

**République Algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**Université BLIDA 1**

**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**

**Département des Biotechnologies**



**Mémoire en vue de l'obtention**

**du diplôme de MASTER**

**Option : Eau et Environnement**

**Thème**

**Dimensionnement d'un réseau de micro-irrigation par le logiciel  
Irripro**

**Présenté par**

**Aissa kheira**

**Devant le jury**

|                     |                        |                    |
|---------------------|------------------------|--------------------|
| <b>L. Remini</b>    | MC U. Blida 1          | Présidente de jury |
| <b>L. Zella</b>     | Professeur U. Blida 1  | Promoteur          |
| <b>N. Degui</b>     | MAA Université Blida 1 | Examineur          |
| <b>M. Amirouche</b> | Dr ENSA                | Examineur          |

**2019/2020**



*L'eau est à la vie matérielle ce que la pensée est à la vie spirituelle*

## DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude pour leur soutien tout au long de mes études. Je ne les remercierai jamais assez. Je ne trouverai jamais de mots pour exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour qu'ils m'accordent.

Mes chers frères : Ali, Zoubir, Mohamed et Habbib.

Mes chères sœurs et leurs maries: Mahdia, Azziz / Imen, Lamouri.

Ma chère amie Hamlaoui Sabrina.

A toute la famille.

A tout mes amis de Master Eau et Environnement.

## REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu qui illumine mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études. 'Et qui conque ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu'.

Je remercie fortement mon promoteur Pr. Zella Lakhdar pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa grande patience, ses encouragements, ses orientations et ses conseils précieux.

Mes gratitudes s'adressent également aux membres de jurys d'avoir honorer ma soutenance par leurs présences et pour l'effort fourni à fin de juger ce travail. Il s'agit de Mme Remini L. qui préside le jury, et aux deux examinateurs Mlle Degui et M. Amirouche.

Je remercie également tous les enseignants de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de Blida, particulièrement ceux du département des biotechnologies pour la qualité des enseignements reçus et les innombrables soutiens durant tout le cursus universitaire.

Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Résumé

L'Algérie fait partie des pays qui souffrent du manque d'eau, notamment pour l'irrigation qui est le plus gros consommateur. Le climat aride caractérisé par un déficit pluviométrique endémique exacerbe les tensions entre les utilisateurs de la ressource hydrique. C'est carrément un frein au développement. D'autres parts, les pratiques anciennes d'irrigations font perdre des volumes importants d'eau. La micro-irrigation est la technique appropriée à limiter le gaspillage d'eau et même des fertilisants. Cependant pour qu'elle soit rentable, il est nécessaire de dimensionner correctement les réseaux. Le logiciel Irripro est un outil informatique qui permet de réaliser le dimensionnement de manière rapide et précise. Irripro donne la possibilité de chercher les dimensions du réseau qui garantissent une meilleure uniformité d'arrosage. Dans ce travail, on s'est assuré d'abord de la maîtrise du logiciel Irripro, puis il a été testé sur un cas virtuel et les résultats sont très acceptables.

**Mots clés** : micro-irrigation, dimensionnement, irripro, coefficient d'uniformité, goutteur, débit, pression

## **Abstract**

Algeria is one of the countries suffering from a lack of water, especially for irrigation which is the biggest consumer. The arid climate characterized by an endemic rainfall deficit exacerbates tensions between users of water resources. This is definitely a brake on development. On the other hand, ancient irrigation practices waste large volumes of water. Micro-irrigation is the appropriate technique to limit the wastage of water and even fertilizers. However, for it to be profitable, it is necessary to properly size the networks. The Irripro software is a computer tool that allows dimensioning to be carried out quickly and precisely. Irripro gives the possibility of searching for the dimensions of the network which guarantee better uniformity of watering. In this work, we first ensured mastery of the Irripro software, then it was tested on a virtual case and the results are very acceptable.

**Keys words:** micro-irrigation, design, irripro, coefficient of uniformity, emitter, pressure, flow rate.

## ملخص

الجزائر من الدول التي تعاني من نقص المياه وخاصة الري الذي يعتبر المستهلك الأكبر. يؤدي المناخ الجاف الذي يتميز بنقص مزمّن في هطول الأمطار إلى تفاقم التوترات بين مستخدمي الموارد المائية. هذا بالتأكيد مكبح للتنمية. من ناحية أخرى ، فإن ممارسات الري القديمة تهدر كميات كبيرة من المياه. الري الدقيق هو الأسلوب المناسب للحد من هدر المياه وحتى الأسمدة. ومع ذلك ، لكي تكون مربحة ، من الضروري تحديد حجم الشبكات هو أداة كمبيوتر تسمح بتنفيذ الأبعاد بسرعة وبدقة. يوفر الشبكة التي تضمن تجانسا أفضل Irripro بشكل صحيح إمكانية البحث عن أبعاد Irripro للري في هذا العمل

الكلمات المفتاح: الري الدقيق التحجيم ، معامل الانتظام ، التنقيط ، معدل التدفق ، الضغط.



## Liste des figures

|                     | <b>Titres</b>                                                                                                               | <b>Page</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>1</b>            | <b>Schéma classique d'un réseau de micro-irrigation</b>                                                                     | <b>18</b>   |
| <b>2</b>            | <b>Réseau type de micro-irrigation</b>                                                                                      | <b>20</b>   |
| <b>3</b>            | <b>Schéma simplifié d'une tête de réseau de micro-irrigation</b>                                                            | <b>21</b>   |
| <b>4</b>            | <b>Pompe centrifugeuse de surface utilisée en micro-irrigation</b>                                                          | <b>22</b>   |
| <b>5</b>            | <b>Pompe immergée et moteur en surface</b>                                                                                  | <b>22</b>   |
| <b>6</b>            | <b>Groupe motopompe totalement immergé</b>                                                                                  | <b>23</b>   |
| <b>7</b>            | <b>Schéma d'une crépine et d'un hydro-cyclone</b>                                                                           | <b>24</b>   |
| <b>8</b>            | <b>Filtre à sable à couche superposées</b>                                                                                  | <b>26</b>   |
| <b>9</b>            | <b>Schéma d'un filtre à tamis</b>                                                                                           | <b>27</b>   |
| <b>10</b>           | <b>Photo d'une batterie de filtres à tamis</b>                                                                              | <b>27</b>   |
| <b>11</b>           | <b>Fertiliseur ou injecteur d'engrais</b>                                                                                   | <b>28</b>   |
| <b>12</b>           | <b>Types de goutteurs</b>                                                                                                   | <b>32</b>   |
| <b>13</b>           | <b>Courbe de fonctionnement (débit pression) d'un goutteur non autorégulant (A) et celle d'un goutteur autorégulant (B)</b> | <b>34</b>   |
| <b>14</b>           | <b>Profil d'humidité et front d'humectation en fonction du temps d'arrosage</b>                                             | <b>37</b>   |
| <b>15</b>           | <b>Bulbe humide sous un goutteur pour deux types de sol</b>                                                                 | <b>37</b>   |
| <b>16</b>           | <b>Structure du bulbe humide</b>                                                                                            | <b>38</b>   |
| <b>17</b>           | <b>Accessoires utilisés dans un réseau de micro-irrigation</b>                                                              | <b>39</b>   |
| <b>18</b>           | <b>Manomètre</b>                                                                                                            | <b>40</b>   |
| <b>19 - 20 - 21</b> | <b>Différentes structures de réseau</b>                                                                                     | <b>41</b>   |
| <b>22</b>           | <b>Schéma du réseau de micro-irrigation (modèle)</b>                                                                        | <b>41</b>   |
| <b>23</b>           | <b>Positionnement des goutteurs et des tronçons</b>                                                                         | <b>43</b>   |

|           |                                                                                |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|           | <b>entre goutteurs sur la rampe</b>                                            |           |
| <b>24</b> | <b>Positionnement des pressions le long de la rampe</b>                        | <b>44</b> |
| <b>25</b> | <b>Le réseau virtuel de logiciel Irripro</b>                                   | <b>47</b> |
| <b>26</b> | <b>Courbe de fonctionnement du goutteur choisi</b>                             | <b>52</b> |
| <b>27</b> | <b>Distribution des pressions et des débits dans les rampes des extrémités</b> | <b>54</b> |
| <b>28</b> | <b>Distribution des pressions et des débits dans les rampes des extrémités</b> | <b>55</b> |
| <b>29</b> | <b>Variation de la pression le long de la rampe favorisée 1</b>                | <b>56</b> |

## Liste des tableau

| <b>Tableaux</b> | <b>Titres</b>                                                      | <b>Page</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>1</b>        | <b>L'indice d'aridité et les caractéristiques des zones arides</b> | <b>13</b>   |
| <b>2</b>        | <b>Diamètres nominalisés de la conduite principale</b>             | <b>29</b>   |
| <b>3</b>        | <b>Diamètre normalisée pour la conduite secondaire</b>             | <b>30</b>   |
| <b>4</b>        | <b>Caractéristiques des rampes utilisées en micro-irrigation</b>   | <b>31</b>   |
| <b>5</b>        | <b>Valeurs de CVf</b>                                              | <b>33</b>   |
| <b>6</b>        | <b>Valeurs du coefficient x et qualité du goutteur</b>             | <b>36</b>   |
| <b>7</b>        | <b>Nombre de goutteurs à l'hectare</b>                             | <b>34</b>   |
| <b>8</b>        | <b>Itérations pour le calcul du CU</b>                             | <b>58</b>   |

## **Liste des figures**

## **Liste des tableau**

## **Introduction**

### **Chapitre 1. Synthèse bibliographique**

- 1.** L'aridité et le besoin d'irrigation
  - 1.1.** L'aridité
  - 1.2.** Les besoins en eau d'irrigation
  - 1.3.** L'efficience de l'irrigation
- 2.** La micro-irrigation
  - 2.1.** Généralités
  - 2.2.** Principes de fonctionnement
  - 2.3.** Inconvénients et avantages de la micro-irrigation
- 3.** Le réseau de la micro-irrigation
  - 3.1.** Description
  - 3.2.** Tête de réseau
    - 3.2.1.** Le groupe motopompe
    - 3.2.2.** La filtration
    - 3.2.3.** Les différents types de filtres
    - 3.2.4.** Les pompes doseuses et la fertigation
  - 3.3.** Le peine
    - 3.3.1.** La conduite principale
    - 3.3.2.** Les conduites secondaires
    - 3.3.3.** Les rampes
    - 3.3.4.** Le distributeur ou goutteur
    - 3.3.5.** Le bulbe humide
  - 3.4.** Accessoires du réseau de micro-irrigation
    - 3.4.1.** La vanne
    - 3.4.2.** La vanne volumétrique
    - 3.4.3.** La vanne hydraulique
    - 3.4.4.** Régulateur de pression
    - 3.4.5.** Débitmètres et limiteurs de débits
    - 3.4.6.** Le compteur d'eau
    - 3.4.7.** Le manomètre
  - 3.5.** Structures du réseau de micro-irrigation
- 4.** Dimensionnement des réseaux de micro-irrigation
  - 4.1.** Objectifs
  - 4.2.** Méthodes de dimensionnement

### **4.3. Les études et expériences antérieures**

## INTRODUCTION

Le système de micro-irrigation est apparu au début des années 60 améliorant ainsi l'efficacité d'utilisation de l'eau au niveau de la parcelle. Portée d'abord par l'aspersion de 50 à 80%, elle s'est élevée à plus de 90% pour la micro-irrigation (Zella, 2010). Ainsi, l'aspersion fait gagner 30% par rapport à l'irrigation de surface, alors que la micro-irrigation assure un gain d'eau de 10% à 40% respectivement vis-à-vis du gravitaire et de l'aspersion. La technique de micro-irrigation s'est alors imposée avec succès dans les pays où les ressources en eau sont rares. Et paradoxalement, c'est dans ces pays où les ressources en eaux sont insuffisantes que l'irrigation est nécessaire. Le taux d'irrigation est carrément proportionnel au degré d'aridité. C'est le cas de l'Algérie où l'impératif d'augmenter les superficies irriguées est confronté à l'insuffisance des ressources hydriques.

La technique de micro-irrigation réduit au maximum les pertes d'eau par évaporation et infiltration, comme elle a consacré l'apport d'eau de manière individualisée à chaque plant éliminant ainsi toutes les pertes d'eau liées à l'arrosage des zones non cultivées. Son avantage s'élargit également à l'apport des fertilisants incorporés directement dans les eaux d'irrigation garantissant une meilleure efficacité et éliminant les pertes par ressuyage aboutissant au risque de pollution des nappes sous-jacentes.

La technique de micro-irrigation s'est surtout illustrée de réussite avec les cultures en ligne très espacées et présentant une grande valeur ajoutée, comme les cultures sous serres ou autres cultures de plein champ très spéculatives.

