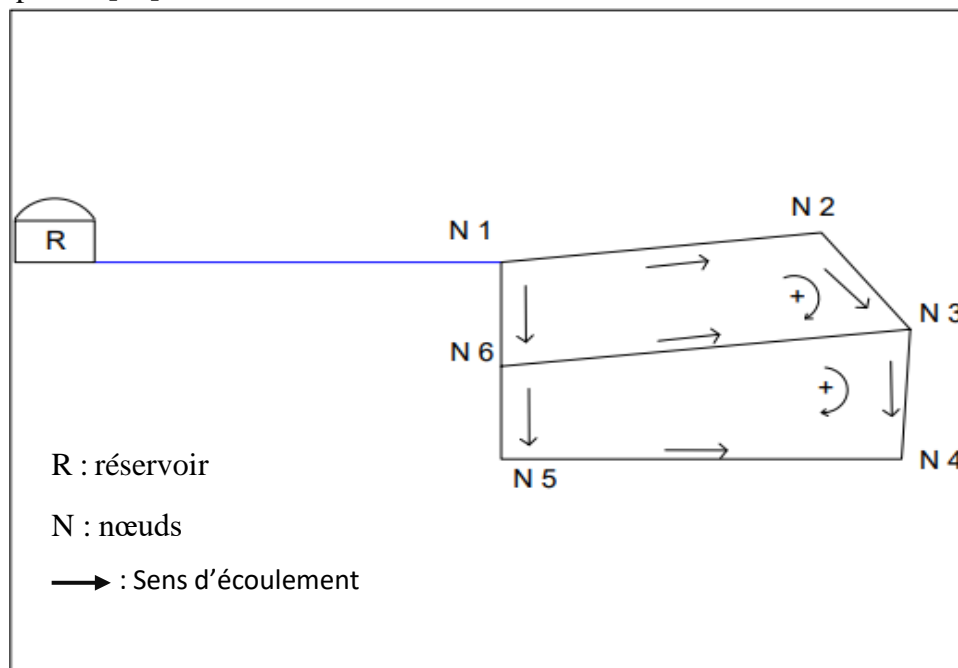
## I. Introduction

Le présent chapitre sera consacré au dimensionnement d'un réseau de distribution en eau potable. Nous rappelons que la méthode retenue pour le dimensionnement est la méthode de calcul Hardy-Cross. Cette méthode itérative est basée sur la loi des nœuds pour l'équilibre des débits et la loi des mailles pour l'équilibre des charges. Une fois le réseau équilibré, nous procédons aux calculs des pressions aux nœuds. Celles-ci seront par la suite vérifiées par rapport aux valeurs admissibles fixées par le cahier des charges du projet.

Lors du dimensionnement de notre réseau, il est impératif de prendre en compte les exigences pratiques d'exploitation et de service à savoir les exigences sur les vitesses d'écoulement dans les conduites du réseau, les exigences sur les pressions, les exigences sur les débits et enfin les exigences sur les gammes de conduites disponibles (diamètres normalisés disponibles sur le marché).

## II. Présentation du projet

Nous proposons dans le cadre de cette étude de dimensionner le projet du réseau maillé d'eau potable du lotissement Ait Abdellah, dans la ville de Tizirt. Le schéma détaillé de ce réseau est présenté sur la figure (III.01). Ce lotissement est composé de 60 lots, à raison de 8 habitants par lot [25].



*Figure III .01 « Schéma du réseau maillé étudié »*

Les caractéristiques géométriques et physiques du réseau sont résumées dans le **tableau (III.01)**.

*Tableau III .01 « Caractéristiques géométriques et physiques du réseau étudié »*

<b>Données</b>	
Nombre de lots	60
Nombre d'habitants par lot	8
Nombre d'habitants total du lotissement	480
Dotation par habitant	150
Consommation	2,5048 (l/sec)
Longueur totale	(808 ml)
Débit spécifique	0,0031 (l /s/ml)
CHW (état vieux) PEHD	130
CHW (état neuf) PEHD	150

### III. Dimensionnement du réseau de distribution

Le dimensionnement d'un réseau de distribution d'eau potable (AEP) constitue une phase fondamentale dans la conception des infrastructures hydrauliques durables. Cette démarche vise à établir les diamètres des conduites optimaux afin de garantir un approvisionnement en eau adéquat et de répondre aux besoins tout en assurant une performance efficiente et économique sur la durée de vie du système. Nous devons donc ainsi veiller à ce que le réseau demeure opérationnel après plusieurs années d'utilisation (allongement de la durée de vie).

Dans le cadre de cette étude, nous allons procéder au dimensionnement du réseau selon deux perspectives temporelles distinctes :

- A sa mise en service : autrement dit le réseau est neuf.
- A long terme : le réseau est dit vétuste.

### III.1. Calcul des diamètres des conduites et des vitesses d'écoulement

#### 1. Calcul des diamètres des conduites

$$\text{On a : } Q = S * v \quad (25)$$

Donc

$$S = \frac{Q}{v}; \quad (26)$$

Les canalisations sont circulaires

Et on suppose que la vitesse est égale à :  $V=1\text{m/s}$

Donc :

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (27)$$

#### 2. Calcul de la vitesse d'écoulement

Après avoir calculé les diamètres en supposant que la vitesse est égale à **1m/s**, on fait le calcul inverse et on calcul les vitesses.

$$V = \frac{4Q}{\pi * DN^2} \quad (28)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau (III .02) :

Tableau III .02 « Récapitulatif des diamètres des conduites et des vitesses d'écoulement »

Tronçons	L(m)	Q <sub>r</sub> (l/s)	Q <sub>c</sub> (l/s)	D calculé (mm)	DN (mm)	Épaisseur	Di (mm)	V (m/s)
<b>R-N1</b>	200,00	0	2,5048	<b>56,47</b>	<b>63</b>	5,8	<b>51,40</b>	<b>1,21</b>
<b>Maille 01</b>								
<b>N1-N2</b>	160,00	0,496	0,87	<b>33,28</b>	<b>40</b>	3,7	<b>32,60</b>	<b>1,04</b>
<b>N2-N3</b>	68,00	0,2108	0,5166	<b>25,65</b>	<b>32</b>	3	<b>26,00</b>	<b>0,97</b>
<b>N1-N6</b>	56,00	0,1736	1,3	<b>40,68</b>	<b>50</b>	4,6	<b>40,80</b>	<b>0,99</b>
<b>N6-N3</b>	207,00	0,6417	0,26485	<b>18,36</b>	<b>32</b>	3	<b>26,00</b>	<b>0,50</b>
<b>Maille 02</b>								
<b>N3-N4</b>	70,00	0,217	0,2467	<b>17,72</b>	<b>20</b>	2	<b>16,00</b>	<b>1,23</b>
<b>N6-N5</b>	50,00	0,155	0,55	<b>26,46</b>	<b>32</b>	3	<b>26,00</b>	<b>1,04</b>
<b>N5-N4</b>	197,00	0,6107	0,16715	<b>14,59</b>	<b>20</b>	2	<b>16,00</b>	<b>0,83</b>
<b>Longueur totale</b>	<b>808</b>							

#### IV. Equilibre de mailles

Nous rappelons que la méthode de Hardy-Cross retenue pour le calcul du réseau est basée sur la notion d'équilibre de mailles qui consiste à corriger les débits initiaux dans le réseau (débits de départ choisis par le concepteur). Cet équilibre est effectué par itérations successives, sous les deux conditions (19) et (20). Le débit correctif est estimé par la relation (24).

Toutes les étapes de calcul par la méthode Hardy Cross sont implémentées sur une feuille **Excel** et par un script **MATLAB**.

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

### A. Les résultats obtenus après calcul sur Excel :

- Calcul du réseau à la mise en service  $CHW=150$  :

Sur le tableau (III.03), nous présentons les résultats obtenus après la première itération

Tableau III.03 « Equilibre de mailles ; 01ère itération ;  $CHW=150$  »

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,87	37,31	5,97	6,86	- 0,11	- 0,11	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,52	42,77	2,91	5,63		- 0,11	<b>0,40</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,30	- 26,32	- 1,47	1,13		- 0,11	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,26	- 12,41	- 2,57	9,70		- 0,13	<b>- 0,39</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>4,84</b>	23,33			
N6-N3	26,00	207,00	0,26	12,41	2,57	9,70	0,01	0,13	<b>0,39</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	115,80	8,11	32,86		0,01	<b>0,26</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 48,04	- 2,40	4,37		0,01	<b>- 0,54</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,17	- 56,31	- 11,09	66,37		0,01	<b>- 0,15</b>
				Σ	<b>- 2,82</b>	113,29			

Compte tenu des valeurs de la somme des pertes de charges dans les deux mailles qui n'est pas nulle, on comprend que le réseau n'est pas encore équilibré, cela nécessite donc une ou plusieurs autres itérations.

Tableau III.04 « Equilibre de mailles ; 07ème itération ; CHW=150 »

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
<b>N1-N2</b>	32,60	160,00	0,76	29,29	4,69	6,14	0,00	- 0,00	<b>0,76</b>
<b>N2-N3</b>	26,00	68,00	0,41	27,87	1,90	4,62		- 0,00	<b>0,41</b>
<b>N1-N6</b>	40,80	56,00	- 1,41	- 30,46	- 1,71	1,21		- 0,00	<b>- 1,41</b>
<b>N6-N3</b>	26,00	207,00	- 0,37	- 23,55	- 4,87	13,02		- 0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,00</b>	25,00			
<b>N6-N3</b>	26,00	207,00	0,37	23,55	4,87	13,02	0,00	0,00	<b>0,37</b>
<b>N3-N4</b>	16,00	70,00	0,25	118,15	8,27	33,16		0,00	<b>0,25</b>
<b>N6-N5</b>	26,00	50,00	- 0,55	- 47,60	- 2,38	4,35		0,00	<b>- 0,55</b>
<b>N5-N4</b>	16,00	197,00	- 0,16	- 54,65	- 10,77	65,46		0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>- 0,00</b>	115,99			

Sur le tableau (III.04), nous présentons les résultats obtenus après 07 itérations, en effet comme on peut le constater la  $\sum \Delta H = 0$  ce qui confirme la convergence de la méthode Hardy Cross (critère d'arrêt de la méthode)

➤ Calcul du réseau à long terme ; **CHW=130**

Sur les deux tableaux (III.05) et (III.06), nous présentons les résultats dans le cas où le réseau est considéré comme vétuste.

