

INSTITUT NATIONAL D'AGRONOMIE -- EL-HARRACH

Département de Génie Rural

THESE DE MAGISTER

(en sciences agronomiques)



OPTION : Aménagement et mise en valeur

La Réutilisation des Eaux Usées Epurées en Micro-Irrigation

Présentée par : L. ZELLA

Devant le jury :

- **A. KETTAB** (Président)
- **C. BENHACINE** (Directeur de Thèse)
- **X. DANG** (Co-Directeur)
- **B. KIES**
- **A. OUMANSOUR** † Examineurs

Année Universitaire 1990 - 1991

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, disparus très tôt dont le dévouement et le sacrifice ont toujours été pour moi le plus précieux des présents.

A ma femme et ma fille Yasmine qui se sont montrées compréhensives durant toute mon indisponibilité.

A mes frères et soeurs.

A tous les miens que j'aime.

REMERCIEMENTS

Je voudrais, au terme de ce travail, exprimer toute ma gratitude et ma sympathie à tous ceux qui m'ont aidé à le faire paraître.

En particulier, je remercie très sincèrement :

- Monsieur C. BENHACINE qui a bien voulu accepter de diriger ce travail en m'accordant son temps précieux pour m'orienter et me corriger.

- Monsieur X. DANG qui n'a pas ménagé d'efforts et de patience pour me soutenir, m'orienter et assister les expériences. Je dois avouer que ses critiques judicieuses et ses conseils, en qualité de co-promoteur, ont été pour moi d'un grand bénéfice tout au long de la réalisation de cette étude.

Je voudrais aussi remercier :

- Monsieur A. KHETTAB pour m'avoir accordé l'honneur d'être parmi le jury.

- Monsieur B. KIES, mon ancien professeur pour sa présence dans le jury ainsi pour ses conseils et sa rigueur.

- Monsieur A. OUMANSOUR qui, avec son expérience, a bien voulu examiner le travail.

Mes remerciements s'adressent également à :

- Toute l'équipe de la station d'épuration de Beni Mered qui m'ont apporté un soutien logistique important.

- M. MESSAHEL qui m'a été d'un grand intérêt pour son aide au niveau de la documentation.

Je ne saurais oublier Nasser qui a assuré avec soin la frappe de ce document

SOMMAIRE

Introduction	
Chapitre I : <u>Problématique de l'eau en Algerie</u>	6
1 - Besoins en eaux.....	7
2 - Potentialités en eaux.....	9
A - potentialités en eaux douces	
1 - Le régime pluviométrique.....	10
2 - Eaux de surface.....	11
3 - Eaux souterraines.....	12
4 - La rarefaction.....	14
5 - Conclusion.....	16
B - Les potentialités en eaux usées épurées.....	17
1 - Eaux usées	
1.1 - Provenance.....	17
1.2 - Production.....	17
2 - Eaux usées épurées.....	21
2.1 - Infrastructure d'épuration des eaux usées	
2.1.1 - L'épuration naturelle	
2.1.2 - L'épuration artificielle.....	22
2.1.2.1 - Le traitement en station.....	23
2.1.2.2 - Le traitement en bassin.....	24
2.2 - L'exemple de la station d'épuration de Beni-Mered.....	27
2.2.1 - Situation.....	27
2.2.2 - Caractéristiques techniques	
2.2.3 - Perspectives.....	28
3 - Conclusion sur la problématique de l'eau en Algerie...	31
Chapitre II : <u>La reutilisation des eaux usées dans le monde et ses contraintes</u>	
A - Experiences sur la REUE.....	33
1 - Introduction	
2 - La reutilisation des eaux usées en Agriculture.....	34
3 - La reutilisation des eaux usées en pisciculture et en aquaculture.....	39
4 - La recharge des nappes.....	40
5 - La reutilisation des eaux usées en Industrie.....	41
B - Les contraintes de la REUE.....	42
1 - Les contraintes liées aux risques infectieux des eaux usées épurées.....	45
- Composition des eaux usées	
- Les risques provoqués par la charge bactérienne.....	45
- Leur élimination.....	48
- Experiences et normes.....	50
2 - Les contraintes liées à la salinité globale.....	56
3 - Les contraintes liées aux métaux lourds et aux oligoéléments.....	58

4 - Les contraintes liées à la valeur fertilisante.....	61
5 - Conclusion.....	67

Chapitre III : Les techniques d'irrigation et la nécessité de l'option micro-irrigation 68

1 - Situation des terres irriguées en Algérie et place de la micro-irrigation.....	68
2 - Consommation en eau des plantes.....	70
3 - Performance de la technique d'irrigation localisée.....	73
3.1 - Performance	
3.2 - Le réseau : schéma d'un système d'irrigation avec goutteurs.....	79
3.2.1 - Prise d'eau	
3.2.2 - Tête du réseau	
3.2.3 - Les rampes.....	80
3.2.4 - Les distributeurs.....	82
3.2.4.1 - Généralités	
3.2.4.2 - Principes de fonctionnement.....	85
3.2.4.3 - Classification des goutteurs.....	86
3.3 - Technologie de fabrication.....	89
4 - Aspects économiques de la micro-irrigation.....	92
5 - Conclusion.....	95

Chapitre IV : Méthodes de calcul hydraulique d'un système d'irrigation avec goutteurs et détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs

A - <u>Méthodes de calcul</u>	96
Introduction	
1.- Méthodes utilisées	
1.1 - Formules de Christiansen.....	97
1.2 - Formule utilisée en Pologne et en Hongrie	
1.3 - Formule utilisée en France.....	98
1.4 - Formule de Hazen et Williams	
2.- Discussion des relations de calcul de $\Sigma \Delta h$	98
3.- Schéma du système et principe de calcul.....	102
3.1 - Schéma	
3.2 - Principe de calcul.....	105
4.- Le calcul hydraulique	
4.1 - Calcul des pertes de charge linéaires du branchement.....	106
4.1.1 - Critères d'écoulement dans le branchement	
4.1.1.1 - Applications aux conditions expérimentales...	110

4.1.2 - Calcul des pertes de charge linéaires dans la partie à écoulement turbulent (L ₁).....	111
4.1.2.1 - Schéma de calcul	
4.1.2.2 - Détermination.....	112
4.1.3 - Calcul des pertes de charge linéaires dans la zone (L ₂) à écoulement laminaire.....	120
4.1.3.1 - Hypothèses	
4.1.3.2 - Détermination	
4.1.3.3 - Représentation graphique.....	125
4.1.3.4 - Application.....	126
4.1.3.5 - Discussion.....	129
5 - Calcul des pertes de charge dans la conduite principale.....	136
5.1 - Schéma de calcul	
5.2 - Principe de calcul.....	137
5.3 - Détermination de l'état d'écoulement dans la partie RB1.....	137
5.4 - Application numérique.....	140
5.5 - Schéma de calcul.....	141
6 - Calcul de pertes de charge de la conduite de refoulement.....	142
6.1 - Principe de calcul	
6.2 - La relation utilisée.....	144
7 - La charge totale nécessaire de la station de pompage ou du bassin d'accumulation	
7.1 - Premier cas : Adduction par refoulement	
7.2 - Deuxième cas : Adduction gravitaire.....	146
7.3 - Détermination de H ₀	
8 - Détermination de la puissance de la pompe.....	147
9 - Conclusion.....	148
B - Détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs utilisés.....	149
1 - Schéma de calcul du pilote de micro-irrigation	
2 - Objectif.....	150
3 - Détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs.....	151
3.1 - Conditions préliminaires	
3.2 - Méthodes de détermination.....	156
3.3 - Résultats et commentaires.....	157
4 - Test d'homogénéité de fabrication et classification des goutteurs.....	176
4.1 - Méthodes	

4.2 - Normes.....	177
4.3 - Résultats du calcul du Cv et Commentaires.....	178
4.4 - Conclusion.....	182
5 - Classifications des emetteurs utilisées vis à vis de la sensibilité à la pression de service.....	182
5.1 - Classification des goutteurs non auto-régulants	
5.2 - Classification des goutteurs auto-regulants	
5.3 - Conclusion.....	183
6 - Conclusion sur les caractéristiques techniques des emetteurs utilisés.....	184

Chapitre V : L'impact de la REUE sur le réseau de m.l185

I - Introduction	
- L'obstruction physique.....	186
- L'obstruction chimique	
- L'obstruction biologique	
2 - Evaluation de l'obstruction : Méthodes et resultats	
2.1 - Méthodes	
2.2 - Qualité des eaux usées épurées de la station d'épuration de Beni-Méred.....	187
2.2.1 - Analyses physico-chimiques et bacteriologiques des eaux usées épurées de la station de Beni Méred	
2.2.1.1 - Résultats	
2.2.2.2 - Commentaires.....	193
2.3 - Evaluation de l'obstruction.....	194
2.3.1 - Critère de la qualité de l'eau : résultats et commentaires	
2.3.2 - Critère du contrôle systématique du débit.....	196
2.3.2.1 - Résultats	
2.3.2.2 - Commentaires.....	199
3 - Conclusion.....	208

Chapitre VI : L'impact de la REUE sur la culture sur le regime d'irrigation et sur le sol.....209

Introduction

A - <u>L'impact de la REUE sur la culture du maïs</u>	
1 - Choix de la culture	
2 - Conduite de la culture du maïs.....	211
3 - Résultats.....	213
4 - Commentaires.....	213

5 - Conclusion.....	214
B - <u>L'impact de la REUE sur le regime d'irrigation</u>	214
1 - Conditions experimentales	
2 - Principe de calcul de la dose d'arrosage.....	215
3 - Méthode grapho-analytique.....	217
4 - Resultats.....	218
5 - Commentaires.....	228
6 - Conclusion.....	232
C - <u>L'impact de la REUE sur le sol</u>	232
1 - Objectif.....	232
2 - Résultats.....	233
3 - Commentaires.....	237
4 - Conclusion.....	237
 Chapitre VII : <u>Recommandations et conclusion générale</u>	238
A - Recommandations	
B - Conclusion générale.....	244
Liste bibliographique	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Annexes	

Introduction

L'évolution rapide des besoins en eaux des différents usagers, les nécessités créées par le défi alimentaire face à une démographie sans cesse galopante montre que notre pays se trouve actuellement dans une phase de transition au cours de laquelle la stratégie de l'eau doit emprunter de nouvelles orientations pour une meilleure utilisation des eaux.

Par ailleurs, l'importance vitale et grandissante des demandes en eaux potables fait appel à un investissement considérable (mobilisation, études, distribution et assainissement) et se heurte à une situation de raréfaction des ressources en eaux économiquement mobilisables. La question de l'eau est placée, de nos jours, en amont d'une multitude d'objectifs risquant parfois d'aller à l'encontre de décisions politiques et économiques importantes.

En effet, comment dans une situation de déficit en eaux :

- Economiser et rentabiliser au maximum les ressources en eaux ?
- Utiliser les ressources non conventionnelles, potentiel garanti (eaux salées, eaux saumâtres et eaux usées) pour l'agriculture ?

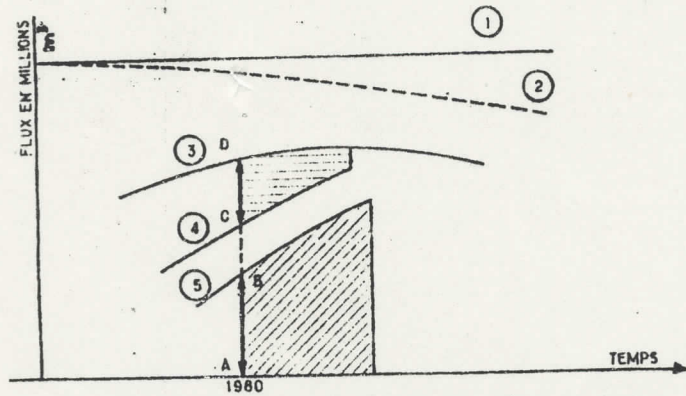
Il va de soi que les solutions apportées à ces questions réaliseront un profit substantiel en eaux qui serait détourné vers l'alimentation en eau potable (A.E.P) jugée prioritaire.

Les eaux usées, cette ressource de "seconde-main" qui s'accroît avec l'utilisation intensive des ressources naturelles, aujourd'hui délaissée au rebut, représentera sans nul doute pour demain une richesse réelle si on apprend à la réutiliser correctement.

La raréfaction des ressources en eaux qui est un phénomène non spécifique à notre pays mais constaté dans tous les pays du bassin méditerranéen manifeste des répercussions économiques et sociales graves, constitue le cadre essentiel de nos interrogations.

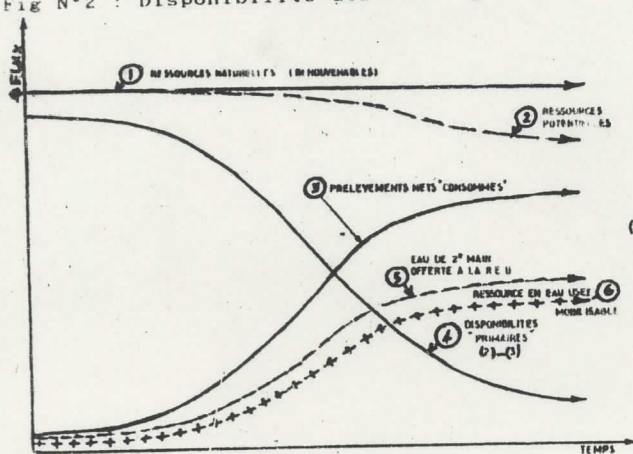
Un schéma global est illustré par les figures suivantes n°1, 2 et 3

Fig N°1 : La variation du flux des eaux naturelles



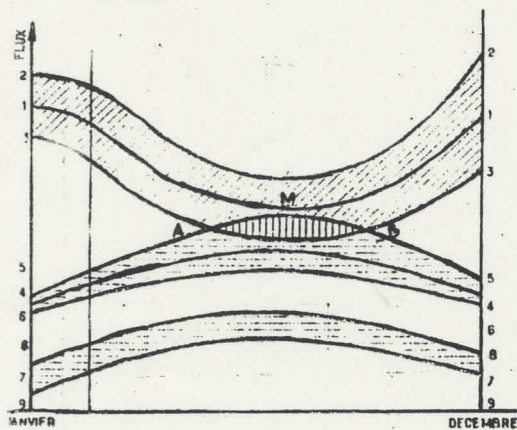
- (1) : Ressource naturelle globale : donnée physique de la région = cste
- (2) : Ressource potentielle réelle réduite à cause de la pollution
- (3) : Ressource mobilisable. économiquement fonction du progrès technologique
- (4) : Demande en pleine hausse
- (cd) : Mesure d'eau naturelle disponible
- (bc) : Les pertes aux rejets

Fig N°2 : Disponibilité des eaux "1^{ère} et 2^{ème} main"



- (2) : Année humide (Ressources)
- (5) : Année sèche (Ressources)
- (4) : Courbe moyenne (Ressources)
- ABM : Lentille, zone de déficit Demande > Ressources
- (4) (5) (6) : Demandes par saison
- (4) : Faible demande
- (5) : Forte demande
- (7) (8) : Ressources de seconde main en moyenne (80 %) de la demande de pointe

Fig N°3 : Variation saisonnière des ressources et des demandes d'eau



Source : (11)

Des prévisions tant réalistes que pessimistes laissent les experts de l'O.M.S. (55) rapporter "... Il est certain que la pollution des eaux augmentera beaucoup plus vite dans les pays en voie de développement que dans les pays déjà développés." Il s'en suit "... que les mesures correctives dans ces mêmes pays risquent fort de s'enfler démesurément et le problème prendra une ampleur écrasante." D'autre part, parmi les procédés qui assurent une économie importante d'eau et une réduction des pertes dans la distribution telle la micro-irrigation devraient être étudiés, expérimentés et mis en oeuvre là où les conditions le permettent.

Malgré l'unanimité des chercheurs par rapport aux avantages de la micro-irrigation, dans notre pays, celle-ci suscite peu d'intérêt.

Quant à l'apport certain des eaux usées traitées, il est du moins au niveau officiel largement sous-estimé.

Dans le travail présenté, nous avons privilégié la combinaison de la réutilisation des eaux usées épurées et la micro-irrigation partant du postulat que celle-ci constitue un axe important et impératif.

Pourtant la réutilisation des eaux résiduaires pour la production agricole, forestière ou autres domaines qui s'inscrit dans le cadre de la préservation de l'eau en tant que richesse naturelle est intéressante à plus d'un titre car :

- Elle permet de produire une richesse à partir d'un déchet.
- Elle constitue un moyen d'épuration de l'eau à travers le sol.
- Elle permet d'éviter le phénomène d'eutrophisation, surtout en période d'étiage.
- Les stations d'épuration, en Algérie, jusqu'ici conçues pour traiter de l'eau usée et la rejeter à l'oued peuvent être rentabilisées en prévoyant la réutilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture et autres domaines.

A grande échelle, les expériences des pays riches montrent que la réutilisation des eaux usées (REU) s'étend à d'autres intérêts comme la recharge des nappes souterraines, la lutte contre l'intrusion de nappes d'eau salée (cas des nappes de la Mitidja, Annaba et Hodna), et le refroidissement des centrales thermiques (projet récemment à l'étude pour le complexe d'El Hadjar).

Inversement, la réutilisation des eaux usées entraîne certains risques objectifs comme :

- La capacité de l'auto-épuration du sol, de l'eau et de l'air ne suffit plus dans certains cas, d'où l'éventualité d'un danger pour la santé humaine.

- La pollution des nappes, par effet de la percolation de certains éléments toxiques (les nitrates par effet cumulatif).

- La phytotoxicité de certains rejets peut constituer un double danger (pour les cultures et pour les sols).

- L'investissement relativement onéreux mais comme même amortissable à brèves échéances des stations d'épuration devant fournir une eau "conforme" pour le milieu agricole.

Interviennent également les facteurs subjectifs liés fondamentalement à la méconnaissance de la réutilisation des eaux usées.

C'est pour cela que la réutilisation des eaux usées en agriculture irriguée à l'échelle réelle, suppose au préalable une phase expérimentale sérieuse destinée à maîtriser ce nouveau créneau et à démystifier ainsi les "tares" et les obstacles inhibant la réutilisation de cette denrée abondante.

La réutilisation des eaux usées épurées (R.E.U.E) en micro-irrigation (m.I) permet à priori de limiter tous les risques déjà cités y compris les risques destinés à l'utilisateur.

Cette combinaison (R.E.U.E - m.I) pourrait se révéler une technique efficace à condition de résoudre le problème relatif à l'obstruction des distributeurs.

C'est à partir de ces éléments de réflexion que nous avons défini l'objet de notre travail par lequel nous espérons rééditer les expériences bénéfiques des autres pays dans les conditions locales et avec des moyens purement algériens dont nous disposons aujourd'hui. Notre étude porte sur la réutilisation des eaux usées épurées de la station de Beni Mered (Blida) utilisant un mini réseau de micro-irrigation de fabrication locale (rampes, goutteurs, filtres et groupe électropompe).

L'essai d'irrigation (et d'effets de la REUE) est expérimenté sur la culture du maïs sous serre et dans les pots.

Le travail s'articule autour de six importants chapitres:

- Un exposé de la problématique de l'eau en Algérie suivi de commentaires et de conclusions.
- Une étude bibliographique variée et récente des essais et pratiques réalisés de par le monde.
- Une contribution à la théorie du calcul hydraulique du système de micro-irrigation.
- La détermination des caractéristiques techniques et hydrauliques des émetteurs fabriqués en Algérie.
- L'élaboration du régime d'irrigation du maïs en (m.I.).
- La détermination des effets inhérents à la (R.E.U.E.) sur le système de (m.I.), sur la plante et sur l'environnement.

Nous terminons notre étude par des recommandations pratiques et la proposition d'un schéma global de la réutilisation des eaux usées en agriculture dans notre pays.

Dans le cadre étroit de cette étude, notre ambition n'est pas d'apporter des réponses urgentes et précises à des problèmes vastes et complexes à la fois mais d'élaborer les prémisses d'une réflexion ouvrant les perspectives à d'autres recherches complémentaires.

CHAPITRE I : Problématique de l'eau en Algérie

La population algérienne qui croit rapidement au taux moyen de 2,54* par an a une grande influence sur la politique de l'eau en Algérie. En effet, la mobilisation, la consommation, la production des eaux usées ainsi que les quantités allouées à l'agriculture en dépendent étroitement.

Le recensement de la population Algérienne en 1987 l'évaluait à 23 millions d'habitants dont près de la moitié (11,2 millions) est urbaine et plus de 5,7 millions vivent dans les grandes agglomérations (39).

Actuellement, ces prévisions sont largement dépassées. En conséquence, le taux d'urbanisation est passé de 40% en 1977 à 49% en 1987. Il atteindra 60% en l'an 2000 et 70% en 2025 (39). Cependant, 40% de la population du Nord du pays (85% de la population nationale) est concentrée dans les quatre principales agglomérations (7) : Alger, Oran, Constantine et Annaba.

Les projections des estimations de la population pour le futur proche, selon les mêmes sources précitées, évolueront comme suit :

Tableau N°1 : Evolution de la population algérienne jusqu'à l'an 2025

Unité : Millions d'habitants

Année	1987	2000	2025
Population totale	23	33	57
Population en ville	11,2	19,6	40
Dont en grande agglomération	05,7	07,6	11

Source : (39)

*. In déclaration du Ministère de la santé . Mai 1991.

L'augmentation rapide de la population et sa tendance à l'urbanisation imposerait des charges particulièrement importantes au pays : d'une part une mobilisation permanente d'eau, d'autres parts, des terres (la plus souvent agricoles) sont substituées par des cités, des usines et des villes entières.

L'approvisionnement en eau de ces dernières est vital et croissant ce qui génère naturellement une pollution du milieu aquatique et de l'environnement si les mesures préventives ne seront pas envisagées.

1. Besoins en eaux

La propriété vitale extraordinaire de l'eau, sa nécessité dans l'extension des villes, dans la prospérité des peuples, dans l'intensification de l'agriculture et de l'industrie exige, dans la situation actuelle des efforts louables et accorde à l'hydraulique une importance primordiale.

En effet, les dotations en eaux potables pour la population algérienne, selon une norme standard moyenne de 150 l/hab/j appelle à une mobilisation de l'ordre de 1,782 milliards de m³ pour l'an 2000 et 3,078 milliards de m³ d'eau pour l'an 2025. La satisfaction des besoins peut s'améliorer si l'on prend en charge les problèmes liés aux pertes (fuites...) évaluées à 50 % dans la plupart des cas, et d'autres mesures telles que la prévention de l'envasement des barrages dont certains ont atteint un taux de 96 % (cas du barrage de Cheurfa)(1).

Partant du fait naturellement admis que le secteur de l'AEP est prioritaire et que les besoins sont maintenant globalement estimés, le reliquat dégagé par la différence entre les potentialités mobilisables et ces besoins, nous permettra d'évaluer les potentialités communes réservées à l'industrie et le reste à l'agriculture. Les besoins industriels, bien que très mal connus, sont considérés eux aussi comme prioritaires par rapport à l'irrigation.