Cependant, ces énormes avantages inhérents à la micro-irrigation ne peuvent être assurés que si le réseau est conçu selon les normes. Le réseau de micro-irrigation est un réseau d'eau sous pression, il est formé d'un ensemble de conduites allant de la conduite principale qui achemine l'eau depuis la source d'eau pour la livrer à la conduite secondaire qui elle à son tour, alimente les rampes portant les goutteurs. Ces derniers appareils sont l'organe terminal qui livre l'eau aux plantes, mais ces goutteurs similaires aux robinets des réseaux domestiques ne se règlent pas à volonté. Leur débit

varie linéairement avec la pression qui elle est diminuée régulièrement à cause de la perte de charge. Pour de telles considérations, il faut veiller à ce que l'écart de pression ne soit pas important car cela impacte l'écart des débits des goutteurs. Cette condition est évaluée par une relation statistique définissant le coefficient d'uniformité.

La réussite d'un réseau de micro-irrigation repose donc sur la garantie d'un coefficient d'uniformité autour de 95%, la valeur 100% ne peut être atteinte que si la perte de charge est nulle, ce qui est impossible, ou si les goutteurs sont parfaitement autorégulant. Dans le cas normal, il est donc impératif de choisir les dimensions du réseau de sorte à assurer cette uniformité élevée. C'est le rôle du dimensionnement permettant de proposer des dimensions (longueurs et diamètres) garantissant la meilleure uniformité d'arrosage.

Ce calcul qui consiste à proposer un type de goutteur, une longueur et un diamètre de conduite et de calculer l'évolution de la pression à n'importe quel point du réseau. Ce qui se résume à calculer la perte de charge tronçon par tronçon. La solution retenue est celle des dimensions ayant assuré l'uniformité élevée. Traditionnellement ce calcul se fait manuellement et il est très fastidieux exposant l'auteur à d'éventuelles erreurs. Depuis le développement de l'informatique, le calcul est réalisé par les ordinateurs moyennant des programmes de calcul. Ces dernières années, plusieurs logiciels dédiés au dimensionnement des réseaux de micro irrigation sont proposés aux utilisateurs.

Le but de ce travail consiste à maîtriser et tester un logiciel, Irripro dans le dimensionnement d'un réseau virtuel.

## Chapitre 1 . SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### 1. L'aridité et le besoin d'eau d'irrigation

La micro-irrigation est une technique inventée pour pouvoir économiser les volumes d'irrigation et augmenter ainsi l'efficacité. La technique est donc très fortement recommandée pour les régions lésées en matière de ressources hydriques. Les régions arides, exigeant des irrigations, sont très répandues dans nos latitudes et les terres d'Algérie sont dominées à plus de 80% d'aridité (Zella, 2015).

#### 1.1. L'aridité

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une pénurie endémique en eau, elle couvre la bande des latitudes de part et d'autre des tropiques. On estime que ces zones arides occupent environ 40% des terres et une population de près de 2 milliards d'individus dont 90% d'entre eux sont situés dans les pays en développement (FAO, 2018). Ces populations sont essentiellement rurales, pauvres et donc vulnérables face aux pénuries alimentaires. Ces populations sont contraintes ces derniers temps aux migrations forcées.

Le degré d'aridité ou l'indice d'aridité est exprimé par le rapport entre les valeurs moyennes annuelles des précipitations et de l'évapotranspiration (P/ETP). L'aridité se manifeste dès que ce rapport est inférieur à 65% (FAO, 2018).



**Tableau 1. L'indice d'aridité et les caractéristiques des zones arides**

| La région         | Indice d'aridité | Pluviométrie (mm)                | Caractéristiques                                                                                                                                                  |
|-------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Subhumides sèches | De 0.65 à 0.50   | Régime pluviométrique saisonnier | -Des régions exposées à une aridification progressive sous l'effet d'actions anthropiques. --- Agriculture pluviale est possible et fortement répandue            |
| Semi-arides       | De 0.50 à 0.20   | Plus de 500                      | -Le domaine des steppes buissonnantes avec plus ou moins une grande fréquence de graminées pérennes. -Régions propices à l'élevage et à l'agriculture sédentaires |
| Aride             | De 0.20 à 0.05   | Ne dépasse pas 200               | -L'élevage sédentaire est encore possible mais pas d'agriculture sans irrigation. -la végétation naturelle est clairsemée, dominée par des espèces                |

|             |                   |                                              |                                                                   |
|-------------|-------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Hyper aride |                   |                                              | épineuses ou succulentes                                          |
|             | Inférieure à 0.05 | Très faible et sécheresse peut durer 12 mois | -Le désert<br>-Peuplée par les nomades<br>-végétations très rares |

Source : (FAO, 2018)

Se sont donc ces zones arides qui ont grandement besoin d'irrigation afin de garantir une certaine production végétale. Comme les ressources en eau sont rares, il est vital de choisir les méthodes d'irrigation les plus économes, comme la micro-irrigation.

## 1.2. Les besoins en eau d'irrigation

Les besoins en eau d'irrigation sont naturellement plus élevés dans ces zones arides déficitaires en précipitations naturelles et où l'évapotranspiration est très élevée. Ces conditions vont compromettre la production agricole pluviale et imposent donc très souvent l'irrigation.

Les volumes d'eau destinés à l'irrigation sont déterminés en calculant la différence entre les quantités d'eau précipitées (P) et celles évapotranspirées (ETP). Les projections de ces deux paramètres peuvent être estimées à l'avance moyennant la disponibilité de leurs bases de données respectives. Ainsi mois par mois, le déficit est évalué et le nombre d'irrigation est calculé en fixant une dose d'arrosage.

Le facteur évapotranspiration est le plus ardu à évaluer compte tenu des paramètres météorologiques qu'il exige. Plusieurs modèles sont proposés dans la littérature

spécialisée mais le plus recommandé, par la FAO, est celui de Penman et Monteith dont un algorithme (Cropwat) a été développé et informatisé facilitant le calcul.

Une fois les besoins en eau des cultures sont déterminés avec précision, l'apport d'eau d'irrigation doit être lui aussi fourni avec précision afin de minimiser les pertes d'eau. C'est de cette précision que dépend l'efficacité de l'irrigation. Si les apports d'irrigation sont exactement les mêmes que les besoins en eau de la culture (ETP) alors l'efficacité est égale à 100%. Plus l'écart est grand, plus l'efficacité diminue.

### **1.3. L'efficacité de l'irrigation**

L'efficacité de l'eau d'irrigation dépend des méthodes et technologies d'irrigation à la parcelle et des solutions de distribution, de stockage et d'adduction prévues au niveau du périmètre d'irrigation ou de la parcelle.

Puisque l'irrigation n'est jamais efficace à 100%, à cause des pertes évitables et inévitables, il est nécessaire de prévoir une certaine quantité de surplus d'eau afin de garantir la dose entière. On parle alors de dose brute d'arrosage. L'efficacité d'application représente l'efficacité fonction de la méthode d'irrigation et du type d'installation au niveau de la parcelle. Elle prend seulement en compte l'eau utilisée par la plante.

Le système de micro-irrigation est apte à offrir la meilleure efficacité en comparaison des autres systèmes (gravitaire et aspersion). Si tout est bien respecté, l'efficacité d'application dépasse assez souvent les 90%. A tel point que les réseaux de micro-irrigation sont conçus pour avoir une efficacité supérieure à 95% (Zella, 2010). Celle-ci ne peut être égalée que si le réseau de micro-irrigation est correctement dimensionné.

L'efficacité d'application ( $E_{appl}$ ) d'une irrigation peut être évaluée par le rapport entre la dose nette ( $D_n$ ) d'irrigation et la dose brute ( $D_b$ ):

$$E_{appl} = (D_n / D_b) 100 \quad (1)$$

## **2. La micro-irrigation**

### **2.1. Généralités**

La micro-irrigation, un concept retenu par la commission Internationale de l'Irrigation-Drainage (CIID) en 1978. C'est une méthode d'irrigation adaptée aux zones arides car elle permet des économies importantes d'eau par rapport aux méthodes d'irrigation de surface.

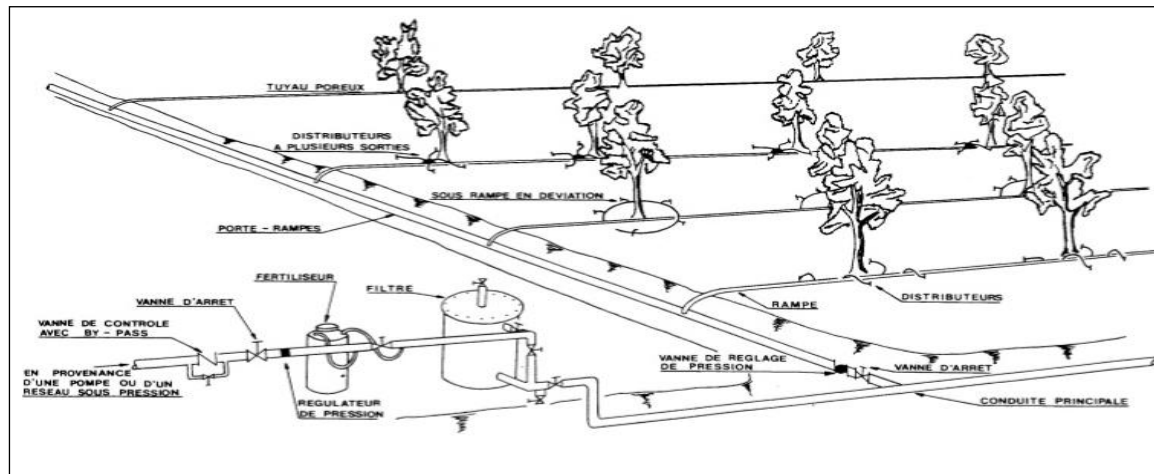
Les surfaces irriguées par cette technique avoisinent les 2 millions d'ha dont 492 700 ha aux USA, selon la CIID en 1991. Aujourd'hui, on estime les surfaces irriguées par la micro-irrigation à plus de 3 millions ha sur les 300 millions d'ha de terres irriguées dans le monde. En Algérie, la technique occupe 20 à 30% sur l'ensemble des terres irriguées autour de 1 million ha (Zella, 2010).

### **2.2. Principe de fonctionnement**

L'irrigation localisée est une technique d'irrigation caractérisée par des apports d'eau faible et répétés presque à la même cadence que l'évapotranspiration (Zella, 2010). L'irrigation goutte à goutte consiste à distribuer l'eau sous faible pression par un réseau ramifié de canalisations totalement en matière plastique (polyéthylène). Le réseau est composé d'une conduite principale qui alimente une conduite secondaire sur laquelle sont fixées des rampes placées parallèlement à l'alignement de la culture.

Les rampes portent l'élément terminal du réseau en l'occurrence le distributeur d'eau, l'émetteur ou le goutteur. Placée le plus souvent au pied du végétal, cet organe est muni d'un orifice ou ajutage de diamètre de l'ordre de moins de 1mm par où l'eau sort sous forme de goutte à la pression atmosphérique. Chaque conduite secondaire arrosée par le biais d'un ensemble de rampes (peine), une aire de 1 à 5 ha définissant l'unité de micro-irrigation. L'ensemble des unités desservies par une même conduite principale détermine le réseau entier totalisant une aire arrosée, appelée zone de 20 à 50 ha (Zella, 2010). Mais quel que soit la taille du réseau, l'aire arrosée dite secteur d'irrigation est desservie par un réseau de

distribution d'eau où l'uniformité de répartition est le facteur déterminant de la réussite du dimensionnement et de l'efficacité de l'arrosage. Cette uniformité peut être obtenue par une régulation parfaite soit à l'échelle du goutteur, soit au niveau des pertes de charge via le choix approprié des dimensions des conduites (Zella, 2010).



**Figure 1. Schéma classique d'un réseau de micro-irrigation**

**Source : (FAO, 2008)**

Cette technique d'irrigation présente de nombreux avantages. En effet, la micro-irrigation s'adapte à tous les types de climat, de sol et de topographie et aussi à différentes qualités de l'eau (salée, saumâtre et usée épurée). Un faible pourcentage de sol est arrosé l'eau, celui-là même qui est utilisé directement pour nourrir les racines des plantes. Sous chaque goutteur le sol occupé est humidifié en permanence par des apports d'eau fréquents et la plante ne connaît plus le stress hydrique. L'eau est utilisée avec une efficacité maximale de 95% et la production agricole est maximale avec une faible quantité d'eau.

L'irrigation localisée est un système très économe en eau, ce qui permet de réduire fortement le phénomène d'évaporation, l'eau ne touche pas les feuilles limitant les risques des maladies cryptogamiques et le développement des mauvaises herbes. Les doses d'eau étant mesurées avec précision, la répartition

d'eau n'est pas affectée par le vent ou par les irrégularités topographiques du terrain, la percolation est également limitée d'où une diminution des pertes d'eau et une meilleure protection de les nappes souterraines, contre la pollution. Cette efficience affecte même la fertilisation étant donné que les engrais sont incorporés dans l'eau d'irrigation au niveau de la tête du réseau à l'aide de doseurs et fertilisateurs.

### **2.3. Inconvénients et avantages de la micro-irrigation**

La technique de micro-irrigation convient dans les zones où l'eau est rare ou chère ou de mauvaise qualité (salée). Elle convient aussi à tous types de sols et de topographie. Elle s'impose là où la main d'œuvre est rare et les cultures sont spéculatives.