Tableau III.05 « Equilibre de mailles ; 01ère itération ; CHW=130 »

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,87	48,67	7,79	8,95	- 0,11	- 0,11	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,5166	55,79	3,79	7,34		- 0,11	<b>0,40</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,3	- 34,33	- 1,92	1,48		- 0,11	<b>-1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,26485	- 16,19	- 3,35	12,65		- 0,13	<b>-0,39</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>6,31</b>	30,42			
N6-N3	26,00	207,00	0,26485	16,19	3,35	12,65	0,01	0,13	<b>0,39</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,2467	151,02	10,57	42,85		0,01	<b>0,26</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 62,65	- 3,13	5,70		0,01	<b>-0,54</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16715	- 73,45	- 14,47	86,56		0,01	<b>-0,15</b>
					Σ	<b>- 3,68</b>	147,76		

Tableau III.06 « Equilibre de mailles ; 07ème itération ; CHW=130 »

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I m/km	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160	0,76	38,19	6,11	8,01	0,00	- 0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68	0,41	36,35	2,47	6,03		- 0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56	- 1,41	- 39,73	- 2,22	1,58		- 0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207	- 0,37	- 30,71	- 6,36	16,99		- 0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,00</b>	32,60			
N6-N3	26,00	207	0,37	30,71	6,36	16,99	0,00	0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70	0,25	154,09	10,79	43,25		0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50	- 0,55	- 62,08	- 3,10	5,67		0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197	- 0,16	- 71,27	- 14,04	85,37		0,00	<b>- 0,16</b>
					Σ	<b>- 0,00</b>	151,28		

De la même manière que pour le calcul du réseau neuf, la méthode de calcul converge après 07 itérations, cela est confirmé par la valeur nulle de la cellule  $\Delta H$ .

### B. Les résultats obtenus par MATLAB

- Débit final (corrigé) dans chaque conduite en l/s

$$QC_{N1-N2} = 0.7633$$

$$QC_{N2-N3} = 0.4099$$

$$QC_{N3-N6} = - 0.3743$$

$$QC_{N6-N1} = - 1.4067$$

$$QC_{N6-N3} = 0.3743$$

$$QC_{N3-N4} = 0.2494$$

$$QC_{N4-N5} = - 0.1645$$

$$QC_{N5-N6} = - 0.5473$$

- Nombre d'itérations nécessaires

$$K = 7$$

### C. Commentaire sur la méthode Hardy Cross

Le calcul de la méthode Hardy cross a pour but de trouver les vrais débits circulants dans les conduites à partir des débits entrants et sortants. Le schéma ci-dessous représente les débits corrigés trouvés à la dernière itération après convergence de la méthode de calcul. Autrement dit ce sont les vrais débits qui circulent dans les conduites.

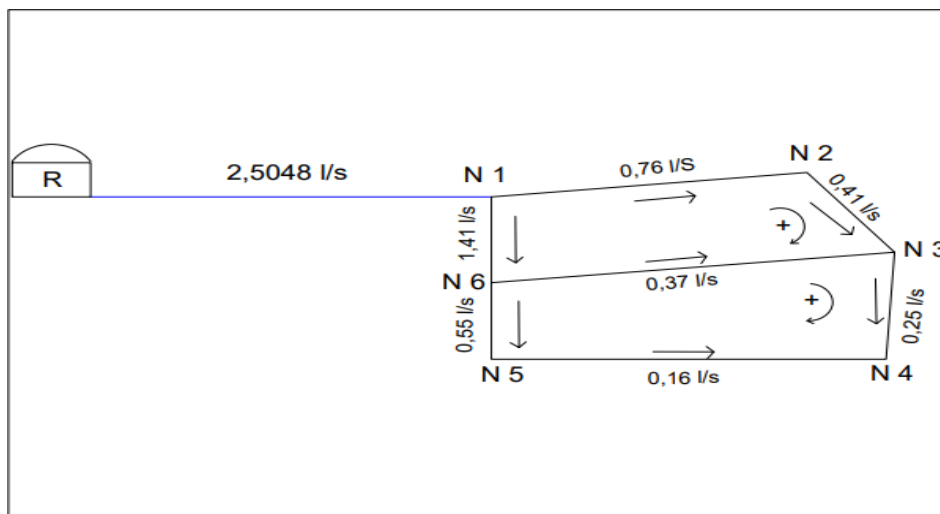


Figure III.02. « La dernière répartition des débits »

## V. Calcul des pressions

A l'instar des autres ouvrages, le réseau de distribution d'eau potable est dimensionné pour une durée de vie donnée. Il est souhaitable que pendant ou même après cette durée de vie, notre réseau reste toujours aussi fonctionnel.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de notre réseau, on le dimensionne à court terme et aussi à long terme, ce qui nous permet d'analyser son comportement suivant les deux horizons.

On dit qu'un réseau de distribution d'eau potable fonctionne correctement lorsqu'il assure la pression minimale exigée par le cahier des charges, en tout point de la région à alimenter.

Dans la pratique la pression de service exigée doit être comprise entre **10 et 60 mètres de colonne d'eau**.

La vérification des pressions aux sols au niveau de chaque nœud du réseau, se fait à travers le calcul des cotes piézométriques des différents points du réseau.

La cote piézométrique noté CP, d'un point du réseau est donnée par la relation suivante :

$$CP = CTN - \Delta H \quad (29)$$

La pression au nœud est donnée par la relation suivante

$$\text{Pression au nœud} = \text{cote piézométrique} - \text{cote du terrain naturel.}$$

Les exigences de bon fonctionnement du réseau en termes de pression sont comme suit :

$$\text{Pression au nœud} > \text{Pression minimale}$$

$$\text{Pression au nœud} < \text{Pression maximale}$$

### ➤ Calcul des pressions à la mise en service

Dans ce cas, nous considérons que toutes les conduites du réseau sont neuves. En raison du choix du PEHD pour le matériau des conduites, nous attribuons la valeur de **150** au coefficient de Hazen-Williams ( $CHW=150$ ).

Pour les besoins du calcul des pressions, nous considérons que la cote du trop-plein du réservoir est à **14 m** par rapport à la CTN (**donnée par le BET**)

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau (**III.07**)

Tableau III.07 « Calcul des pressions dans le réseau, CHW=150 »

Hauteur du TP par rapport au TN					14m							
Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q (l/s)	I m/km	DH (m)	V (m/s)	CTN am	CTN av	H am	H av	P am	P av
R-N1	51,40	200	2,5048	28,79	5,76	1,21	143,00	90,00	157,00	151,24	14,00	61,24
<b>Maille 01</b>												
N1-N2	32,60	160	0,76	29,28	4,69	0,91	90,00	93,63	151,24	146,56	61,24	52,93
N2-N3	26,00	68	0,41	27,87	1,89	0,77	93,63	101,00	146,56	144,66	52,93	43,66
N1-N6	40,80	56	1,41	30,46	1,71	1,08	90,00	101,50	151,24	149,54	61,24	48,04
N6-N3	26,00	207	0,37	23,55	4,87	0,70	101,50	101,00	149,54	144,66	48,04	43,66
<b>Maille 02</b>												
N3-N4	16,00	70	0,25	118,15	8,27	1,24	101,00	116,00	144,66	136,39	43,66	20,39
N6-N5	26,00	50	0,55	47,60	2,38	1,03	101,50	117,00	149,54	147,16	48,04	30,16
N5-N4	16,00	197	0,16	54,64	10,76	0,82	117,00	116,00	147,16	136,39	30,16	20,39

Tableau III.08 « Récapitulatif du calcul des pressions dans le réseau, CHW 150 »

Récapitulatif	
Hauteur TP	14m
P <sub>max</sub>	61,24 m
P <sub>min</sub>	14,00 m
V <sub>max</sub>	1,24m/s
V <sub>min</sub>	0,70m/s

Après avoir fait le calcul des pressions au sol à la mise en service, nous constatons :

- D'une part, que la pression maximale obtenue est de l'ordre de **61.24 m**. Cette valeur est supérieure à la valeur de la pression admissible imposée par le cahier des charges à savoir **60 m** de colonne d'eau. La conséquence directe de ce résultat est le fait que ceci peut poser un problème sur le plan technique car une forte pression peut faire éclater soit les conduites soit les équipements. Ceci aura un impact négatif sur la qualité du service et va engendrer des dépenses supplémentaires en termes de maintenance ce qui va impacter l'aspect financier.
- D'autre part, nous constatons que la pression minimale obtenues est de l'ordre de **14 m** de colonne d'eau. Cette valeur dépasse largement la valeur exigée imposée qui est de **10m**. De ce point de vue Notre réseau fonctionne très bien.

➤ **Calcul des pressions à long terme**

Dans ce cas, nous considérons que toutes les conduites du réseau sont anciennes. En raison du choix du PEHD pour le matériau des conduites, nous attribuons la valeur de **130** au coefficient de Hazen-Williams ( $CHW=130$ ).

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau (III.09).

Tableau III.09 « Calcul des pressions dans le réseau,  $CHW=130$  »

Hauteur du TP par rapport au TN					14m							
Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q (l/s)	I (m/km)	DH (m)	V (m/s)	CTN am	CTN av	H am	H av	P am	P aval
R-1	51,40	200	2,5048	37,55	7,51	1,21	143,00	90,00	157,00	149,49	14,00	59,49
Maille 01												
N1-N2	32,60	160	0,76	38,19	6,11	0,91	90,00	93,63	149,49	143,38	59,49	49,75
N2-N3	26,00	68	0,41	36,34	2,47	0,77	93,63	101,00	143,38	140,91	49,75	39,91
N1-N6	40,80	56	1,41	39,73	2,22	1,08	90,00	101,50	149,49	147,27	59,49	45,77
N6-N3	26,00	207	0,37	30,71	6,36	0,70	101,50	101,00	147,27	140,91	45,77	39,91
Maille 02												
N3-N4	16,00	70	0,25	154,09	10,79	1,24	101,00	116,00	140,91	130,12	39,91	14,12
N6-N5	26,00	50	0,55	62,08	3,10	1,03	101,50	117,00	147,27	144,16	45,77	27,16
N5-N4	16,00	197	0,16	71,27	14,04	0,82	117,00	116,00	144,16	130,12	27,16	14,12

Tableau III.10 « Récapitulatif du calcul des pressions dans le réseau, CHW 130 »

Récapitulatif	
Hauteur TP	<b>14m</b>
$P_{\max}$	<b>59.49 m</b>
$P_{\min}$	<b>14,00 m</b>
$V_{\max}$	<b>1,24m/s</b>
$V_{\min}$	<b>0,70m/s</b>

L'analyse des résultats issus du calcul des pressions au sol dans le cas **d'une conduite ancienne**, montre que :

- La **pression maximale** obtenue est de l'ordre de **59.49 m**. Cette valeur avoisine la valeur de la pression admissible ( $P_{adm}=60m$ ). Ce qui ne laisse pas vraiment une marge de sécurité vis-à-vis des équipements et même des abonnés.
- La **pression minimale** obtenue est de l'ordre de **11.12 m**. Cette valeur dépasse **légèrement** la valeur imposée qui est de l'ordre de **10m**.

**Remarque :** Dans ce cas et compte tenu du fait que les deux conditions en termes de pression sont vérifiées, nous pouvons conclure qu'à long terme, notre réseau est fonctionnel vu que les valeurs des pressions trouvées sont comprises entre les valeurs limites exigées.