Test de NEWMAN-KEULS - Seuil=5%

Facteur 1 :Hôte-parasite

Nombre de moyennes	2	3	4	5
Valeurs des ppas	95.73	117.01	130.26	139.90

F1	Libellés	Moyennes	Groupes	homogènes
3	S+T	474.25	A	
4	S+S	452.50	A	
2	R+T	425.88	A	
5	R+S	373.50	A	
-1	TNI	201.00		B

3.2- Production des pectines-lyases (PL) *in vivo*

Ces enzymes sont détectées dans les extraits de plantes qu'elles soient inoculées par les deux isolats ou non. La présence des PL dans des plantes saines semble être anormale, puisque ces enzymes sont strictement d'origine microbienne. Ceci peut suggérer une infection latente due à une contamination au niveau des semences.

Les extraits sont analysés dès l'apparition des symptômes, toutefois, l'activité des PL reste invariable chez les plantes non inoculées. Au niveau des interactions, par contre, elle augmente en général, et elle atteint son maximum au sixième jour, sauf pour le couple (R / A), où dès le troisième jour, la production est maximale. Cette activité baisse ensuite de 50% à 80% au quinzième jour. Les activités les plus élevées sont révélées chez le couple S/A (Tableau 46).

L'analyse de la variance met en évidence des différences significatives entre les différents types d'interactions et entre les périodes d'incubation.

Le test de Newman-Keuls classe les interactions en trois groupes homogènes (Tableau 47):

- Gr 1: S/A très productif de PL
- Gr 2: S/pA, R/pA et R/A moyennement productif
- Gr 3: Témoin

Tableau N°2 : Récapitulatif des besoins en eaux

Unité : Milliards de m³ d'eau

Année	1987	2000	2025
Secteur			
A.E.P	1,01	1,782	3,078
Agriculture	1,5	1,8	4,2
Total	2,61	3,582	7,278

Sans tenir compte des besoins en eau actuels et futurs de l'industrie, les quantités d'eau à garantir aux deux secteurs pour l'horizon 2025 dépassent les 7 milliards de m³ d'eau. Les efforts de mobilisation devront satisfaire ces besoins semblent être énormes, cependant ils peuvent être modérés par une bonne gestion (moins de fuites) et plus de vigueur et de planification dans la distribution.

2. Potentialités en eaux

Quelle que soit l'ampleur des interventions opérées pour un développement agricole intensif, la connaissance, voire la maîtrise du potentiel naturel de production est une condition sine-qua-non.

Ce potentiel naturel dépend essentiellement de deux paramètres:

- Le climat
- Le sol

Ce dernier intervient par ses dimensions spatiales et qualitatives sur l'amélioration de la production agricole. Le sol, par sa faculté de réservoir tampon est en interaction avec les facteurs climatiques, il régule le stock d'eau emprunté.

Le paramètre climatique intervient surtout par la hauteur de la lame d'eau précipitée annuellement (variable aléatoire) et par la température.

Une hausse de la température de 3°C entraînerait un accroissement des besoins en eau pour l'irrigation de 7 % même si les pluies augmentent de 10 %. En revanche, si le volume des pluies chutait de 10 % pour un même réchauffement, l'augmentation des besoins en eau pour l'irrigation serait de 26 % (4).

En Algérie, les valeurs des paramètres climatiques de l'année agricole 1989-1990 ont confirmé la persistance de la sécheresse ayant sévit cette dernière décennie (7). Le déficit pluviométrique a fluctué entre 40% et 70 % par rapport à la moyenne Seltzer, ce qui a nécessité la mise en oeuvre du plan ORSEC - sécheresse et de programmes spéciaux à l'échelle de la sphère officielle.

L'analyse des données pluviométriques permet de constater une différenciation à l'échelle superficielle et souterraine dans les ressources régionales en eaux : le gradient est décroissant de l'Est à l'Ouest (7) et la moyenne pluviométrique varie entre 400 et 530mm/an ce qui confère à l'Algérie un climat semi-aride avec tendance à l'aridité (7).

Les efforts actuels de la météorologie ne permettent pas de prévoir les avatars climatiques à moyen et long terme, ce qui complique sévèrement la planification et exige une réflexion beaucoup plus poussée au profit de nouvelles méthodes de gestion et de stratégie de l'élément EAU.

A. Potentialités en eaux douces

1. Le régime pluviométrique

L'apport global des précipitations en Algérie est estimé en moyenne à 65 milliards de m³ d'eau (Tell) réparties comme suit :

- 47 milliards de m³ s'évaporent (72,3 %)
- 15 milliards de m³ ruissellent (23,1%) dont 700 millions de m³/an vers les chotts et 700 millions de m³/an vers le Sahara. Le reste, soit 13,6 milliards de m³ retournent vers la mer en majorité.
- 0,3 milliards de m³ s'infiltrent, soit 4,6 %.

Au niveau des Hauts-plateaux, l'apport pluvial est de 23 à 24 milliards de m^3 /an. Au Sud (L'Atlas Saharien), les pluies apportent chaque année environ 41 milliards de m^3 d'eau.

La pluviométrie, à l'échelle de tout le pays totalise, un apport moyen de 130 milliards de m^3 d'eau. Cependant, l'analyse réalisée récemment par l'O.N.M (7) a montré une grande variabilité temporelle et spatiale de la pluviométrie en Algérie et que son effet s'accroît en période de sécheresse (ressources rares et difficilement renouvelables). Ainsi, le Tell qui représente 7 % de la superficie du territoire national reçoit à lui seul 92% du ruissellement total (7).

A titre comparatif, en France, les précipitations atmosphériques apportent en moyenne 440 milliards de m^3 /an dont seulement 60 % s'évaporent (55). Les 40 % restants sont utilisés au moins deux fois avant qu'ils ne regagnent la mer (38).

2. Eaux de surface

Parmi les 13 milliards de m^3 d'eau qui ruissellent annuellement, seul un volume insignifiant est mobilisé par un parc national de barrages constitué de 37 grands ouvrages.

Les barrages en exploitation mobilisent une capacité théorique de 3,9 milliards de m^3 d'eau dont un volume régularisé de 1,7 milliards de m^3 /an (1).

Nous signalons, au passage, que le taux d'envasement annuel varie de 2000 à 5000 tonnes/ km^2 portant le volume envasé à 430 millions de m^3 en 1990, soit 11 % de la capacité existante. Les prévisions pour l'an 2010 l'estiment à 933 millions de m^3 de vase, soit 24 % de la capacité actuelle (7). L'envasement des barrages, phénomène répandu dans notre pays, limite dangereusement la capacité des barrages. La fraction de l'écoulement mobilisé actuellement est évaluée à 22 % de l'écoulement annuel moyen. Ce pourcentage pourrait augmenter à 38 % en l'an 2000 (7). La capacité mobilisée intègre le volume relatif aux retenues collinaires (au nombre de 700 totalisant une capacité de 60 millions de m^3 /an).

L'impact de la sécheresse sur les eaux superficielles est très perceptible :

- Au niveau des nappes libres (barrages) et souterraines par une évaporation importante. La plupart de ces nappes ont été exploitées à la limite de l'admissibilité.

- L'envasement des barrages : barrage Fergoug envasé à 80 % , Ghrib et Boughzoul à 41 % .

- Dégradation de la qualité des eaux. D'où une augmentation de la concentration en sels des eaux ; de même une apparition des phénomènes d'eutrophisation des étendues d'eau (plusieurs épidémies ont été signalées cet été 1990). Les déficits qu'accuse l'AEP sont réduits grâce à des compléments substantiels par des ponctions au niveau des ressources souterraines.

3. Eaux souterraines

Leur évaluation est plus difficile que celle des eaux superficielles. Elles sont estimées selon les études (8), (57) et (7) à 1,4 milliards de m³ pour le Nord (Tell) et à plus de 5 milliards de m³ d'eau au niveau du Sahara Septentrional.

Cette quantité énorme est caractérisée par son aspect fossile dont l'exploitation est rendue très difficile à cause des profondeurs élevées, supérieures à 1000 m, à des prix prohibitifs, en plus la salinité quasi fréquente dépassant souvent 5g/l (1). Les ressources d'eau souterraines, pour le Nord, ont connu durant cette décennie une surexploitation : la nappe de la mitidja (1300 km²) a été sollicitée par plus de 4000 puits et forages*. Cette surexploitation a favorisé l'inversement du gradient hydraulique (écoulement) d'où une vulnérabilité aux invasions des nappes marines. Dans les études de l'A.N.R.H, deux cas ont attiré notre attention :

- Nappes souterraines de la Mitidja et d'Annaba infectées par une pollution marine : l'eau pompée a atteint une salinité totale de 3g/l.

*. - Soit plus de deux forages au km²

- Bassins Chotteux (plateaux Sétifiens et Aurassiens).

Ces phénomènes apparaissent après une exploitation intensive (80 %) (7) où les ponctions sur les réserves d'eau souterraines étant supérieures aux infiltrations.

Les projections en matière d'exploitation des ressources superficielles et souterraines sont résumées dans le tableau N°3.

Tableau N°3 : Ressources en eaux souterraines et superficielles à l'horizon 2025

Unité : Milliards de m³

Ressources en eaux mobilisées	1987	2000		2025	
		min	max	min	max
Eaux superficielles	1,5	3	3,7	4,7	5,3
Eaux souterraines	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6
T O T A L	2,9	4,6	5,3	6,3	6,9

Source : (39)

L'examen de ce tableau montre que les volumes d'eau pompés des nappes se stabilisent à 1,6 milliards de m³ à partir de l'an 2000 . Cette constance confirme la limite d'exploitation de ces réserves de plus en plus vulnérables à la pollution.

Cependant dans le tableau suivant illustrant la balance entre les besoins et les potentialités en eau, les volumes mobilisés ne semblent pas couvrir la quantité d'eau demandée.

Le défi pourrait être satisfait par des efforts louables en matière de mobilisation, solution trop onéreuse et qui semble être impossible dans la situation économique actuelle.

La solution réside alors dans l'amélioration de la gestion en faveur du rationnement de l'eau.

- L'indice d'exploitation = ratio prélèvement/flux des ressources potentielles.

- L'indice de consommation = ratio consommation/flux des ressources potentielles (c'est à dire prélèvement non restitué).

Ainsi, les indices supérieurs à 100 sont révélateurs de présomption de pénurie d'eau régionale ou locale comme il est indiqué sur le tableau n°5.

Les zones de pénurie actuelle, et l'Algérie en est une, appelées à s'aggraver à l'avenir sont principalement (56):

- "Les régions des pays de la zone aride et semi-aride à population croissante avec tendance à concentration urbaine et volonté d'intensification de l'agriculture".

- "Les régions industrielles fortement urbanisées ne disposant pas de cours d'eau majeurs".

Tableau N°5 : Quelques indices nationaux d'exploitation

Pays où l'indice > 100	Pays où l'indice = 100	Pays où l'indice 50-100
Bahrein 400	Arabie Séoudite	Malte 92
Lybie 210	Emirates Arabes Unies	Egypte 80
Quatar 170		Pakistan 68
Yemen du Sud		Belgique 66
		Irak 58
		Iles Canaries 52

Source (54)

La sécheresse quasi totale en Algérie a touché tous les secteurs (AEP, AEI, irrigation). Les litiges ainsi créés ont failli générer des répercussions graves et irréversibles. De nouveaux arbitrages au profit de l'AEP et l'AEI ont eu des conséquences désastreuses

sur la production agricole. Ainsi, plusieurs Wilayas ont été déclarées sinistrées (El Tarf, Constantine, Mascara...). A titre d'exemple, à Constantine, 82.000 ha ont subi des dégâts dûs à la sécheresse.

A Mascara, l'expertise d'évaluation des dommages occasionnés par la sécheresse ont été évalués à 10 milliards de centimes pour une superficie de 98 970 ha^{*}, soit 1000.00DA/ha environ.

5. Conclusion

L'aridité du climat, la raréfaction de la ressource en eau la pollution de l'environnement nous interpellent dès à présent de réfléchir à une politique hydraulique basée sur le rationnement et sur la gestion scientifique et planifiée. Le risque de transformer des milliers d'hectares en désert inutilisables plane à l'horizon.

- Les études, la mobilisation, le transport et la répartition doivent être révisés en tenant compte des nouvelles contraintes.

- L'utilisation des eaux non conventionnelles devient une réalité incontournable.

*. Chiffre publié dans la presse nationale : El Watan n°9 17/10/1990

Pour certaines enzymes, les niveaux d'activités sont liées au degré d'agressivité des isolats. Ainsi, **Mussell et Green (1970)** observent des niveaux d'activités PL plus élevés chez les plantes infectées par des isolats virulents de *Verticillium* que sur les plantes infectées par des isolats moins virulents. Ceci est observé dans notre cas aux niveaux des activités PL et Cx. Pour les PL, le même comportement est observé uniquement dans le cultivar sensible, et pour les deux interactions dans le cas des cellulases.

Les activités pectines-lyases (PL) chez les cultivars résistants sont du même niveau quelque soit l'agressivité de l'isolat, alors que les activités cellulases Cx sont moins élevées chez le cultivar résistant inoculé par l'isolat faiblement agressif que chez le même cultivar inoculé par l'isolat agressif. Ceci suggère que la production des cellulases est plus liée à la virulence que la production des PL.

Contrairement à l'étude *in vitro* où l'activité diminue progressivement durant la période d'incubation, la production des PME est progressive dans le temps. L'activité de ces enzymes est la même quelque soit l'interaction et forment un même groupe avec le témoin, ce qui suggère un rôle secondaire des PME dans la pathogénèse. De même, leur production n'est pas corrélée avec l'agressivité des isolats comme le montre l'étude *in vitro*.

Les isolats agressifs paraissent plus productifs d'enzymes que les isolats faiblement agressifs, ceci est vrai surtout pour les activités PL et Cx. Ainsi, la corrélation positive entre la virulence des isolats et les activités enzymatiques révélée dans l'étude *in vitro* est confirmée par les résultats obtenus sur le végétal.

Les résultats de cette étude suggèrent que les activités sont contrôlées par l'interaction et donc par la paroi cellulaire d'un côté et d'un autre côté par le pathogène.

4.1. Protéines totales natives extracellulaires

Les profils des protéines natives totales des gels de la minicouche révélés au bleu de coomassie sont similaires pour les isolats testés sur milieux Pois chiche (PC) (Sig, TO, AT, Tam, Harl, Mand/08) dans les conditions de culture. Les bandes apparaissent avec plus ou moins d'intensité, qui reflète le niveau de concentration des protéines dans le milieu. Une bande majeure (RF 0,37) apparaît sur tous les profils et est spécifique à l'espèce ou au genre. La bande de faible vitesse de migration (RF 0,18) est présente dans le milieu de culture et donc c'est une protéine du Pois chiche. Celle-ci apparaît sur tous les profils compris dans l'extrait de milieu Pois chiche (soja) (Plaque I, Fig 1.1, 1.2 ; Fig 9).

Les profils du filtrat de culture Maïs-soja (MF) montre entre 6 à 18 bandes plus ou moins intenses. Une bande majeure (RF 0,37) et deux autres de moindre intensité (RF 0,27 et 0,25) sont présentes pour tous les profils des isolats à l'exception de l'isolat Sig. Le profil de l'isolat TO montre une bande de RF 0,3 qui n'apparaît pas sur les autres profils. La bande RF 0,11 apparaît bien localisée au niveau de la paroi de l'isolat Sig et faiblement au niveau des autres (Plaque I, Fig 1.7 ; Fig 10).

Tableau N°6 : Estimation de la production des eaux usées domestiques dans les villes algériennes 1987-2025

Année	Population (millions)	Production des eaux usées (millions) (m ³ /j)	Production des eaux usées (millions) (m ³ /an)
1987 villes	12	1,8	648
Gdes agglo.	5,7	0,855	307,8
2000 villes	19,6	2,94	1.058,4
Gdes agglo.	7,6	1,14	410,4
2025 villes	40	6	2.160
Gdes agglo.	11	1,65	594

Il faut signaler que ces chiffres peuvent être révisés à la hausse si l'on tient compte des eaux de ruissellement, de l'industrie et de l'utilisation publique. Ces importantes quantités d'eaux usées (40 à 50 m³/an/personne) peuvent constituer un volume d'eau garanti pour l'irrigation.

En France, ces quantités varient entre 20 et 200 m³/an et par personne, sachant que la moyenne des rejets dans les pays développés est de 60 m³/an, avec un taux de variation de 3 à 10 % (56). Ainsi, pour une charge de 500 équivalent-habitants (E.H)*, l'on peut assurer un débit spécifique d'arrosage de 0,86l/s/ha. Il est utile également de signaler que les débits des rejets dans les canalisations subissent des fluctuations importantes, saisonnières, mensuelles et journalières. Ils sont influencés essentiellement par la consommation d'eau propre par le climat et par les activités spécifiques.

En l'an 2025, l'apport susceptible d'être assuré par les eaux usées est de plus de 2 milliards de m³, ce qui comblerait sans doute le déficit déjà signalé.

*. (E. H) : Correspond selon les normes actuelles (O. M. S) à une consommation en eau et donc à des rejets de 150 l/hab/j. Il s'agit d'une moyenne pondérée

Tableau N°7 : Production en eaux usées

selon le nombre d'habitants

Nombre d'hab de la commune	Production moyenne	Production maximale par heure
	l/hab/j	En l/hab./h
2000	100	12,5
2-5000	115	14,4
5-10 000	125	13,9
10-20 000	145	14,5
20-100 000	160	13,4
100 000	190	11,9
En moyenne	150	13,5

Source : (54)

Ces variations ont un rôle déterminant sur la qualité des eaux. La ventilation de la consommation journalière serait globalement (12) :

- Consommation domestique 55 %
- Eaux industrielles 15 %
- Eaux minérales 10 %
- Pertes 20 %

Nous estimons que ces chiffres sont à réactualiser car, en ce qui concerne les pertes, les récents rapports soulignent leur importance et ont été réévaluées à 50 % dans la majorité des villes (1). Les débits saisonniers des eaux usées sont étroitement liés aux débits d'alimentation en eau potable ; par conséquent les fluctuations subissent les mêmes effets. Elles ont fait l'objet d'une estimation par le bureau d'étude Anglais Binnie et Partners (1983) et se répartissent comme suit :

Tableau N°8 : Demande mensuelle exprimée en % des besoins totaux annuels en eau

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Débit besoins annuels	7,5	7,5	7,7	7,9	8,7	9,5	9,3	9,3	9,3	8,4	8,2	7,7	100

Source : (12)

La demande en eau d'irrigation qui a fait l'objet dans le même rapport (12) est elle aussi saisonnière. Le schéma type de la demande en eau d'irrigation dans les périmètres irrigables de la Mitidja et du Sahel se répartit de la manière suivante :

Tableau N°9 : Demande mensuelle en eau d'irrigation exprimée en % des besoins totaux en eaux

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Débit	0,2	0,5	1,3	3,9	7,3	19,7	28,1	23,9	13,0	1,8	0,2	0,1	100

Source : (12)

Les besoins annuels bruts moyens en eau d'irrigation (eaux livrées à la tête-morte des réseaux d'irrigation) ont été estimés par plusieurs études (12) (7) et varient entre 6000 et 7000 m³/ha/an avec un besoin mensuel de pointe de 1600 à 2500 m³/ha.

L'examen de ces deux derniers tableaux montre une discordance entre l'offre (tableau n°8) et la demande (tableau n°9) et exige dans l'optique de réutiliser les eaux usées en irrigation, un moyen de régulation (stockage) afin de faire correspondre l'offre à la demande. La régulation élimine donc le déficit et corrige la tendance à la pénurie.

La capacité de stockage requise est évaluée par le même rapport (12) à 50% des besoins annuels moyens en eau d'irrigation. Soit un stockage de $3000 \text{ m}^3/\text{ha}$, en tenant compte du schéma de la demande en eau déjà illustré. Le stockage permettrait de consacrer un débit important à d'autres sols et assurerait par la même occasion une désinfection efficace de l'eau par exposition aux rayons solaires.

Une utilisation plus efficace de ce potentiel pour l'irrigation nécessiterait de prévoir des moyens de stockage dont la capacité équivalerait le débit des eaux traitées de plusieurs mois. Les déficits en eau que peuvent combler directement à l'eau d'irrigation et indirectement à l'eau d'alimentation humaine sont à considérer. Ainsi, pour une charge de 10 000 E.H., la superficie susceptible d'être arrosée régulièrement serait de 90 ha, avec une dose de $6000 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Si l'aspect quantitatif est à considérer avec beaucoup d'optimisme, l'aspect qualitatif suscite beaucoup de répugnance et de négligence.

2. Eaux usées épurées

2.1. Infrastructures d'épuration des eaux usées

L'objectif d'introduire ce paragraphe n'est pas d'étudier les procédés de traitement des eaux usées mais de les présenter brièvement sachant que la station d'épuration de Beni Mered et le point de départ de notre recherche.

2.1.1. L'épuration naturelle

Les eaux usées qui retournent directement aux rivières ou indirectement à travers la couche du sous-sol (fosse d'assainissement) subissent une filtration et une auto-épuration dans le milieu naturel.

Au siècle dernier, ce procédé de traitement des eaux usées était utilisé pour les grandes villes (28).

Si cette technique a perdu, de nos jours une bonne partie de son intérêt dans le contexte urbain, cela est dû, d'une part à l'importance de l'espace nécessaire et d'autre part, aux dangers qu'elle entraîne. Mais, elle reste encore le mode d'épuration le mieux adapté à l'assainissement autonome.

Les étapes de cette auto-épuration sont :

- L'exposition aux rayons solaires
- L'oxygénation atmosphérique
- La filtration à travers le sol
- L'adsorption des éléments toxiques au niveau des particules terreuses.

L'épandage des eaux usées sur les terres agricoles repose sur ces étapes citées ci-dessus. Son avantage particulier, c'est qu'il peut apporter une solution au problème de l'absence du réseau hydrographique superficiel susceptible de recevoir les eaux usées épurées.

L'épuration naturelle, comme l'épandage, est tributaire de l'aptitude du sol récepteur à épurer et évacuer ces eaux.

Quand ce type d'épuration n'est plus réalisable, l'homme intervient sur le cycle naturel, accélère le rythme du parcours et on parle alors d'épuration artificielle. Le développement que connaît actuellement l'assainissement des collectivités de grande envergure conduit à se tourner vers ce type d'infrastructure.

2.1.2. L'épuration artificielle

Elle consiste à raccourcir le cycle d'épuration naturelle de l'eau dans le but d'une utilisation immédiate de "deuxième main" répondant aux exigences en quantité et en qualité de l'utilisateur, y compris le milieu naturel.