Le système peut être couplé avec un programmeur afin d'être automatisé, ce qui permet d'irriguer certaines régions d'environnement hostile sans intervention de l'homme et d'arroser aux heures où il n'y a pas de pertes par évaporation (la nuit).

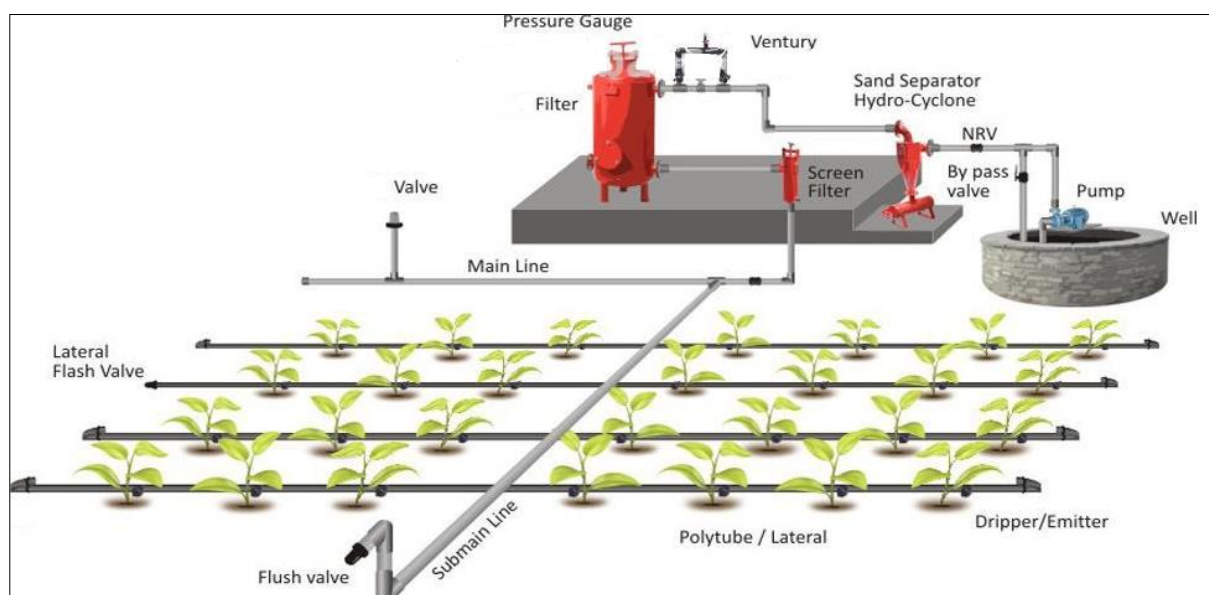
Les contraintes de la micro-irrigation sont dues essentiellement à sa technicité élevée, ainsi le choix du système, son dimensionnement, son installation et son exploitation nécessite un savoir-faire spécialisé. Le système exige une filtration et quelque fois une filtration poussée et un coût élevé d'investissement de départ. Parmi les points noirs de la technique, la vulnérabilité des goutteurs au bouchage et la nécessité d'une maintenance régulière. Il faut préciser que cette technique ne convient pas aux cultures de grande densité de semis

Malgré son automatisation, la technique de micro-irrigation nécessite un entretien régulier et permanent pour garder ses performances. Autres limites du système goutte à goutte c'est que il n'est pas possible de l'utiliser pour les cultures à densité de semis élevée (Zella, 2010).

### 3. Le réseau de la micro-irrigation

#### 3.1. Description

Le réseau de micro-irrigation est composé de deux parties essentielles : la tête et le peigne. La tête comprenant une prise d'eau sous pression qui peut être, soit une station de pompage, soit une jonction sur un réseau sous pression, ou une alimentation à partir d'un réservoir surélevé ou un groupe motopompe.



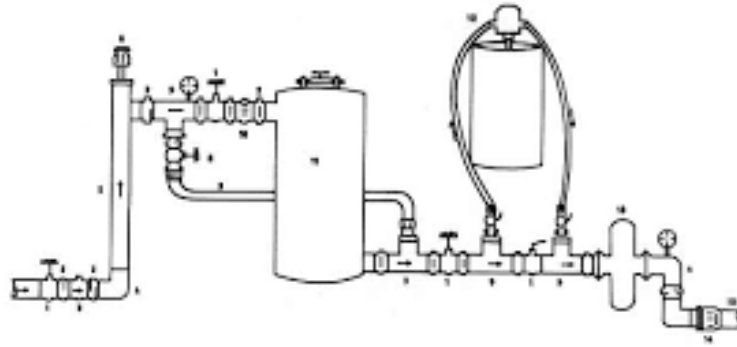
**Figure 2. Réseau type de micro-irrigation**

**Source : (Netafim, 2019)**

Le réseau peut être alimenté directement par une borne d'irrigation, une prise d'eau qui peut être dotée d'automatisme de fermeture et d'ouverture.

#### 3.2. Tête de réseau

Elle se situe à l'amont du réseau et représente la partie la plus chère et la plus importante du système. La tête comprend une prise d'eau sous pression.



**Figure 3. Schéma simplifié d'une tête de réseau de micro-irrigation**

**Source : (FAO, 2008)**

### **3.2.1. Le groupe motopompe**

Le choix de groupe motopompe obéit à plusieurs conditions dont la disponibilité de la source d'énergie (électricité), la nature de la source d'eau (cour d'eau, lac, puits ou forage), le débit souhaité par l'utilisateur et la qualité de l'eau (degré de charge en matière en suspension (Zella, 2010). C'est un ensemble composé d'un moteur électrique ou thermique entraînant une pompe hydraulique. Il comprend souvent des équipements électroniques ou mécaniques pour la régulation de la pression, du débit ou d'autres paramètres.

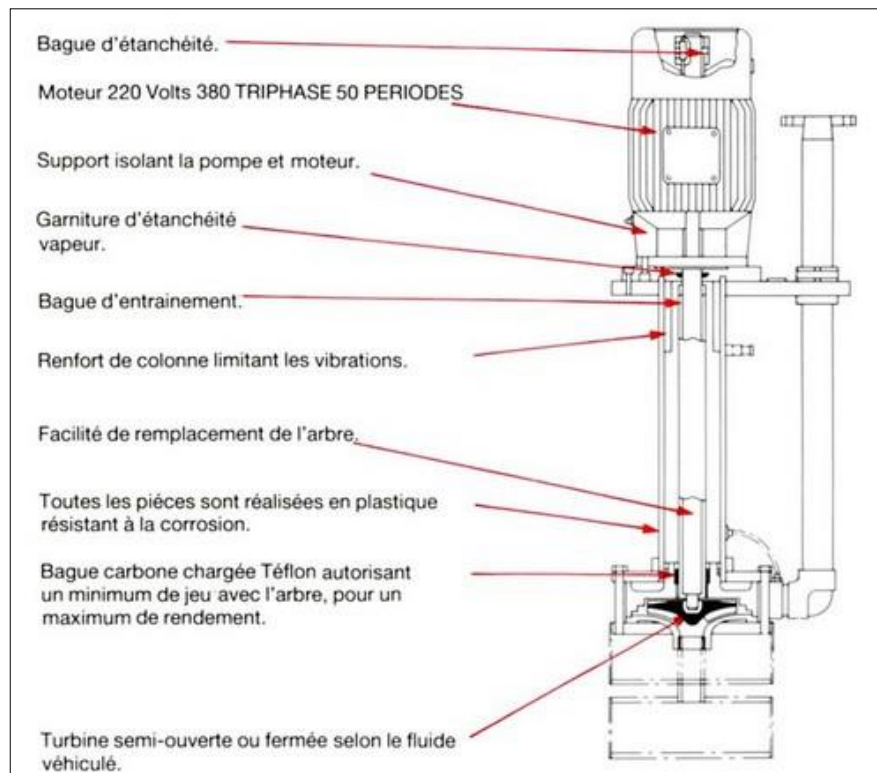


**Figure 4. Pompe centrifugeuse de surface utilisée en micro-irrigation**

**Source : (Netafim, 2019)**



Si la source d'eau est superficielle (lac, cours d'eau ou puits peu profond) inférieur ou égale à 7 m, dans ce cas la mise en pression du réseau est assurée par des pompes centrifuges (pompe de surface).



**Figure 5. Pompe immergée et moteur en surface**

**Source : (Netafim, 2019)**

Il est recommandé d'utiliser une centrifugeuse multi cellulaire immergée dans le fond de puits ou forage dépassant 7 m.



**Figure 6. Groupe motopompe totalement immergé**

**Source : (Netafim, 2019)**

Les pompes immergées multicellulaires, fonctionnent uniquement au refoulement, sont utilisées totalement dans les puits et forages, elles sont immergées plus 7 m de profondeur.

### **3.2.2. La filtration**

La filtration est obligatoire en micro-irrigation, elle permet la protection de tout le système de micro-irrigation et assure une meilleure répartition de l'eau. Une filtration efficace est essentielle pour le bon fonctionnement du système d'irrigation et pour des performances à long terme. Elle empêche les matières en suspension présentes dans l'eau d'irrigation d'obstruer les émetteurs (goutte à goutte, jets, micro-arroseurs) et même les accessoires comme les filtres.

La conception d'un système de filtration implique la sélection d'un type et d'une taille (capacité) de filtre, basée sur la qualité générale de l'alimentation en eau, sur la quantité de particules, sur la concentration des carbonates et de fer dans l'eau. Ainsi que sur le type de nutriments (s'il y en a) ou de solutions chimiques complètes à injecter, conformément aux exigences spécifiques du système de micro-

irrigation. Il existe une panoplie d'appareils de filtration à commencer par la filtration au bout amont de l'entrée d'eau dans le réseau, soit la crépine. Vient ensuite une série de filtres, le filtre à tamis, celui à sable ou encore le filtre hydro cyclone.

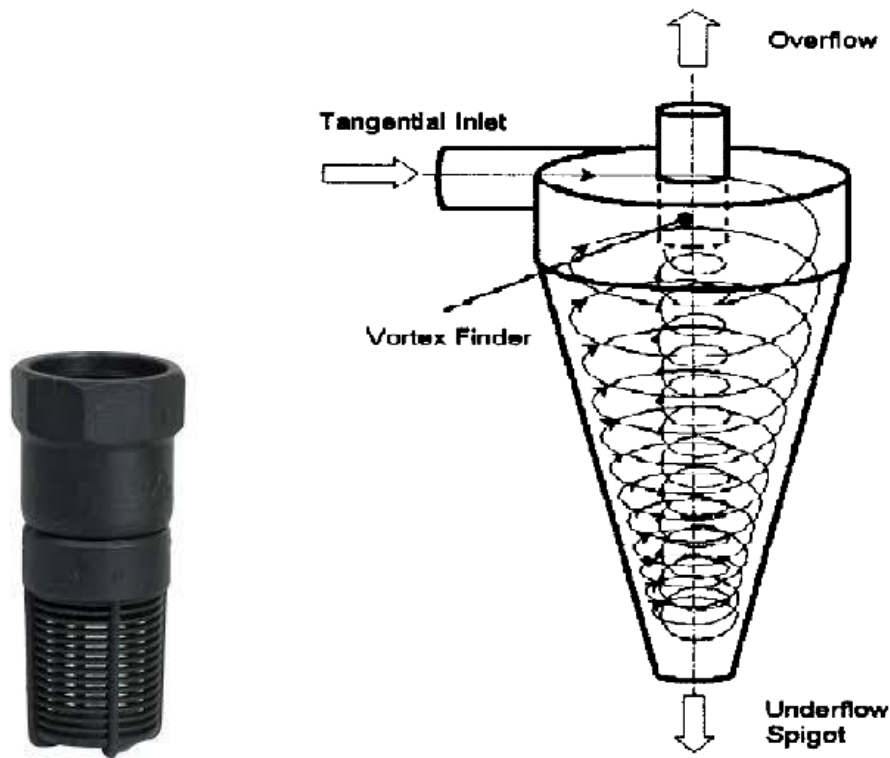


Figure 7. Schéma d'une crépine et d'un hydro-cyclone

Source : (FAO, 2008)

Dans certaines situations une pré-filtration est nécessaire, opérée soit par une crépine ou un hydro-cyclone.

**La crépine** est à l'extrémité de la conduite d'aspiration. Elle empêche la pénétration des corps étrangers pouvant obstruer les canalisations et faire des dégâts dans la pompe ou les réducteurs de pression.