➤ Résultats de MATLAB

- La vitesse d'écoulement en m/s

$$V_{R-N1} = 1.2078$$

$$V_{N1-N2} = 0.9149$$

$$V_{N2-N3} = 0.7724$$

$$V_{N3-N6} = 0.7052$$

$$V_{N6-N1} = 1.0765$$

$$V_{N6-N3} = 0.7052$$

$$V_{N3-N4} = 1.2410$$

$$V_{N4-N5} = 0.8184$$

$$V_{N5-N6} = 1.0314$$

- Les pressions au sol en m Colonne d'eau
  - a. Les pressions à l'amont

$$P_{amR-N1} = 14$$

$$P_{amN1-N2} = 61.2418$$

$$P_{amN2-N3} = 52.9263$$

$$P_{am_{N3-N6}} = 48.0359$$

$$P_{am_{N6-N1}} = 61.2418$$

$$P_{am_{N3-N4}} = 43.6613$$

$$P_{am_{N4-N5}} = 30.1559$$

$$P_{am_{N5-N6}} = 48.0359$$

b. Les pressions à l'aval

$$P_{av_{R-N1}} = 61.2418$$

$$P_{av_{N1-N2}} = 52.9263$$

$$P_{av_{N2-N3}} = 43.6614$$

$$P_{av_{N3-N6}} = 43.6613$$

$$P_{av_{N6-N1}} = 48.0359$$

$$P_{av_{N3-N4}} = 20.3908$$

$$P_{av_{N4-N5}} = 20.3913$$

$$P_{av_{N5-N6}} = 30.1559$$

## VI. Conclusion

Après avoir effectué les calculs hydrauliques pour les deux horizons, nous constatons le bon fonctionnement à long terme de notre réseau, confirmé par les valeurs acceptables des vitesses et des pressions. Cependant, à court terme, la pression maximale dépasse les limites admissibles, ce qui est inacceptable et peut présenter des risques pour les conduites, les équipements et même les consommateurs. Pour remédier à ce problème, nous envisageons de procéder à l'optimisation de la conception de notre réseau. Le chapitre suivant détaillera les moyens par lesquels nous comptons effectuer cette optimisation.

**CHAPITRE IV :**  
**Optimisation des réseaux de  
distribution d'AEP**

## I. Introduction

L'optimisation des réseaux de distribution d'eau potable consiste à concevoir, planifier et gérer ces systèmes de manière à maximiser leur performance tout en minimisant les coûts et les impacts environnementaux. Les objectifs de l'optimisation des réseaux de distribution sont résumés dans la figure ci-dessous. Ils peuvent inclure différents aspects du réseau d'eau potable à savoir :

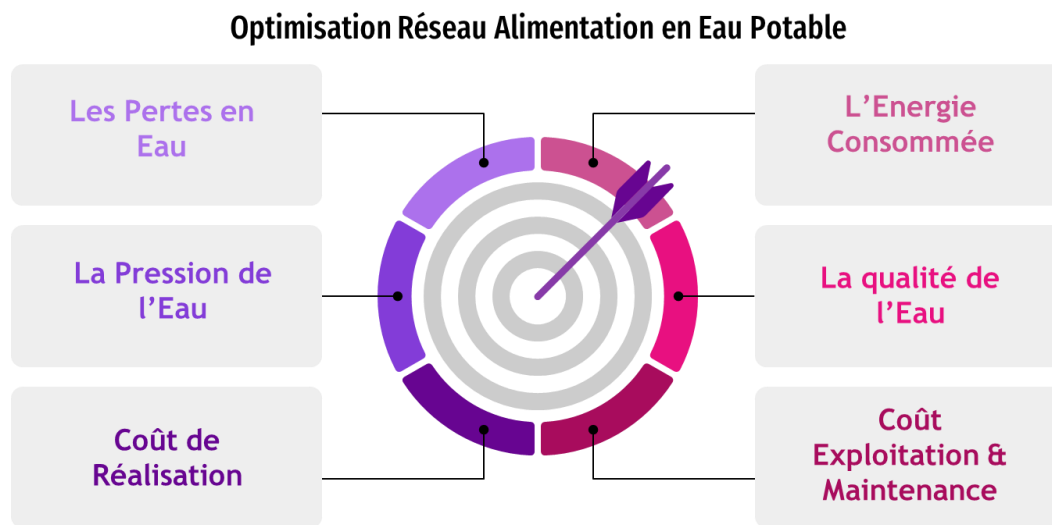


Figure IV.01 « Différents aspects de l'optimisation d'un réseau d'alimentation en eau potable »

- **Les Pertes en Eau** : Cela consiste à minimiser les pertes d'eau à travers l'identification et par la suite la réparation des fuites dans les conduites.
- **La Pression de l'Eau** : Cela consiste à optimiser la pression de l'eau dans le réseau pour garantir un approvisionnement fiable tout en réduisant les risques de dommages aux infrastructures et aux équipements.
- **L'Energie Consommée** : Cela consiste à réduire la consommation d'énergie en optimisant le fonctionnement des pompes et des vannes.
- **La qualité de l'eau** : Cela consiste à améliorer la qualité de l'eau en optimisant le traitement et la désinfection (chloration) de l'eau.

- **Le coût d'exploitation & de maintenance** : Cela consiste à réduire les coûts d'exploitation et de maintenance à travers une planification efficace des opérations de maintenance et de réparation.

Tout cela implique une utilisation de techniques avancées d'analyse, de modélisation et d'optimisation telles que l'optimisation mathématique.

Dans la littérature, il existe différentes méthodes et outils d'optimisation. Nous pouvons citer à titre d'exemple l'optimisation avec *solveur* - Excel, ainsi qu'une optimisation avec **MATLAB**.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à deux aspects de l'optimisation d'un réseau de distribution d'eau potable ; à savoir

- Une optimisation de l'aspect **technique** avec le *solveur* - EXCEL.
- Une optimisation de l'aspect **économique** avec *un algorithme génétique*.

## II. Optimisation d'un réseau de distribution d'eau potable

### II.1. Optimisation de l'aspect technique

L'optimisation de l'aspect technique d'un projet consiste à trouver les valeurs optimales des paramètres de conception qui constituent ce projet sans prendre en compte les coûts que cela va engendrer.

L'optimisation de l'aspect technique d'un réseau de distribution d'AEP consiste à le concevoir de manière optimale en d'autres termes, trouver une conception qui satisfait toutes les contraintes techniques en termes de vitesse et de pression afin d'assurer une meilleure qualité d'approvisionnement.

Nous allons procéder à l'optimisation de l'aspect technique du réseau de distribution d'AEP du lotissement Ait Abdellah de Tizirt à l'aide du *solveur* – Excel.

#### II.1.1. Définition du *solveur*

Le *solveur* est un complément Excel utilisé pour l'**optimisation** et la résolution de problèmes complexe en ajustant automatiquement les valeurs de certaines cellules pour **maximiser** ou **minimiser** une valeur cible spécifiée dans une feuille de calcul Excel.

Il s'agit d'un outil puissant qui permet aux utilisateurs de trouver **la meilleure solution** pour un ensemble donné de contraintes en modifiant les valeurs de certaines cellules dans la feuille de calcul.

Le solveur est particulièrement utile pour résoudre des problèmes **de programmation linéaires** et **non linéaires**, des problèmes avec des **contraintes** ainsi que des problèmes **d'optimisation globale**.

### II.1.2. Fonctionnement du solveur

Le solveur fonctionne en utilisant des algorithmes mathématiques pour trouver la meilleure solution à un problème. Il utilise un processus appelé *optimisation* pour trouver les meilleures valeurs pour les variables du modèle.

La configuration d'un problème d'optimisation dans le solveur implique d'identifier les trois éléments de base de l'optimisation à savoir : *la fonction objectif*, *les variables de décision* et *les contraintes*.

- **La Fonction objectif** : C'est l'objectif que nous souhaitons atteindre. Cette fonction objectif peut représenter soit **un maximum**, soit **un minimum** et enfin soit **une valeur cible** à atteindre. Cela est rendu possible en spécifiant une cellule cible à optimiser.
- **Les Variables de décision** : Ce sont les variables qui peuvent être ajustées (modifiées) pour atteindre la fonction objectif définie précédemment.
- **Les contraintes** : Ce sont les limitations ou les restrictions exigées sur les variables de décision ainsi que sur la réponse du réseau définies précédemment qui doivent être prises en compte.

Une fois que les paramètres sont définis, le solveur tente de trouver les **valeurs optimales** pour les cellules variables en utilisant différentes méthodes d'optimisation telles que la **méthode du gradient** ou la méthode de **recherche de base**.

Une fois que le solveur a trouvé une solution optimale, autrement dit, solution qui permet d'atteindre l'objectif défini tout en vérifiant que les contraintes exigées sont satisfaites, il affiche les valeurs des cellules variables correspondantes dans la feuille de calcul.

### II.1.3. Problématique 01

Dans ce paragraphe nous allons présenter un premier cas d'optimisation. Ce cas est issu de l'analyse des résultats obtenus lors du calcul des pressions au sol qui a révélé des problèmes, notamment pour les valeurs de la pression maximale à la mise en service qui dépasse la valeur de la pression admissible et qui représente un danger et pour les équipements et pour les abonnés.

Nous allons donc optimiser les paramètres de conception de notre réseau afin de remédier à ce problème.

Et pour procéder à cette optimisation on va configurer le problème selon le fonctionnement du *SOLVEUR* que nous avons expliqué

➤ **Optimisation du réseau à la mise en service (conduite neuve ;  $CHW=150$ )**

La mise en place de ce problème d'optimisation sur le solveur -Excel est présentée sur la figure (IV.02). Cette figure représente le paramétrage du solveur

- Configuration du problème :
  - 1- Fonction objectif : pression minimale ( **$P_{min}=10$  m**)
  - 2- Les variables de décision : la cote du TP par rapport au TN
  - 3- Les contraintes :
    - $P_{max} \leq 60$  m
    - $V_{max} \leq 1.5$  m/s
    - $V_{min} \geq 0.5$  m/s

Paramètres du solveur

Objectif à définir : **\$B\$16** Pression minimale

À :  Max  Min  Valeur : **10** Valeur cible

Cellules variables : **\$D\$1** Côte TP réservoir

Contraintes :

\$B\$15 <= 60	Pression max
\$B\$17 <= 1,5	vitesse max
\$B\$18 >= 0,5	vitesse min

Rendre les variables sans contrainte non négatives

Sélect. une résolution : GRG non linéaire

Méthode de résolution  
Sélectionnez le moteur GRG non linéaire pour des problèmes non linéaires simples de solveur. Sélectionnez le moteur Simplex PL pour les problèmes linéaires, et le moteur Évolutionnaire pour les problèmes complexes.