Selon les utilisateurs (AEP-irrigation alimentation du bétail-vie piscicole-baignade-industrie-recharge de nappes...), l'objectif visé par le traitement repose sur les normes et sur les teneurs limites relatives aux risques divers. La question essentielle posée par les chercheurs et aussi par les utilisateurs concerne les dangers éventuels après traitement de l'eau usée dans ces installations et le niveau tolérable des agents pathogènes et toxiques présents dans les eaux recyclées. La stérilité complète est beaucoup souhaitable mais elle est trop chère et pas forcément indispensable même si elle peut être réalisée (56).

Les volumes des eaux usées traitées ainsi que leur qualité dépend directement de l'importance, du type de procédés et du bon fonctionnement de ces installations de traitement. Deux organes technologiques existent actuellement :

- Le traitement en station
- Le traitement dans les bassins

2.1.2.1. Le traitement en station

Il se compose de plusieurs procédés qui dépendent de l'objectif, de la nature des eaux usées et des moyens financiers. Il peuvent coexister tous dans une même station.

Procédés physiques

- Décantation
- Flocculation
- Filtration sur sable ou charbon actif
- Tamisage

L'osmose inverse fait partie de ces procédés physiques.

Procédés chimiques : assurant

- Flocculation
- Oxydation chimique
- Chloration
- L'échange d'ions

Procédés biologiques : s'appuyant sur :

- Oxydation biologique
- Les boues activées
- Le traitement biologique en aérobie et en anaérobie avec aération-dénitrification biologique

Procédés électriques : s'articulant autour de :

- L'électrodialyse
- L'ozonation
- L'ultra-violet

Dans le tableau n°10, sont présentés, selon les techniques de filtration, les procédés des moins coûteux au plus coûteux, ainsi que les particularités des interventions sur la qualité des eaux usées épurées. Le choix parmi les différents procédés dépend des conditions économiques, de l'usage de l'eau et de la nature de la pollution.

2.1.2.2. Le traitement en bassin

Lagunage-bassin de stabilisation-bassin d'infiltration

Situés à l'aval des traitements primaires et secondaires en station, le stockage des eaux traitées en station dans les bassins spécialement conçus pour cet effet assurent la suite du traitement. L'affinage de l'eau s'effectue grâce à l'action solaire et celle des algues inhibant de manière importante les colibacilles et les algues pathogènes.

Les bassins de stockage, en plus du traitement qui s'y améliore jouent un rôle dans la modulation des flux d'eau pour une éventuelle utilisation à la demande : cas du lagunage naturel ou aéré. Cette technique s'est avérée efficace, cependant elle exige beaucoup d'espace.

Tableau N° 10 : Techniques de filtration et de traitement des eaux usées

Technique	Pourcentage de réduction :		MES	Colloïdes	DBO	DCO (Cat)	Toxiques organiques	Virus	Pathogènes	Bactéries non pathogènes	Métaux	NH ₃	NO ₃	PO ₄	MBAS	CO ₃ H ⁻	TDS
	x	30 %															
Décantation primaire	x	30 %	xxx	x	x	x	xxx	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Floculation aux sels métalliques (1)	xx	60 %	xxx	xxx	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Précipitation à la chaux (1)	xxx	90 %	xxx	xxx	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Traitement biologique conventionnel	xxx	90 %	x	xx	xxx	xxx	xx	xx	xx	xx	x	xxx	0	x	x	xx	0
Nitrification biologique (2)	xxx	99 %	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xx	xx	xx	xxx	0	xxx	0	x	xx	0
Dénitrification biologique (2)	0	production	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Filtration tertiaire			xxx	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Moussage			x	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Stripping (pH)			x	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Charbon actif			x	x	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Oxydation chimique :																	
Cl ₂ /ClO ⁻																	
O ₃																	
Osmose inverse			xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Electrodialyse			xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Distillation			xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx

Source : (56)

(1) Suivi de la séparation des floes ou précipités par décanteur ou flottateur.
 (2) En étapes successives ou combinées au traitement biologique conventionnel.
 (3) Seu^l si ces toxiques sont volatils.

ANNEXE 1

Solutions nutritives utilisées (d'après LOMBART, 1987).

Produits	Concentration de produit en g/l			
	K	P	Mg	Oligo-éléments
<u>Solution appelée P</u>				
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	4,65	0	4,65	4,65
<u>Solution appelée B</u>				
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5,27	1,76	5,27	3,52
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,56	1,28	0	2,56
K_2SO_4	0	0	1,34	0
KNO_3	0	0,776	0	1,552
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0,002	0,001	0,002	0,002 ou 0

selon l'élément à tester

Elements	Concentration d'élément en mg/l			
	K	P	Mg	Oligo-éléments
N	625	316	625	633
P	402	0	402	402
K	0	300	601	600
Ca	894	299	894	597
Mg	253	126	0	253
Na	597	0,1	597	597
S	350	175	264	343 à 350
Fe	8	4	8	8 ou 0
Mn	13	7	13	13 ou 0
Zn	12	6	12	12 ou 0
Cu	10	5	10	10 ou 0
B	0,2	0,1	0,2	0,2 ou 0

selon l'élément à tester

L'alternance de phase d'humectation (infiltration) et dessèchement permet d'éviter le colmatage et éliminer une fraction importante d'azote, phosphate et de micro-organismes. Nous reviendrons en détail sur ces aspects dans les chapitres suivants.

2.2. L'exemple de la station d'épuration de Beni Mered (Blida)

2.2.1. Situation

La station de Beni Mered, qui se limite au traitement secondaire des eaux usées de la ville de Blida, a été choisie du fait de sa position à proximité de notre institution de travail et surtout parce qu'elle est en amont de vastes superficies à irriguer dans le futur.

Le lieu de l'expérimentation a été choisi à l'intérieur du site de la station, ce qui nous a permis de bénéficier de l'eau traitée sur place.

2.2.2. Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de cette station, selon DEGREMONT (1983) sont résumées par les points suivants :

- Mise en eau : Février 1990
- Collecte des eaux usées : réseau pseudo-unitaire

	1 ^{ère} phase	2 ^{ème} phase
- Nombre d'équivalent-habitants (E.H)	300 000	400 000
- Le débit des eaux usées $Q, m^3/j.$	700 000	100 000
- Le débit moyen journalier $Q_{moy}, m^3/h$	2920	4170
en eau usée		
- Le débit de pointe par temps sec: m^3/h	4670	6670

L'évolution de la pollution (entrée) de la première à la seconde phase est exposé dans le tableau n°11 .

Tableau N°11 : Evolution de la pollution entre 1^{ère} et 2^{ème} phase

Caractéristiques	1 ^{ère} phase	2 ^{ème} phase
	1990	2000
Population équivalente	300 000	400 000
DB05	54	54
Dotation g/hab/j.	16 200	216 000
Pollution journalière (concentration des eaux brutes)	231	216
M.E.S	70	70
Dotation hab/j.	21 000	28 000
Quantité journ.g/hab/j.	300	280

Source : (24)

Les caractéristiques des eaux traitées sur 24h seraient en moyenne selon le projet DEGREMONT comme suit :

Tableau N°12 : Concentrations projetées des eaux usées traitées (charge physique et biologique) à la sortie de la station

Caractéristiques	Concentration (mg/l)
M.E.S	30
DB05	30
DCO	90

Source (24)

N.B. : Le rendement théorique de l'épuration a été évalué à 87 %

2.2.3. Perspectives

En se basant sur les caractéristiques de la station d'épuration que nous venons de présenter, celle-ci pourrait satisfaire

en eau, pour le court terme (1^{ère} phase), les besoins de pointes les plus élevés des cultures de la région.

Pour une dose moyenne de 6000 m³/ha, les superficies irrigables, à partir des eaux de la station seraient de l'ordre de 2700 ha. En optant pour la micro-irrigation, les superficies irriguées seraient nettement supérieures.

La station d'épuration de Beni Mered, comme toutes les autres stations, de part sa situation géographique et son importance, pourrait être instituée en station pilote, une base d'expérimentation, avec une nouvelle vocation, celle de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation.

Beaucoup de créneaux sont à posteriori possibles : allant de l'utilisation des boues comme amendement des terres agricoles, la production de gaz (CH₄) dans les digesteurs, à la production d'électricité. Cela permettrait l'amortissement rapide des coûts élevés de cette infrastructure et élargirait les objectifs de la station, outre l'aspect initial anti-pollution du milieu naturel.

L'expérience est encourageante à plus d'un titre et peut avoir un effet d'entraînement par inertie sur les quatre stations en projet dans la Wilaya et les douzes de la région (Tipaza-Alger-Blida) annexe.

A l'échelle nationale, le nombre de stations d'épuration tout genre confondu avoisine 70 stations dont la majorité (70 %) sont en arrêt depuis longtemps (1). Les tableau n°13 constitué grâce aux informations glanées auprès des services concernés nous montre l'importance de la capacité en eaux usées épurées fournies par les quelques stations en fonctionnement.

Tableau N°13 : Principales stations d'épuration en Algérie

N°	Villes	E.H.	m ³ /j	m ³ /an.10 ³
1	Alger	700 000	105 000	37 800
2	Blida	300 000	45 000	16 200
3	Batna	120 000	1 800	6 480
4	Tizi Ouzou	100 000	15 000	5 400
5	Saida	70 000	7 500	2 700
6	Tiaret (N.F)	100 000	15 000	5 400
7	Ghardaia	50 000	7 500	2 700
8	Ouargla	80 000	12 000	4 320
9	Koléa	40 000	6 000	2 160
10	Djelfa	75 000	11 250	4 050
En construction				
11	Touggourt	65 000	9 750	3 510
12	Mascara	100 000	15 000	5 400
13	Tlemcen	105 000	15 750	5 670
14	Setif	400 000	60 000	21 600
15	Maghnia	90 000	13 500	4 860
16	Constantine	50 000	7 500	2 700
17	Staouali	15 000	2 250	810
18	Club des pins	5 000	750	270

Les quantités d'eaux usées épurées s'élèvent à plus de 130 000 m³/an. Ce volume non négligeable, jusque là abandonné dans la nature est appelé à doubler dans l'avenir très proche.

En tenant compte de la multiplication des stations d'épuration, conséquence de l'urbanisation et de la lutte contre la pollution des oueds, des nappes et de l'environnement, les quantités d'eaux usées épurées sont susceptibles de doubler dans la décennie à venir.

La ventilation de ces volumes croissants permet sans équivoque de relever les défis et limiter les dégats qu'occasionne la raréfaction de l'eau dans notre pays.

3. Conclusion sur la problématique de l'eau en Algérie

Il existe un grand déséquilibre entre les besoins en eaux et les potentialités mobilisables des eaux en Algérie. Ce déséquilibre s'accroîtra dans l'avenir.

En tenant compte des expériences dans la gestion des eaux dans d'autres pays du monde et des conditions propres à l'Algérie, une politique de l'eau doit être sérieusement envisagée. Cette politique s'articulera autour des orientations suivantes :

- Mobilisation et utilisation rationnelle de toutes les ressources en eaux (superficielles-souterraines et non conventionnelles)
- Protection et enrichissement des ressources en eaux par la lutte contre le gaspillage et les pertes d'eau.
- Elaboration de relations entre les différents secteurs utilisateurs.

La mobilisation des eaux superficielles se réalise ordinairement par le stockage à l'aide de barrage-réservoirs et de retenues collinaires. C'est un moyen classique connu pour son efficacité dans la régularisation, la lutte contre la sécheresse, et l'alimentation des nappes.

Mais l'efficacité dans la construction des barrages réservoirs en Algérie, jusqu'à nos jours, est grandement limitée par la réduction de leur capacité à la suite de l'envasement.

En plus de celà, les sites favorables, donc économiques pour la construction, ont été déjà utilisés et les réservoirs futurs seront techniquement et économiquement plus chers.

Les ressources souterraines sont utilisées au delà de leurs débits d'exploitation et ne constituent plus une solution complémentaire

Enfin, la mobilisation des eaux superficielles et souterraines reste aléatoire à la tendance climatique actuelle.

La réutilisation des eaux non-conventionnelles se présente alors comme une première réponse à cette situation de pénurie. Les volumes des eaux usées épurées disponibles en Algérie constituent un authentique potentiel, si nous savons les réutiliser.

Notre travail s'inscrit dans cette perspective qui constituerait une garantie potentielle. La capacité en eaux usées épurées pour la vingtaine de stations d'épuration (fonctionnelles) en Algérie représente environ $130.000 \text{ m}^3/\text{an}$. Cette énorme quantité peut desservir facilement les réseaux d'irrigation des périmètres limitrophes.

Les risques liés à la REU peuvent être limités, voire supprimés si l'on opte pour une gestion et une exploitation réfléchie de nos stations d'épuration.

" Tout corps dans un milieu aquatique qui ne soit pas H₂O
est un produit de contamination ou une impureté... Toute eau est
impure..."

Frank N.KEMMER (1979)

CHAPITRE II : La réutilisation des eaux usées dans le monde et ses contraintes

A. Experiences sur le REUE

1. Introduction

La REU, en agriculture, dans ce que l'on appelait l'épandage des eaux usées a débuté à la fin du 19^{ème} siècle dans beaucoup de pays : en Australie, en France, en Allemagne, en Inde, en Grande-Bretagne, aux USA et au Mexique.

La REU, de manière indirecte, c'est à dire l'approvisionnement à partir des eaux de rivière recevant les eaux usées est pratiquée dans le monde entier (21).

Les problèmes qu'elle a engendrés sont ignorés, faute de prise en charge, de contrôle et de recherches sérieuses. Il reste cependant difficile de les éliminer surtout dans les pays vivant une situation d'indisponibilité en eau d'irrigation à une époque où la pollution des eaux s'est diversifiée et s'est accentuée..

L'irrigation, au moyen des eaux usées brutes cause un important surcoût d'infections à la population, là où elle est pratiquée. Elle demeure donc fatale pour la santé humaine même avec beaucoup de précautions. Officiellement, les pouvoirs publics, partout ailleurs, l'interdisent sur toutes variétés de cultures.

En Algérie, la réutilisation des eaux usées brutes en irrigation a été constatée à plusieurs endroits. Nous l'avons remarqué dans la région de Blida. Elle s'amplifie durant les périodes de sécheresse et provoque des infections parfois mortelles. Les épidémies de choléra déclarées en été témoignent de la gravité de la pratique.

Parmi les pays présentés ci-dessus, certains ont perfectionné la pratique de l'épandage des eaux usées en agriculture et leur réutilisation s'est étendue à d'autres activités comme l'aquaculture, l'industrie, la réalimentation des nappes et le nettoyage public. D'autres ont une expérience beaucoup plus récente (Tunisie-pays du Golfe-Palestine occupée...).

2. La réutilisation des eaux usées en agriculture

En 1939, ROLLEY (52) avait déclaré que "l'irrigation est un des meilleurs moyens qui existe pour épurer les eaux usées parce- qu'elle réinjecte dans le circuit vital, des déchets organiques et minéraux qui vont remplacer les éléments exploités par les plantes" Ce point de vue est partagé par beaucoup de chercheurs (33) (52) (56)

Aux USA où la REUE est une pratique ancienne donc mieux maîtrisée, le nombre de projets réutilisant l'eau usée épurée en agriculture a atteint le chiffre de 3400 en 1980 (50) (53). Un résumé des expériences américaines est donné au tableau N°14.

En Inde, 73.000 hectares (en 1989) (50) sont arrosés par des eaux usées épurées en plus des énormes projets existants dans le domaine de la pisciculture.

Au Mexique, un débit de $55 \text{ m}^3/\text{s}$ des eaux usées partiellement traitées puis stockées dans des réservoirs saisonniers pour leur dilution dans les eaux de rivières permet d'irriguer dans la vallée du MEZQUITAL plus de 80.000 ha (50) (53).

Pour cette superficie, le Mexique abrite le plus vaste projet de la REUE au monde, ayant l'objectif d'assurer la production de luzerne, du maïs, de l'avoine. Une solution heureuse pour l'alimentation du bétail. Les cultures comme la tomate et le piment sont également irriguées à l'aide de ces eaux usées, exception faite pour la laitue, la culture de la bettrave, les carottes, les épignards et le persil.

En règle générale, ce sont les cultures à feuillage à ras du sol, ainsi que les plantes à tubercules qu'il faut éviter car le contact avec les eaux est facile et la contamination est inévitable.

En République d'Afrique du Sud où les conditions climatiques ressemblent aux nôtres (487 mm de pluviométrie en moyenne par an) on incite à la réutilisation des eaux usées. Le débit des effluents disponibles quotidiennement est de 640.000 m^3 d'eaux usées épurées dont 50 % sont réutilisées comme suit (50) :

- 14,4 % pour le rafraichissement de l'atmosphère dans les parcs, les jardins publics et les accotements.

- 26,8 % pour l'irrigation de nombreuses cultures (fourragères, maïs...) sur une superficie de 18.000 ha.

- 8,8 % réutilisé dans des installations industrielles.

A ICA ,au Pérou, le succès de la REUE tient lieu à un traitement partiel des eaux usées dans les bassins de stabilisation. Les eaux contiennent 10^5 de bacteries coliformes fécales par 100 ml (valeur trop élevée) et servent à irriguer environ 400 ha de coton, de maïs et de vigne. La restriction élimine les plantes à tubercules, les légumes poussant près du sol ou consommés à l'état cru.

En Tunisie, après un traitement biologique secondaire classique, les eaux usées sont réutilisées sans chloration pour irriguer des milliers d'héctares d'agrumes (50) (10).

Cette technologie est en pleine expansion en Tunisie en raison des résultats encourageants prouvés par une dizaine d'années de recherches (National Research Concil).

Les projets de la REUE sont nombreux en Tunisie, (28 projets) assurant la production d'arbres fruitiers, de plantes à graine et de cultures fourragères. La région de Tunis et de Kairaouan sont des sites expérimentaux (10). Les eaux usées épurées sont distribuées par des rampes souterraines de micro-irrigation. La distribution localisée permet d'assurer la protection de la santé des manipulateurs et des consommateurs.

En Egypte, les plans de développement et d'implantation de nouvelles agglomérations dans le désert prévoient la REUE pour développer de nouvelles superficies agricoles.

Les mêmes objectifs sont prévus par le plan directeur des eaux en Jordanie pour l'horizon 1985-2000, dans la région d'Akaba (56)

Au Soudan, au Sud de Khartoum, une ceinture verte de 2800 ha plantée d'eucalyptus et d'arbre variés réutilisent les eaux usées épurées pour lutter contre la désertification (37).

Tableau n°14. - La réutilisation des eaux usées aux USA

Localisation	Climat Pluviométrie moyenne annuelle	Type de sol	Cultures pratiquées	Qualité de l'eau épurée	Volume d'eau épuré	Surfaces utilisées	Commentaires
Pennsylvanie (U.S.A.)	850 mm	Limons sableux profonds très perméable	Forêts prairies céréales zones de loisirs	Traitement II + désinfect. ~ 600 colif./ 100 ml	1 500 m ³ /j ~ 50 mm/s	400 ha	
Muskegon (U.S.A.)	760 mm	Sableux perméabilité élevée	Céréales	Lagunage aéré + décantation + désinfect. 1000 colif./ 100 ml	40 000 m ³ /j	2 400 ha	Dose maximale épurée (effluent + pluie): 100 mm/s.
San Francisco (U.S.A.)	550 mm		Parc d'agrément	Traitement II + désinfect.	~ 3 800 m ³ /j ~ 25 mm/s en une fois	400 ha	Parc du Golden Gate
Tallahassee (U.S.A.)	1 500 mm	Sables à quartz fin forte infiltration		Traitement II + désinfect.	3 800 m ³ /j	Deux parcelles de 1,6 ha	Satation expérimentale
St Charles (U.S.A.)		Sablonneux bon drainage	Bois	Lagunage	2 000 m ³ /j ~ 125 mm/s	3 520 ha	Nécessité de maintenir la litière forestière qui contribue à l'épuration, évite les inondations et la lessivage des sols
Raunswaig (R.F.A.)	650 mm	Sable pur	Pommes de terre céréales betteraves	Traitement II + désinfect.	4 500 m ³ /j ~ 300 mm/an en six applications de 50 mm	3 000 ha	Association d'exploitants agricoles qui utilisent les eaux de la ville (550 exploitants)
Debrecen (Hongrie)	600 mm	Limons sableux à bonne perméabilité	Pommes de terre, maïs luzerne tournesol	Décantation I	300 à 600 mm/an	14 ha	Certaines parcelles sont irriguées, d'autres servent à l'infiltration. Irrigation de produits maraichers interdite. Zone de protection de 300 m boisée autour des périmètres d'épandage.

Source : (56)

L'on constate que la REUE est appliquée en climat aride mais également en climat humide (1500 mm de pluie/an). Cette pratique concerne les forêts, les parcs d'agrément, les cultures maraîchères et les céréales. L'épuration des effluents s'est limitée aux traitements secondaires suivis d'une désinfection.

En Algérie, cette pratique serait intéressante à plus d'un titre car :

- Elle pourrait être appliquée pour développer des plantations de ceinture d'arbres (barrages verts) autour des villes permettant de stabiliser le désert et enrayer les tempêtes de sables.

- L'irrigation de plusieurs cultures comme l'arachide (consommée torréfiée), le coton, les cultures industrielles et l'arboriculture ne doit poser aucun problème d'ordre sanitaire.

A la ferme pilote de LANDIRAS (GIRONDE-BORDEAUX) l'expérience tentée en 1985 (18) consistait à traiter un effluent de 600 EH par le biais du sol et le recyclage des eaux aux moyens d'une production fourragère de qualité. Le débit moyen de l'effluent ($15\text{m}^3/\text{j}$) n'a pas influencé la qualité des eaux de la nappe située à 5m de profondeur grâce au choix du système d'irrigation par aspersion.

Les rendements de l'épuration sont exposés dans le tableau n° 15

Tableau N°15 : Rendements de l'épuration des eaux usées à travers le sol.

Paramètres	DBO	DCO	m.e.s	Coliformes/ml	Streptocoques/ml
Rdt	mg/l	mg/l	mg/l		
Effluent Primaire	168	305	76	$9 \cdot 10^7$	$7.2 \cdot 10^6$
Rendement de l'épuration par le sol(%)	54	42	20	95	94

Source : (18)

Ces mêmes études ont montré également la possibilité de réaliser des économies de 35 % sur les investissements dûs aux équipements dans le traitement classique.

L'arrosage des espaces verts urbains (parcs, terrains de sport, accotement des routes ...) s'est considérablement développé en Australie, en Amérique latine, en Espagne et aux USA (50).

La REUE en foresterie pourrait avoir des retombées écologiques, économiques et hydrauliques importantes en plus des autres domaines qu'elle peut servir et développer.

A cet effet, les chercheurs français (35) (47) (18) se sont intéressés depuis quelques années à la question et avaient effectué plusieurs études en milieu forestier comme à Saint-Tropez en 1985 et à Cogolin en 1986.

Ces recherches dirigées par le CERMAGREF ont montré que l'irrigation localisée voire même par aspersion donnait des résultats intéressants vis à vis de la croissance des jeunes forêts, de la diminution de l'inflammabilité (lutte contre l'incendie) et l'amélioration de la combustibilité (exploitation du bois).