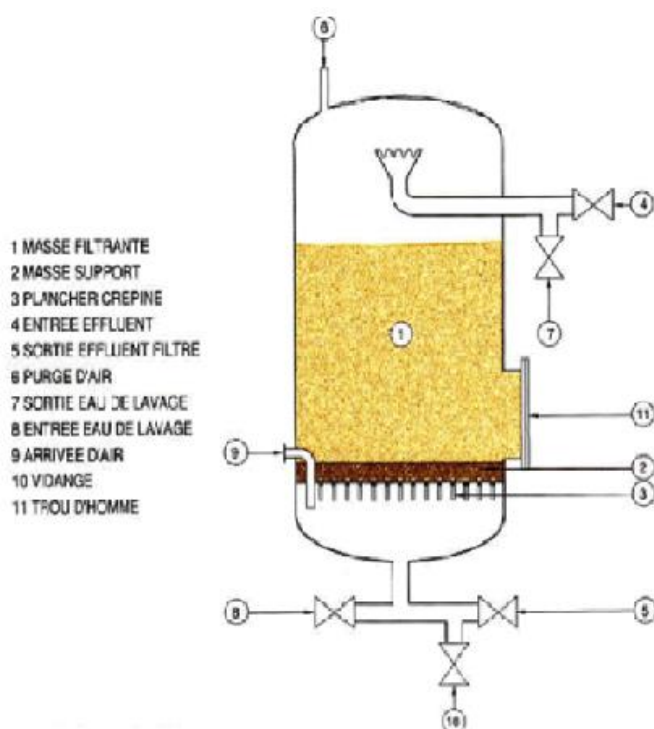
**L'hydro-cyclone** est à placer en tête du réseau, il permet d'éliminer le sable dans les eaux selon le principe du vortex où les particules de sable atteignent la vitesse suffisante pour être évacuées par centrifugation.

Le choix des filtres est tributaire donc de la qualité des eaux d'irrigation. Les eaux souterraines étant souvent de bonne qualité physique que les eaux de surface.

Ces dernières sont susceptibles de connaître de forts développements biologiques (algues et autres petites bêtes) notamment l'été avec l'augmentation de la température et aussi elles peuvent charrier de fortes charges en matières en suspension.

### 3.2.3. Les différents types des filtres

- **Filtre à sable** : C'est un réservoir rempli de sable spécial de granulométrie régulière et calibrée, le plus souvent du sable volcanique, broyé à angles vifs, permettant de mieux retirer les algues, les sables fins voir même les limons. Pour avoir une filtration efficace, il faut réduire la vitesse du passage de l'eau ou le débit mais aussi il faut maintenir un entretien régulier du filtre.



**Figure 8. Filtre à sable à couche superposées**

**Source : (FAO, 2008)**

La FAO recommande certains critères dont une capacité de filtre de 1800 l/mn/m<sup>2</sup>, la vitesse doit être inférieure à 100 m/h, Soit 2,8 cm/s et doit être réduite à 1,4 cm/s lors du contre lavage afin d'éviter l'entérinement du sable par le courant

de l'eau. Même si le filtre à sable se nettoie par contre lavage cependant, il est tout de même conseillé de changer le sable tous les 2 à 3 ans (Zella, 2010).

- **Filtre à tamis:** ou le filtre à cartouches, est principalement utilisé comme filtre secondaire et sert à arrêter les particules pouvant s'échapper aux dessaleurs cyclones ou aux filtres à sable ou les deux à la fois.



**Figure 9. Schéma d'un filtre à tamis**

**Source : (Netafim, 2019)**

Le filtre à tamis est conseillé pour tous les réseaux de micro-irrigation. Ce type de filtre est conçu pour des eaux de relative bonne qualité. Il est moins utilisé pour des eaux de surface (lacs, réservoirs, rivières, etc.). Sa capacité de stockage étant limitée, son emploi serait inefficace dans le cas d'une eau très chargée en limons ou sables. Si un filtre s'avère insuffisant, on lui ajoute d'autres pour avoir une batterie de filtres en série qui éliminent drastiquement comme souhaité les éléments indésirables.



**Figure 10. Photo d'une batterie de filtres à tamis.**

**Source : (Netafim, 2019)**

### **3.2.4. Les pompes doseuses et la fertigation**

La fertigation est l'association de la fertilisation et de l'irrigation, autrement dit c'est l'apport d'engrais dilués dans les eaux d'irrigation grâce à des appareils fertilisateurs dits dilueurs. Le principe consiste d'introduire les fertilisants dont les doses déjà calculées dans un réservoir maintenu sous pression avec une entrée et une sortie d'eau. Les fertilisants ou les engrais sont dilués à la concentration désirée et sont livrés avec l'eau d'irrigation au niveau du goutteur.



**Figure 11. Fertiliseur ou injecteur d'engrais**

**Source : (Netafim, 2019)**

Les pompes doseuses, un peu plus compliquées que les simples dilueurs, sont de deux types :les pompes doseuses électrique couplée à un moteur qui entraîne soit une pompe alternative à membrane ou à piston soit une pompe rotative ou mécanisme qui écrase périodiquement un tuyau souple comme le venturi.

Les pompes doseuses hydrauliques aspirent la solution fertilisante grâce à un piston pour la réinjecter dans la conduite principale. La pompe doseuse doit avoir un débit constant afin d'assurer une concentration constante en fertilisant.

### 3.3. Le peine

Le peine est la partie du réseau formée de conduite, son rôle est de transporter l'eau et de la distribuer sur la parcelle, au niveau de chaque plante. Il est tout en plastique (PE) noir. Les composants du peine sont:

#### 3.3.1. La conduite principale

Elle amène l'eau depuis la tête pour alimenter la ou les conduites secondaires. Elle possède donc le plus grand diamètre du réseau allant jusqu'à 50mm. Elle transporte de gros débit et doit supporter de fortes pressions. La gamme des diamètres standardisés est indiquée dans le tableur suivant.

**Tableau 2. Diamètres nominalisés de la conduite principale**

| Diamètre ext (mm) | Epaisseur (mm) | Poids (kg/m) | Pression à 20°C (bar) |
|-------------------|----------------|--------------|-----------------------|
| 25                | 2,0            | 0,140        | 6                     |
| 32                | 2,4            | 0,184        | 6                     |
| 40                | 2,5            | 0,276        | 6                     |
| 50                | 3,0            | 0,430        | 6                     |
| 63                | 9,8            | 0,690        | 6                     |

**Source : (Netafim, 2019)**

### 3.3.2. Les conduites secondaires

Elles portent les rampes sur lesquelles sont fixés les goutteurs. Les diamètres diminuent de l'amont en aval proportionnellement aux débits et aux pressions.

**Tableau 3. Diamètre normalisée pour la conduite secondaire**

| Diamètre ext (mm) | Epaisseur (mm) | Poids (kg/m) | Pression 20 °C(bar) |
|-------------------|----------------|--------------|---------------------|
| 20                | 2,0            | 0,118        | 6                   |
| 25                | 2,3            | 0,181        | 6                   |
| 32                | 2,4            | 0,300        | 6                   |

**Source : (Netafim, 2019)**

### 3.3.3. Les rampes

Elles sont formées de conduites de section circulaire, flexible ou rigide et classées selon leur résistance à la pression de service et à la température.

La position des rampes peut être très variée, posée à même le sol, accrochée à un fil de palissage à quelques centimètres du sol, ou carrément enterrée au niveau racinaire (Zella, 2010).

Le peigne prend des structures différentes de la plus simple à la plus compliquée selon les besoins de réseau de micro-irrigation. Le choix de la configuration permet des réalisations des économies sur le coût lié aux conduites et aussi sur la pression de service.

Certaines rampes sont-elles mêmes dotées de perforations calibrées jouant le rôle de goutteurs ou intègrent carrément des goutteurs. Elles peuvent être poreuses sur toutes leurs surfaces. L'eau suinte sur toute la longueur avec un débit de 9 l/mètre linéaire et à l'heure.

Les rampes peuvent être posées au sol, en aérien, suspendues sur un palissage, ou bien enterrées. La longueur des rampes, en fonction du diamètre du



tuyau et du débit des goutteurs, des longueurs maximales sont à calculer. De plus si la pression est trop différente entre le début et la fin de la rampe, le débit ne sera pas le même, celui-ci ne doit pas dépasser 20% d'écart.

**Tableau 4. Caractéristiques des rampes utilisées en micro-irrigation**

| Diamètre ext (mm) | Diamètre int (mm) | Epaisseur (mm) | Poids (kg/m) | Pression 20°C (bar) |
|-------------------|-------------------|----------------|--------------|---------------------|
| 12,5              | 10,2              | 1,15           | 0,039        | 4                   |
| 16                | 16                | 1,35           | 0,059        | 4                   |
| 17                | 17                | 1,25           | 0,059        | 4                   |
| 20                | 20                | 1,50           | 0,083        | 4                   |
| 25                | 25                | 1,50           | 0,106        | 4                   |
| 32                | 32                | 2,00           | 0,180        | 4                   |

**Source : (Netafim, 2019)**

#### **3.3.4. Le distributeur ou goutteur**

Il représente l'organe terminal du réseau de micro-irrigation, c'est lui qui délivre l'eau aux plantes, il peut être un capillaire, un goutteur, un diffuseur ou un micro-asperseur. Chacun d'entre eux diffère selon leur mode de fixation sur la rampe, leur fonctionnement hydraulique et les différentes fonctions qu'il assure. Chaque distributeur porte ses propres caractéristiques consignées sur une fiche technique individuelle qui sera sa carte d'identité. On distingue alors les goutteurs en ligne, ou en dérivation, les goutteurs autorégulant et ceux non autorégulant.



**Figure 12. Types de goutteurs. Source : (Netafim, 2019)**

Le goutteur possède des caractéristiques techniques qui sont considérées lors du calcul de dimensionnement.

Le débit du goutteur est proportionnel à la pression au niveau du point d'ancrage sur la rampe. Il obéit à cette loi du débit-pression:

$$q = kH^x \quad (2)$$

Où k est une constante liée aux caractéristiques géométriques du goutteur et x est lié au régime d'écoulement. La valeur de x est souvent proche de 0,5 propre à un écoulement turbulent.

Quand le débit q est exprimé en l/h, on a par exemple pour un goutteur non autorégulent à long cheminement, de débit nominal  $q = 2$  l/h, l'équation :

$$q = 0,34H^{0,77} \quad (3)$$

Dans le cas où q est exprimé en  $m^3/s$ , l'équation s'écrit :

$$q = 9,44 \cdot 10^{-8} H^{0,77} \quad (4)$$

Le goutteur est aussi caractérisé par le coefficient de variation technologique ou de fabrication Cvf. Il renseigne sur la précision d'usinage.

$$CVf = \frac{\sigma_q}{q_{bar}} 100 \quad (5)$$

Avec  $\sigma$  est l'écart type ou déviation standard du débit des goutteurs lors de la fabrication,  $q_{bar}$  est le débit moyen d'un échantillon de n goutteurs.

L'écart type est la mesure statistique de la dispersion des valeurs d'un échantillon ou d'une distribution de probabilité. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou comme la moyenne quadratique des écarts types par rapport à la moyenne.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)} \quad (6)$$

$$CVf = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_i}{q_{bar}} - 1 \right)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

Le Cvf est calculé sur un échantillon de n=20 goutteurs pris au hasard, fonctionnant à une pression donnée. Ce facteur permet de distinguer la qualité technologique des goutteurs.

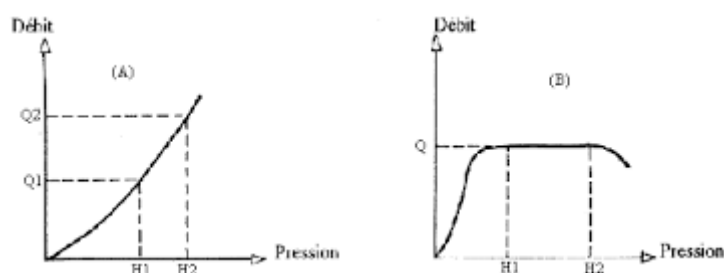
**Tableau 5.Valeurs de Cvf**

| Valeurs de Cvf | Qualité du goutteur |
|----------------|---------------------|
| 0,00-0,03      | Excellente          |
| 0,05-0,07      | Moyenne             |
| 0,08-0,1       | Marginale           |
| 0,11-0,14      | Médiocre            |
| >0,15          | Mauvais             |

**Source : (Zella, 2010)**

Le Cv<sub>f</sub> indiqué dans la fiche technique du goutteur par le fabricant, il permet à l'acheteur de choisir son goutteur en se référant au tableau plus haut. Il est aussi utilisé dans le calcul du coefficient d'uniformité.

Chaque goutteur possède donc une courbe de fonctionnement  $q=f(H)$ , établie par le fabricant. La figure 13 traduit la courbe de fonctionnement du goutteur en ligne non autorégulant et le goutteur en dérivation autorégulant.



**Figure 13. Courbe de fonctionnement (débit pression) d'un goutteur non autorégulant (A) et celle d'un goutteur autorégulant (B)**

Source : (FAO, 2008)

**Tableau 6. Valeurs du coefficient x et qualité du goutteur**

| Valeur de x | Type du goutteur            |
|-------------|-----------------------------|
| 0,8-0,7     | Goutteur à long cheminement |
| 0,52-0,57   | Goutteur à labyrinthe       |
| 0,48        | Goutteur à circuit court    |
| 0,4         | Goutteur cyclone            |
| <0,4        | Goutteur à compensation     |

Source :( Zella, 2010)

La dérivée de l'équation (1) donne :

$$\frac{dq}{q} = x \frac{dH}{H} \quad (8)$$

La variation de la pression entraîne une variation relative du débit d'autant plus grande que x est plus grand. Plus la valeur de x est faible, plus l'influence de la variation de pression sur le débit du goutteur le long de la rampe est faible.