Aide Résoudre Fermer

Figure IV.02 « Paramétrage du solveur-Excel en fonction de nos données »

Après lancement du solveur, nous obtenons les résultats récapitulés dans les deux tableaux suivants :

- Résultats d'optimisation

Tableau IV.01 « Résultats d'optimisation du réseau à la mise en service »

Hauteur du TP par rapport au TN					<b>9,99<math>\approx</math>10m</b>							
Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q (l/s)	I m/km	DH m	V m/s	CTN am	CTN av	H am	H av	P am	P av
R-N1	51,40	200	2,5048	28,79	5,76	1,21	143,00	90,00	153,00	147,24	<b>10,00</b>	<b>57,24</b>
Maille 01												
N1-N2	32,60	160	0,76	29,28	4,69	0,91	90,00	93,63	147,24	142,56	<b>57,24</b>	48,93
N2-N3	26,00	68	0,41	27,87	1,89	0,77	93,63	101,0	142,56	140,66	48,93	39,66
N1-N6	40,80	56	1,41	30,46	1,71	1,08	90,00	101,5	147,24	145,54	<b>57,24</b>	44,04
N6-N3	26,00	207	0,37	23,55	4,87	<b>0,70</b>	101,50	101,0	145,54	140,66	44,04	39,66
Maille 02												
N3-N4	16,00	70	0,25	118,15	8,27	<b>1,24</b>	101,00	116,0	140,66	132,39	39,66	16,39
N6-N5	26,00	50	0,55	47,60	2,38	1,03	101,50	117,0	145,54	143,16	44,04	26,16
N5-N4	16,00	197	0,16	54,64	10,76	0,82	117,00	116,0	143,16	132,39	26,16	16,39

Tableau IV.02 « Récapitulatif des résultats d'optimisation, CHW 150 »

Récapitulatif	
Hauteur TP	<b>9,99<math>\approx</math>10m</b>
P <sub>max</sub>	<b>57.24 m</b>
P <sub>min</sub>	<b>10,00 m</b>
V <sub>max</sub>	<b>1,24m/s</b>
V <sub>min</sub>	<b>0,70m/s</b>

A travers ces résultats, nous confirmons bien que la position du réservoir a une influence majeure sur les pressions au sol, et en considérant la position du réservoir comme variable de

conception, nous avons procédé à l'optimisation de notre réseau en se fixant comme objectif une pression minimale au sol de 10 m de colonne d'eau tout en respectant les autres exigences techniques (contraintes techniques) de bon fonctionnement du réseau.

Nous pouvons ainsi conclure que la position optimale d'un point de vue technique du réservoir est celle obtenue par le solveur correspondant à une hauteur du trop-plein par rapport au terrain naturel de l'ordre de 10m.

➤ **Vérification du réseau à long terme (conduite ancienne ;  $CHW=130$ ) :**

Dans le but d'assurer le bon fonctionnement du réseau à long terme, on procède à l'optimisation des paramètres de conception en considérant toutes les conduites anciennes en prenant un  $CHW=130$ .

- Résultats de vérification à long terme :

Tableau IV.03 « Résultats de la vérification du réseau à long terme »

Hauteur du TP par rapport au TN					9,99 $\approx$ 10m							
Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q (l/sec)	I m/km	DH (m)	V m/s	CTN am	CTN av	H am	H av	P am	P av
R-1	51,40	200	2,5048	37,55	7,51	1,21	143,0	90,00	153,00	145,49	10,00	55,49
<b>Maille 01</b>												
N1-N2	32,60	160	0,76	38,19	6,11	0,91	90,0	93,63	145,49	139,38	55,49	45,75
N2-N3	26,00	68	0,41	36,34	2,47	0,77	93,63	101,00	139,38	136,91	45,75	35,91
N1-N6	40,80	56	1,41	39,73	2,22	1,08	90,0	101,50	145,49	143,27	55,49	41,77
N6-N3	26,00	207	0,37	30,71	6,36	0,70	101,5	101,00	143,27	136,91	41,77	35,91
<b>Maille 02</b>												
N3-N4	16,00	70	0,25	154,09	10,79	1,24	101,0	116,00	136,91	126,12	35,91	10,12
N6-N5	26,00	50	0,55	62,08	3,10	1,03	101,5	117,00	143,27	140,16	41,77	23,16
N5-N4	16,00	197,00	0,16	71,27	14,04	0,82	117,0	116,00	140,16	126,12	23,16	10,12

Tableau IV.04 « Récapitulatif des résultats d'optimisation,  $CHW=130$  »

<b>Récapitulatif</b>	
Hauteur TP	<b>9,99 <math>\cong</math> 10m</b>
$P_{\max}$	<b>55.49 m</b>
$P_{\min}$	<b>10,00 m</b>
$V_{\max}$	<b>1,24m/s</b>
$V_{\min}$	<b>0,70m/s</b>

A long terme, les résultats d'optimisation en guise de vérification donnent les mêmes résultats.

La cote du TP par rapport à la CTN après optimisation, à court terme et à long terme est la même, on conclut donc que la conception optimale qui satisfait les contraintes techniques et qui assure le bon fonctionnement du réseau dans les deux cas est de mettre la hauteur du TP par rapport à la CTN **9,99 $\cong$ 10m**.

## **II.2. Optimisation de l'aspect économique**

L'optimisation de l'aspect économique d'un projet consiste à réduire aussi bas que possible le prix de revient de ce projet, en gardant le bon fonctionnement sur le plan technique, le but de cette optimisation est donc de trouver le bon équilibre entre l'aspect technique et économique

L'optimisation de l'aspect économique d'un réseau de distribution d'AEP consiste à trouver les valeurs optimales pour les paramètres de conception dans le but d'avoir la conception la moins coûteuse, en d'autres termes de trouver les valeurs exactes des diamètres ainsi que la position du réservoir qui vont nous permettre de minimiser les couts et d'assurer le bon approvisionnement en respectant les contraintes imposées sur les vitesses et les pressions.

Trouver l'équilibre entre l'aspect technique et économique n'est pas chose facile, cela nécessite une exactitude et une précision afin d'avoir des résultats de qualité ce qui explique le recours à des méthodes plus poussées qui garantissent de meilleurs résultats que le calcul classique.

### II.3. Résolution du problème d'optimisation

Comme présenté précédemment dans le chapitre 01, un problème d'optimisation est un modèle mathématique formel d'un problème réel, et sa résolution est un processus qui passe par plusieurs étapes. Ces dernières sont résumées dans la figure (IV.03).

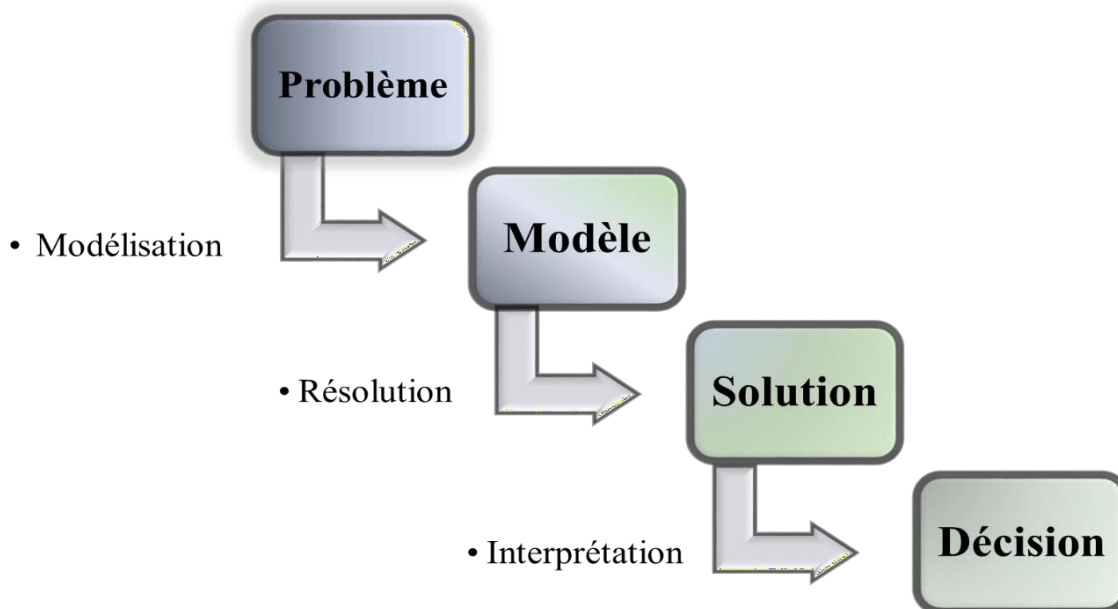


Figure IV.03 « Résolution d'un problème d'optimisation »

La modélisation d'un problème d'optimisation peut se faire avec différents langages de programmation. L'outil le plus utilisé est le logiciel MATLAB.

#### II.3.1. présentations de MATLAB

C'est le diminutif de Matrix Laboratory. Matlab c'est un environnement de programmation orienté de calcul numérique. Articulé autour du langage de script du même nom qui est un ensemble d'instructions MATLAB qui joue le rôle de programme principal.

L'environnement de programmation Matlab possède de nombreux avantages :

- Développement rapide pour le calcul et pour l'affichage.
- Un environnement facile d'approche pour un débutant.
- Un éditeur intégré.

- Une boîte à outil qui sert d'un modèle à ajuster et à utiliser en fonction des besoins de l'utilisateur.

## II.4. Problématique 02

### II.4.1. Présentation de notre problème d'optimisation

Compte tenu de la nature de notre problème (nature des équations mathématiques), nous avons à faire à un problème d'optimisation non linéaire. En raison, d'une part, des exigences techniques sur les vitesses et les pressions et d'autre part des exigences commerciales sur les diamètres des conduites à savoir :

- $V_{\min} \geq 0,5\text{m/s}$
- $V_{\max} \leq 1,5\text{m/s}$
- $P_{\min} \geq 10\text{m}$
- $P_{\max} \leq 60\text{m}$

Nous avons à faire à un problème d'optimisation non linéaire sous contraintes. L'objectif que nous nous fixons ici est de trouver *la conception optimale*, c'est-à-dire les diamètres les moins coûteux tout en veillant à satisfaire les contraintes techniques.