Les résultats des recherches sur la REUE, même s'ils restent partiels et imprécis, sont satisfaisants, encourageants et constituent un repère pour la valorisation des eaux usées et la conservation de l'eau de manière générale.

La tendance à la raréfaction de l'eau douce a incité les pays possédant des moyens financiers importants (pays du Golfe) à utiliser les techniques de pointes les plus coûteuses pour la filtration et la désinfection des eaux usées traitées (50).

Les pouvoirs publics, dans certains pays comme la Jordanie, le Pérou et l'Arabie Séoudite, autorisant déjà la réutilisation de tous les effluents provenant des stations d'épuration exclusivement pour l'irrigation (50).

Le cas de la Palestine occupée mérite d'être souligné. En effet, la Palestine occupée serait dans très peu de temps le pays pilote de la REUE en agriculture. C'est le label de la politique nationale de ce pays (50).

Déjà, en 1990, 70 % des effluents palestiniens sont utilisés dans quelques 250 projets agricoles. L'objectif visé est la réutilisation à 100 % des effluents.

Les conditions climatiques de ce pays ne lui permettent pas une gestion sans économie d'eau. Nous rappelons que le goutte à goutte occupe la même importance que la REU dans ce pays. Pendant les périodes de moindre demande en eau, le stockage des eaux usées s'effectue dans des réservoirs profonds et serviront à irriguer des cultures comme le coton, les plantes fourragères et l'arboriculture.

En plus de la REUE dans l'irrigation, les eaux usées épurées ou pas peuvent être valorisées de plusieurs manières et pour divers objectifs.

3. La réutilisation des eaux usées en pisciculture et aquaculture

Cette pratique est aussi ancienne ; elle s'est développée en Europe, en Allemagne et en Inde (50).

Ainsi, en Inde (Calcutta) où se trouve actuellement le plus vaste réseau du monde d'aquaculture basé sur l'utilisation des eaux usées (50) (29), des bassins totalisant une superficie de 12.000 ha sont peuplés de grandes carpes et d'espèces Tilapia. Le rendement annuel moyen est de plus de 1000 kg/ha, au point où la consommation du poisson pour cette ville est assurée à 20 % sans aucun risque de maladie. D'autres avantages sont à signaler tels que le taux d'emploi de 8 personnes à l'hectare (soit 96.000 employés dans tout le projet) et la conservation du milieu naturel.

En Allemagne (ex RFA), les eaux usées de la ville de Munich (25 %) sont stabilisées, c'est à dire débarrassées de la majeure partie des m.e.s. puis traitées (40 heures de rétention) dans des grands bassins. Ils représentent de grands complexes piscicoles (30 bassins sur 233 ha) assurant un rendement de 500 kg de viande bleue à l'hectare.

* m.e.s : matières en suspension

4. La recherche de la nappe

L'épuration des eaux usées comme nous l'avons déjà cité, peut se réaliser par la filtration à travers la couche sableuse d'un bassin ou par la circulation à travers le terrain naturel constituant un potentiel important dans la recharge de la nappe.

La recharge des nappes a été pratiquée dans des pays développés comme : la France, l'Allemagne, les pays-Bas, les USA, la Palestine occupée et la Suède.

L'exemple français est illustré par le cas de Croissy-Laval de Paris (vallée de la Seine) (55) où l'alimentation de la nappe se réalise à l'aide de l'eau de la Seine tant que la pollution de cette dernière n'a pas dépassé un certain seuil.

Le débit spécifique d'infiltration a été évalué de 0,02 à 0,04 $m^3/h/m^2$. Le prétraitement repose sur la coagulation et le charbon actif sans stérilisation.

Un autre projet en France, mis en service en 1951, consiste à injecter une quantité d'eau totalisant 8,5 m^3/s à travers 121 fosses sur la rive droite et 112 fosses d'alimentation sur la rive gauche du Rhône.

En Allemagne (ex RFA), c'est dans le bassin de la Rhur ou d'importants bassins d'infiltration à fond sableux ont été aménagés. L'eau est prétraitée dans des décanteurs type "accelator" puis injectée à travers des bassins d'infiltration qui permettent une alimentation considérable de la nappe souterraine au profit des réseaux d'AEP, d'irrigation ou d'utilisations diverses (55). Le prélèvement atteint les 1,2 milliards de m^3/an , soit un débit assuré de 40 m^3/s .

Au Pays-Bas, où la même pratique existe, elle permet grâce aux lacs d'infiltration dans les dunes littorales d'Amsterdam d'alimenter toute la ville en eau potable à partir de l'eau polluée du Rhin (1).

Après prélèvement de l'eau du sous-sol, l'eau subit un prétraitement au charbon actif puis une infiltration rapide suivie d'une filtration lente et enfin une chloration-fluoration avant son utilisation par l'homme.

En Californie (55), dans l'Orange Country, cette technique est également utilisée depuis les années 1960. C'est à partir des eaux du Colorado que les américains injectaient un débit équivalent à $8\text{m}^3/\text{s}$ dans le sous-sol pour les mêmes objectifs précités.

Dans le même Etat, à Los-Angeles Country Flood Control District, l'utilisation des eaux usées du Colorado a pour objectif de servir comme force antagoniste, un contre poids, pour repousser l'invasion du biseau formé par la nappe saline en bordure de l'océan. L'avance du biseau salin au détriment des nappes continentales est accélérée par suite de pompage intensifs (55). Ce phénomène existe chez nous ; il a été déjà signalé.

Enfin, aux USA, il existe de véritables usines de traitement des eaux usées (chaînes de traitement) utilisant le procédé de l'osmose inverse traitant des quantités énormes variant de 20.000 à 50.000 m^3/j . aux fins de la réalimentation des nappes. (55)

5. La réutilisation des eaux usées en industrie

La régénération des eaux usées pour l'usage industriel est un atout largement pratiqué par les usines géantes et les centrales thermiques.

Citons le cas de USINOR à DUNKERQUE ; cette usine épure ses eaux résiduaires pour un recyclage complet (55).

Le cas des aciéries de la compagnie BETHELHEM à Sparrows Point aux USA ou la raffinerie de pétrole de la TEXAS COMPAGNY qui utilisent les eaux usées pour le refroidissement et la production de vapeur d'eau (56).

A Las Vegas, la compagnie NEVADA POWER achete environ 16.000 m³/j d'eau usées traitées pour le refroidissement des usines thermiques. Pour de tels usages, le traitement singulier à la chaux (ou à l'aide d'un coagulant) élimine largement les phosphates et par conséquent les risques d'entartrage (56).

Au Japon, les dangers de la pollution et les perspectives de la REU sont pleinement pris en considération. Dans les grandes villes, les eaux grises (eaux de lavage) sont collectées séparément, traitées et recyclées pour les chasses-d'eau (55) et autres usages.

On y trouve même des mini-stations de traitement permettant de réaliser le travail sous les immeubles, assurant des circuits d'eau fermés. Le principe est certes onéreux, mais il réalise une économie d'eau importante.

B. Les contraintes de la REUE

Les eaux usées industrielles les plus à craindre sont celles provenant des usines utilisant les métaux lourds ou utilisant des produits radioactifs. Le tissu industriel en Algérie est important et s'élargira éventuellement dans le futur. La nécessité de la mise en place d'une structure de contrôle permanent et urgent dans une perspective d'améliorer la qualité de l'eau usée, protéger les stations d'épuration et le milieu naturel et une condition de réussite.

Les eaux usées urbaines sont constituées essentiellement de matières solides, minérales, limons... provenant du ruissellement (plus abondant en milieu méditerranéen), des matières dissoutes, des sels solubles (CE), des matières organiques (DBO-DCO et le COT) et de nombreux ions provenant des détersifs comme c'est illustré dans les tableaux précédents.

Ainsi, la suppression, lors du traitement de certains éléments jugés indésirables dans les eaux usées épurées permettrait de fixer la qualité de l'eau et donc sa destination.

Il faut signaler que, nonobstant le traitement, les eaux usées risquent de contenir des impuretés gênantes et dangereuses. L'obtention de la qualité d'eau usée requise pour l'irrigation exigerait au minimum une filtration gravitaire rapide suivie par une chloration précédée d'un traitement par coagulation chimique et une décantation en plus du traitement classique (12).

Dans de nombreux cas, le traitement des effluents destinés à l'irrigation se rapproche du traitement pour la production d'eau potable. Cependant, cette approche a été jugée sévère et a fait l'objet de nombreuses tergiversations que nous expliquerons plus loin.

Les dangers de la pollution de ces eaux usées sont dûs essentiellement à :

- La présence d'agents pathogènes provoquant un risque infectieux.
- La salinité des eaux, l'excès des concentrations des sels, la présence de métaux lourds et des oligo-éléments et la valeur fertilisante.
- La présence de matières en suspension
- L'existence d'éléments radioactifs

Tableau N°16 : Composition des eaux usées ménagères en gramme par m³ d'eaux usées (g/m³) pour un débit d'eau usée de 150l/h.j

Nature de pollution	Minérale	Organique	Total	DBO5
Matière en suspension séparable par décantation	130	270	400	130
Matières en suspension non séparable par décantation	70	130	200	80
Matières dissoutes	330	330	660	150
Total des matières solides	530	730	1260	360

Source : (54)

Tableau N°17 : Pollution des eaux usées moyennes (pollution des eaux ménagères en gramme par habitant et par jour)
[g/hab., j]

Nature de la pollution	Minérale	Organique	Total	DBO5
Matières en suspension séparable par décantation	20	40	60	19
Matières en suspension non séparable par décantation	10	20	30	12
Matières dissoutes	50	50	100	23
Total des matières solides	80	110	190	54
N			12	
P ₂ O ₅			3	
K ₂ O			9	

Source (54)

1. Les contraintes liées aux risques infectieux des eaux usées épurées

Composition des eaux usées

Les eaux usées contiennent une diversité d'éléments pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, vers intestinaux et champignons); leur abondance dans les eaux induit des risques infectieux dangereux.

Cette abondance est mesurée par le test des bactéries coliformes de matières fécales car ils indiquent le degré de pollution dû aux agents pathogènes.

La charge pathogène provoque des problèmes sérieux là où les règles d'hygiène sont bafouées (chaque être humain élimine quotidiennement plusieurs milliards de germes/grammes de matières fécales) (32). Les risques d'infection sont parfois grands et s'accroissent durant les périodes d'étiages. A ce propos, les lachures au niveau des barrages jouent un rôle capital dans la dilution et par conséquent la réduction de la charge pathogène dont on dit : (56) " qu'elle reflète l'état de santé de la population de la région".

Dans la pratique, les *coliformes intestinaux* peuvent indiquer de façon assez sûre la présence de bactéries pathogènes car leur survie dans l'environnement ainsi que leur destruction durant le traitement sont similaires. En revanche, les *coliformes totaux* constituent un indice moins évident. Ces derniers ne sont pas tous exclusivement de même origine fécale, par conséquent, présentent des différences diverses. Les coliformes intestinaux indiquent très mal la présence des virus excrétés ou encore la présence de protozoaires, des helminthes, pour lesquels il n'existe pas d'indicateurs fiables (56).

Les risques provoqués par la charge bactérienne

Les coliformes intestinaux sont des bactéries qui vivent normalement dans l'intestin de l'homme et des animaux à des concentrations auto-régulées par l'organisme, donc tolérables.

Essentiellement, les *colibacilles* et les entérocoques (gram⁺), les coliformes intestinaux, à concentrations élevées, peuvent devenir pathogènes en envahissant les tissus et les organes.

Les agents pathogènes des eaux usées sont nombreux et dangereux dont les principales caractéristiques épidémiologiques sont classées dans le tableau n°18 .

Les risques dûs à la pollution des eaux usées, résident dans la contamination susceptibles de se manifester à différents niveaux par simple contact. En irrigation, les dangers provoqués par les eaux usées peuvent atteindre en premier chef le manipulateur (l'irrigant), le sol, les plantes, le consommateur et l'environnement.

Tableau N° 18. Principales caractéristiques épidémiologiques des agents pathogènes présents dans les excréta par catégorie environnementale

Agents pathogènes	Concentration dans les excréta ^a	Latence ^b	Persistance ^c	Multiplication en dehors de l'hôte humain	Dose infectieuse médiane (ID ₅₀) ^d	Immunité	Réservoir important autre que l'homme	Hôte intermédiaire
Catégorie I								
Entérovirus ^e	10 ⁷	0	3 mois	Non	F	Oui	Non	Aucun
Virus de l'hépatite A	10 ⁶ (?)	0	?	Non	F(?)	Oui	Non	Aucun
Rotavirus	10 ⁶ (?)	0	?	Non	F(?)	Oui	Non(?)	Aucun
<i>Balantidium coli</i>	?	0	?	Non	F(?)	Non(?)	Oui	Aucun
<i>Entamoeba histolytica</i>	10 ⁸	0	25 jours	Non	F	Non(?)	Non	Aucun
<i>Giardia lamblia</i>	10 ⁸	0	25 jours	Non	F	Non(?)	Oui	Aucun
<i>Enterobius vermicularis</i>	en général pas dans les matières fécales	0	7 jours	Non	F	Non	Non	Aucun
<i>Hymenolepis nana</i>	?	0	1 mois	Non	F	Oui(?)	Non(?)	Aucun
Catégorie II								
<i>Campylobacter fetus</i> ssp <i>jejuni</i>	10 ⁷	0	7 jours	Oui ^f	E(?)	?	Oui	Aucun
Pathogène								
<i>Escherichia coli</i> ^g	10 ⁸	0	3 mois	Oui	E	Oui(?)	Non(?)	Aucun
<i>Salmonella</i>								
<i>S. typhi</i>	10 ⁸	0	2 mois	Oui ^f	E	Oui	Non	Aucun
Autres salmonelles	10 ⁸	0	3 mois	Oui ^f	E	Non	Oui	Aucun
<i>Shigella</i> spp	10 ⁷	0	1 mois	Oui ^f	M	Non	Non	Aucun
<i>Vibrio cholerae</i>	10 ⁷	0	1 mois(?)	Oui	E	Oui(?)	Non	Aucun
<i>Yersinia enterocolitica</i>	10 ⁸	0	3 mois	Oui	E(?)	Non	Oui	Aucun
Catégorie III								
<i>Ascaris lumbricoides</i>	10 ⁴	10 jours	1 an	Non	F	Non	Non	Aucun
Ankylostome ^h	10 ²	7 jours	3 mois	Non	F	Non	Non	Aucun
<i>Strongyloides stercoralis</i>	10	3 jours	3 semaines (stade libre beaucoup plus long)	Oui	F	Oui	Non	Aucun
<i>Trichuris trichiura</i>	10 ³	20 jours	9 mois	Non	F	Non	Non	Aucun
Catégorie IV								
<i>Taenia saginata</i> et <i>T. solium</i> ⁱ	10 ⁴	2 mois	9 mois	Non	F	Non	Non	Bœuf (<i>T. saginata</i>) ou porc (<i>T. solium</i>)
Catégorie V								
<i>Clonorchis sinensis</i> ^j	10 ²	6 semaines	Durée de vie du poisson	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et poisson
<i>Diphyllobothrium latum</i> ^j	10 ⁴	2 mois	Durée de vie du poisson	Non	F	Non	Oui	Copépodes et poisson
<i>Fasciola hepatica</i> ^j	?	2 mois	4 mois	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et plantes aquatiques
<i>Fasciolopsis buski</i> ^j	10 ³	2 mois	?	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et plantes aquatiques
<i>Gastrodiscoides hominis</i> ^j ?		2 mois(?)	?	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et plantes aquatiques
<i>Heterophyes heterophyes</i> ^j	?	6 semaines	Durée de vie du poisson	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et poisson
<i>Metagonimus yokogawai</i> ^j ?		6 semaines(?)	Durée de vie du poisson	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et poisson
<i>Paragonimus westermani</i> ^j	?	4 mois	Durée de vie du crabe	Oui ^k	F	Non	Oui	Mollusque et crabe ou écrevisse
<i>Schistosoma</i>								
<i>S. haematobium</i> ^j	4 par millilitre d'urine	5 semaines	2 jours	Oui ^k	F	Oui	Non	Mollusque
<i>S. japonicum</i> ^j	40	7 semaines	2 jours	Oui ^k	F	Oui	Oui	Mollusque
<i>S. mansoni</i> ^j	40	4 semaines	2 jours	Oui ^k	F	?	Non	Mollusque
<i>Leptospira</i> spp	urine(?)	0	7 jours	Non	F	Oui(?)	Oui	Aucun

Leur élimination

Il est admis, par ailleurs, que la présence de faible quantité de bactéries coliformes dans le percolat d'un système (sol) ou au niveau des rejets d'une station d'épuration signifie l'absence ou le faible niveau de contamination par des agents pathogènes.

Le filtre "terre" est très efficace pour débarrasser les eaux usées de leurs agents pathogènes. Leur danger, pour les nappes ou dans les sols, dépend de beaucoup de facteurs : durée de vie des bactéries, des virus et vers à l'extérieur des hôtes spécifiques. Annexe n° 1.

Il est précisé maintenant que quelques mètres (1,2 ou 3 mètres) de percolation suffisent pour les éliminer des eaux (28).

Les plus gros sont piégés directement dans les micropores du terrain, les plus petits et les virus sont adsorbés par les colloïdes minéraux et organiques (28). Ces phénomènes sont plus rapides si le pH est inférieur à 7. On estime que 92 à 97 % des bactéries sont supprimées dans les 10 à 20 premiers centimètres du sol (53).

Dans les terrains Karstiques, la désinfection des eaux est incomplète (28) d'où un risque pour les nappes mais les agents pathogènes peuvent survivre sans aucune chance de se reproduire en absence de leur hôte et des conditions de développement. Sachant que les virus qui n'ont pas d'attributs essentiels de la cellule ne peuvent se multiplier de façon autonome car, ils se multiplient en présence de la cellule de l'organisme qu'ils infectent.

La destruction naturelle de ces agents pathogènes se produit après une période de quelques semaines à quelques mois dans le sol. Elle est due à une réaction hémostatique des associations microbiennes naturelles du sol par production de toxines et digestion grâce à des enzymes. Aussi, elle est due à l'absorption de ces organismes, grâce à des protozoaires prédateurs, par des organismes parasites et par le phénomène de la compétition à l'hostilité générale du milieu-sol-envers

les agents pathogènes habitués à l'homme ou aux animaux à sang chaud (28).

Afin d'éviter la contamination des eaux naturelles souterraines par ces agents pathogènes des eaux usées, il est nécessaire de prévoir une distance suffisante entre le périmètre d'épandage et le point de captage de la nappe pour les usages domestiques. Cette distance peut varier de 10 à 100 mètres selon la nature du terrain (28).

Le principal danger semble être alors leur présence éventuelle à la surface des légumes et fruits consommés à état cru, bien que certains virus échappent à toute filtration vue leur taille et arrivent à pénétrer par les racines à l'intérieur de la plante.

Leur présence à l'intérieur des plantes est sujette à beaucoup de réserves sachant que l'eau et les ions ont à franchir plusieurs barrières lors de l'alimentation des végétaux ;

- Membrane squelettique des cellules : paroi perméable
- Membrane cytoplasmique : composée d'une membrane dialysante laissant passer l'eau et les petites molécules.

En effet, cette représentation physique ne tient pas compte des détails importants : tels le phénomène de pinocytose (absorption de gouttelettes liquides par comparaison avec la phagocytose qui est une absorption de particules solides).

Les mécanismes de cheminement de l'eau dans la racine invoquent également les théories du gradient osmotique et du potentiel global.



Tableau N°19 : Dimensions des particules pénétrant par le poil absorbant des racines

Cellules de poils racin-	Bactéries	Virus	Ion non hydraté	Molécules d'eau	Molécules acide humique
20 μ	2 μ	-	2 Å	2,5 Å	50 Å

Source : (27)

Expériences et normes

Des polyvirus inoculés dans les eaux usées destinés à l'irrigation ont été détectés dans le sol après 7 jours et retrouvés à l'intérieur des concombres (53) alors que SMITH reconnaît que plusieurs auteurs infirment les résultats de son expérimentation. Leurs conclusions sur cet aspect considèrent que les éléments pathogènes ne peuvent pénétrer à l'intérieur du fruit sauf si celui-ci est endommagé, ce qui faciliterait la pénétration des bactéries et des virus.

RUDOLF (in 53) en irrigant des plants de tomates à l'eau usée confirme la non-pénétration des agents pathogènes à l'intérieur du fruit avec la précaution d'arrêter les irrigations à l'eau usée un mois avant la cueillette.

Les risques infectieux des eaux usées, dûs à la présence d'agents pathogènes ont constitué alors depuis longtemps un point de divergence entre les chercheurs eux-mêmes et avec les utilisateurs.

Ainsi, des normes ont été fixées par les organismes internationaux tels : OMS, FAO, OCED, CEE et gouvernements pour divers usages.

En 1985, les spécialistes de l'environnement et de l'épidémiologie se sont réunis en Engelberg (Suisse) (50) pour examiner les aspects sanitaires de l'utilisation des eaux usées et des excréta en agriculture et aquaculture. Ils ont souligné le danger essentiel des helminthes qui continuent de provoquer des cas de maladies mortelles (helminthiases) là où les eaux usées épurées ou pas ont été utilisées. (voir annexe n°2).

En 1987, les experts des projets OMS (programme des Nations Unies pour l'environnement) (50) avaient étudié à ADELBODEN, en Suisse, le danger de l'utilisation des déchets humains en agriculture et aquaculture.

Les documents, ainsi publiés, ont pour but d'encourager le gouvernement à envisager la REUE en agriculture mais de façon contrôlée.

A la même date, le Dr KREISEL (Directeur de la division de l'hygiène et du milieu) déclarait à Genève (50) qu'après une analyse récente des données épidémiologiques et des résultats des recherches récentes, les irrigations avec les eaux usées épurées comportent désormais beaucoup moins de risques qu'on ne le pensait et que les normes bactériologiques actuelles sont trop restrictives. Bien avant, en 1983, dans le document publié par DURAND (28), ce point de vue était déjà avancé. L'auteur précisant que par rapport à l'hygiène publique, l'épandage des eaux usées est moins dangereux que leur déversement direct dans les cours d'eau (eaux de surface et eaux souterraines).