La plupart des goutteurs ont un exposant  $x=0,5$ , ce qui veut dire que l'écoulement est turbulent et que la variation du débit (dq) est la moitié de la variation de pression (dH).

A partir de l'équation (1), on peut écrire :

$$q_1 = kH_1^x \quad (9)$$

$$q_2 = kH_2^x \quad (10)$$

$$k = \frac{q_1}{H_1^x} \quad (11)$$

$$k = \frac{q_2}{H_2^x} \quad (12)$$

$$\frac{q_1}{H_1^x} = \frac{q_2}{H_2^x} = k \quad (13)$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{H_1^x}{H_2^x} = \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^x \quad (14)$$

Enfin, parmi les facteurs utilisés en dimensionnement, l'espacement entre goutteurs (Eg) qui dépendra quant à lui du type de culture. En maraîchage il sera autour de 25 cm, en arboriculture, chez certains arbres comme le pommier ou le poirier, l'espacement ira de 50 cm à 1.00 m. Le nombre de goutteurs au niveau de la parcelle s'élève de 1 500 à 50 000 par ha.

**Tableau 7. Nombre de goutteurs à l'hectare**

| Type de culture  | Nombre de goutteurs/ha | Débit du goutteur | Apport d'eau horaire, mm/h |
|------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|
| Arboriculture    | 1500-2000              | 4                 | 0,6-0,8                    |
|                  | 400-1000 diffuseurs    | 20                | 0,8-2                      |
| C. Maraichères   |                        |                   |                            |
| - plein champ    | 10 000-20000           | 2                 | 2-4                        |
| - serre          | 20 000- 50 000         | 2                 | 10                         |
| Grandes cultures | 10 000-20 000          | 2                 | 2-4                        |

**Source : Compaoré L. (2003).**

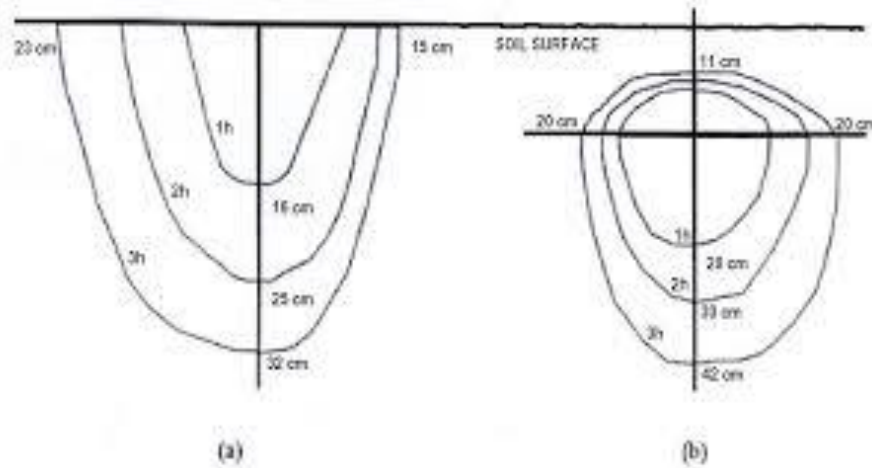
Le goutte à goutte enterré demande une infrastructure spécifique afin de ne pas laisser les tuyaux enterrés remplis d'eau entre chaque irrigation. La filtration doit être particulièrement soignée car un bouchage ne sera pas visible. Il est, dans l'ensemble moins sensible aux insectes, mais des attaques d'insectes sur les membranes de goutteurs enterrés ont pu être constatées dans plusieurs zones en France. La proximité avec le système racinaire renforce l'efficacité des apports en eau. Cependant les coûts d'installation sont encore plus importants. Il limite évidemment le travail du sol. Pour finir, il est encore difficile d'établir la longévité de cette technique sur le long terme.

### **3.3.5. Le bulbe humide**

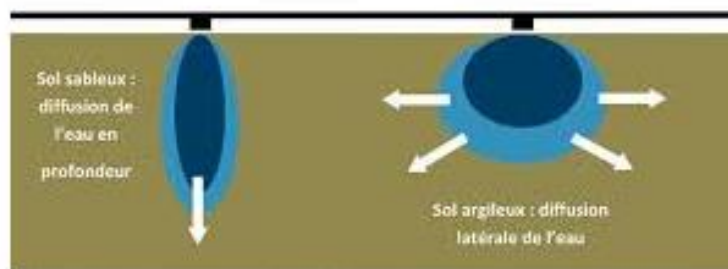
Sous la zone d'apport d'eau par le goutteur, un apport très ponctuel, l'humidité croît lentement aussi bien horizontalement qu'en profondeur.

Le front d'humectation avance latéralement et verticalement sous forme d'écoulement non saturé. L'eau diffuse selon ces directions, soumise sous l'effet

conjugué des forces de gravité et des forces de succion. Il en résulte un bulbe humide de forme plus ou moins elliptique qui s’allonge davantage dans le cas des sols sableux où la perméabilité est nettement plus élevée.

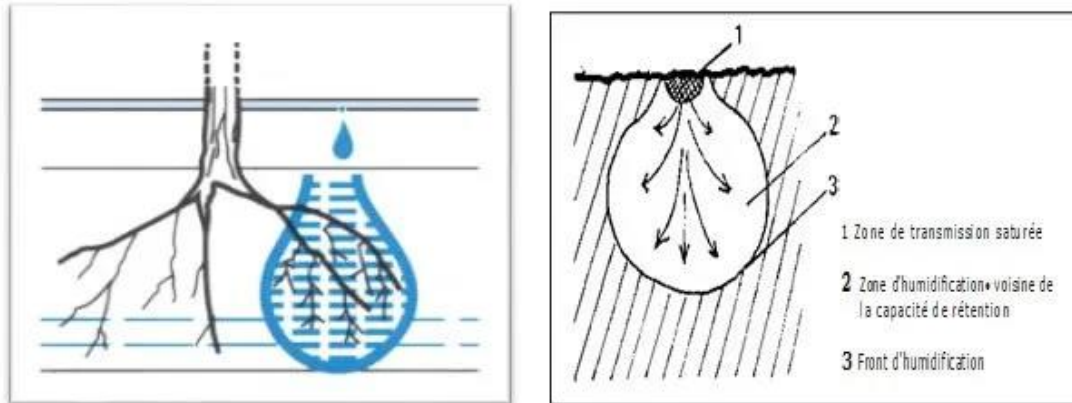


**Figure 14. Profil d’humidité et front d’humectation en fonction du temps d’arrosage. Source : Compaoré L. (2003).**



**Figure 15. Bulbe humide sous un goutteur pour deux types de sol**

**Source : (Netafim, 2019)**



**Figure 16. Structure du bulbe humide.**

**Source : (Netafim, 2019)**

### **3.4. Accessoires du réseau de micro-irrigation**

Tout réseau de micro-irrigation a besoin d'accessoires techniques de contrôle et de régulation (vanne, régulateur de pression et de débit, compteur d'eau, manomètre) ainsi que des pièces de réseau tel que les jonctions et les bouchons.

#### **3.4.1. La vanne**

C'est l'appareil qui assure les débits et les pressions désirées pour une conduite, un secteur ou un réseau complet. La vanne permet la mise en eau ou son arrêt.

#### **3.4.2. La vanne volumétrique**

Ces vannes fonctionnent sans électricité, la quantité d'eau à faire transiter par la vanne est affichée par la déviation d'un index par rapport à la position zéro qui correspond à la position fermée de la vanne. Selon les pressions de l'eau cet index se dérive. Ce type de vanne est conçu pour des doses faibles.

#### **3.4.3. La vanne hydraulique**

Ce type de vanne est toujours jumelé avec une vanne volumétrique qui se ferme dès que la quantité d'eau programmée est passée. Le rôle de l'irrigant ce



limite à afficher sur chaque vanne volumétrique la quantité d'eau à faire transiter à travers chaque vanne.

#### **3.4.4. Régulateur de pression**

Représente un pilot de régulation hydraulique pour gérer au mieux la pression à l'entrée ou à la sortie de la vanne.

De nos jours, des réseaux d'irrigation sont informatisés, automatisés et commandés même à distances par téléphone. Ainsi, la main d'œuvre agricole est réduite et le gain de temps est énorme. Le réseau est contrôlé aussi manuellement ou avec un programmeur.

#### **3.4.5. Débitmètres et limiteurs de débits**

C'est l'appareil qui jauge les débits transitant dans une conduite. Il peut être à ultra sons, électromagnétique, à pression différentielle ou à turbine. Les limiteurs de débit sont de simples diaphragmes en plastique déformable qui agissent sur la section de passage de l'eau en limitant le débit.



**Figure 17. Accessoires utilisés dans un réseau de micro-irrigation**

**Source : (Netafim, 2019)**

#### **3.4.6. Le compteur à eau**

Il est utilisé pour l'évaluation de la consommation de l'eau dans le réseau de micro-irrigation.

### 3.4.7. Le manomètre

Cet appareil est un instrument de mesure de la pression de l'eau dans la conduite, du filtre ou autres accessoires en charge. Il existe plusieurs modèles de manomètre couvrant des plages de pression et de niveau de précision déterminée. Le plus simple des manomètres est un tube en U dont la pression est indiquée par la différence de niveau du liquides (eau, mercure). Le manomètre doit être systématiquement vérifiés ou étalonnés a fin de s'assurer de leur fidélité.

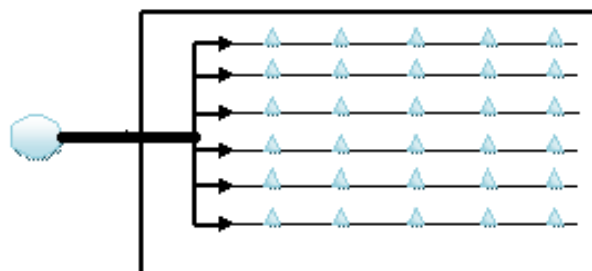


**Figure 18. Manomètre.**

**Source : (Netafim, 2019)**

### 3.5. Structures du réseau de micro-irrigation

La forme structurelle du réseau de micro-irrigation peut changer beaucoup en fonction de la forme géométrique de la parcelle à irriguer, de la position de la source d'eau et des obstacles éventuels sur la parcelle. La forme touche exclusivement le peigne dont la plus classique est celle de la fig. 19 où la conduite secondaire est alimentée en eau au milieu. Le réseau est divisé en deux parties symétriques et il suffit de calculer une partie pour connaître les caractéristiques du réseau.



### Figure 19. Structure 1 du réseau

La seconde structure (fig. 20) représente la moitié du réseau du premier cas, mais la conduite secondaire est alimentée par son extrémité. Les caractéristiques hydrauliques changent totalement.

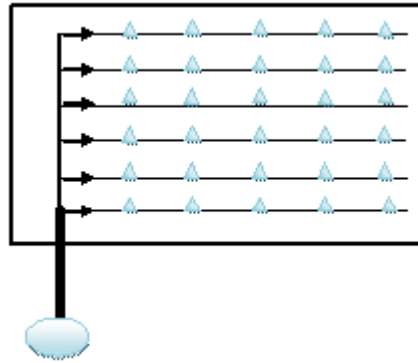


Figure 20. Structure 2 du réseau

Le troisième cas est une série de deux cas de la même forme que le cas 1, où le débit global se divise en 4 parts égales de part et d'autre des conduites secondaires.

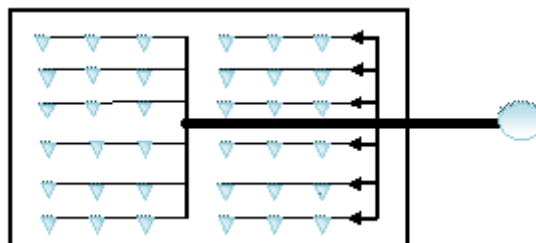


Figure 21. Structure 3 du réseau

Une infinité de structures est possible et chacune d'elle exige un calcul particulier. Certaines formes sont très avantageuses car elles réduisent soit la pression soit le débit.

## 4. Dimensionnement des réseaux de micro-irrigation

### 4.1. Objectifs

Les réseaux de micro-irrigation ne peuvent garantir des rendements hydraulique et agricole satisfaisants s'ils ne sont pas correctement dimensionnés. Le

dimensionnement consiste à choisir les bonnes dimensions (longueur et largeur du réseau, soit les longueurs des rampes, et conduites secondaires ainsi que leurs diamètres. Le dimensionnement concerne aussi le type de goutteur, leur écartement et leur nombre.

L'objectif de ces calculs permet de connaître la distribution de la pression et donc du débit des goutteurs sur l'ensemble du réseau. Aussi, le dimensionnement a pour but d'avoir des débits de goutteurs proche en valeur afin de limiter les écarts. Les dimensions sont choisies de sorte à maximiser l'uniformité des débits des goutteurs.

#### 4.2. Méthodes de dimensionnement

Plusieurs méthodes de calcul sont possibles mais traditionnellement c'est un calcul par tâtonnement qui est opéré afin de trouver les dimensions qui donnent cette uniformité élevée des débits. Les calculs sont donc très fastidieux et complexes et avec l'apparition des moyens de calculs informatisés, plusieurs modèles ou logiciels sont disponibles sur le marché.