Donc l'équation mathématique représentant notre problème d'optimisation sera de la forme

$$\begin{array}{l} \text{PO (sous contraintes)} \quad \min (\max) f(x) \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad g(x) \leq 0 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad x \in E \subset R^n \end{array}$$

Correspondant physiquement au système suivant :

$$\begin{array}{l} \min (\text{coûts}) \\ V_{\min} (0.5\text{m/s}) \leq V \leq V_{\max}(1.5\text{m/s}) \\ P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \end{array}$$

II.4.2. Modélisation du problème d'optimisation d'un réseau d'AEP

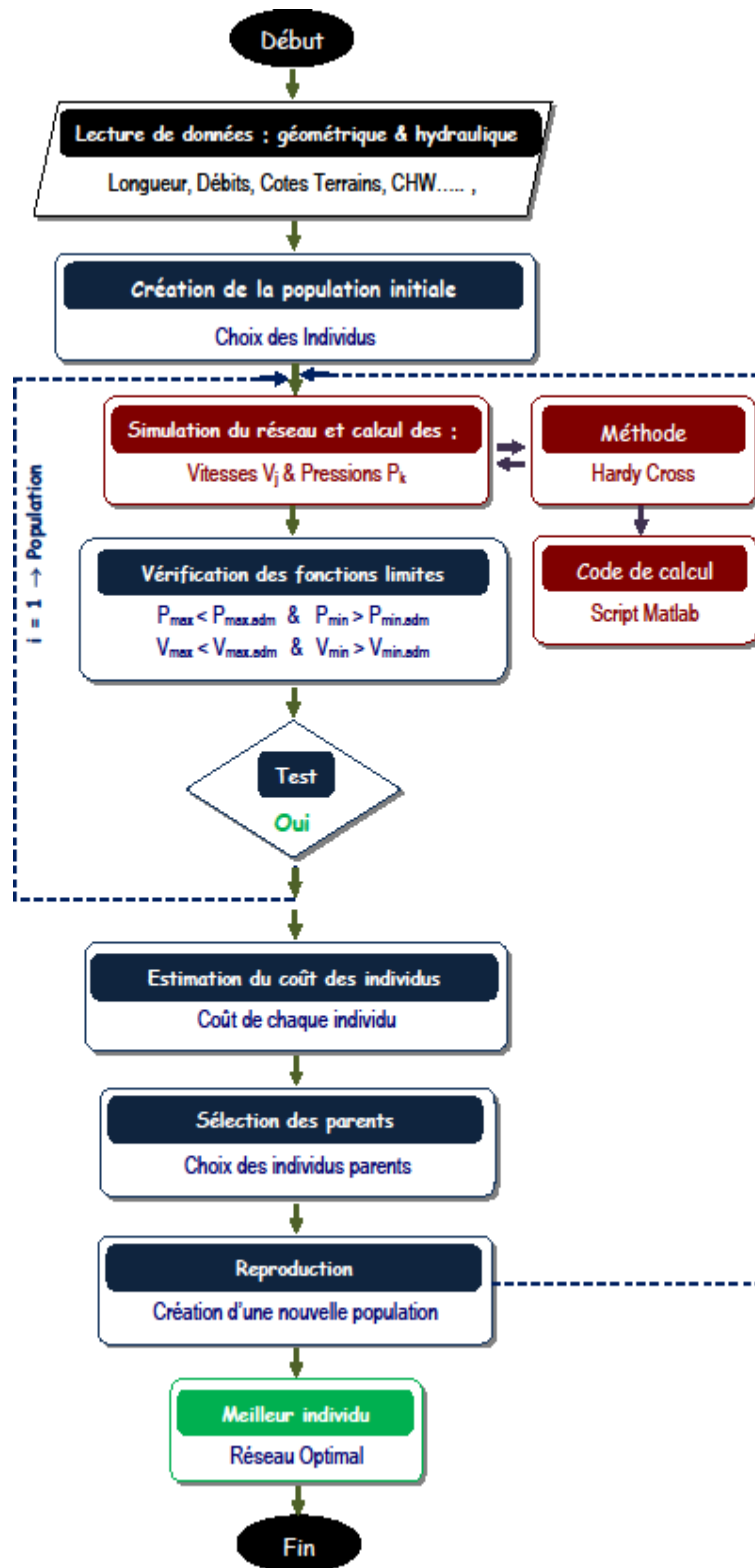


Figure IV.04 « Organigramme des différentes étapes de calcul du réseau de distribution d'eau »

Sur la **figure (IV.04)** nous présentons l'organigramme des différents éléments de notre outil de calcul développé dans le cadre de cette étude. Cet outil est constitué principalement de deux blocs à savoir :

➤ ***Un bloc consacré principalement à la simulation hydraulique du réseau :***

Ce bloc a pour rôle l'étude du réseau d'un point de vue hydraulique. Autrement, dit ce bloc permet d'analyser notre réseau en appliquant les lois théoriques de l'hydraulique appliqué aux réseaux de distribution d'eau. La méthode retenue pour cette étude est la méthode de Hardy Cross. Pour le calcul des pertes de charge, nous avons retenu la méthode de Hazen-Williams.

➤ ***Un bloc consacré principalement à l'optimisation du réseau :***

Ce bloc a pour rôle l'application de la méthode d'optimisation retenue afin d'analyser notre réseau retenu. La méthode d'optimisation adoptée dans cette étude est l'optimisation par algorithme génétique. Ce bloc ainsi permet la création de la population initiale, l'évaluation de cette population, la sélection et enfin l'affichage des résultats.

### **II.4.3. Résolution du problème d'optimisation**

Comme déjà indiqué dans le **chapitre I**, il existe diverses méthodes de résolution d'un problème d'optimisation, et le choix d'une méthode précise dépend de la complexité du problème.

Étant donné que le problème étudié est assez **complexe**, on a opté pour la résolution avec une méthode métaheuristique (les algorithmes génétiques, le recuit simulé, colonie de fourmis ...etc.), et notre choix final s'est porté sur **les algorithmes génétiques**.

### **II.4.4. Application de l'algorithme génétique au réseau étudié**

#### **1. Initialisation :** Génération de la population initiale

Une population est constituée d'un ensemble d'individus

Un individu est constitué d'un ensemble de chromosomes

Un chromosome == Diamètre (d'un tronçon ; d'un nœud à un autre)

Donc  $\sum$  Diamètres == individu (conception)

Et  $\sum$  Individus == une population (ensemble de conceptions)

Nous présentons dans le tableau (IV.05), les résultats obtenus après exécution du scripte MATLAB que nous avons mis en place sur la base de l'organigramme de la figure (IV.04). Il y a lieu de préciser que la dernière colonne correspond au coût de la conception selon les diamètres choisis correspondants à chaque individu.

Tableau IV.05 « 1ère population »

Individu	Chromosomes								Prix Conception DA
	DR-N1	DN1-N2	DN2-N3	DN3-N6	DN6-N1	DN3-N4	DN4-N5	DN5-N6	
<b>i1</b>	50	32	25	25	40	25	20	25	<b>120 861,30</b>
<b>i2</b>	50	32	25	25	40	20	20	32	<b>121 631,30</b>
<b>i3</b>	50	32	32	25	40	20	20	25	<b>122 349,50</b>
<b>i4</b>	50	32	25	25	40	25	20	32	<b>122 856,30</b>
<b>i5</b>	50	32	32	25	40	25	20	25	<b>123 574,50</b>
<b>i6</b>	50	32	25	25	50	20	20	25	<b>124 340,30</b>
<b>i7</b>	50	32	32	25	40	20	20	32	<b>124 344,50</b>
<b>i8</b>	50	32	25	25	50	25	20	25	<b>125 565,30</b>
<b>i9</b>	50	32	32	25	40	25	20	32	<b>125 569,50</b>
<b>i10</b>	50	32	25	25	50	20	20	32	<b>126 335,30</b>
<b>i11</b>	50	32	32	25	50	20	20	25	<b>127 053,50</b>
<b>i12</b>	50	32	25	25	50	25	20	32	<b>127 560,30</b>
<b>i13</b>	50	32	32	25	50	25	20	25	<b>128 278,50</b>
<b>i14</b>	50	32	32	25	50	20	20	32	<b>129 048,50</b>
<b>i15</b>	50	40	25	25	40	20	20	25	<b>129 268,30</b>
<b>i16</b>	50	32	32	25	50	25	20	32	<b>130 273,50</b>
<b>i17</b>	50	40	25	25	40	25	20	25	<b>130 493,30</b>
<b>i18</b>	50	40	25	25	40	20	20	32	<b>131 263,30</b>
<b>i19</b>	50	40	32	25	40	20	20	25	<b>131 981,50</b>
<b>i20</b>	50	40	25	25	40	25	20	32	<b>132 488,30</b>
<b>i21</b>	50	40	32	25	40	25	20	25	<b>133 206,50</b>

## Suite tableau (IV.05)

Individu	DR-N1	DN1-N2	DN2-N3	DN3-N6	DN6-N1	DN3-N4	DN4-N5	DN5-N6	Prix Conception DA
<b>i22</b>	50	40	25	25	50	20	20	25	<b>133 972,30</b>
<b>i23</b>	50	40	32	25	40	20	20	32	<b>133 976,50</b>
<b>i24</b>	50	40	25	25	50	25	20	25	<b>135 197,30</b>
<b>i25</b>	50	40	32	25	40	25	20	32	<b>135 201,50</b>
<b>i26</b>	50	40	25	25	50	20	20	32	<b>135 967,30</b>
<b>i27</b>	50	40	32	25	50	20	20	25	<b>136 685,50</b>
<b>i28</b>	50	40	25	25	50	25	20	32	<b>137 192,30</b>
<b>i29</b>	50	40	32	25	50	25	20	25	<b>137 910,50</b>
<b>i30</b>	50	40	32	25	50	20	20	32	<b>138 680,50</b>
<b>i31</b>	50	40	32	25	50	25	20	32	<b>139 905,50</b>

## 2. Codage des éléments de la population initiale :

Cette étape vient juste après la formulation mathématique du problème à optimiser et elle associe à chaque solution de l'espace de recherche une structure de données. Il existe différents types de codage d'élément :

- **Le Codage binaire**
- **Le Codage réel**

Il est très important d'indiquer que le type de codage dépend du problème à résoudre et influe largement sur la convergence de l'algorithme et dans notre cas nous avons opté pour un **codage réel** autrement dit c'est un **codage direct**.

## 3. Evaluation de la fonction objective :

Chaque individu appartenant à une population doit être une solution initiale ; une solution admissible, donc une fois que la 1ere population a été générée, chaque individu doit être évalué par une fonction **fitness** qui va mesurer son degré d'adaptation à l'objectif visé

Cette fitness calcul la probabilité de sélection de chaque individu. Elle s'écrit sous cette forme :

$$P(i) = \frac{f(i)}{\sum_{k=1}^N f(k)} \quad (30)$$

#### 4. La sélection :

C'est une étape primordiale dans l'algorithme génétique, c'est un processus inspiré du processus naturel de *la sélection naturelle* qui mène à la mort des individus les plus faibles.

La sélection donc consiste à sélectionner les individus les mieux adaptés à leur environnement selon la fonction objectif pour jouer le rôle des parents, et il existe différentes méthodes pour faire cette sélection : la sélection par tournoi, la sélection uniforme, la sélection par roulette (roue de fortune) et la sélection par rang

##### ➤ La sélection par rang :

Cette technique de sélection choisit toujours les individus possédants les meilleurs scores d'adaptation, le hasard n'entre donc pas dans ce mode de sélection. En fait si N individus constituent la population, la sélection appliquée consiste à conserver les K meilleurs individus (au sens de la fonction d'évaluation). Dans notre cas nous avons sélectionner les six meilleurs individus.

Tableau IV.06 « Sélection (parents) »

Individu	Chromosomes								Prix conception DA
	DR-N1	DN1-N2	DN2-N3	DN3-N6	DN6-N1	DN3-N4	DN4-N5	DN5-N6	
<b>i1</b>	50	32	25	25	40	25	20	25	<b>120 861,30</b>
<b>i2</b>	50	32	25	25	40	20	20	32	<b>121 631,30</b>
<b>i3</b>	50	32	32	25	40	20	20	25	<b>122 349,50</b>
<b>i4</b>	50	32	25	25	40	25	20	32	<b>122 856,30</b>
<b>i5</b>	50	32	32	25	40	25	20	25	<b>123 574,50</b>
<b>i6</b>	50	32	25	25	50	20	20	25	<b>124 340,30</b>

- Représentation graphique des individus sélectionnés :

Tout individu doit être une solution initiale, c'est à dire admissible, dans notre cas, pour dire que les individus sélectionnés sont des solutions initiales ils doivent satisfaire les contraintes techniques de vitesses et de pressions.