En l'absence de données épidémiologiques précises (facteurs déterminants et réalistes mais aussi difficiles à évaluer) pour atteindre la qualité bactériologique voulue des eaux d'irrigation, sans présenter de risques majeurs pour la santé, les experts de l'OMS ont estimé (50) que les effluents ne devraient pas contenir plus de :

- Un oeuf viable de nématodes (helminthes) par litre d'effluent

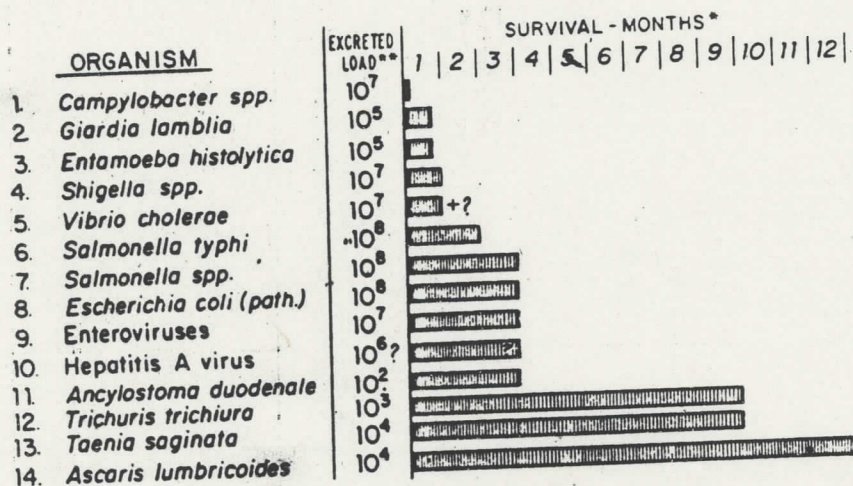
- 100 bactéries coliformes intestinales par 100 ml d'eau usée épurée.

Néanmoins, pour atteindre ce stade de norme, cela nécessiterait dans bien des cas à procéder à un traitement primaire et secondaire suivi d'une sédimentation et d'une chloration massive. La norme de 1988 prévoit 1000 coliformes intestinaux par 100 ml d'eau usée épurée.

Toutefois, ce qui a été souligné par ces mêmes experts, est que la présence dans les eaux usées d'organismes d'origine fécale n'implique pas automatiquement une augmentation de la morbidité ou de signes symptomatiques. Cette nouvelle exigence basée sur les données épidémiologiques et non bactériologiques est une manière de rendre plus pénible le choix mais, plus sûr pour une prise en charge sérieuse du problème. Même les traitements en bassin de stabilisation, qui étaient sous estimés, sont considérés de nos jours comme des procédés pouvant obtenir des effluents utilisables sans chloration, pour l'irrigation illimitée des cultures. L'efficacité de ces bassins est meilleure si elle intervient après d'autres traitements classiques (50).

Certains auteurs (50) évaluent le degré d'élimination des composants microbiologiques dans les eaux usées selon une échelle logarithmique et considèrent qu'une réduction de 99,99 % de germes correspond à l'échelle log₁₀ (Voir Fig. n°4).

Figure n°4. - Dose infective minimale. BRYAN, 1977 et FEACHEM et al, 1983



Source : (37)

Ainsi, pour que les eaux usées municipales aient la qualité voulue pour l'irrigation non limitée, il faut réduire la concentration bactérienne d'au moins quatre unités log₁₀ et celle des oeufs d'helminthes de trois unités.

Pour conclure avec l'aspect sanitaire et avant d'entamer les procédures citées dans la littérature pour la protection de la santé, nous proposons deux classifications : celle de SHUVAL et AL (37) basée sur des études épidémiologiques et celle de FEACHAM et AL en fonction du mode de transmission dans l'environnement.

SHUVAL et AL ont défini cinq mesures concernant les eaux usées destinées à l'irrigation après examen des études épidémiologiques, ils en ont conclu :

1. L'irrigation au moyen d'eaux usées non traitées cause un important *surcroît* d'infections par les nématodes intestinaux chez les consommateurs là où les maladies sont endémiques (l'ankylostomose)

2. L'irrigation des cultures au moyen d'eaux usées traitées n'entame pas un surcroît d'infections causées par les nématodes.

3. L'irrigation des légumes avec des eaux usées non traitées peut contribuer à la transmission du choléra et sans doute aussi de la thyphoïde.

4. Le bétail qui paît dans des champs irrigués avec des eaux usées non traitées peut être infecté par le *Cysticercus bovis* (ténia saginata à l'état larvaire) (voir annexe).

5. L'irrigation par aspersion au moyen d'eaux usées même traitées peut favoriser la dispersion en aérosol de petites quantités de virus et bactéries provenant d'excréta, mais aucun risque effectif de la transmission par cette voie n'a été détecté (précaution oblige).

FEACHAM et AL (30) ont réparti eux aussi en cinq catégories les infections causées par des pathogènes contenus dans les excréta en fonction du mode de transmission dans l'environnement.

1^{ère} Catégorie

Infections causées par des agents pathogènes infectieux dès l'excrétion qui ne peuvent pas se multiplier dans le milieu (virus- protozoaires-helminthes enterobius vermicularis [oxyures ou nématodes] et hymeolepris nana [petit ténia]). Ils sont généralement transmis directement de personne à personne dans le milieu domestique.

2^{ème} Catégorie

Bactéries contenues dans les excréta. Elles sont infectieuses dès l'excrétion de sorte qu'elles doivent être absorbées en plus grande quantité pour pouvoir causer des maladies. elles peuvent survivre longtemps mais exigent certaines voies de transmission. •

3^{ème} Catégorie

Nématodes (helminthes) intestinaux transmis par le sol qui n'ont pas d'hôte intermédiaire mais nécessitent une période de latence dans l'environnement (ascaris lumbricoides, les ankylostomes et les tricolcéphales).

4^{ème} Catégorie

Tenia saginata et *T. solium* qui se transmettent par la consommation de viande peu cuite.

5^{ème} Catégorie

Infections causées par les helminthes aquatiques nécessitant un ou deux hôtes aquatiques (mollusque, poisson)

Tableau N°20 : Directives concernant la qualité microbiologique des eaux usées utilisées dans l'agriculture

Catégorie	conditions de réutilisation	Groupe exposé	Nématodes intestinaux (nombre d'oeufs/l)	Coliformes intestinaux (nombre par 100ml)	Procédé de traitement susceptible d'assurer la qualité microbiologique voulue
A	Irrigation de cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sport, des jardins publics	ouvriers agricoles consommateurs	≤ 1	≤ 100	Une série de bassin de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique
B	Irrigation des céréales des C.I et des C.F et C. arboricoles	Ouvriers	≤ 1	Aucune norme n'est recommandée	Bassin de stabilisation 8-10 j de rétention
C	Irrigation des cultures de la catégorie B	Néant	Sans objet	Sans objet	Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation

2. Les contraintes liées à la salinité globale

Les eaux usées, même épurées, peuvent contenir beaucoup d'éléments minéraux et par conséquent génèrent des problèmes de salinité au niveau des sols irrigués. Ces contraintes sont à craindre en climat aride et semi-aride.

La présence de sels solubles (dû aux déversement de saumures) au niveau du sol (salinisation) du sodium et du magnésium échangeables sur le complexe absorbant (sodisation) peut entraîner des problèmes sérieux pour la structure du sol et sa perméabilité. Ils créent une phytotoxicité de conséquences néfastes.

La salinité globale est estimée par la détermination de la conductivité électrique (C.E. en mmhos/cm à 20°C). Les limites de ce paramètre sont indiquées par la norme USDA. Tableau n°21.

Les valeurs élevées de C.E. influent surtout sur l'absorption de l'eau par les cultures (pression osmotique élevée).

L'influence de la capacité de ces eaux sur le sol est déterminée après calcul du S.A.R. ajusté.

En effet, quand le S.A.R. dépasse la fourchette [6-9], on peut s'attendre à ce que l'eau d'irrigation induit un problème de perméabilité dans les sols du type gonflant. Mais la perméabilité est liée à la teneur en carbonate (CO_3) et bicarbonate (HCO_3) de l'eau d'irrigation, ce dont le S.A.R. ne tient pas compte. Entre deux arrosages, le sol se dessèche et une partie du CO et de HCO précipite sous forme de carbonate mixte de Ca et de Mg. Ainsi, le calcium et le magnésium sont ôtés de la solution du sol, ce qui accroît la proportion relative de Na, d'où le risque.

Tableau N° 21. Classification des eaux d'irrigation (norme USDA)

Degré	Qualité	Classes	
1	Excellente	C ₁ -C ₂	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols
2	Bonne	C ₂ -S ₁ C ₂ -S ₂	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sols. Sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux)
3	Admissible	C ₃ -S ₁	En général, eau convenant à l'irrigation de culture tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être alors contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité.
4	Médiocre	C ₄ -S ₁ C ₄ -S ₂ C ₃ -S ₃	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C ₃ -S ₄ C ₄ -S ₃ C ₄ -S ₄	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage; plantes tolérant très bien le sel.

Source : (9)

3. Les contraintes liées aux métaux lourds et oligo-éléments

Les oligo-éléments ou éléments traces sont utilisés en faible quantité par les végétaux. Ceux reconnus comme indispensables au développement des végétaux sont peu nombreux : le Bore, le Fer, le Manganèse, le Zinc, le Cuivre, le Molybdène, le Cobalt, le Nickel, le Plomb et d'autres. Voir tableau n°22 :

L'apport des eaux usées épurées ou non épurées favorise leur présence au niveau du sol. Si leur insuffisance indispensable au bon développement provoque des carences d'alimentation, leur excès peut conduire à des effets toxiques. Ainsi, des normes empiriques ont été établies selon leur phytotoxicité. Voir Tableau n°23.

Les sols contiennent des quantités variées et variables d'éléments sous forme de traces. Cependant, ces quantités sont très difficilement accessibles à la phase liquide du sol (3).

Dans le sol, les ions métalliques sont fixés par les argiles, la matière organique et les hydroxydes de fer et de manganèse. Cette fixation est favorisée par un pH élevé. La matière organique fixe les métaux lourds chélation (ELLISAND, 1972 in [12]). Ainsi, la présence de puissants agents de chélation dans les eaux usées permet l'entraînement des métaux lourds à une plus grande profondeur. VOLK (12) a montré que les chélateurs de zinc percolent rapidement et que les conditions, d'aérobie ainsi que la présence de la matière organique favorisent beaucoup la fixation des métaux lourds. L'élimination de ces derniers est conditionnée par le pH, la teneur en matière organique et la capacité d'échange de bases du sol. Leur élimination en profondeur ne constitue nullement un assainissement du milieu, bien au contraire, leur concentration risque d'augmenter au niveau des nappes et constituerait un danger pour l'alimentation humaine et animale. La présence des métaux lourds dans les eaux est indésirable à cause des surcroûts de problèmes de santé qu'elle provoquerait. La meilleure manière de les éviter consiste à isoler les rejets (souvent industriels) responsables et de les neutraliser.

Celà peut se faire par exemple par un stockage préalable ou par un prétraitement avant rejet dans les réseaux d'assainissement (ce qui suppose une réglementation relative et un organisme de contrôle).

Tableau N° 22 : Teneurs en métaux d'eaux décelées dans les eaux résiduaires de différentes stations d'épuration des Etats de New York (d'après Bower H.1974)

	Teneur minimale	Teneur maximale	Moyenne
Hg (en ppb)	< 0,1	125,0	0,9
Cr (en ppm)	< 0,05	6,8	< 0,05
Cu (en ppm)	< 0,02	5,9	0,10
Ni (en ppm)	< 0,1	1,5	< 0,1
Zn (en ppm)	< 0,02	20,0	0,12
Cd (en ppm)	< 0,02	6,4	< 0,02
Pb (en ppm)	< 0,2	6,4	< 0,02
Co (en ppm)	< 0,05	6,8	< 0,05

source : (56)

Tableau N° 23 : Teneurs maximales en métaux lourds tolérables dans les eaux d'irrigations en mg/l (d'après Page, 1974)

Eléments	Eaux destinées à l'irrigation		
	Utilisation continue		Utilisation discontinue
	Tous types de sols (1)	Sols à texture grossière (2)	Sols à texture fine (1)
Cr	5,0	0,1	20,0
Cu	0,2	0,2	5,0
Ni	0,5	0,2	2,0
Zn	5,0	2,0	10,0
Cd	0,005	0,010	0,050
Pb	5,0	5,0	20,0
Co	0,2	0,05	10,0
B	0,75	0,75	2,0
Se	0,05	0,02	0,05
Hg			
As	1,0	0,1	10,0

source : (56)

Le traitement par lagunage permet également d'obtenir une sédimentation des métaux lourds (3) dans le cas de lagune à macrophytes où leur élimination est assurée (absorption par les végétaux supérieurs). Sachant que des plantes comme la jacinthe d'eau, scirpes, thyphas, lentilles d'eau cultivées dans des terrains submergés d'eau usée ont permis d'aboutir à des rendements satisfaisants dans l'épuration et l'élimination des métaux lourds.

Tableau ° 24. Faculté de certaines plantes dans l'épuration des eaux usées.

Plantes	DBO5		M.E.S		Azote total		Coliformes fécaux/cm ³	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Jacinthes	22	7mg/l	43	6mg/l	4,4	1,1mg/l	-	-
Thyphas et lentilles d'eau	560	15	860	45	36	3,5mg/l	3000	17

Source (28)

Le prélèvement de ces éléments par d'autres plantes dépend donc des espèces cultivées. Les racines récoltées dans des terrains infectés par les métaux lourds ont révélé une forte charge à leur surface externe, mais les tissus internes de la plante et même les racines n'en contiennent pratiquement pas (26).

Seules les carottes absorbent et accumulent de fortes quantités de cadmium et de plomb. Les carottes peuvent donc servir de moyen de cure des sols riches en éléments toxiques mais ne peuvent être destinées à l'alimentation.

Après analyse des eaux, si l'effluent est modéré ou pauvre en métaux lourds, il peut être utilisé dans l'irrigation des cultures industrielles (coton) peu sensibles à la phytotoxicité.

Nous citons à titre d'exemple le cas du fluor et du bore qui se trouvent dans les eaux usées industrielles et domestiques provenant de l'utilisation permanente de détergents.

Le Fluor : L'absorption de fluor par le calcium sous forme de fluorine (F_2Ca) et de fluoroapatite conduit à la fois à la rétention du fluor et du calcium dans le sol et par les plantes (31).

Dans les eaux d'irrigation, la teneur maximale admissible du fluor est de 2 mg/l : seuil de tolérance des plantes. Les eaux superficielles en contiennent rarement plus de 1 mg/l. L'enlèvement du fluor dans le sol se fait par précipitation avec les phosphates sous forme de fluoroapatite.

Le Bore : En irrigation, la dose maximum tolérée du bore est de 0,75mg/l (les agrumes sont très sensibles au bore). Le bore est retenu dans le sol sous forme absorbée par les hydroxydes de fer et d'aluminium en revêtement des minéraux argileux (type micacéhydroxyde de magnésium).

Des études sur l'absorption du bore (28) après irrigation, ont montré que l'excès du bore est oté par libération après une altération des minéraux et lessivage du bore absorbé.

Donc, le bore des eaux usées sera retenu par le sol jusqu'à ce que sa concentration d'équilibre avec le bore de la solution soit atteinte.

D'autres auteurs (15) ont précisé que le sable ne retient pas de bore, contrairement à l'argile et peut absorber jusqu'à 90% après 1,2m de percolation.

4. Contraintes liées à la valeur fertilisante

Les eaux usées urbaines contiennent des éléments minéraux et organiques très utiles pour les cultures comme éléments fertilisants.

En tenant compte des doses d'irrigation employées même strictement (cas de l'irrigation localisée), les quantités d'éléments fertilisants apportées sont loin d'être négligeables.

D'une façon générale, une lame d'eau usée de 100 mm peut apporter(3):

- de 16 à 64 kg d'azote total
- de 4 à 24 kg de phosphate
- de 2 à 69 kg de potassium
- de 18 à 208 kg de calcium
- de 9 à 110 kg de magnésium
- de 27 à 182 kg de sodium

Ces concentrations peuvent être dépassées en climat semi-aride ou aride. Compte tenu des prélèvements de ces éléments fertilisants par les cultures, des excès de fertilisation peuvent apparaître et avoir des conséquences graves. Les exportations d'éléments majeurs correspondent à des dizaines ou centaines de kg /ha alors que pour les oligo-éléments, il s'agit de dizaines ou de centaines de g/ha.

Tableau N° 25. Quantités en éléments fertilisants prélevés par les cultures annuelles.

Production annuelle	Prélèvement à l'hectare en kg									
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Mn	Cu		
13 à 17 tonnes de M.S./ha	254	92	341	128	45	114	0,28	0,14		
40 tonnes fruits à l'ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Fe	Mn	Zn	Ca	B
	98	35	148	191	35	0,28	0,04	0,08	0,07	0,12

Source (27)

Les quantités d'éléments fertilisants apportées à chaque dose d'irrigation sont considérables face aux possibilités d'exportation par les cultures. On distingue :

- Produits solubles : Leur concentration dans les eaux d'égout dépend essentiellement de celle de l'eau distribuée et des apports propres des industries.

- L'azote : Les eaux usées en contiennent de 20 à 1000 mg/l. L'azote se trouvant sous forme organique, ammoniacale ou nitrique rentre dans le cycle de l'azote du sol et subit des phénomènes de réorganisation (minéralisation, nitrification, dénitrification). L'azote est alors oxydé puis transformé en nitrates au niveau du sol lors de l'irrigation. La moitié de ces nitrates est absorbée par les plantes (12) -cas des engrais- le reste se distribue entre dénitrification et vaporisation dans l'atmosphère sous forme de gaz ammoniac.

Si l'azote apportée par les eaux usées est sous forme organique ou ammoniacale, la formation des nitrates se réalise en aérobie avec consommation du carbone organique. Au contraire, la dénitrification, principal processus d'enlèvement de l'excès d'azote, exige des conditions d'anaérobie et la présence de carbone organique comme aliment énergétique des bactéries (12).

L'ammonium formé est absorbé par le sol où il peut être oxydé en phase de dessèchement et d'aération. Dans ce cas, il peut être consommé par les plantes (12). L'azote est considéré comme le facteur déterminant des rendements et constitue le pivot de la fumure, mais son excès limite grandement le développement des cultures.

En conclusion, les composés azotés provenant des eaux usées peuvent être minéralisés, retenus sur le complexe absorbant, volatilisés par dénitrification ou lessivés. Ce dernier constitue d'ailleurs un facteur limitant principal, sachant qu'en sol limono-argileux ($k = 12 \text{ mm/h}$)*, un pourcentage de 30 à 40 % d'azote épandu rejoint la nappe sous forme de nitrates.

* K = Conductivité hydraulique du sol

- Le phosphore : la teneur en phosphore des eaux d'égout varie de 0,5 à 40 mg/l. Nonobstant, l'intérêt du phosphore pour l'agriculture, des méthodes pour l'enlever au niveau du traitement avant la distribution, ont été mises au point : la plus importante consiste à ajouter des flocculants : calcaire, sulfate d'alumine ou chlorure ferrique dans l'eau d'égout avant la filtration.

La capacité d'absorption du phosphore par le sol est en relation avec sa teneur en fer et en aluminium. Elle est faible dans les terrains calcaires pauvres en ces deux métaux.

Par contre, le phosphore peut être précipité dans les sols calcaires sous forme de phosphate de chaux. C'est, selon DURAND (12), le principal mécanisme de la fixation du phosphore des eaux usées en sols calcaires. L'enlèvement du phosphore dans les terrains atteint parfois 70 à 99 % du phosphore présent selon le temps de séjour.

Ainsi, pour les deux éléments (N,P), les études (50) ont montré qu'avec un taux d'irrigation annuel de $20.000 \text{ m}^3/\text{ha}$, soit 2 m de C.E., dose qui correspond à la plupart des régions semi-arides et arides, des concentrations type 15 mg/l d'azote total et 3 mg/l de phosphore total dans les eaux usées convenablement traitées (bassin de stabilisation) équivalents à des taux d'application annuels d'azote et de phosphore de 300 kg et 60 kg /ha respectivement. De tels apports en éléments nutritifs peuvent réduire ou éliminer totalement la nécessité d'utiliser des engrais industriels et occasionnent par là une réduction des coûts à l'amont de la production.

- Le Magnésium : Élément constitutif de la chlorophylle, au delà d'un taux optimum, dans le sol le magnésium échangeable peut provoquer une certaine toxicité.

- Le Potassium : Très sollicité dans l'alimentation minérale des plantes (plantes à tubercules), son excès conduit à :

*- Fixation éventuelle de potassium à un état difficilement échangeable (rétrogradation dans les argiles). (3).

*- Augmentation des pertes par drainages en sols légers.

*- Consommation de luxe par les récoltes.

Son accumulation dans les sols peut entraîner une augmentation générale de la salinité du sol.

Les déséquilibres dans la fertilisation résultant de la REUE peuvent être diminués ou éliminés par l'emploi complémentaire de lagunage, de bassin de stockage ou par une fertilisation équilibrante bien contrôlée

- Le Carbone organique : Les eaux usées contiennent de nombreuses particules organiques non identifiées individuellement dont la teneur s'exprime globalement par les paramètres des milieux aquatiques définis par la DBO5, la DCO et le COT.

Dans le cas de l'épandage, le carbone organique total semble être le paramètre le plus utile.

Les eaux usées épurées doivent présenter une DBO5 de 10 à 20 mg/l, une DCO de 30 à 60 mg/l et un COT de 10 à 30 mg/l (12).

La valeur du rapport DCO/DBO5 indique la nature plus ou moins biodégradable de la matière organique. Plus il est élevé, moins elle est biodégradable (31).

Le carbone organique apporté par les eaux usées lors de l'irrigation ou produit par les bactéries autotrophes du sol est un des principaux facteurs de la dénitrification.

- Les matériaux en suspension : Les matières en suspension (m.e.s) qui existent dans les eaux usées épurées sont constituées de boue, de flocons bactériens, de fibres diverses et d'algues. Il s'y ajoute en région aride, des débris minéraux fins venant de l'érosion.

Ces solides se déposent à la surface du sol formant une couche peu perméable qui réduit la filtration de l'eau et accentue les conditions d'anaérobiose à l'intérieur du sol (12).

L'efficacité du terrain comme filtre se constate par la disparition des matériaux solides après un mètre de circulation dans le terrain.

Le colmatage en surface ou en profondeur peut être atténué par des phases répétées de séchage favorables à la décomposition des produits de colmatage et la régénération de la structure du sol et par conséquent de la perméabilité.

Si l'eau contient une teneur en m.e.s. supérieure à 10 mg/l, il faut prévoir un curetage périodique de la surface de contact pour éviter une diminution trop rapide de l'infiltration (12).

Les eaux usées peuvent contenir des hydrocarbures, des détergents, des composés phénoliques et une diversité d'autres produits. Beaucoup d'auteurs soulignent la présence du "boron", un composant des détergents synthétiques, très toxique pour les plantes (surtout les agrumes).

5. Conclusion

La situation en Algérie en matière d'eau est critique ; elle mérite une attention particulière. En effet, plus la demande en eau de "première main" augmente et plus les ressources en eaux naturelles potentielles et faciles à utiliser se raréfient d'une manière permanente pour l'agriculture. Inversement, les ressources de "deuxième main" s'accroissent proportionnellement et leur réutilisation deviendrait une nécessité impérieuse. Il est utile de signaler que la REU à l'état brut a tendance à se généraliser dans notre pays.

Beaucoup de pays vivant le problème de l'eau ont très tôt investi leur efforts dans la REUE et les résultats ainsi obtenus sont très encourageants et méritent d'être médités. Les expériences citées précédemment ont matérialisé les avantages de la REUE dans plusieurs domaines.