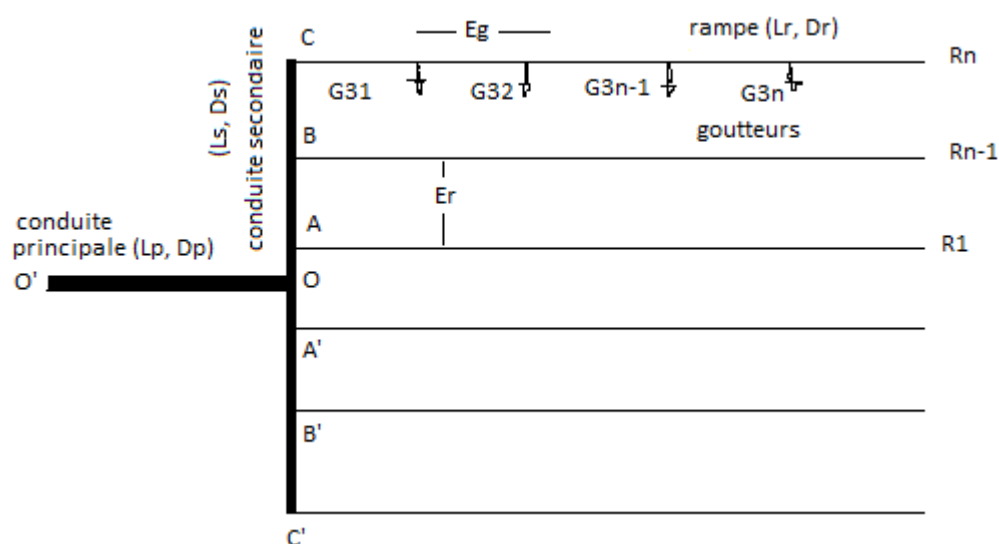


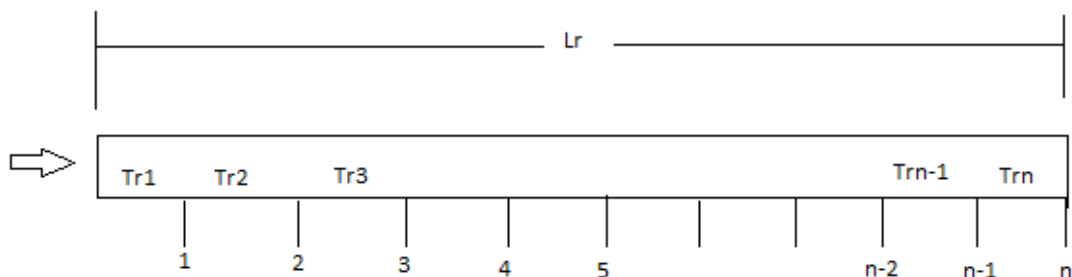
Figure 22. Schéma du réseau de micro-irrigation (modèle)

Dans ce réseau modèle, on peut apporter les notations afin de modéliser le calcul de dimensionnement. On dispose d'un réseau formé d'une conduite principale  $OO'$ , de longueur  $L_p$  et de diamètre  $D_p$ , d'une longueur secondaire de longueur totale  $L_s$  et de diamètre  $D_s$ , elle est divisée en deux parts égales au point  $O$ . Le débit de la conduite principale se divise en deux au point  $O$  et atteindra le point  $A$  dont une partie est véhiculée dans la rampe  $R_1$ . Au point  $B$ , part un débit dans la rampe suivante  $R_{n-1}$  et au point  $C$ , part un débit dans la dernière rampe  $R_n$ . On peut noter ces débits partiels,  $Q_A, Q_B$  et  $Q_C$ .

On peut écrire l'équation :  $Q_t = 2(Q_A + Q_B + Q_C)$ ,

avec  $Q_t$  le débit total dans la conduite principale, égal à  $\sum q_i$  du réseau.

Si on considère une rampe munie de  $n$  goutteurs identiques et équidistants de  $E_g$ , de longueur totale  $L_r = \sum Tr$ ,  $Tr$  étant la longueur constante entre les goutteurs, on peut la schématiser par la figure 23.



**Figure 23. Positionnement des goutteurs et des tronçons entre goutteurs sur la rampe**

Le débit total de la rampe  $Q_r$ , au niveau de l'extrémité amont, diminue à chaque goutteur, soit après chaque distance  $Tr$ . Au dernier tronçon  $Tr_n$ , le débit n'est plus que  $Q(Tr_n)$ , c'est-à-dire le débit du dernier goutteur tel que :

$$Q(Tr_n) = q_n \quad (15)$$

De l'extrémité amont à l'extrémité aval, la pression diminue à cause de la perte de charge que l'on peut évaluer pas à pas au niveau de chaque tronçon.

En conséquence, comme le débit  $q$  du goutteur étant proportionnel à la pression  $H$ , il diminue à fur et à mesure le long de la rampe, tel que le débit le plus élevé est  $q_1=q_{\max}$  et le plus faible est  $q_n=q_{\min}$ , donc  $q_{\max}$  correspond à  $H_{\max}$  et pour  $q_{\min}$  correspond à  $H_{\min}$ .

En outre, la variation du débit le long de la rampe est ( $q_{\text{var}}$ ):

$$q_{\text{var}} = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max}} \quad (16)$$

$$H_{\text{var}} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max}} \quad (17)$$

$$q_{\text{var}} = 1 - (1 - h_{\text{var}})^x \quad (18)$$

Quand  $x=0$ , la variation est nulle, quand  $x=1$  (régime laminaire), le débit  $q$  aura la même variation que la pression  $H$ , on aura  $q=H$  et enfin quand  $x=0,5$  (régime turbulent) la variation de la pression de 20% correspond à une variation de débit de 10%, ce qui est souvent le cas et de la même manière que  $x \geq 0,5$ .

Pour la plupart des goutteurs, l'exposant  $x$  est compris entre 0,4 et 1. La connaissance du coefficient  $K$  et de l'exposant  $x$  est d'une grande importance pour le dimensionnement du réseau. L'exposant  $x$  est en effet déterminant pour le degré de dépendance du débit du goutteur aux variations de pression.

A partir de l'équation (2) du goutteur, on peut facilement montrer que la variation relative du débit du goutteur est directement proportionnelle à la variation relative de la pression et à l'exposant  $x$ .

Des valeurs élevées de l'exposant (cas des goutteurs à écoulement laminaire), signifient une forte influence des variations de pression sur le débit. En revanche, les goutteurs 'turbulents' sont moins sensibles aux variations de pression. Cela veut dire que pour une même variation tolérée du débit, la variation de pression peut être plus grande pour un goutteur 'turbulent' que pour un goutteur 'laminaire'. Aussi du fait de la dépendance de l'écoulement laminaire à la viscosité de l'eau, le débit des goutteurs à régime laminaire sera plus sensible aux variations de température. L'augmentation de celle-ci s'accompagne de celle du débit du goutteur.

Une valeur faible de K indique un petit diamètre de l'orifice de sortie et donc une plus grande sensibilité à l'obstruction.

Pour un goutteur de débit nominal  $q_n=4$  l/h, avec  $H_n= 10$  m, le  $q_{var}=dq/q=\pm 5\%$ , soit  $q_{min}=3,8$  l/h et  $q_{max}= 4,2$  l/h, le débit moyen  $q_{moy} = \bar{q}$  :

$$q_{moy} = \frac{q_{max} + q_{min}}{2} \quad (19)$$

Compte-tenu de la formule (7)  $\frac{dq}{q} = x \frac{dH}{H}$ , On peut déduire  $dH/H=10/0,5=20\%$ ,

$H_{min}= 9$  m et  $H_{max}= 11$  m

Si tel est le cas, le coefficient d'uniformité du débit (CUq) est  $>95\%$ .

Ce coefficient (CUq) est la clé du dimensionnement des réseaux de micro-irrigation, car plus sa valeur s'écarte, en diminuant vers des valeurs inférieures à 95%, plus l'écart entre le débit des goutteurs est grand, ce qui n'est souhaité et accepté en irrigation. Cela veut dire que certaines plantes vont avoir le double de la dose d'irrigation que d'autres. Là où le débit est minimal, l'application de l'eau doit être suffisante pour une croissance optimale de la culture. On peut estimer le CUq de différentes manières :

$$CU= 1,0865 C_v \quad (20)$$

$$CU=100(1-C_v) \quad (21)$$

$$CU=-0,0095+0,4288 q_{var} \quad (22)$$

$$CU= 1,0085-0,3702 q_{var} \quad (23)$$

Dans le cas où le réseau est déjà en place, on peut estimer le CU par voie expérimentale selon :

$$CU = \frac{\text{debit de 25\% des goutteurs les plus faibles}}{\bar{q}} 100 \quad (24)$$

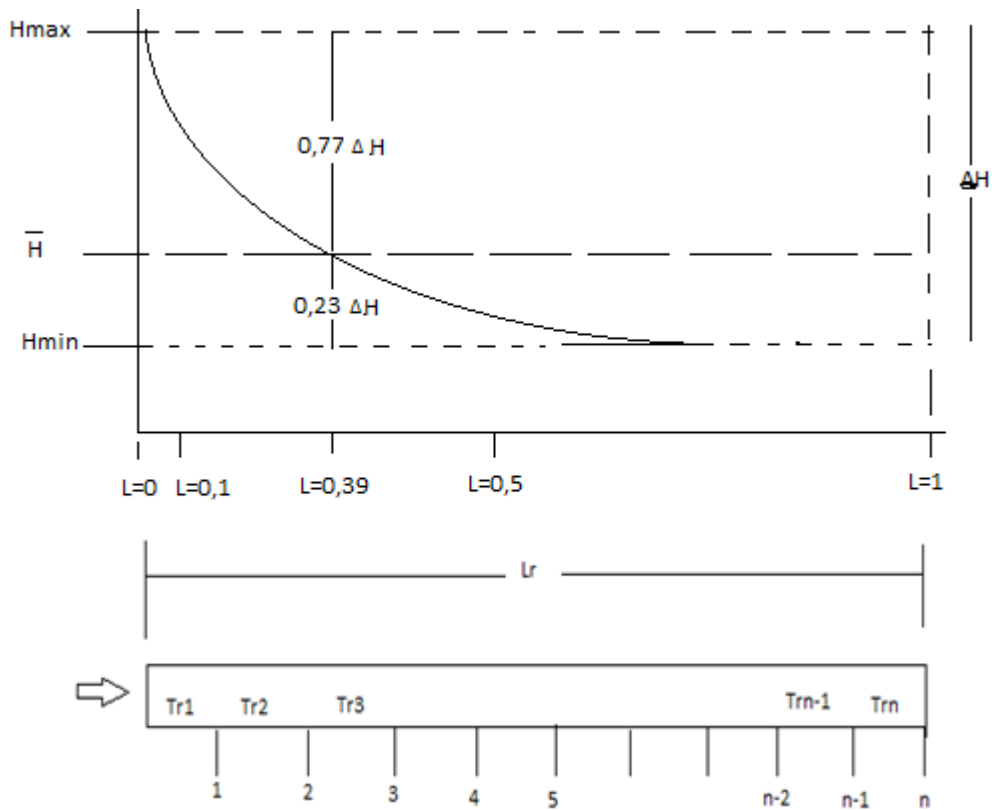
$$CU = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})}{n\bar{q}} \right] \quad (25)$$

Et enfin un coefficient d'uniformité proposé par Keller et Karmeli :

$$CU = 100 \left[ 1 - \left( 1,27 \frac{CVf}{\sqrt{n}} \right) \frac{q_{\min}}{q} \right] \quad (26)$$

Sur la figure 23, on voit le positionnement des n goutteurs le long de la rampe, on se donne  $L=0$  pour la tête de rampe,  $L=0,5$  au milieu de la rampe et  $L=1$  pour l'extrémité aval. Ainsi, on peut déduire  $q_{\max}$  et  $q_{\min}$ ,  $H_{\max}$  et  $H_{\min}$  ainsi que  $q_{\text{moy}}$  et  $H_{\text{moy}}$ . De nombreuses expériences (Keller et Karmeli, 1974) ont montré que pour une large gamme d'exposant  $x$  du goutteur, la pression moyenne le long de la rampe, se situe au point de position relative  $L=0,39$ . En amont de ce point intervient 77% de la perte de charge totale ( $\Delta H$ ) et 23% en aval.