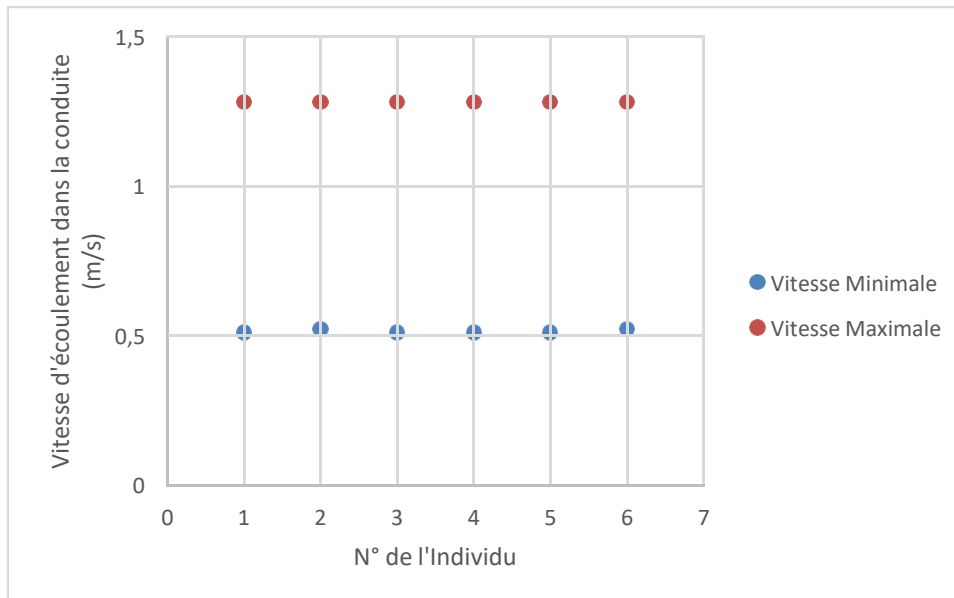


Figure IV.05 « la variation de la vitesse d'écoulement (maximale et minimale) des individus sélectionnés »

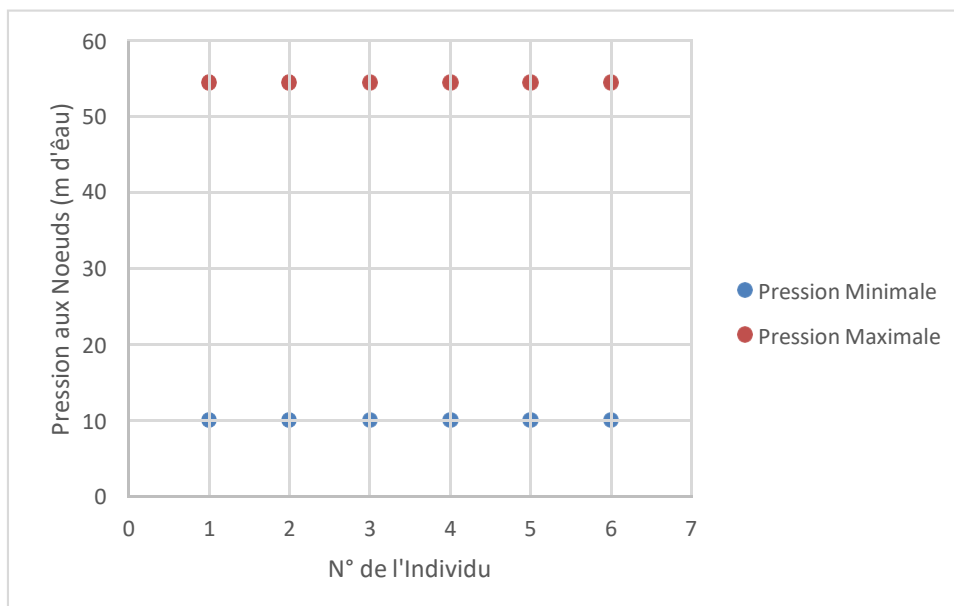


Figure IV.06 « la variation de la pression au sol (minimale et maximale) pour les individus sélectionnés »

Nous présentons sur les figures (IV.05) et (IV.06) l'évolution des valeurs de la vitesse (minimale et maximale) ainsi que les pressions au sol dans les différents tronçons et ce pour les différents individus retenus. A partir de cette figure nous pouvons retenir les points suivants :

- La vitesse minimale reste supérieure à la limite minimale admise à savoir 0.5.
- La vitesse maximale reste inférieure à la limite maximale admise à savoir 1.5.
- La pression minimale reste supérieure à la limite minimale admise à savoir 10 m de colonne d'eau.
- La vitesse pression maximale reste inférieure à la limite maximale admise à savoir 60 m de colonne d'eau

Conclusion : Tous les individus sélectionnés respectent toutes les contraintes techniques, ils sont donc des solutions initiales (admissibles)

### 5. La reproduction :

« La différence crée la diversité »

Afin de diversifier les populations et les générations à venir, on procède à la reproduction par deux opérateurs à savoir : le croisement et la mutation.

**5.1. Le croisement** : c'est la recombinaison des gènes de la 1<sup>ère</sup> génération dans le but de former de meilleurs individus pour la nouvelle génération.

On prend donc un individu qui va jouer le rôle d'un **premier parent** et on le croise avec un autre individu qui va jouer le rôle d'un **deuxième parent** dans le but de reproduire un individu qui sera le résultat de ce croisement, autrement dit pour obtenir **l'enfant**.

Et nous avons fait un croisement en un point.

Dans les deux tableaux (IV.07) et (IV.08), nous avons présenté les deux parents sélectionnés. Leur croisement nous a permis d'obtenir un enfant représenté dans le tableau (IV.09)

Tableau IV.07 « Individu i1 ; parent 01 »

Individu	D <sub>R-N1</sub>	D <sub>N1-N2</sub>	D <sub>N2-N3</sub>	D <sub>N3-N6</sub>	D <sub>N6-N1</sub>	D <sub>N3-N4</sub>	D <sub>N4-N5</sub>	D <sub>N5-N6</sub>	Prix conception DA
i1	50	32	25	25	40	25	20	25	120 861,30

Tableau IV.08 « Individu i6 ; parent 02 »

Individu	D <sub>R-N1</sub>	D <sub>N1-N2</sub>	D <sub>N2-N3</sub>	D <sub>N3-N6</sub>	D <sub>N6-N1</sub>	D <sub>N3-N4</sub>	D <sub>N4-N5</sub>	D <sub>N5-N6</sub>	Prix conception DA
i6	50	32	25	25	50	20	20	25	124 340,30

Tableau IV.09 « Individu croisé, enfant »

Enfant	D <sub>R-N1</sub>	D <sub>N1-N2</sub>	D <sub>N2-N3</sub>	D <sub>N3-N6</sub>	D <sub>N6-N1</sub>	D <sub>N3-N4</sub>	D <sub>N4-N5</sub>	D <sub>N5-N6</sub>	Prix conception DA
E1	50	32	25	25	40	20	20	25	119 636,30

➤ **Interprétation des résultats du croisement :**

Le but de l'opérateur de croisement est de générer un nouvel individu ; un enfant issu d'une combinaison de deux parents, et le but est que cet enfant soit meilleur que les deux parents croisés.

Dans notre cas, on constate que, l'enfant résultant de la combinaison des deux individus (parents), est bien de meilleure qualité, il représente donc *la solution optimale* (la conception la moins coûteuse, qui satisfait les contraintes techniques)

**5.2. La mutation :** L'opérateur de mutation agit sur un seul chromosome, il consiste généralement à tirer de façon aléatoire un gène dans le chromosome et le remplacer par une valeur qui elle-même est aléatoire.

Dans notre cas, l'utilisation de l'opérateur de mutation reste très faible voire impossible vu que nos chromosomes (les diamètres des tronçons) sont conditionnés par les contraintes des vitesses et pressions, donc l'individu qui va résulter de la mutation d'un chromosome risque de violer une ou les contraintes donc l'individu sera rejeté.

**6. Evaluation de la solution :**

Une fois que la solution est trouvée on évalue sa qualité, dans notre cas, l'enfant issu du croisement des deux parents est bien de meilleure qualité que tous les autres individus ; il représente la conception la moins coûteuse en satisfaisant toutes les contraintes techniques.

### 7. *Décision :*

Une fois l'évaluation de la solution est faite, si elle est de bonne qualité on la met en œuvre, sinon on refait les étapes jusqu'à ce qu'on trouve une solution satisfaisante (meilleure qualité).

➤ Analyse graphique de la solution optimale :

La figure (IV.07) représente l'optimum global et les optimums locaux

L'optimum global qui représente le point le plus bas de la courbe correspondant à l'enfant résultant du croisement, qui même d'après l'analyse représente l'optimum globale, donc la solution optimale.

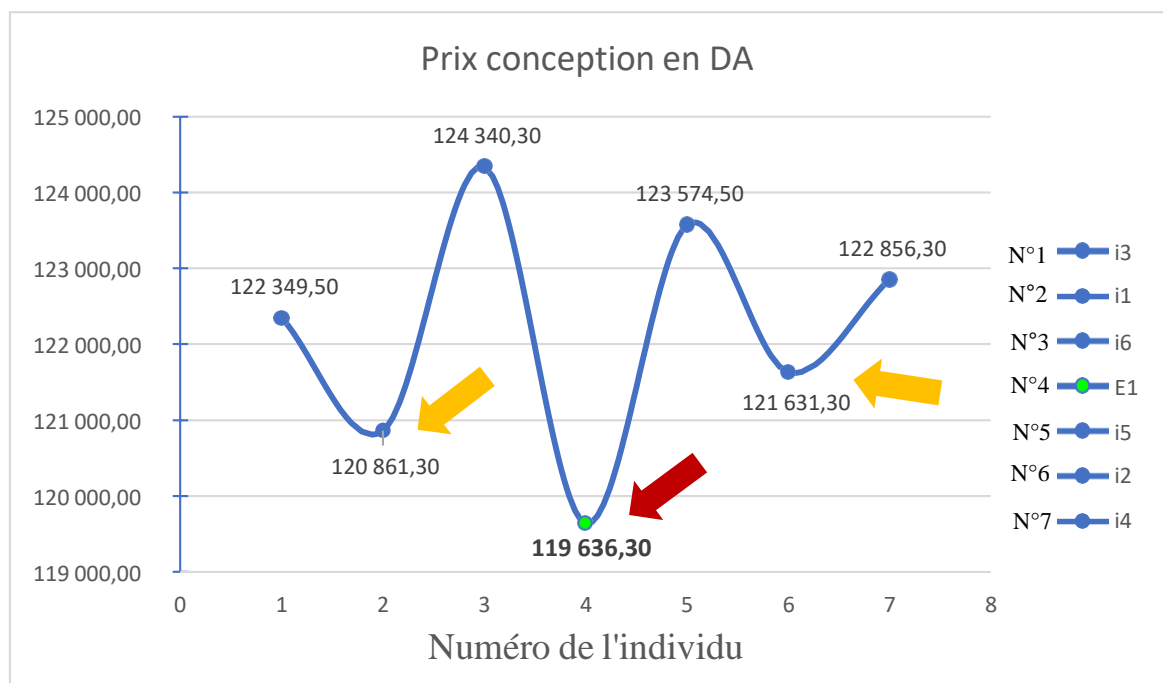


Figure IV.07 « Visualisation de l'optimum global et les optimums locaux »

La figure (IV.08) représente le pourcentage des gains des différents individus sélectionnés, on constate que la solution optimale nous fait gagner un bénéfice qui va de **1%** jusqu'à presque **4%** par rapport aux autres solutions (les autres individus sélectionnés).