Les contraintes que pose la REUE sont théoriquement suffisamment connues et il convient cependant de les éviter en se référant aux limites imposées par les nombreuses recherches et expérimentations. La contrainte principale reste la charge microbienne que les normes OMS fixent à :

- Un oeuf viable de nématodes/litre d'eau usée épurée
- 100 bactéries coliformes intestinales/100 ml d'eau usée épurée

Il semble que pour atteindre ces normes, l'on peut se contenter d'un traitement primaire et secondaire suivis d'une sédimentation et chloration massive.

Ces mesures peuvent être rendues efficaces par la mise en place d'organismes compétents, assurant la planification, le contrôle et le suivi de la REUE en irrigation.

Il faut retenir que le stockage des eaux usées épurées est apparu comme un élément nécessaire pour la régulation des volumes d'eau et l'amélioration de la qualité des eaux.

"L'irrigation est, dans beaucoup de pays, un art ancien aussi vieux que la civilisation-mais pour le monde entier, c'est une science moderne, la science de la survie".

N.D. GULHATI, Un Indien

CHAPITRE III : Les techniques d'irrigation et la nécessité de l'option micro-irrigation

1. Situation des terres irriguées en Algérie et place de la micro-irrigation

L'Algérie, qui dispose actuellement eu égard à l'étendue de son territoire de 237.640.000 ha (a) a une S.A.U. de 7.500.000 ha (b), soit 3,1 % de (a) et une S.A.U. par habitant à la baisse depuis 1962 :

1 ha per capita en 1962

1 / 3 ha per capita en 1983

1 / 4 ha per capita en 1989

1 / 5 ha per capita en l'an 2000

Sachant que parmi cette S.A.U.(b), seulement 325.000 ha sont irrigués [soit 4,3 % de (b)] avec un système d'irrigation traditionnel dominant à 90,8 % (57) très prodigue en eau et de faible efficacité (30 à 40 %). Voir tableau n°26.

Ajouté à cela, 30 % seulement de la S.A.U. disposent de conditions pluviométriques plus ou moins favorables et moins de la moitié de la superficie est classée à caractère agricole.

Dans un contexte caractérisé par un manque des ressources hydriques du pays, l'explosion démographique, la nécessité d'accroître et d'améliorer la production agricole, il apparaît impératif de planifier et de gérer avec une grande efficacité l'utilisation de l'eau et surtout les volumes d'eau prévus pour l'irrigation.

L'irrigation devient alors un facteur décisif dans l'intensification agricole et l'accroissement des rendements. Cependant, à l'heure actuelle, elle n'occupe en somme qu'une faible part (4,3 %) à l'échelle de tout le pays, laissant la production agricole tributaire des aléas climatiques. En conséquence, la persistance de cette situation a pesé lourdement sur le poids des importations en produits alimentaires.

Tableau N°26 : Situation des périmètres irrigués en Algérie

PERI- METRES	INTITULE	LOCALI- SATION	SITUA- PHYSIQUE		REPAR. SECT. AG. PU.	SECTEUR SECTEUR PRIVE	RESSOURCES EN EAU	SYSTEMES IRRIGATION
			SUPERFI. T. (HA)	SUPERFI. EQ. (HA)				
BOU NAMOUSSA		ANNABA (1.576 ha) EL TARF (14.700)	17.480	16.276	15.700	1.700 (10%)	Barr. Cheffia VR. 90 hm ³ * Agriculture 60 hm ³	ASPERSION
HAMIZ		BOUMERDES (17.840 ha) ALGER (84ha) BLIDA (656ha)	18.470	17.000	11.970	6.500 (37%)	B. Hamiz VR. 15hm ³ . Marais de Reghia *3,2 hm ³ . Nappe de Bounah *4hm ³	GRAVITAIRE
HAUT CHELLIF		AIN DEFLA	20.280	20.280	15.527	4.723 (24%)	Barr. du Grib Deurdeur et Hareza. VR. Te 123hm ³ . Nappe 20hm ³	ASPERSION
MOYEN CHELLIF		CHLEF	25.386	21.774	15.332	10.054 (40%)	Barr. Fodda VR. 54hm ³ Transf. Part. du Ghrif B. de Sidi Yacoub VR. 90hm ³	GRAVITAIRE
BAS CHELLIF		RELIZANE	28.249	22.484	-	-	Merdjat Sidi-Abed VR. 45 hm ³	GRAVITAIRE
HABRA		MASCARA	20.230	19.610	16.290	3.920	B. de Bouhnia VR. 52hm ³ B. de Fergoug VR. 5hm ³	GRAVITAIRE
MINA		RELIZANE	9.943	9.592	8.451	1.472 (15%)	B/Bakhada VR. 50hm ³ (AEP de Tiaret) B. de Es-Saada VR. 120hm ³	GRAVITAIRE
SIG		MASCARA	8.666	8.200	4.178	4.408 (50,8%)	B. de Sarno. VR. 17hm ³ . B. de Cheurfa. VR. 15hm ³ (déclassé)	GRAVITAIRE
MAGHNIA		MAGNIA W. DE TLEMCEN	11.160	8.180	4.190	6.970 (59%)	B. Béni-Bahdel (Tharcua) VR. 48hm ³ . Nappe sout. 12hm ³	ASPERSION
AIN SKHOUNA		SAIDA	2.850	2.850	200	1.260 (40,7 % APFA)	Nappe de Ain Skhoua: 21hm ³	ASPERSION
KSOB		M'SILA	4.850	4.850 ha en cours de réaménagement	824	4.026 (88%)	B. du Ksob VR. 134hm ³	GRAVITAIRE
ABADLA		BECHAR	5.400	5.400	5.400	-	B. Djourf-Etorka VR. 100hm ³	SUBMERSION

Source : (6)

Nous signalons au passage que certains pays vivant des situations hydriques similaires ont contourné le problème par une planification efficace et une réelle gestion des ressources en eau. La micro-irrigation et la réutilisation des eaux se sont développées pour se substituer aux anciennes techniques.

En Algérie, par contre, nous continuons d'appliquer les méthodes classiques qui, outre leurs conséquences de la salinisation des périmètres, les apports d'eau irréguliers entraînent d'énormes pertes par évaporation et aussi par ruissellement et par percolation.

Les périmètres équipés déjà depuis longtemps subissent aujourd'hui d'importants préjudices dûs à la mauvaise gestion et exploitation, en plus de leur vétusté. Actuellement, ils sont l'objet de rénovation et donc de réinvestissements alors que les superficies réellement irriguées ont stagné ces dernières années (0,1 % de la surface du territoire (a)).

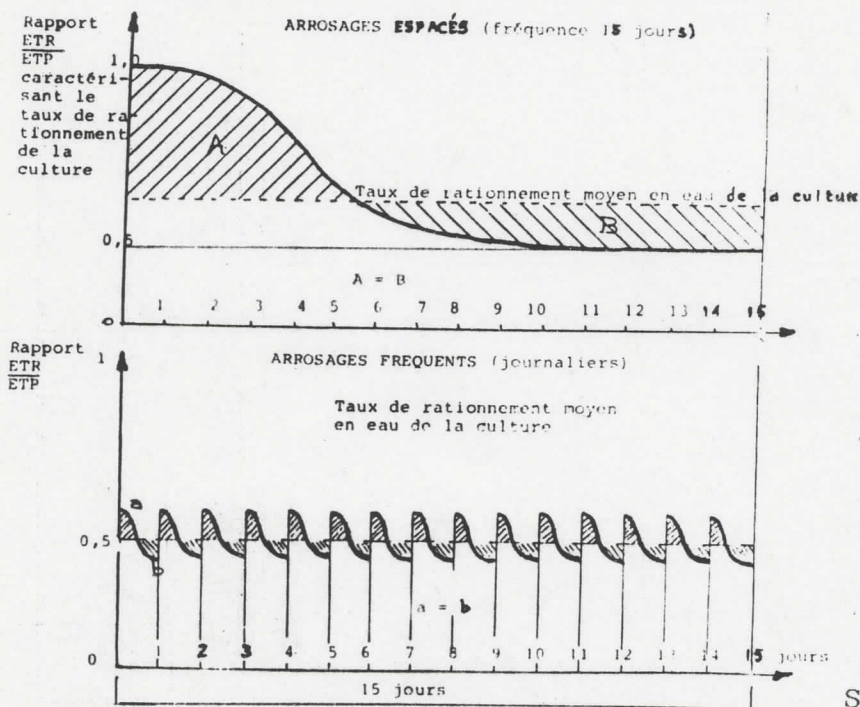
2. Consommation en eau des plantes

C'est en introduction, au point suivant, que nous avons jugé utile d'inclure quelques notions de besoins en eau des plantes et leur relation avec les techniques d'arrosage.

Compte tenu du perfectionnement de ces techniques d'irrigation dans le monde qui tendent, en règle générale, à augmenter le rendement hydraulique à la parcelle (R.H)* et par conséquent à limiter les déficiences (ou augmenter l'efficacité), à diminuer l'énergie utilisée et à rentabiliser l'apport d'eau. Cela veut dire faire tendre "l'offre" de l'eau, par le biais des techniques d'arrosage (souvent en régime discontinu) vers la "demande" des plantes (en régime continu). Cette tendance est schématisée par le graphique de la Fig.n°5.

* RH: Rapport entre l'évapotranspiration de la culture + lessivage - pluie efficace et le volume total délivré en tête de parcelle.

Fig.n°5 : Graphique de l'évolution théorique du rapport de consommation dans le temps (cas des cultures annuelles)



Source : (40)

Sachant que la pluviométrie dans notre pays est très mal répartie dans l'espace et dans le temps et que l'évaporation est intense (>1000 mm/an dans les pays arides et semi-arides), les quantités d'eau consommées par les plantes sont relativement importantes (400 à 800 mm d'eau/an).

Cependant, l'eau consommée par les plantes suit un rythme de fonction continue dont l'imitation -apport d'eau lors des irrigations- est d'une extrême délicatesse. Le sol aussi joue un rôle de régulateur mais souvent l'intervention de l'homme est indispensable.

En effet, lorsque la réserve en eau du sol, renouvelée par les pluies, n'est plus suffisante pour assurer une bonne alimentation hydrique des plantes, il y a manque d'eau ou sécheresse. L'irrigation doit intervenir, sinon la plante réagit en diminuant sa consommation d'eau par des mécanismes de régulation (fermeture des stomates ...)

La réussite de l'irrigation et à fortiori, la micro-irrigation dépend essentiellement des éléments suivants :

- Connaissance exacte des besoins réels en eau des cultures et du sol.

- Bon choix de la méthode d'irrigation et conduite rationnelle des arrosages.

C'est cette dernière méthode que nous avons choisie, vue sa simplicité et son efficacité dans nos conditions expérimentales.

Dans les deux cas, pour compenser le déficit du sol, avant que les plantes souffrent de manque d'eau, il faut connaître sa RFU ou dose d'arrosage qui varie avec la vitesse de dessèchement du sol.

Les recherches en matière d'irrigation ont développé des méthodes davantage plus fines en vue d'un rendement optimum (RH) qui valoriserait au mieux les ressources en eau et les équipements pour l'irrigation. Nous avons souhaité les expérimenter mais les conditions et les moyens n'étant pas offerts, nous nous contenterons de les citer :

Parmi ces méthodes dites "fines" (51), qui permettent un contrôle directe et routinier sur la plante et un bon pilotage des irrigations, nous avons :

- Méthodes du potentiel foliaire (chambre à pression)
- Méthode de la résistance stomatique (poromètre)
- Micro-morphomètre des organes, tiges ou fruits (pepista)
- Méthode basée sur la température de la surface du couvert végétal (radio-thermomètre infra-rouges ...)

En plus des méthodes qui sont complètement automatisées, basées sur l'incorporation d'un programme informatique pilotant les irrigations selon les conditions climatiques et météorologiques, il est clair que l'efficacité de ces méthodes va de paire avec le bon choix du système d'arrosage.

3. Performances de la technique d'irrigation localisée

3.1 Performances

Les techniques d'irrigation sont anciennes et nombreuses. Cependant, sans détailler chacune d'elles, nous distinguons deux grands types de mode d'irrigation :

- L'irrigation par gravité
- L'irrigation sous pression

L'irrigation par gravité englobe les techniques traditionnelles (calants, raie et ruissellement). Sa caractéristique principale est l'apport de grande quantité d'eau, même chargée, à des intervalles relativement éloignés (fréquences). Plus économe en énergie (terrain en pente légère), elle est cependant exigeante en eau. Le rendement hydraulique moyen à la parcelle est estimé à 30-40 % (voir tableau n°27). La durée de vie des installations est importante, ce qui la laisse encore dominante dans le monde (95 % des superficies irriguées) (22) (26), mais elle subit une régression importante au profit des techniques les plus évoluées (aspersion et goutte à goutte). Les pertes d'eau occasionnées sont grandes, quelque soit le soin qu'on y apporte. Le début de la parcelle reçoit toujours plus d'eau que l'extrémité et la quasi-impossibilité pour les plantes annuelles d'ajuster l'ETM à l'ETP : d'où des pertes d'eau importantes. voir graphique Fig.n°6 et 7.

Compte tenu de la nature des pertes d'eau propres à cette technique, il est très risqué de prévoir la REUE. L'irrigant est exposé en permanence au contact de l'eau.

L'aspersion, une technique beaucoup plus performante que l'irrigation de surface relativement économe en eau dont le RH varie entre 70 à 80 %. L'aspersion continue à s'améliorer grâce aux progrès technologiques de son matériel.

Elle perd son avantage de simuler parfaitement la pluie en temps venté

Tableau N°27 : Quantités d'eau utilisées par différentes méthodes d'irrigation

Méthodes	Par gravité	Par aspersion	Au G à G
Dose d'irrigation (mm)	1.068	903	722
Différence par rapport au G à G.	+ 48%	+ 25%	-

Source : (45)

Fig n°6 : Consommation en eau des plantes et impact du système d'irrigation

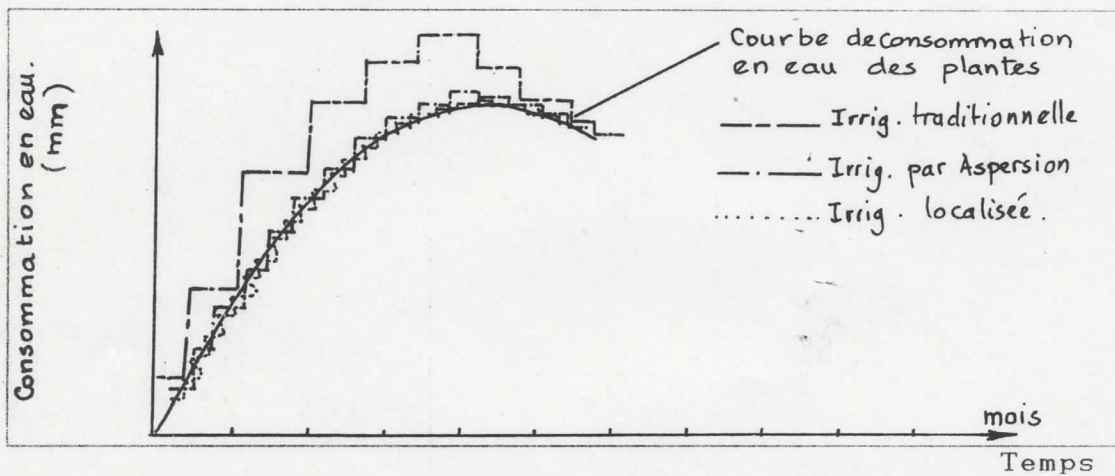
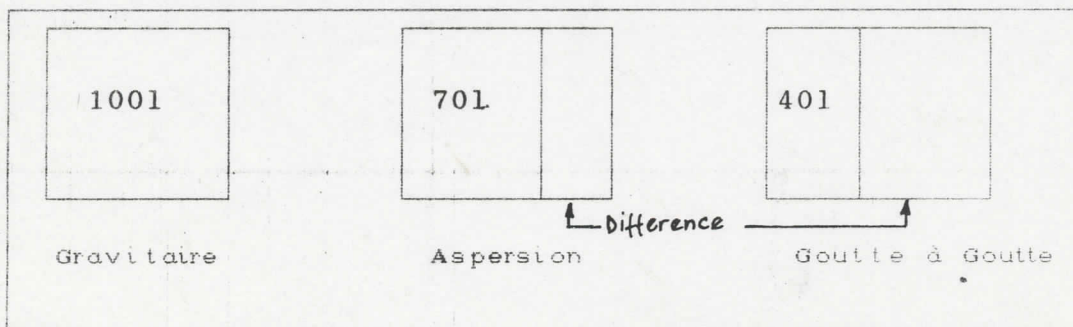


Fig n°7 : Influence du mode d'arrosage sur les apports d'eau (pour des besoins identiques, des apports différents)



Source : (2)

L'utilisation des eaux chargées ne constitue pas un handicap pour les asperseurs mais accélère la contamination dans le cas des eaux usées épurées. Elle est par conséquent très déconseillée pour des raisons sanitaires.

-La micro-irrigation : C'est le système le plus moderne et le plus économe en eau et en énergie (pression maximum à la borne 2 bars) (26). Cette technique est relativement simple d'emploi mais exige un calcul précis et consiste à apporter l'eau à de faibles doses et de manière fréquente au niveau de la surface du sol ou du sous-sol. L'apport se fait en un point précis (voisinage immédiat des racines) et peut compenser dans le temps de manière beaucoup plus objective et continue les volumes d'eau consommés par la plante (ETM).

Les graphiques de la Fig.n°6 et 7 montrent les écarts (pertes) entre les besoins des plantes et les apports d'eau résultants d'après le choix de la technologie d'irrigation.

En micro-irrigation, l'apport est souvent individuel et l'équation : Débit d'infiltration = Débit d'émission est globalement satisfaite. Cette équation exige des conditions strictes, en l'occurrence une connaissance exacte des besoins en eau des cultures ainsi qu'un fonctionnement adéquat et surtout uniforme du système de distribution .

Sa progression dans le monde atteste de son importance et de l'essor qui lui est réservée dans le futur.

D'après un rapport de la C.I.I.D* (22) sur la micro-irrigation il y avait en 1981 environ 416.000 ha répartis comme suit :

*. CIID: Commission Internationale de l'Irrigation - Drainage

Tableau N°28 : Evolution des superficies équipées de micro-irrigation dans le monde

Pays	Superficie en ha	Pays	Superficie en ha
U.S.A	185 000	Australie	20 050
Palestine occupée	81 700	U.R.S.S	11 200
Afrique du Sud	44 700	Italie	10 300
France	22 000	Chine	8 040
		Autres pays	33 760

Source : (22)

En Algérie, les statistiques ne sont pas très bien connues. La micro-irrigation est omniprésente dans les stations expérimentales du pays sans développement concret. Elle couvre quelques 1000 à 1500 ha souvent dans le secteur privé. Au Sud du pays et en raison de l'aridité du climat et du prix de revient de l'eau, la micro-irrigation est trop demandée. La STTF couvre 80 % du marché vers cette région. Plus de 600 ha ont été équipés par ce même fabricant.

En 1978, D. Dubost (25) a réalisé une expérience de micro-irrigation sur 114 palmiers-dattiers à la station de Sidi-Mahdi (Touggourt). Les goutteurs utilisés, de marque NETAFIM (4 l/h) ont montré une bonne résistance à l'obstruction et aux conditions climatiques locales. Sachant que l'eau utilisée a été pompée de la nappe du continental intercalaire dont le taux de résidu sec varie de 2.5 à 7g/l.

Malgré que cette technique est compétitive en culture fruitière et viticole (cultures tuteurées) où la densité de plantation est faible, elle a donné des résultats surprenants en cultures maraîchères (tomate-fraise-pastèque...) et toutes les cultures en serre et en ligne (45).

La technique s'adapte également à tous les types de sol qu' ils soient plats ou pentus. Parmi les avantages qu'elle présente, elle permet d'assurer des interlignes et des frondaisons secs, ce qui facilite la libre circulation en tout temps sur un sol dés herbé. Elle limite aussi le lessivage des divers traitements chimiques.

La distribution fréquente (souvent journalière) dans la micro-irrigation permet de maintenir un faible volume du sol à l'état humide (RFU) et assure une diffusion latérale différentielle de l'eau en formant un bulbe d'humidité à partir de ces zones humifères.

Le bulbe d'humidité qui se forme sous chaque émetteur peut avoir des formes d'extension variables selon les types de sol.

Ainsi, en terrain lourd (argileux ou compact), le bulbe prend une forme aplatie (bulbe en oignon) pouvant atteindre une largeur de 4m (2) et en terrain léger (sableux, caillouteux), le bulbe est relativement moins sphérique, étroit en forme de "carotte"

D'une manière générale, en supposant que le bulbe humidifié est hémisphérique, l'humidité varie entre deux points caractéristiques H_i et H_f . Le rayon de ce bulbe est donné par la relation suivante (2).

$$r = \frac{3 q \cdot t}{2 (H_f - H_i)^{1/3}}$$

r : rayon en m

q : débit spécifique de l'émetteur en m^3/h

t : temps de fonctionnement (h)

H_f : humidité pondérale finale en %

H_i : humidité pondérale initial en %

On peut dire que cette relation donne seulement une approximation du volume de sol humecté par un émetteur en fonctionnement. Car, dans l'état actuel des connaissances, l'on peut admettre comme raisonnable d'humecter au minimum le 1/3 du volume total du sol accessible par les racines ($V_r = 33\%$) (48)-cas de

l'arboriculture. Sachant que le nombre et le débit des goutteurs doivent être choisis pour humidifier le Vr .

Pour les autres cultures, l'on peut diminuer ce rapport, encore mieux, dans les régions pluvieuses, le Vr est estimé à 20 % .

Les corrélations établies entre le Vr et le rendement potentiel d'une culture ont montré que les rendements sont élevés pour des Vr faibles, inférieurs à 100 % (48).

En se basant sur ces dernières conclusions, la micro-irrigation serait en effet un facteur authentique d'intensification agricole assurant 30 à 50 % d'augmentation des rendements (44) (45) et permettant un rationnement des volumes d'eau disponibles. Le gain relatif sur les quantités d'eau est appréciable (40 %) et joue un grand rôle dans les circonstances de pénurie d'eau et de sécheresse (43) (16)

A la ferme Cactus Corporation-Oresso-Californie (55)

l'expérience sur les 140 ha d'oranger, irrigués au goutte à goutte a permis d'augmenter la production de 40 %, de 50 % pour la tomate et une économie d'eau de plus de 30 % . Ajouté à cela, le coût de réalisation du réseau goutte à goutte est revenu deux fois moins cher qu'un système stationnaire à l'aspersion .

La durée de vie du matériel de micro-irrigation est souvent contestée, bien que des études (44) ont montré que celle-ci pourrait être longue (15 à 20 ans), induisant même un coût d'amortissement annuel de l'ordre de 5 à 6 % . Sachant que l'entretien ainsi que le climat interviennent également dans la limite de la durée de vie .