**Figure 24. Positionnement des pressions le long de la rampe**

La rampe est hydrauliquement parlant, une conduite avec le service en route assuré par les goutteurs. Sa perte de charge  $\Delta H$  peut être estimée à partir de la valeur approximative de la perte de charge  $\Delta H_f$ , celle d'une conduite identique transportant la totalité du débit jusqu'à son extrémité aval (service d'extrémité), tel que :

$$\Delta H = \Delta H_f / 3 \quad (27)$$

Le calcul de la perte de charge totale est en général effectué à l'aide de la formule de Williams-Hazen :

$$\Delta H = 2,78 \cdot 10^{-6} FLD^{-4,871} \left( \frac{Qr}{C} \right)^{1,852} \quad (28)$$

avec L : longueur de la rampe, D : diamètre de la rampe, n : nombre des goutteurs sur la rampe ( $n > 20$ ),  $Q = q \cdot n$  débit en tête de rampe en  $m^3/h$ , égal au débit du

goutteur q par leur nombre n, F : coefficient de réduction de la perte de charge

F=0,36 et C : coefficient de perte de charge

C=130 pour les tuyaux en plastique pour les diamètres D<15 mm

C=140 pour les tuyaux en plastique pour les diamètres D : 15 -25 mm

C=150 pour les tuyaux en plastique pour les diamètres D : 25-30 mm

La formule d'origine est :

$$\Delta H = 2,78.10^{-6} LD^{-4,871} \left( \frac{Qr}{C} \right)^{1,852} \quad (29)$$

La perte de charge unitaire est :

$$J = \frac{\Delta H}{L} = 2,78.10^{-6} D^{-4,871} \left( \frac{Qr}{C} \right)^{1,852} \quad (30)$$

avec L en m, J : en m/m,  $\Delta H$  : en m, Q : m<sup>3</sup>/h, D en m,

Autres formules utilisées, celle de Guyon-Pernes :

$$J = \frac{\Delta H}{L} = 8 \cdot 10^5 D^{-4,75} Q^{1,75} \quad (31)$$

Avec J en m/m, Q en l/s et D en m/m, la formule peut s'écrire :

$$J = \frac{\Delta H}{L} = 0,478 D^{-4,75} Q^{1,75} \quad (32)$$

Avec J en m/m, Q en l/h et D en mm.

$$\Delta H = J.L \quad (33)$$

Le calcul de  $\Delta H_1$  correspondant au premier tronçon  $Tr_1$ , puis  $\Delta H_1$  tronçon  $TR_2$  et ainsi de suite jusqu'au tronçon  $TR_n$ . La somme des pertes de charge de chaque tronçon donne la perte de charge totale sur la rampe 1, puis 2 et ainsi pour toutes les rampes.

On peut alors estimer la pression au départ de chaque rampe et au niveau de chaque goutteur. La connaissance de la distribution de la pression le long de la rampe, permet de calculer le débit de chaque goutteur au moyen de l'équation (2). La pression au départ de la conduite principale est aussi calculée ce qui permet de connaître la pression et le débit du groupe motopompe.

La connaissance des débits de tous les goutteurs autorise le calcul du CU, sa valeur doit être  $>90$  pour accepter les dimensions choisies. Sinon on change les dimensions et on refait le calcul.

#### **4.3. Les études et expériences antérieures**

Plusieurs études ont été réalisées dans le domaine de la micro-irrigation, et notamment sur le sujet du dimensionnement. La difficulté de ces calculs c'est que le débit dans les rampes est tributaire de la pression. Dans ce cas, la mise en équations de la rampe ou du réseau aboutit à des équations ayant deux inconnues (la pression et le débit). C'est donc la résolution de ces équations qui est difficile voire impossible analytiquement, on a souvent recours aux méthodes numériques pour les résoudre en s'aidant de programme informatique. C'est le cas des publications de (Zella et al., 2005), où est concentré le travail sur les méthodes de dimensionnement d'abord d'une rampe de micro-irrigation et ensuite ces méthodes ont été extrapolées à d'un réseau complet et ses diverses dispositions géométriques.

C'est pour contourner ces corvées de calcul long et fastidieux, que l'on a inventé les logiciels de calcul de dimensionnement. Il existe une panoplie de ces moyens de calcul plus ou moins difficile à acquérir et surtout à maîtriser. Parmi ces logiciels on peut citer Epanet, Irricad, Hydrocalc et Irripro.

Ce dernier qui est utilisé dans cette étude, a été testé déjà par Salah Eddine K. (2019), où le modèle Irripro a pu être testé pour réaliser plusieurs esquisses de dimensionnement d'un réseau virtuel de micro-irrigation.

Un autre programme HYDRUS-2D / 3D a été utilisé par L. R. Sinobas and M. G. Rodriguez (2012), Simunek et al. (1999), il comprend un modèle de calcul utilisant la méthode de calcul numérique des éléments finis, Permettant de simuler le mouvement bidimensionnel et tridimensionnel de l'eau, de la chaleur et des solutés dans les milieux à saturation variable. Il permet de simuler et prédire l'infiltration de l'eau en résolvant numériquement l'équation de Richard. Ce programme est recommandé comme outil pour la conception et dimensionnement des systèmes de micro-irrigation, notamment souterraine. Le bulbe humide peut ainsi être connu grâce à cette simulation.

## Chapitre 2. MATERIEL ET METHODES

Le but de cette étude est d'atteindre un dimensionnement rapide et approprié d'un réseau de micro-irrigation choisi au hasard qui permet une distribution uniforme de l'eau au niveau de la parcelle irriguée.

### 1. Le matériel

#### 1.1. Le réseau

Il s'agit d'un matériel virtuel qui comporte, une parcelle avec des dimensions (longueur  $L= 100$  m et largeur  $l= 100$  m) sa topographie (pente  $i=0$ ) et sa géométrie (carré, rectangle). Une source d'eau approvisionne la conduite principale de longueur  $L_p= 5$  m et de diamètre  $D_p= 30$  mm) jusqu'au réseau (peigne), l'eau est distribuée à la conduite porte-rampe ou conduite secondaire de longueur  $L_s=100$  m et  $D_s= 24$  mm, des rampes identiques et équidistantes de  $\Delta R= 4$  m, les rampes sont similaires et égales, de longueur  $L_r=100$  m chacune et de diamètres ( $D_{ir}=14,20$  mm et  $D_{er}= 16,20$  mm). On retiendra  $D_r= 14,20$  mm.

Enfin un type de goutteur est choisi avec ses coefficients ( $k, x$ ). Le goutteur a un débit nominal ( $q_n$ ) égal à  $4 \text{ l/h}$  à pression nominale  $H_n= 10$  m ou 1 bar. Le goutteur supporte jusqu'à une pression max de fonctionnement de 2 bars et a un  $C_vf=4\%$ .

L'équation de fonctionnement du goutteur est  $q=1,325H^{0,48}$

C'est un goutteur type circuit court, démontable, avec des dimensions de passage de l'eau :  $1,27 \times 1,20 \times 50$  mm. Ces dimensions exigent une filtration d'eau autour de  $200/80$  microns/mesh.

L'écartement entre goutteurs ( $\Delta g$ ) est constant dans tout le réseau,  $\Delta g= 20$  cm. On peut faire varier tout ces paramètres dimensionnels à volonté afin d'obtenir le réseau idéal (le moins cher et qui offre le meilleur coefficient d'uniformité  $CU_q$ ).

L'eau utilisée est supposée à la température moyenne de  $20^\circ\text{C}$ .

La forme du réseau est représentée plus bas dans la figure, la conduite secondaire est alimentée en eau en son milieu, le calcul concerne uniquement la moitié, l'autre étant parfaitement symétrique.

## 1.2. La parcelle

La parcelle qui supporte la culture a une forme géométrique carrée de 100x100 m, elle est parfaitement plate, donc sa pente  $i$  est nulle. Sa surface est donc de un hectare. La source d'eau est à 5 m de la parcelle.

Outre ce matériel, on utilise un logiciel de calcul (matériel de calcul) nommé Irripro

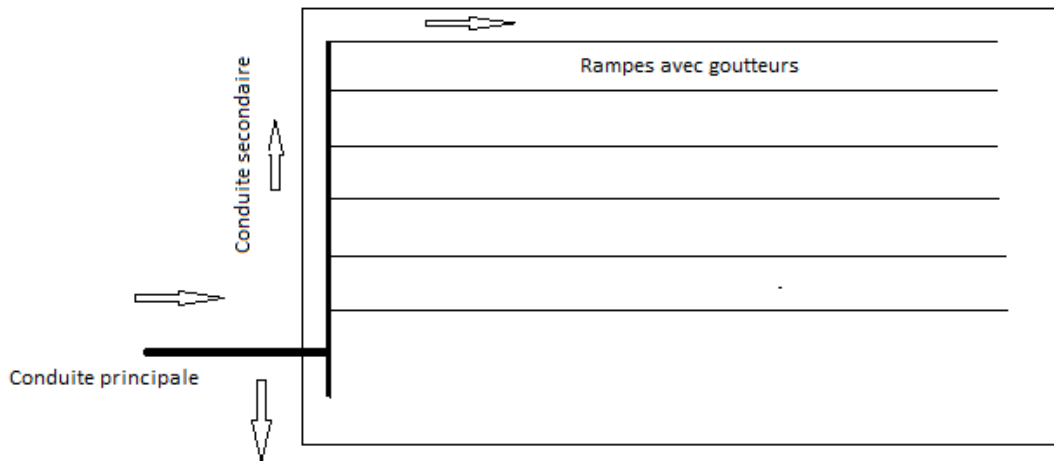


Figure 25. Le réseau virtuel de logiciel Irripro

## 2. Méthodes

La méthode utilisée pour le dimensionnement du réseau décrit précédemment, est le logiciel de calcul Irripro. Ce dernier est disponible sur le net et téléchargeable gratuitement. C'est un logiciel type boîte noire.

Il a de larges options d'utilisation et de choix. Il dispose de sa propre base de données qui peut être enrichie par l'utilisateur, allant des caractéristiques des conduites, aux divers types de goutteurs et mêmes des photos satellites ou cartes topographiques et enfin les prix unitaire de chaque matériel utilisé. A cet effet, le logiciel peut calculer les couts détaillés et le cout final de l'équipement.

Irripro est capable de suivre le comportement de la plante en apportant une irrigation de qualité. Il permet de calculer la solution exacte de la distribution de l'eau dans chaque point du sol, même en présence d'une pente, même si la surface à irriguer est de forme quelconque et même si le réseau est composé de plusieurs

dizaines de milliers d'émetteurs. Capable de concevoir des systèmes d'irrigation de n'importe quelle complexité et taille d'une manière facile, puissante, innovatrice et productive. Il augmente l'efficacité du système et assure la distribution appropriée de l'eau et des engrais.

Permet également, même dans le cas des installations de *micro-irrigation*, d'évaluer les pertes de charge du type continu le long du tuyau et du type localisé causées par les émetteurs installés le long des conduites latérales. Il est possible de calculer tous paramètres et conception hydrauliques correctement et efficacement de n'importe quel genre de système.

Il possède une interface facile à utiliser de DAO-modèle, conçue pour être employée par des ingénieurs, des agronomes et d'autres techniciens. Estimer les conséquences de n'importe quel choix de conception et pour représenter la tendance de n'importe quel paramètre physique.

Irripro optimise l'utilisation de l'eau et améliore l'uniformité de distribution, en augmentant l'efficacité du système, en assurant la distribution correcte de l'eau et des engrais et en améliorant la quantité et la qualité de la production agricole.

Parmi les entrées exigées par le logiciel Irripro, il s'agit de tous les paramètres cités dans le paragraphe matériel.

Les sorties, c'est-à-dire les résultats qu'il fournit sont essentiellement, les pressions max et min, le coefficient d'uniformité en deux versions et les vitesses de l'eau.

### Chapitre 3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### 1. Le goutteur

C'est un goutteur de type circuit court, non autorégulant, démontable, avec des dimensions de passage de l'eau : 1,27x1,20x50 mm. Ces dimensions exigent par conséquent une filtration d'eau autour de 200/80 microns/mesh. Le goutteur a un débit nominal ( $q_n$ ) égal à 4 l/h à pression nominale  $H_n= 10$  m ou 1 bar. Le goutteur supporte jusqu'à une pression max de fonctionnement de 2 bars.

$q=KH^x$  avec  $K=1,325$  et  $x=0,48$ ,  $q$  exprimé en l/h

$$q=1,325H^{0,48}$$

Ayant son équation caractéristique, on peut tracer sa courbe de fonctionnement  $q=f(H)$ .