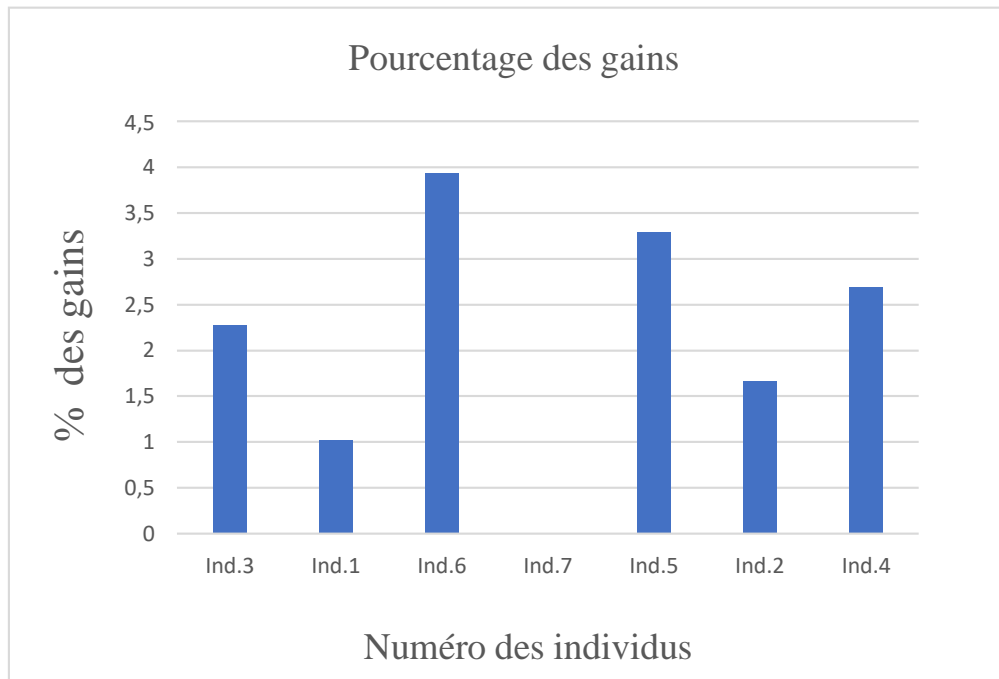


Figure IV.08 « Pourcentage des gains »

### III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'optimisation des réseaux de distribution d'eau potable en utilisant deux approches complémentaires : une première approche basée sur l'optimisation technique avec le solveur Excel et une deuxième approche basée sur l'optimisation économique avec un algorithme génétique. Les résultats de ces deux approches d'optimisation ont des implications pratiques significatives pour la gestion et l'exploitation des réseaux de distribution d'eau potable à savoir :

- Amélioration de l'efficacité du réseau : les ajustements techniques réalisés avec le solveur Excel ont permis d'améliorer l'efficacité du réseau en trouvant la position optimale du réservoir de stockage qui garantit ainsi une distribution uniforme de la pression.
- Réduction des coûts d'investissement : l'optimisation économique avec les algorithmes génétiques a conduit à déterminer la solution optimale correspondant à la conception la moins coûteuse.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

L'objectif du modèle d'optimisation d'un réseau de distribution d'eau potable est de concevoir, à un coût minimum, un système de distribution d'eau tout en vérifiant les contraintes exigées à savoir :

- Les contraintes physiques : traduites par les lois de la conservation d'énergie et de la continuité aux nœuds,
- Les contraintes hydrauliques relatives aux bornes de pressions nodales et de vitesses.
- Et enfin, les contraintes commerciales exprimées par les gammes des prix des éléments composant le réseau (diamètres des conduites).

Par le présent travail nous avons apporté une contribution à l'optimisation des réseaux d'alimentation en eau potable en appliquant une des méthodes d'optimisation métaheuristique à savoir optimisation par un *algorithme génétique*. Ces derniers, permettent une bonne exploration du domaine des solutions réalisables avec une bonne exploitation des données, contrairement aux méthodes déterministes qui ne permettent qu'une exploitation des données dans un domaine local, fournissant ainsi une solution optimale locale.

Les résultats trouvés sont très satisfaisants que ce soit d'un point de vue économique (une minimisation de coûts) ou d'un point de vue technique (toutes les contraintes techniques sont respectées) et ce malgré la complexité du problème.

En effet, nous avons appliqué un algorithme génétique dans le but d'optimiser le réseau maillé de distribution d'eau potable du lotissement ait Abdellah de la ville de Tizirt. L'objectif est de trouver un compromis optimal entre, d'une part, les contraintes techniques à savoirs : la vitesse d'écoulement et les pressions au sol, d'autre part, les contraintes économiques (commerciales) à savoirs : les diamètres normalisés et le coût du projet.

Le réseau maillé étudié est modélisé en utilisant la méthode Hardy cross. Les pertes de charges sont estimées par la formule de Hazen Williams.

La modélisation nous a permis d'une part de déterminer la position optimale du réservoir du réseau satisfaisant ainsi les contraintes techniques, et d'autre part de minimiser le coût du projet, satisfaisant ainsi les contraintes commerciales.

## Conclusion générale

---

La complexité de l'analyse d'un réseau d'alimentation en eau potable, fait que le travail réalisé de cette étude ouvre les perspectives suivantes :

- Les améliorations « classiques » pour les algorithmes génétiques.
- Le concept d'hybridation entre les différents types des métaheuristiques.
- Les résultats obtenus sur les problèmes traités doivent être comparés à ceux issus d'outil de calcul reconnu dans le domaine (EPANET).
- L'introduction des aspects probabilistes.

## Conclusion générale

---

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

[1] **LEFKIR ABDELOUAHAB**, « Contribution à l'optimisation des réseaux de distribution d'eau », Mémoire de magister, ENP, Alger

[2] **Michel Bierlair**, 1998, « introduction à l'optimisation », Belgique

Consulté sur GOOGLE SCHOLAR

[3,6] **Johann Dreo**, ORCID : 0000-0003-2727-9569, Laboratoire image, signaux et systèmes intelligents ; **Éric Taillard**, Haute école d'ingénierie et de gestion de canton de Vaud (Yverdon-les-Bains)

[4] **MEZINE Abdenour**, 2016, « Optimisation Des Réseaux d'Alimentation en Eau Potable par le Shuffled Complex Evolution », Mémoire de Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en HYDRAULIQUE, Ecole Nationale Polytechnique Département d'Hydraulique, Alger

[5] **Sergio Nesmachnow**, journal international des métaheuristiques, 2014, « un aperçu des métaheuristiques : des méthodes d'optimisation précises et efficaces »

[7] **M. Dorigo et T. Stuzle**, 2004, « optimisation des colonies de fourmis », MIT press, Cambridge

[8] **Jean-Marc Alliot, Nicolas Durand**, March 14, 2005, Algorithmes génétiques

[9] **CARLIER Michel**, 1972 'Hydraulique générale et appliquée' « édition Eyrolles »

[10, 15, 16, 17, 18, 19,22,23] **DUPONT André**, 1974, « Hydraulique urbaine ouvrage de transport », Evaluation et distribution des eaux, Edition Eyrolles, Paris,

[11, 12,14] **BOUALEM REMINI**, 2005, « HYDRAULIQUE APPLIQUEE », COLLECTION HYDRAULIQUE ET TRANSPORT SOLIDE, Blida

[13] **ARMADO LANCASTR**, université nouvelle-Lisbonne-Portugal, Edition EYROULES 61, Bld saint-germain 75240, paris

[20] **Dr. Benzannache Naziha**, 2020-2021, « ALIMENTATION EN EAU POTABLE », Guelma.

[21] **FIOGBE Tibaut, KELOME Jordan, VIVOUCHEHO Célestin**, 2021, « simulation d'un réseau maillé par la méthode d'Hardy Cross », projet d'hydraulique, institut national supérieur de technologie industrielle de LOKOSSA, BENIN.

## Références bibliographiques

---

[24] **LEFKIR ABDEL OUAHAB**, 21 novembre 2015, « contribution à l'optimisation des réseaux de distribution d'eau », thèse de magistère pour l'obtention du titre de Magister en hydraulique, école nationale polytechnique, département d'hydraulique, El Harrach, Alger

# Annexes

## Annexes

Sur le **tableau 01** on présente la gamme des diamètres normalisés et leur prix en hors taxes (HT) et en toutes taxes comprises (TTC), et nous avons également calculé le prix de la fourniture et pose.

*Tableau 01 "Prix des diamètres normalisés "*

<b>PN16</b>					
Diamètre Normalisé (mm)	Épaisseur (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Prix HT DA	Prix TTC DA	Fourniture et pose (Da)
20,00	2,00	16,00	34,45	41,00	57,40
25,00	2,30	20,40	44,96	53,50	74,90
32,00	3,00	26,00	68,91	82,00	114,80
40,00	3,70	32,60	105,04	125,00	175,00
50,00	4,60	40,80	155,46	185,00	259,00
63,00	5,80	51,40	251,26	299,00	418,60
75,00	6,80	61,40	352,94	420,00	588,00
90,00	8,20	73,60	487,39	580,00	812,00
110,00	10,00	90,00	735,29	875,00	1 225,00
125,00	11,40	102,20	941,18	1 120,00	1 568,00
160,00	14,60	130,80	1 529,41	1 820,00	2 548,00
200,00	18,20	163,60	2 436,97	2 900,00	4 060,00
250,00	22,70	204,60	3 655,46	4 350,00	6 090,00
315,00	28,60	257,80	6 050,42	7 200,00	10 080,00
400,00	36,30	327,40	9 621,85	11 450,00	16 030,00
500,00	45,40	409,20	14 705,88	17 500,00	24 500,00

## Annexes

---

Le **tableau 02** présente les valeurs du coefficient de Hazen Williams en fonction du matériau et de l'état de la conduite.