Dans le cas de la REUE, la micro-irrigation a été expérimentée en présence des autres techniques (aspersion-submersion...) et il s'est avéré que c'est la technique la plus appropriée dans ces conditions (16) (36).

La garantie pour le rationnement de l'eau qu'elle offre évite de répandre les sels et éventuellement les parasites contenus dans l'eau de migrer au-delà du bulbe humide.

Un front salé se constitue autour du bulbe (2) (48) (13) sans pour autant s'intégrer dans la solution du sol où baignent les racines. La micro-irrigation permet d'assurer une bonne diffusion de l'eau et des engrais sans compromettre la qualité des eaux en profondeur, en évitant le dépôt d'agents pathogènes sur les cultres et sur l'utilisateur. Les perspectives de développement de la REUE en micro-irrigation semblent être optimistes et réalistes.

Afin de voir de plus près les performances de la technique de m.I dans le cas de la REUE, il nous a semblé important de décrire un système d'irrigation, de présenter sa composition et de préciser les paramètres les plus importants à contrôler lors de l'expérimentation.

3.2. Le réseau : schéma général d'un système d'irrigation avec goutteurs

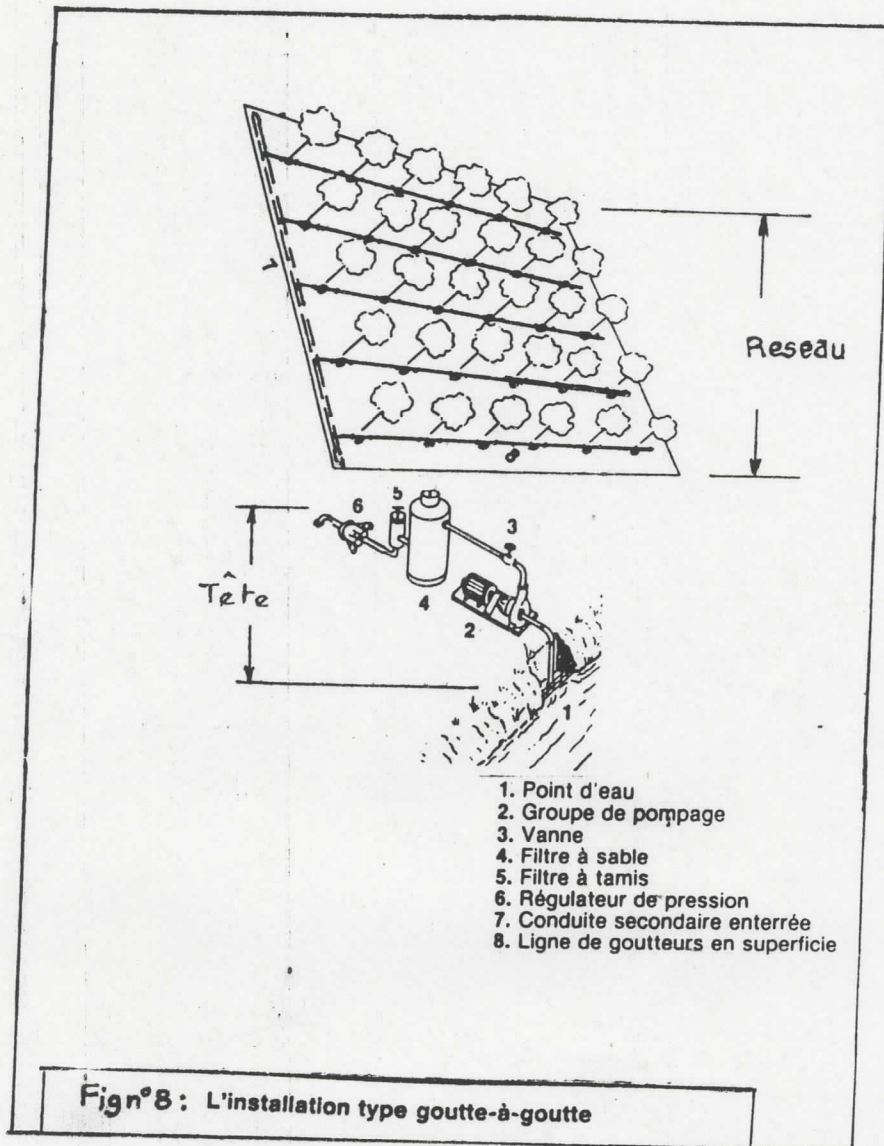
Il est constaté que les réseaux de micro-irrigation obéissent tous au même schéma, à savoir : une prise d'eau sous pression - une tête de réseau et le réseau proprement dit c'est-à-dire rampes et distributeurs . (voir fig.N°8).

3.2.1. Prise d'eau

Compte tenu que l'eau utilisée par le réseau doit être sous pression, cette dernière est souvent assurée soit par un réservoir surélevé soit par le branchement sur un réseau sous pression ou à l'aide d'un surpresseur.

3.2.2. Tête du réseau

La tête du réseau est considérée comme la partie la plus importante de l'ensemble du système. Elle intervient surtout, au niveau de la filtration mais assure aussi la régulation du débit et de la pression. La tête est constituée de :



- Un filtre à sable
- Un doseur d'engrais ou pompe doseuse
- Un filtre à tamis
- Un ensemble d'accessoires hydromécaniques (manomètres régulateurs de pression - régulateur de débit - vannes d'arrêt - des compteurs...).

Il faut noter que la constitution de la tête du réseau changera en fonction des conditions réelles d'exploitation. Selon les cas, elle peut être renforcée ou simplifiée. Si la parcelle n'est pas grande (là 1,5 ha), une seule tête de contrôle suffirait.

Les filtres : La filtration de l'eau est une opération pratiquement obligatoire dans le cas de la micro-irrigation. Elle diminue considérablement l'obstruction interne des goutteurs.

Dans le cas de la REUE, la filtration débute à l'échelle de la station d'épuration. Du dégrillage au micro-tamisage, l'eau usée subit une série d'opérations de filtration par des dispositifs variés (grilles, barreaux, filtres à sable...).

Malgré cela, il est très recommandé de bien veiller à la filtration en tête du réseau de m.I. Le plus souvent on y installe deux filtres (filtre à tamis et filtre à sable) pouvant filtrer jusqu'à 100 μ , voire 50 μ .

3.2.3. Les rampes

Les rampes sont des conduites généralement de faible diamètre qui constituent le corps du système de micro-irrigation. Elles assurent le transport et la répartition de l'eau à l'échelle de la parcelle à irriguer. Les rampes sont fabriquées en polyéthylène, ou en PVC sous produits du pétrole brut, en différentes gammes (longueur et diamètre). Leur prix devient alors relativement compétitif. Les rampes résistent à des pressions allant de 1 à 6 bars.

Les rampes principales (gros diamètres) desservent les rampes secondaires de faible diamètre et constituent le peigne de l'irrigation, dont le calcul mérite une attention particulière. Les rampes peuvent être posées sur sol, suspendues ou enterrées. La variété de la culture, les propriétés du sol et le climat imposent le choix.

3.2.4. Les distributeurs (goutteurs ou émetteurs)

3.2.4.1. Généralités

Classés en plusieurs types selon les critères de fonctionnement, de fabrication, du mode de nettoyage et du montage sur la rampe, ils constituent l'organe le plus technique de la micro-irrigation (goutte à goutte) placé en phase finale de l'égouttement de l'eau vers la plante.

Depuis l'avènement des plastiques en agriculture, la gamme des goutteurs ne cesse de s'élargir et de se diversifier. En effet, des centaines de marques existent dans le monde. En France, plus de 60 marques ont été testées aux laboratoires du CEMAGREF.

Au début de la micro-irrigation, la réduction de la pression était assurée par les capillaires qui ont été remplacées de nos jours par les goutteurs.

Les goutteurs fabriqués actuellement doivent répondre aux exigences suivantes (42) :

- Garantir le débit prévu
- Assurer une pression nulle par dissipation de l'eau à la sortie du goutteur
- Résistance aux ultra-violets et à l'humectation variable
- Pas de colmatage par les m.e.s ou les bactéries....
- Compact, exploitable et économique.
- La qualité de fabrication du matériel de la micro-irrigation est établie selon les normes définies par le *PLASTIC PIPE INSTITUTE*, l'ISO/AFNOR et de nombreux autres organismes.

Ces normes traitent des critères techniques pour les rampes, du fonctionnement et du dimensionnement.

Les distributeurs qui existent actuellement sont réalisés essentiellement en polyéthylène (PE), en polypropylène (PP) et autres matières auxiliaires.

En plus de la régulation du débit et de la pression qu'ils assurent pour satisfaire l'équation citée auparavant : -débit d'infiltration = débit d'émission du goutteur- la consommation d'eau par les plantes est largement avantageée. Les faibles débits d'émission et la grande fréquence garantissent une infiltration tridimensionnelle de l'eau en maintenant la tension de liaison de l'eau aux particules terreuses à une faible valeur. Ceci se traduira par une facilité de l'alimentation hydrique des plantes selon un régime continu quasi permanent.

Si ces avantages placent la micro-irrigation parmi les techniques les plus rationnelles en eau, néanmoins l'uniformité des débits des émetteurs et le calcul hydraulique précis sont de rigueur. Sachant qu'une disparité dans les débits d'émission ou un dysfonctionnement du système de m.I aurait des conséquences graves sur les rendements des cultures. Une mauvaise uniformité diminue par conséquent l'efficacité du mètre cube d'eau apporté.

Cette uniformité s'évalue grâce au calcul du coefficient d'uniformité (CU) déterminé à partir de plusieurs relations. L'uniformité est en relation directe avec la qualité de la fabrication des goutteurs, ainsi l'émetteur (dans toutes ses parties) ne doit en aucun cas présenter de défauts de fabrication tels que les rainures, les saillies sur les surfaces d'écoulement, les fissures ou les cavités susceptibles de nuire au bon fonctionnement du goutteur (garantie d'un débit constant).

La répartition inégale de l'eau d'arrosage est accentuée par la perte de pression le long de la rampe qui a pour conséquence une

réduction des débits des goutteurs placés en aval de la rampe. Le rapport des débits est lié ainsi à celui des pressions par l'expression : (58)

$$(q_N / q_1) = (H_N / H_1)^{1/2}$$

q : débit du goutteur

H : Pression de service

N : nombre de goutteur

1 : goutteur n°1 sur la rampe.

En pratique, on tolère une chute de pression limitée le long des porte-rampes à (3 - 6m de CE). (58)

Pour les porte-rampes très longues on peut admettre une différence de pression de 10 m de CE (58).

Ces limites de pression ont évidemment un but d'augmenter la sécurité du réseau et surtout de réduire le coût de l'investissement.

La conception d'une rampe d'irrigation localisée est essentiellement basée sur la variation admissible du débit de l'émetteur (CU).

La relation du Cu la plus utilisée est celle de Christian-
sen : (30)

$$Cu = 1 - (\Delta \bar{q} / \bar{q})$$

Afin de tenir compte des contraintes d'obstruction éventuelles, des tolérances de fabrications et de la difficulté de contrôler les goutteurs, il est généralement recommandé de calculer les goutteurs avec un Cu de 98%. Cette limite du Cu qui correspond à une variation totale de pression le long de la rampe de 20% (équivalent à une variation de débit de 10%) assure une grande homogénéité de distribution et donc une grande efficacité d'application de l'eau.

Le C.U. devra être suivi par l'utilisateur de manière permanente sachant que l'uniformité peut être diminuée par le phénomène d'obstruction des émetteurs. Il est recommandé de contrôler le C.U.

semestriellement afin d'établir un diagnostic de l'état de l'installation de m.I et les mesures à entreprendre pour y remédier.

3.2.4.2. Principe de fonctionnement

De manière générale, le fonctionnement du goutteur obéit aux principes suivants :

L'eau sous pression circulant dans la rampe secondaire, en régime laminaire ou turbulent, pénètre dans le goutteur par un orifice, suit un cheminement plus ou moins long garni d'obstacles (labyrinthes, spirales) assurant une turbulence de l'écoulement et une perte d'énergie (perte de charge) importante. L'eau sort alors par un autre orifice à la pression atmosphérique sans énergie (donc sans jet) et à faible débit, sous forme de gouttes. Le débit de l'émetteur sera fonction de la pression de service, du type de goutteur et du diamètre de l'orifice de sortie et des propriétés propres à l'eau.

La relation entre le débit et la pression d'un goutteur dépend de la façon dont celui-ci est conçu. C'est pour cette raison que nous réservons un paragraphe à la technologie de fabrication de ce type de matériel

Le débit du goutteur obéit habituellement à la relation

$$q = KH^x$$

avec :

K : Coefficient caractérisant les dimensions du goutteur.

x : Coefficient caractérisant le régime d'écoulement à l'intérieur du goutteur.

De manière générale, x varie de 0,4 à 1 : (30)

- x = 0,5 : le goutteur développe un régime turbulent

- x = 1 : le goutteur développe un régime laminaire

Les coefficients K et x donnent des indications sur la sensibilité des goutteurs au bouchage (59).

3.2.4.3. Classification des goutteurs

* Selon le critère de fonctionnement :

- Goutteurs à circuit long : L'eau parcourt à l'intérieur du goutteur un cheminement relativement long, permettant de créer une turbulence, et surtout provoquer une perte de charge importante. Pour ce type de goutteur, le débit dépend directement de la pression. On les appelle aussi : goutteurs non auto-régulants (Fig. N° 9).

* Goutteurs à circuit court : (Voir Fig. N° 10)

Le cheminement de l'eau à l'intérieur du goutteur est court mais l'eau peut buter face à des pastilles amorphes, mobiles assurant une uniformité de la répartition de l'eau à la sortie du goutteur. La mobilité de la pastille assure donc cette uniformité en acceptant des variations de pression de 0,5 à 2 bars. (41)

* Selon le critère de fabrication :

- Goutteurs fixes : Constitués en monoblocs, leur fixation sur la rampe peut être permanente ou semi-permanente, ce qui rend impossible leur nettoyage en cas de bouchage.

- Goutteurs mobiles : Ces goutteurs sont composés de plusieurs parties mobiles, ce qui facilite leur démontage en cas de bouchage.

Dans ce type de goutteurs, on trouve les goutteurs auto-purgeurs et les goutteurs à sorties multiples.

* Selon le critère de montage sur la rampe :

Goutteurs latéraux ou en parallèle : Fig. N° 10.

Ces goutteurs sont fixés parallèlement sur la rampe.

Goutteurs en série ou en ligne :

Ces émetteurs sont fixés sur la rampe formant ainsi une ligne continue (Voir Fig. N° 9)

N.B. : Il faut signaler qu'un émetteur peut être à la fois à circuits long, en série et fixe.

Toutefois, on peut dire que les goutteurs auto-régulants sont les plus performants et sont utilisés dans des parcelles à

Fig N°9 : Schéma de gouteur non auto-régulant

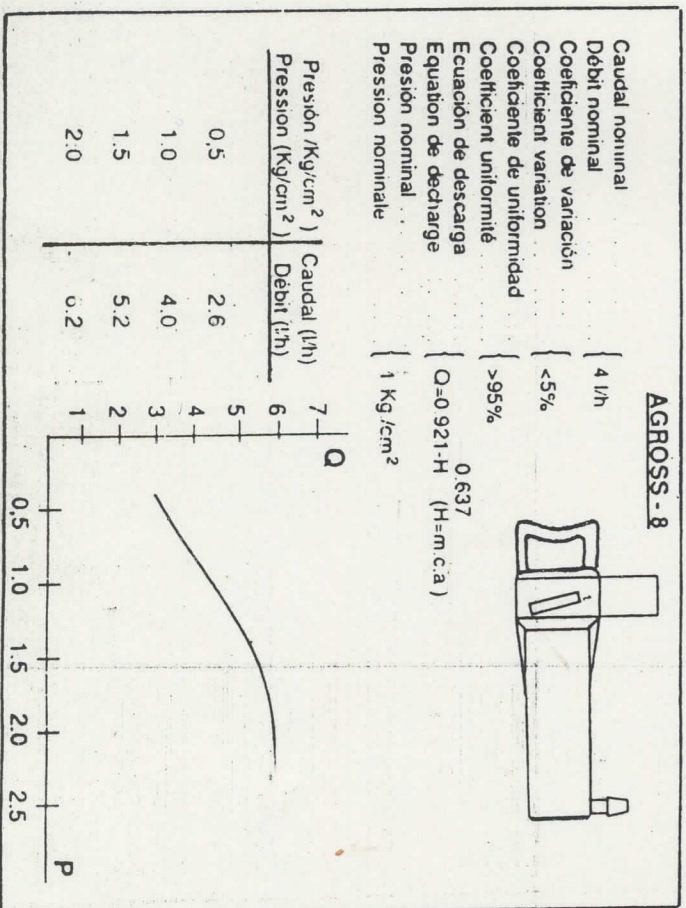
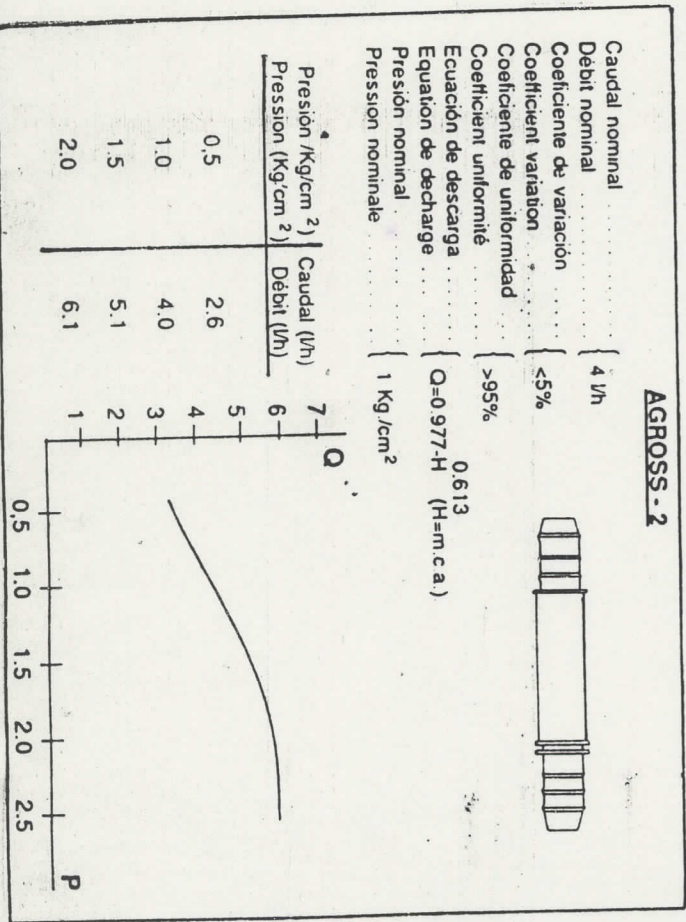
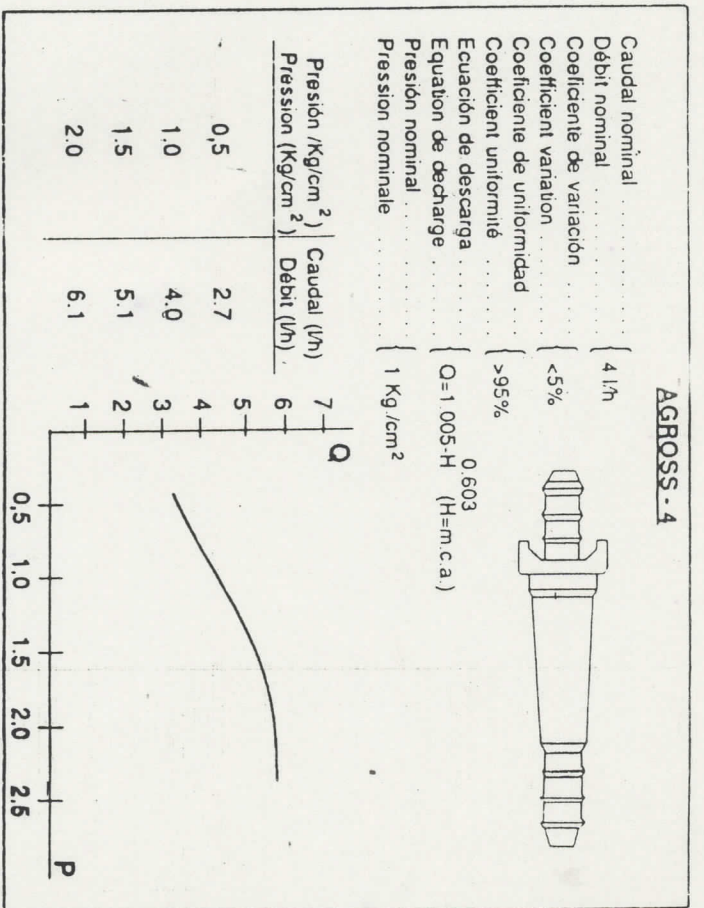
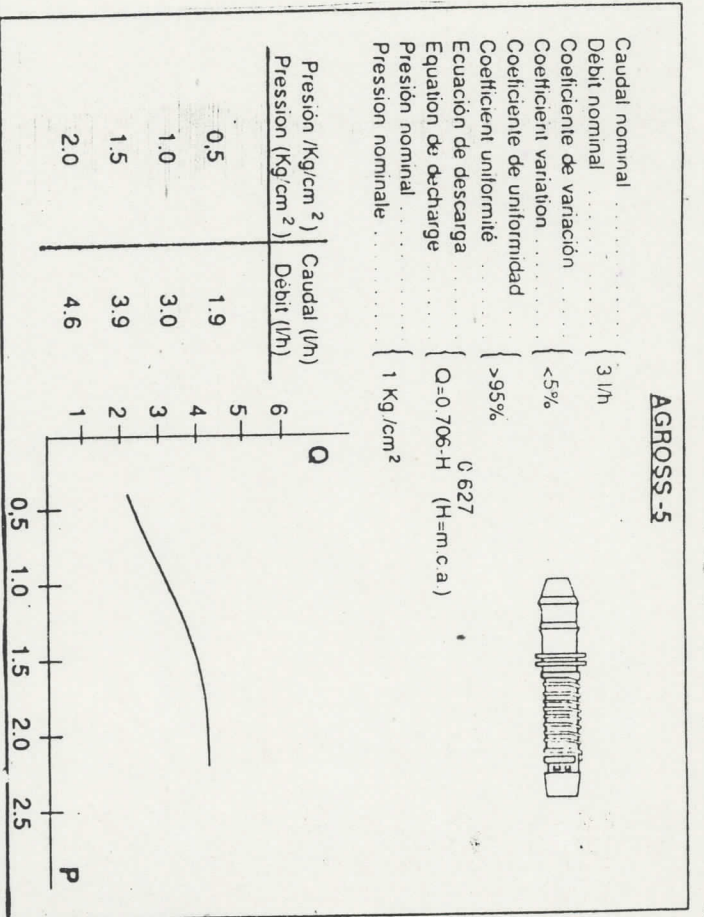
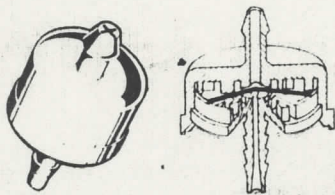


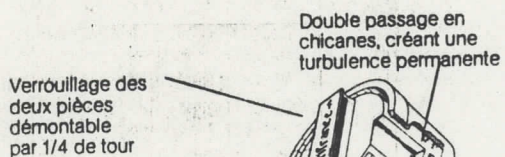
Fig N°10 : Schéma de gouteur auto-régulant



Goutteur Gari
4 l/h et 2 l/h à 1 bar

Débit régulier, démontable fiabilité garantie.
Grâce à sa conception, symétrique 2 montages possibles :
Sur la rampe, ou à l'extrémité d'un microtubo

un petit gouteur auto-régulant, à double chicanes



Goutteur Bip :
4 l/h et 2 l/h à 1 bar

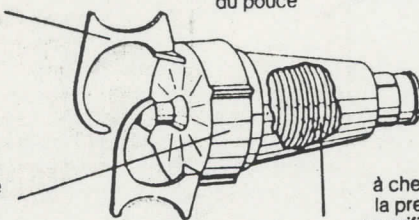
Prise d'eau en tête de vipère pour montage direct sur rampe polyéthylène ou sur rallonge en arrosage de pots

Fixation par mouvement de quart de tour après perçage sur la rampe

Nettoyage à grand débit d'eau par simple pression du pouce

Goutteur Gana :
8 l. 4 l/h et 2 l/h à 1 bar

Goutteur démontable en trois éléments permettant un nettoyage approfondi en fin de campagne



Gorge hélicoïdale à cheminement long réduisant la pression tout en maintenant un orifice de passage important

cultures pérennes. Leur durée de vie est relativement longue car ils résistent bien à l'obstruction.