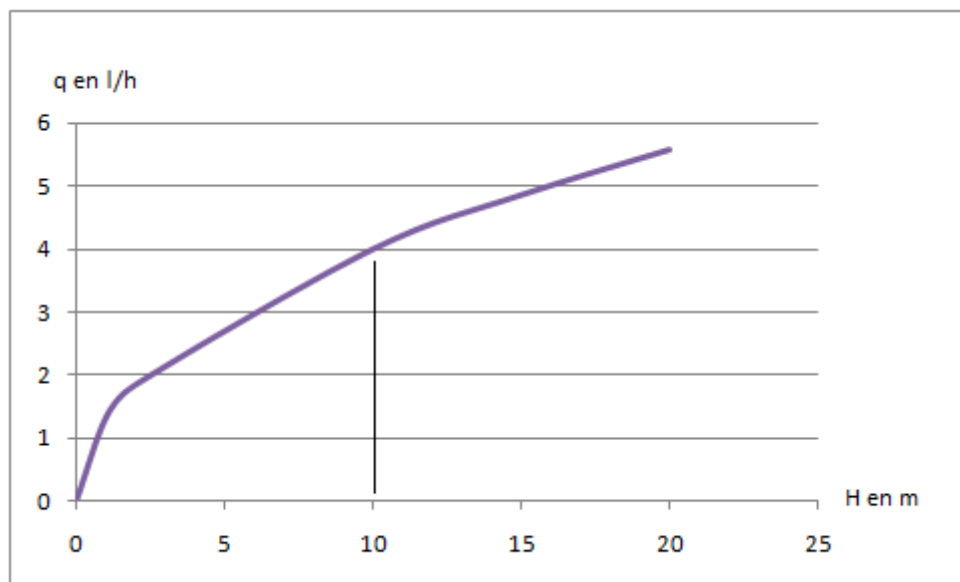


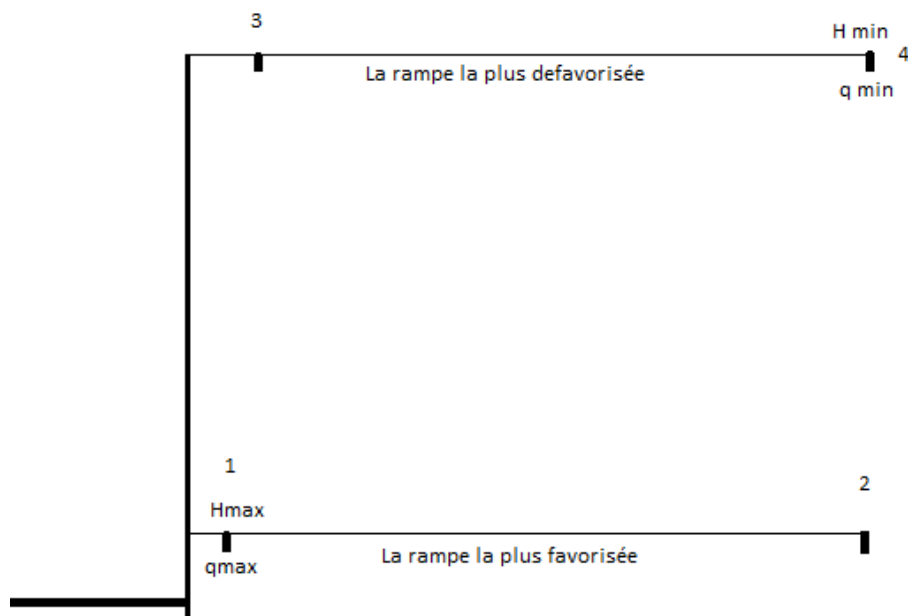
Figure 26. Courbe de fonctionnement du goutteur choisi

On peut vérifier qu'à une pression  $H=10$  m, le débit nominal est  $q_n=4$  l/h.



## 2. Le réseau

Les résultats fournis par le logiciel Irripro permettent de matérialiser les pressions et les débits sur le réseau. Ainsi on peut sélectionner les extrémités du réseau, avec la rampe la plus défavorisée se trouvant en aval et la rampe la plus favorisée se trouvant en amont.



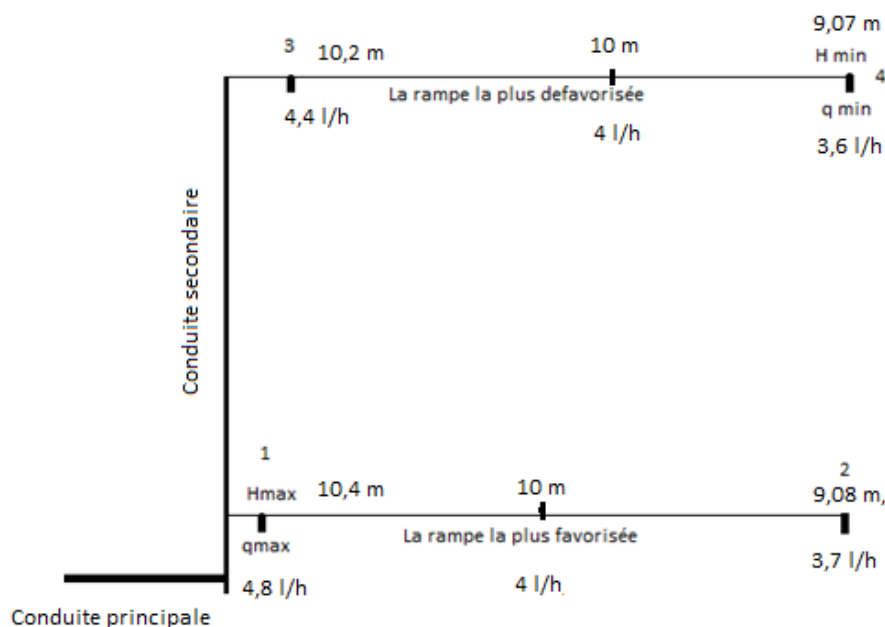
**Figure 27. Les rampes des extrémités et les  $q_{max}$  et  $q_{min}$**

La figure représente la moitié du réseau avec uniquement la rampe la plus favorisée qui dispose de  $q_{max}$  de tout le réseau et la rampe la plus défavorisée avec de le débit le plus faible du réseau  $q_{min}$ . A ces débits max et min correspondent les pressions  $H_{max}$  et  $H_{min}$ .

Au niveau de la rampe de l'amont, le goutteur 1 (fig. 27) a le débit le plus élevé du réseau,  $q_{max} =$  avec sa symétrie de l'autre côté. Le débit 1 est supérieur au débit 2.

La dernière rampe en aval, elle est la plus défavorisée et dispose du débit le plus faible du réseau  $q_{min}$ , sachant que le débit  $q_3$  est supérieur à  $q_4$ . C'est-à-dire que

sur chaque rampe on un débit max et un débit min appartenant aux goutteurs des extrémités.



**Figure 28. Distribution des pressions et des débits dans les rampes des extrémités**

La longueur de la rampe est  $L_r=100$  m, sachant que l'écartement entre goutteur est  $\Delta g=20$  cm, le nombre de goutteurs sur la rampe est  $L_r/ \Delta g=500$  goutteurs.

D'autre part, la longueur de la conduite secondaire est aussi  $L_s= 100$  m, et l'écartement entre les rampes est  $\Delta R=4$  m, d'où  $L_s/ \Delta g=25$  rampe, c'est un nombre impair, on peut rajouter 4 m et installer la 26 eme rampe, et on aura 13 rampes de chaque côté de la jonction avec la conduite principale.

Si on a 26 rampes dans le réseau, on aura un nombre total de goutteurs :  $NG=26.500=13\ 000$  goutteurs. Le débit nécessaire à l'irrigation par heure est :  $13000 \cdot 4=52\ 000$  l/h =  $52$  m<sup>3</sup>/h.

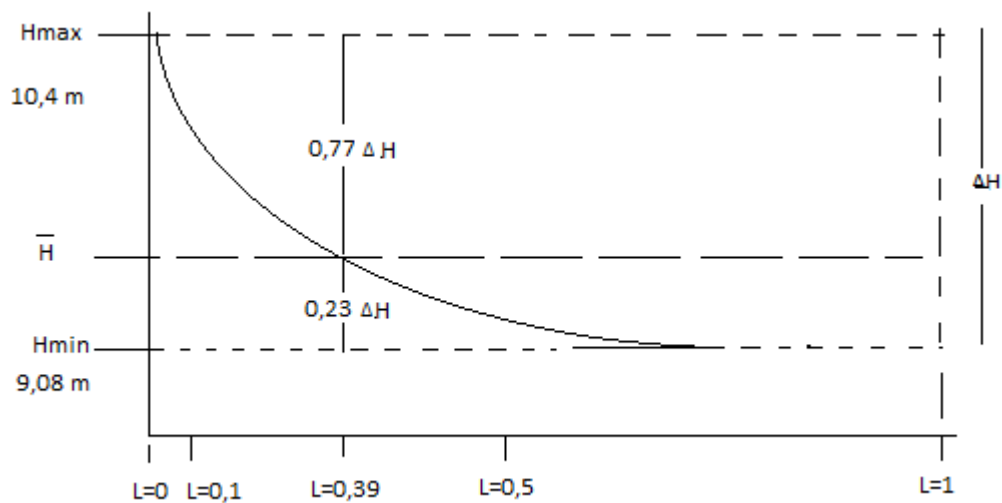
Le débit de tous les 13000 goutteurs du réseau est compris entre ces deux valeurs  $q_{max}= 4,8$  l/h et  $q_{min}=3,6$  l/h. La variation du débit dans le réseau est évaluée par la relation :

$$q_{\text{var}} = \frac{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}}{q_{\text{max}}}$$

$$q_{\text{var}} = (4,8 - 3,6) / 4,8 = 25\%$$

$$H_{\text{var}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}}}$$

$$H_{\text{var}} = (10,4 - 9,07) / 10,4 = 12,7\%$$



**Figure 29. Variation de la pression le long de la rampe favorisée 1**

On voit à travers ce graphique que plus la perte de charge  $\Delta H$  est grande, plus l'écart entre les pressions aux extrémités de la rampe est grand et plus l'écart entre les débits des goutteurs aux extrémités est important. Les écarts importants induisent des CU faibles.

Le débit moyen dans le réseau, à ne pas confondre avec le débit nominal ( $q_n$ ) est évalué par :

$$q_{\text{moy}} = \frac{q_{\text{max}} + q_{\text{min}}}{2}$$

$$q_{\text{moy}} = (4,8 + 3,6) / 2 = 4,2 \text{ l/h}$$

Ce débit correspond à la pression moyenne :  $H_{\text{moy}} = \frac{H_{\text{max}} + H_{\text{min}}}{2}$

$$H_{\text{moy}} = (10,4 + 9,07) / 2 = 9,55 \text{ m}$$

La vitesse moyenne est  $V_{\text{moy}}=1,2$  m/s

**Tableau 8. Itérations pour le calcul du CU**

| N°<br>itération | Dr en mm | CU en % |
|-----------------|----------|---------|
| 1               | 10       | 82      |
| 2               | 12       | 90      |
| 3               | 13       | 92      |
| 4               | 14       | 95      |
| 5               | 15       | 97      |
| 6               | 16       | 98      |

Les longueurs des différentes conduites du réseau sont fixées ici par la configuration de la parcelle, il reste alors de jouer sur la valeur des diamètres pour aboutir au coefficient d'uniformité (CU) désiré soit 95%. Les diamètres qui correspondent à ce CU sont le diamètre de la rampe  $D_r=14,2$  mm, celui de la conduite secondaire  $D_s=24$  mm et de la conduite principale  $D_p=30$  mm.

(Salah eddine, 2019) a appliqué déjà ce logiciel à un autre type de réseau, et les résultats ont été positifs.

## **CONCLUSION**

Le logiciel Irripro est un outil de dimensionnement des réseaux de micro irrigation. En garantissant un calcul rapide et précis, il aide le concepteur de réseau de micro irrigation à proposer des réseaux performants, moins chers, en assurant une meilleure repartitions d'eau et des fertilisants. Des réseaux correctement dimensionnés participent à lutter contre la gabegie de l'eau et la pollution des nappes. C'est un outil intéressant à maîtriser pur les bonnes prises de décisions.

## Références bibliographiques

1. CIID (1991). Nouvelles CIID. Revue Gestion de l'eau pour l'agriculture. 8P.
2. Compaoré L. (2003). Cours de micro-irrigation. Doc.pdf, 150P.
3. FAO (2018). L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde. Ed. FAO, Rome. 178P.
4. FAO (2008). Manuel des techniques d'irrigation sous pression.49P.
5. Feyen J, Leliaert L. et Badji M. (1982). Traité pratique de l'irrigation sous pression. Ed. Université catholique de Leuven, 230P.
6. Netafim (2019). Goutte à goutte, catalogue produits et solution. Vol. 1, 128P.
7. Vabre C., S. Chiva, V. Leonor, H. López, J. Enrique, J. Bolívar. (2012). Manuel d'utilisation du programme de calcul CECIIL (Calcul Et Conception d'Infrastructures d'Irrigation Localisée). Ed. , PSYLICOM, Valencia, 68P.
8. Salah eddine K. (2019). Utilisation du logiciel Irripro dans le dimensionnement des réseaux de micro-irrigation. Th. Master eau environnement, univ. Blida, 60P.
9. Sinobas L. R. and M. G. Rodrigue (2012). A Review of Subsurface Drip Irrigation and Its Management. In book: Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops, *Edited by Teang Shui Lee*
10. Simunek M. Th; Van. Genuchten, M. Seja. (1999). Development and application of Hydrus softward. Vadose Zone Journal V7(587-600).
11. Keller et Karmeli (1974). Trickle irrigation design parameters. ASAE : Transactions 17(4) : 678-684.
12. Zella L. (2015). Irrigation : eau, sol, plante. Ed.OPU, 390P.
13. Zella L. (2010). Micro-irrigation : théorie et applications. Ed. OPU, 302P.
14. Zella L. (2019). Ressources hydriques. Ed. OPU, 256P
15. Zella L., Kettab A., Chasseriaux G. (2005). Dimensionnement des réseaux de micro-irrigation. Congrès inter. De l'eau pour le développement durable dans le bassin méditerranéen, 22-23 mai, Alger, 12 P.