*Tableau 02 « Valeurs du coefficient CHW »*

<b>Matériaux</b>	<b>Coefficient d'Hazen Williams <i>CHW</i></b>
Chlorure de Polyvinyle (PVC) et plastique	150
Amiante ciment « cancérogène »	145
Mortier de ciment centrifugé	140
Métal neuf	130
Béton centrifugé	125
Fonte et acier avec revêtement de ciment	110
Fonte et acier non revêtus (neuf)	100
Fonte et acier non revêtus (ancien)	90
PEHD (neuf)	150
PEHD (ancien)	130
Béton lissé	130

## Annexes

Sur les tableaux (03,04,05,06,07,08,09,10,11,12), on présente le développement de la méthode Hardy cross pour les deux cas (a la mise en service, à long terme)

*Tableau 03 «02<sup>ème</sup> itération ; CHW=150 »*

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
<b>N1-N2</b>	32,60	160,00	0,76	28,91	4,63	6,10	0,01	0,01	<b>0,77</b>
<b>N2-N3</b>	26,00	68,00	0,40	27,20	1,85	4,57		0,01	<b>0,42</b>
<b>N1-N6</b>	40,80	56,00	- 1,41	- 30,68	- 1,72	1,22		0,01	<b>- 1,40</b>
<b>N6-N3</b>	26,00	207,00	- 0,39	- 25,46	- 5,27	13,50		0,02	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,51</b>	25,39			
<b>N6-N3</b>	26,00	207,00	0,39	25,46	5,27	13,50	- 0,01	- 0,02	<b>0,37</b>
<b>N3-N4</b>	16,00	70,00	0,26	127,76	8,94	34,38		- 0,01	<b>0,25</b>
<b>N6-N5</b>	26,00	50,00	- 0,54	- 45,88	- 2,29	4,28		- 0,01	<b>- 0,55</b>
<b>N5-N4</b>	16,00	197,00	- 0,15	- 48,21	- 9,50	61,79		- 0,01	<b>- 0,17</b>
				Σ	<b>2,42</b>	113,94			

## Annexes

*Tableau 04 « 03<sup>ème</sup> itération ; CHW=150 »*

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,77	29,68	4,75	6,18	- 0,01	- 0,01	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,42	28,57	1,94	4,68		- 0,01	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,40	- 30,24	- 1,69	1,21		- 0,01	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 22,82	- 4,72	12,84		- 0,01	<b>- 0,38</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,28</b>	24,90			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	22,82	4,72	12,84	0,00	0,01	<b>0,38</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	117,51	8,23	33,08		0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 47,72	- 2,39	4,35		0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,17	- 55,09	- 10,85	65,70		0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>- 0,29</b>	115,97			

*Tableau 05 « 04<sup>ème</sup> itération ; CHW=150 »*

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	29,26	4,68	6,14	0,00	0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	27,82	1,89	4,62		0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 30,48	- 1,71	1,21		0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,38	- 23,67	- 4,90	13,05		0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,03</b>	25,02			
N6-N3	26,00	207,00	0,38	23,67	4,90	13,05	- 0,00	- 0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	118,70	8,31	33,23		- 0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 47,50	- 2,37	4,34		- 0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 54,26	- 10,69	65,25		- 0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>0,14</b>	115,88			

## Annexes

*Tableau 06 « 05<sup>ème</sup> itération ; CHW=150 »*

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	29,31	4,69	6,14	- 0,00	- 0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	27,91	1,90	4,63		- 0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 30,45	- 1,71	1,21		- 0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 23,50	- 4,87	13,01		- 0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,02</b>	24,99			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	23,50	4,87	13,01	0,00	0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	118,11	8,27	33,16		0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 47,61	- 2,38	4,35		0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 54,67	- 10,77	65,47		0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>- 0,02</b>	115,99			

*Tableau 07 « 06<sup>ème</sup> itération ; CHW=150 »*

Tronçons	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	29,28	4,69	6,14	0,00	0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	27,86	1,89	4,62		0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 30,46	- 1,71	1,21		0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 23,56	- 4,88	13,03		0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,00</b>	25,00			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	23,56	4,88	13,03	- 0,00	- 0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	118,18	8,27	33,17		- 0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 47,59	- 2,38	4,35		- 0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 54,62	- 10,76	65,45		- 0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>0,01</b>	115,99			

## Annexes

*Tableau 08 « 02<sup>ème</sup> itération ; CHW=130 »*

Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	37,70	6,03	7,96	0,01	0,01	<b>0,77</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,40	35,47	2,41	5,96		0,01	<b>0,42</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 40,01	- 2,24	1,59		0,01	<b>- 1,40</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,39	- 33,20	- 6,87	17,61		0,02	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,67</b>	33,11			
N6-N3	26,00	207,00	0,39	33,20	6,87	17,61	- 0,01	- 0,02	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,26	166,63	11,66	44,84		- 0,01	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,54	- 59,84	- 2,99	5,58		- 0,01	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,15	- 62,87	- 12,39	80,59		- 0,01	<b>- 0,17</b>
				Σ	<b>3,16</b>	148,61			

*Tableau 09 « 03<sup>ème</sup> itération ; CHW=130 »*

Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,77	38,71	6,19	8,06	- 0,01	- 0,01	0,76
N2-N3	26,00	68,00	0,42	37,27	2,53	6,10		- 0,01	0,41
N1-N6	40,80	56,00	- 1,40	- 39,44	- 2,21	1,58		- 0,01	- 1,41
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 29,76	- 6,16	16,74		- 0,01	- 0,38
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,36</b>	<b>32,47</b>			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	29,76	6,16	16,74	0,00	0,01	0,38
N3-N4	16,00	70,00	0,25	153,26	10,73	43,14		0,00	0,25
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 62,23	- 3,11	5,68		0,00	- 0,55
N5-N4	16,00	197,00	- 0,17	- 71,85	- 14,16	85,69		0,00	- 0,16
				Σ	<b>- 0,38</b>	<b>151,26</b>			

## Annexes

*Tableau 10 « 04<sup>ème</sup> itération ; CHW=130 »*

Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	38,16	6,11	8,00	0,00	0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	36,28	2,47	6,02		0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 39,75	- 2,23	1,58		0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,38	- 30,87	- 6,39	17,03		0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,04</b>	<b>32,63</b>			
N6-N3	26,00	207,00	0,38	30,87	6,39	17,03	- 0,00	- 0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	154,81	10,84	43,34		- 0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 61,95	- 3,10	5,67		- 0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 70,77	- 13,94	85,09		- 0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>0,19</b>	<b>151,13</b>			

*Tableau 11 « 5<sup>ème</sup> itération ; CHW=130 »*

Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	38,22	6,12	8,01	- 0,00	- 0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	36,40	2,47	6,03		- 0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	- 1,41	- 39,71	- 2,22	1,58		- 0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 30,66	- 6,35	16,97		- 0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>0,02</b>	<b>32,60</b>			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	30,66	6,35	16,97	0,00	0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	154,04	10,78	43,24		0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 62,09	- 3,10	5,67		0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 71,30	- 14,05	85,39		0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>- 0,02</b>	<b>151,28</b>			

## Annexes

*Tableau 12 « 06<sup>ème</sup> itération 130 »*

Tronçon	Di (mm)	L (m)	Q <sub>0</sub> (l/s)	I (m/km)	ΔH (m)	ΔH/Q <sub>0</sub>	Δ maille	Δ tronçon	Q'
<b>Maille 01</b>									
N1-N2	32,60	160,00	0,76	38,19	6,11	8,01	0,00	0,00	<b>0,76</b>
N2-N3	26,00	68,00	0,41	36,34	2,47	6,03		0,00	<b>0,41</b>
N1-N6	40,80	56,00	-1,41	- 39,73	- 2,22	1,58		0,00	<b>- 1,41</b>
N6-N3	26,00	207,00	- 0,37	- 30,72	- 6,36	16,99		0,00	<b>- 0,37</b>
<b>Maille 02</b>				Σ	<b>- 0,00</b>	<b>32,61</b>			
N6-N3	26,00	207,00	0,37	30,72	6,36	16,99	- 0,00	- 0,00	<b>0,37</b>
N3-N4	16,00	70,00	0,25	154,13	10,79	43,26		- 0,00	<b>0,25</b>
N6-N5	26,00	50,00	- 0,55	- 62,07	- 3,10	5,67		- 0,00	<b>- 0,55</b>
N5-N4	16,00	197,00	- 0,16	- 71,24	- 14,03	85,35		- 0,00	<b>- 0,16</b>
				Σ	<b>0,01</b>	<b>151,27</b>			

## Annexes

### **Résumé :**

Les réseaux de distribution d'eau potable nécessitent des investissements considérables de la part des pouvoirs publics. Une conception et une gestion optimale de ces réseaux est essentielle pour maximiser leur efficacité, réduire leurs coûts et prolonger leur durée de vie.

Ce travail est consacré à l'application d'un algorithme génétique dans le but d'optimiser un réseau maillé de distribution d'eau potable. En effet, l'objectif est de trouver un compromis optimal entre, d'une part, les contraintes techniques à savoir : la vitesse d'écoulement et les pressions au sol, d'autre part, les contraintes économiques (commerciales) à savoir : les diamètres normalisés et le coût du projet.

Le réseau maillé est modélisé en utilisant la méthode Hardy cross. Les pertes de charges sont estimées par la formule de Hazen Williams.

La modélisation nous a permis d'une part de déterminer la position optimale du réservoir du réseau. D'autre part, de minimiser le coût du projet étudié.

**Mots clés :** Optimisation, algorithme génétique, Hazen Williams, Hardy cross, réseau maillé, dimensionnement

### **Abstract**

Drinking water distribution networks require considerable investment on the part of public authorities. Optimum design and management of these networks is essential to maximize their efficiency, reduce costs and extend their lifespan.

This work is devoted to the application of a genetic algorithm to optimize a meshed drinking water distribution network. The objective is to find an optimal compromise between, on the one hand, the constraints of standardized diameters and, on the other hand, the cost of the project.

The mesh network is modeled using the Hardy cross method. Head losses are estimated using the Hazen Williams formula.

Modelling enabled us to determine the optimum position for the network reservoir, and to minimize the cost of the project studied.

**Keywords:** optimization, genetic algorithm, Hazen Williams, Hardy cross, mesh network, dimensioning.

### **ملخص**

تتطلب شبكات توزيع مياه الشرب استثمارات كبيرة من قبل السلطات العامة. إن التصميم والإدارة الأمثلين لهذه الشبكات أمران ضروريان لتحقيق كفاءتها وتقليل التكاليف وإطالة عمرها..

يكرس هذا العمل لتطبيق خوارزمية جينية لتحسين شبكة توزيع مياه الشرب المشابكة. الهدف هو إيجاد حل وسط مثالي بين، من جهة، قيود القطر المعياري، ومن جهة أخرى، تكلفة المشروع.

يتم نمذجة الشبكة المشابكة باستخدام طريقة هاردي كروس ويتم تقدير الفاقد في الضغط باستخدام صيغة هازن ويليامز. مكّننا النمذجة من تحديد الموقع الأمثل لخزان الشبكة وتقليل تكلفة المشروع المدروس.

### **الكلمات الدالة:**

الكلمات المفتاحية: تحسين، خوارزمية جينية، هازن ويليامز، هاردي كروس، شبكة شبكية، تحديد الأبعاد

## Annexes

---