3.3. Technologie de fabrication

C'est à partir du pétrole brut que l'on extrait les principaux matériaux du matériel de micro-irrigation. Il s'agit du polyéthylène (PE), du polyvinyle de chlorure (PVC) ou du propylène (PP).

Nous présentons dans ce paragraphe quelques notions sur la technologie du polyéthylène, principal produit de la micro-irrigation. Le P.E existe sous trois formes :

PEBD - Polyéthylène à basse pression

PEMD - Polyéthylène à moyenne pression

PEHD - Polyéthylène à haute pression : ce type se

commercialise plus facilement de nos jours en raison de ces qualités (souplesse, facilité de courbure, introduction aisée des embouts des goutteurs...).

La polymérisation de l'éthylène donne du polyéthylène naturel sous forme de poudre ou granulé de couleur blanchâtre. Il subit chez le fabricant une opération de compoundage destinée à inclure des adjuvants pour répondre à certains objectifs visés.

Parmi les adjuvants utilisés, on cite :

-Le noir de carbone : qui permet d'assurer une protection contre les rayons ultra-violet et protège donc contre le vieillissement .

-Les anti-oxydants : utilisés dans la stabilisation du polyéthylène et évite toute oxydation .

-Les anti-acides : sont additionnés pour parer aux conditions difficiles d'emploi .

Ces adjuvants (0,3 %) doivent être admis par les services de la répression des fraudes en raison de leurs effets sur les produits alimentaires (34) .

La résine est alors présentée sous forme de granulés noirs vendus à l'utilisateur (fabricant). En Algérie, cette matière première est sous le monopole de l'E.N.P.C. (Entreprise Nationale du Plastique et du Caoutchouc).

C'est à partir de la résine que le processus de fabrication des rampes ou des goutteurs commence en usine.

Les rampes comme les goutteurs doivent en effet obéir à certaines caractéristiques (41) dont particulièrement le comportement à la pression dans le temps ou *fluage*. Dans la technologie Française, les rampes sont réalisées pour une contrainte maximale de durée d'utilisation de 50 ans.

La tendance actuelle est de fabriquer des *Tubes fins* traités qui seront favorables à la dilatation, au gradient de température, et qui assureront une bonne résistance au cisaillement.

La technologie de la micro-irrigation est relativement nouvelle. Elle est née dans les années 1960 avec le développement de la micro-irrigation. Son matériel ne cesse de s'améliorer et de s'adapter de jour en jour dans le monde.

En Algérie, la micro-irrigation est considérée du point de vue de son utilisation et de sa technologie au stade "larvaire".

Nonobstant l'abondance de la matière première de fabrication, la technologie relative à la fabrication du matériel des goutteurs, des rampes et des accessoires reste primitive pour plusieurs raisons dont essentiellement l'absence de prise en charge sérieuse de ce problème.

Les recherches, les études à l'échelle nationale, dans ce domaine sont insignifiantes. Elles méritent d'être prises en charge et soutenues par les pouvoirs publics.

Les fabricants du matériel de micro-irrigation en Algérie ne sont pas nombreux et sont très peu connus. Nous avons dénombré quatre industriels privés sur tout le territoire national :

- La S.T.T.F. : Société des Technologies et du Transport du fluide

La SERIL : Société d'Etudes et de Réalisation d'Irrigation Localisée

- AGROPLAST

- AGRI SUD

Les problèmes que rencontrent ces industriels sont d'origine économiques et surtout techniques. En effet, la S.T.T.F., qui est une entreprise relativement ancienne, fabrique et commercialise le matériel de micro-irrigation (gainés, rampes, goutteurs variés, micro-diffuseurs et plusieurs accessoires) depuis longtemps.

Les contraintes que vit cette entreprise selon notre avis sont communes à celles des autres industriels. Elles sont de nature technique.

Selon notre enquête, beaucoup de réserves techniques sont à signaler, concernant la nature, l'origine et surtout la durée de vie des "moules" de fabrication. En effet, il semble que certains "moules" périmés sont toujours utilisés dans cette fabrication, ce qui se répercute bien entendu sur la précision du matériel (goutteurs) et sur la longévité du produit.

L'absence du savoir-faire, des structures de contrôle techniques et d'expérimentation, des structures d'homologation de ce type de matériel laissent un vide aux conséquences graves pour notre agriculture.

Nous avons constaté, après enquête, que les goutteurs fabriqués en Algérie ne possèdent pas de fiches techniques propres à la commercialisation légale du produit entre le fabricant et les pouvoirs publics (chambre de commerce) qui exigent un certificat de conformité du produit pour qu'il soit légitimement commercialisé.

C'est dans ce contexte là que nous nous sommes intéressés à connaître la gamme du matériel de micro-irrigation de la S.T.T.F.

afin d'essayer de l'étudier sur le plan technique et évaluer les performances techniques et hydrauliques par rapport aux normes en vigueur.

Les questions que nous nous sommes posées concernent la conformité du produit de la STTF et surtout le comportement des goutteurs à la REUE.

4 . Aspects économiques de la micro-irrigation

Les avantages économiques de la REUE sont nombreux disait Valiron (56); ceux de la m.I ne sont plus à contester.

On distingue les avantages mesurés au niveau de l'exploitation (micro-économie) et ceux dont l'impact s'élargit à une dimension régionale ou nationale (macro-économie) .

Au niveau de la micro-économie, sur la base d'une comparaison homogène et en tenant compte de tous les éléments : mobilisation-traitement-stockage éventuel-transport-répartition et prix du mètre cube d'eau, l'avantage final revient à la REUE en m.I.

Prenons, par exemple : l'aspersion et la REUE en m.I. les étapes à suivre sont :

Aspersion	REUE en m.I.
Mobilisation. . Barrage ou retenue collinaire . Forage (Investissements importants	Réseau d'assainissement. (Réalisé en dehors de l'objectif de la REUE)
Traitement. Néant Stockage. Bassins de tailles importantes Réservoirs élevés	.Réalisé pour un objectif écologique Bassin de taille moins Importante
Transport. Conduites de gros calibres	Conduites de petit calibre en PVC moins chère
Durée de vie Relativement longue	Relativement réduite
Répartition. RH = 60 à 80 %	RH = 80 à 95 %
Prix du m ³ d'eau = 1,5 à 2,5 DA au pied du barrage	Prix du m ³ d'eau = 1.50 DA Selon calcul station de Beni-Méred

A l'image de ce schéma théorique, l'on peut constater qu'à priori l'avantage est en faveur de la REUE en m.I, même si le coût d'adaptation à l'usage de l'eau usée épurée est toujours plus élevée que pour une eau naturelle .

A l'échelle macro-économique, la valeur monétaire de l'eau dans son gîte et le paiement de celle-ci par chaque usager permet de rentabiliser les installations et leur entretien permanent.

Les avantages de la REUE en m.I. sont assurés par la valeur de la production agricole, la création d'emploi, les économies réalisées sur l'achat d'engrais et la pollution ainsi évitée.

A ce dernier avantage est liée l'économie réalisée sur le coût des installations d'évacuation qu'il a fallu aménager sans cela.

Il faut rappeler que chaque mètre cube d'eau usée épurée utilisée en m.I. permet d'épargner un mètre cube d'eau douce au profit de l'AEP et qui serait à son tour réutilisé.

Il serait également plus facile de trouver des solutions satisfaisantes du point de vue technique et donc économique quand la REUE est envisagée dès le stade de planification. La conception du réseau de collecte des eaux usées, l'emplacement et les performances de la station d'épuration influent beaucoup sur la viabilité économique des projets d'irrigation .

5 . Conclusion

Compte tenu de la limite de la S.A.U. totale et de la S.A.U. irriguée (4,3 % de la S.A.U.) desservie en grande partie par un système d'irrigation traditionnel (90 %), "l'exiguïté" des ressources hydrauliques économiquement mobilisables, conséquence d'un climat aride la production agricole Algérienne reste tributaire des aléas climatiques défavorables et des méthodes classiques d'exploitation.

- La micro-irrigation se définit comme étant un mode d'apport d'eau plus ou moins continu et individuel qui assure une production agricole prématurée, une augmentation relative des rendements et un gain d'eau considérable (50 %).

La micro-irrigation permet une utilisation rationnelle des ressources en eau et s'adapte parfaitement à la 'REUE. Elle constitue, dans les circonstances actuelles, une solution à la problématique de l'eau en Algérie.

Cependant, sa technologie ainsi que les études théoriques et expérimentales dans notre pays sont dans un état primitif. Leur maîtrise est impérativement nécessaire et interpelle les pouvoirs publics et scientifiques de coordonner leurs efforts pour mettre en place les conditions réelles de promotion et d'expérimentation qui restent désormais insuffisantes.

"J'ai obligé l'eau puissante à couler selon ma volonté et j'ai dirigé ces eaux pour fertiliser des régions qui auparavant étaient stériles et inhabitées".

Inscription sur la tombe de la reine assyrienne, 2000 ans av. J. C.

CHAPITRE IV : Méthodes de calcul hydraulique d'un système d'irrigation avec goutteurs et détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs

A. - Méthodes de calcul

Introduction

Le calcul hydraulique d'un système de micro-irrigation a pour but de déterminer la charge totale nécessaire constituée soit par l'équipement de pompage, soit par un réservoir d'accumulation situé sur des côtes supérieures à celles du périmètre à desservir.

Le système de micro-irrigation se compose de branchements espacés, munis de N goutteurs chacun, généralement avec les mêmes caractéristiques hydrauliques, géométriques et technologiques (distance entre branchements, distances entre goutteurs, même coefficient de rugosité).

Le dimensionnement d'une telle installation est basé sur la détermination de deux paramètres essentiels :

- Les pertes de charges dans les conduites
- Les courbes caractéristiques $q = f(H)$ des émetteurs.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les relations de calcul des pertes de charge linéaires, les plus utilisées, dans le dimensionnement des systèmes de micro-irrigation.

Après une critique de ces relations de calcul, nous présentons dans une première étape une approche théorique et méthodologique de calcul des pertes de charge dans les systèmes de m.I .

Les goutteurs qui sont des appareils utilisés dans ces systèmes, sont étudiés à l'aide d'un pilote expérimental dans la seconde partie de ce chapitre.

1. - Méthodes utilisées

De nombreux auteurs se sont intéressés à la détermination des relations pour le calcul des pertes de charge dans les branchements.

Parmi eux nous citons :

1.1. Formule de Christiansen (4) (1942)

$$\Sigma \Delta h = \frac{k v^{1,9}}{2 g D} . L \quad [a]$$

avec :

$\Sigma \Delta h$ = somme des pertes de charge linéaires dans le
branchement (en m.)

k : coefficient qui dépend de la nature de la conduite.

v : Vitesse de l'eau dans la conduite (en m/s).

L : longueur de la conduite (branchement)(en m.).

g : accélération de pesanteur (m/s^2).

1.2. Formule utilisée en Pologne et en Hongrie (11)

$$\Sigma \Delta h = \frac{0,3}{\Pi^2 g} \frac{L}{D^5} Q^2 \quad [b]$$

avec :

$\Sigma \Delta h$ = somme des pertes de charges linéaires du
branchement (en m.)

L : longueur du branchement (en m.)

D : diamètre de la conduite (branchement) (en m.)

Q : débit en tête du branchement (m^3/s)

g : accélération de pesanteur (m/s^2)

1.3. Formule utilisée en France (40)

$$\Sigma \Delta h = \frac{k \cdot Q^{1,75}}{2,75} L \quad [c] \text{ avec } K = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{D^{4,75}}$$

avec :

$\Sigma \Delta h$: somme des pertes de charges linéaires du branchement (m)

Q : débit en tête du branchement (m^3/s)

L : longueur du branchement (m)

D : diamètre de la conduite (branchement) (m)

1.4. Formule de Hazen et Williams (4)

$$\Sigma \Delta h = 1,32 C_1 R^{0,63} i^{0,54} L \quad [d]$$

avec :

C_1 : coefficient du débit de Hazen et Williams. Fonction de la nature de la conduite (tabulé).

R : rayon hydraulique de la conduite (m)

i : gradient hydraulique (perte de charge unitaire) pente hydraulique

L : longueur de la conduite (branchement) (m).

2. Discussions des relations de calcul de $\Sigma \Delta h$

Les relations mentionnées ci-dessus ont été déterminées sur la base de l'équation de Darcy Weisbach relative au calcul des pertes de charge dans les conduites à section circulaire avec l'hypothèse selon laquelle les débits spécifiques q de chaque goutteur sont répartis régulièrement suivant la longueur L du branchement.

En établissant des relations sur cette base, il n'a pas été tenu compte du régime d'écoulement dans le branchement muni de N goutteurs dont le débit varie du premier tronçon (Nq) au dernier (q), ce qui laisse supposer que le régime peut éventuellement changer d'état dans un même branchement : turbulent en tête de branchement où les vitesses sont grandes et laminaire en fin de conduite où les vitesses deviennent faibles. Dans ce cas, on ne peut se contenter d'une seule relation pour déterminer la somme des pertes de charges pour un seul état d'écoulement (turbulent).

- Ces relations négligent ΔL , l'intervalle entre les goutteurs successifs, qui varie de 0,40 m pour les cultures maraîchères jusqu'à 4 m pour les cultures pérennes arboricoles.

- Il n'existe pas de recommandations pratiques pour le calcul global de dimensionnement du système de micro-irrigation.

- Nous pouvons constater qu'après avoir effectué certaines transformations numériques sur les relations utilisées dans différents pays, nous aboutissons à la même forme.

Suivant la relation [a], nous avons :

$$\Sigma \Delta h = \frac{K \cdot V^{1,9}}{2g D} L$$

avec :

$$K = 35 \cdot 10^{-3}$$

on a :

$$\Sigma \Delta h = \frac{35 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2}{2g \left[\frac{\pi D^2}{4} \right]^2} \frac{L}{D} = 2,8 \cdot 10^{-3} \frac{Q^2}{D^5} L$$

d'où

$$\Sigma \Delta h = \frac{K.V^{1,9}}{2g.D} L \approx 2,8.10^{-3} \frac{Q^2}{D^5} L \quad [a']$$

Selon la relation [b] utilisée en Hongrie, nous aurons :

$$\Sigma \Delta h = \frac{0,3}{\pi^2 g} \frac{L}{D^5} Q^2 = \frac{0,3}{\pi^2 g} \frac{L}{D^5} Q^2$$

$$\Sigma \Delta h = \frac{0,3}{\pi^2 g} \frac{L}{D^5} Q^2 = 3,1. 10^{-3} \frac{Q^2}{D^5} L \quad [b']$$

Selon la relation [c] utilisée en France, nous aurons :

$$\Sigma \Delta h = 2,9.10^{-3} \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad [c']$$

D'autres méthodes de calcul des pertes de charge en micro-irrigation ont été élaborées dans les années 70 par quelques auteurs Américains.

Il s'agit de trois principales méthodes :

- La méthode des essais successifs
- La méthode d'approximations mathématiques
- La méthode graphique -POLYPLOT-

Parmi les auteurs nous citons WU et GILTIN (1973) (30) qui dans leur exposé démontrent qu'en divisant la rampe en 3 ou 4 sections et qu'en calculant la perte de charge dans chaque section, l'erreur commise est inférieure à 5%.

Ainsi pour une conduite de 30 sorties, cette erreur reste inférieure à 3% si on considère 3 sections et à 2% si l'on considère 4 sections.

Avec ces méthodes, la chute de la vitesse dans la rampe est atténuée par le changement de la section "du diamètre" de la rampe, on obtient alors une rampe dite *télescopique* qui assure un écoulement quasi turbulent le long de la rampe.

Il a été démontré (59) que dans les tuyaux circulaires, la vitesse évolue de la manière qui suit :

- En régime laminaire, la vitesse maximum est le double de la vitesse moyenne alors qu'en régime turbulent le rapport n'est que de 1,25.

Ce phénomène s'explique par les échanges de quantités de mouvement entre les particules rapides du centre et celles très lentes au voisinage des parois.

L'état d'écoulement turbulent permet certes d'éviter considérablement les risques de dépôts éventuels des impuretés contenues dans l'eau. Cependant, la perte de charge reste plus élevée qu'en régime laminaire pour une même uniformité de débit désirée. L'énergie supplémentaire requise pour produire les courants transversaux doit être fournie par la pompe, sans servir au transport du liquide (30).

L'avantage de ces méthodes peut être compromis aussi par la non disponibilité des dimensions nominales des rampes sur le marché (diamètre généralement inférieur à 25 mm).

Ces procédés de calcul sont certes beaucoup plus utilisés, néanmoins, ils nécessitent des calculs trop fastidieux et négligent dans tous les cas le régime laminaire.

Compte tenu des remarques que nous venons de présenter, il nous faudra sur la base de l'analyse des régimes d'écoulement dans les différents branchements, en tenant compte des espacements Δl entre les goutteurs, aborder le calcul hydraulique d'un branchement et de tout le système de micro-irrigation par une approche beaucoup plus pragmatique.

L'approche que nous allons suivre pour aboutir à des relations déterminant les pertes de charges dans un branchement et dans tout le système aborde les points suivants :

- Schémas du système et principes de calcul
- Critères de l'état d'écoulement dans un branchement
- Méthodes de calcul des pertes de charges dans un branchement d'une part et dans tout le système d'autre part.

N.B : BEZDEK et SOLOMON (1978) ont constaté que la perte de charge linéaire est également fonction du type d'alignement du tuyau (rectiligne ou sinueux) et est influencée par l'applatissage du tube (30).

3. Schéma du système et principe de calcul

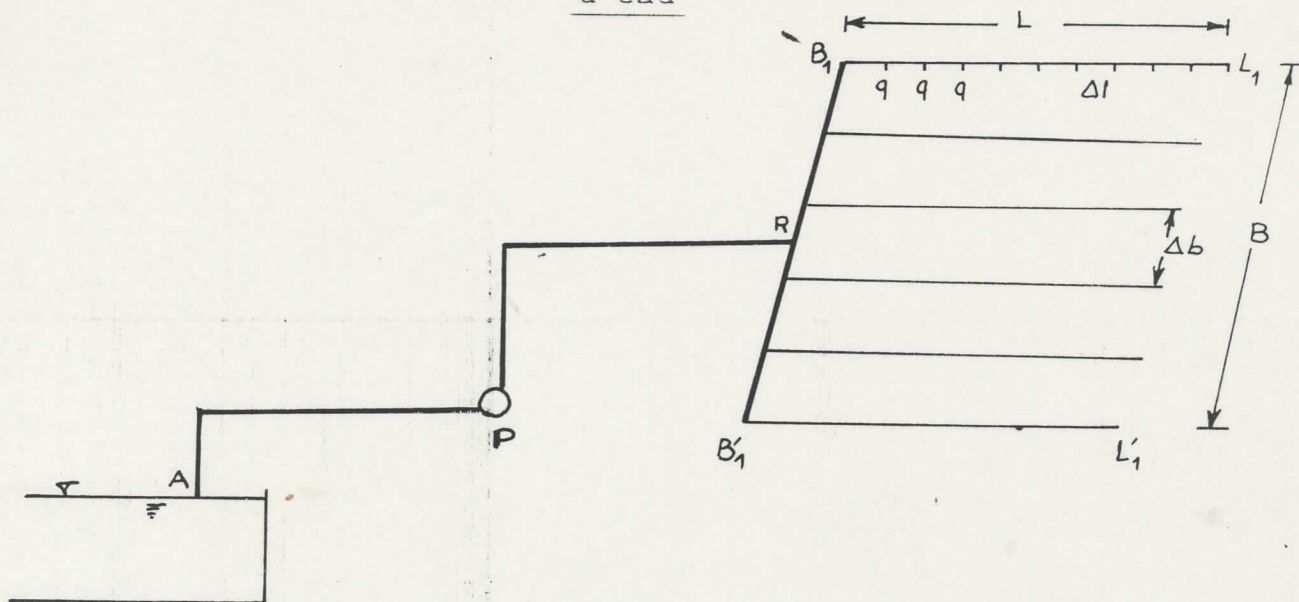
3.1. Schéma

Selon l'emplacement du réservoir (bassin d'accumulation) d'eau par rapport aux côtes de niveau du périmètre irrigué, on aura deux types (deux schémas) possibles de systèmes d'irrigation avec goutteurs:

1^{er} Cas : système de micro-irrigation avec adduction par refoulement. Fig.n°11.

2^{ème} Cas : système de micro-irrigation par adduction gravitaire Fig.n°12.

1^{er} Cas : Fig n°11 : Système de micro-irrigation avec adduction d'eau



A - Bassin ou réservoir d'accumulation disponible pour l'irrigation

P - Equipement de pompage (bief aspiration-pompe-bief refoulement et tête du réseau).

B1RB1 - Conduite principale qui distribue l'eau sur les branchements

B1L1 - Conduite secondaire ou branchement espacés de Δb , armée de goutteurs.

Δl - Intervalle entre les goutteurs ayant chacun un débit caractéristique q .

L,B - Respectivement, la longueur et la largeur du périmètre irrigué

Dans ce premier cas, la charge totale que doit créer l'équipement de pompage pour conduire et distribuer l'eau dans tout le système de branchement doit être :

$$H_{\text{totale}} = H_g + \Sigma \Delta h + H_o$$

où :

H : charge totale nécessaire

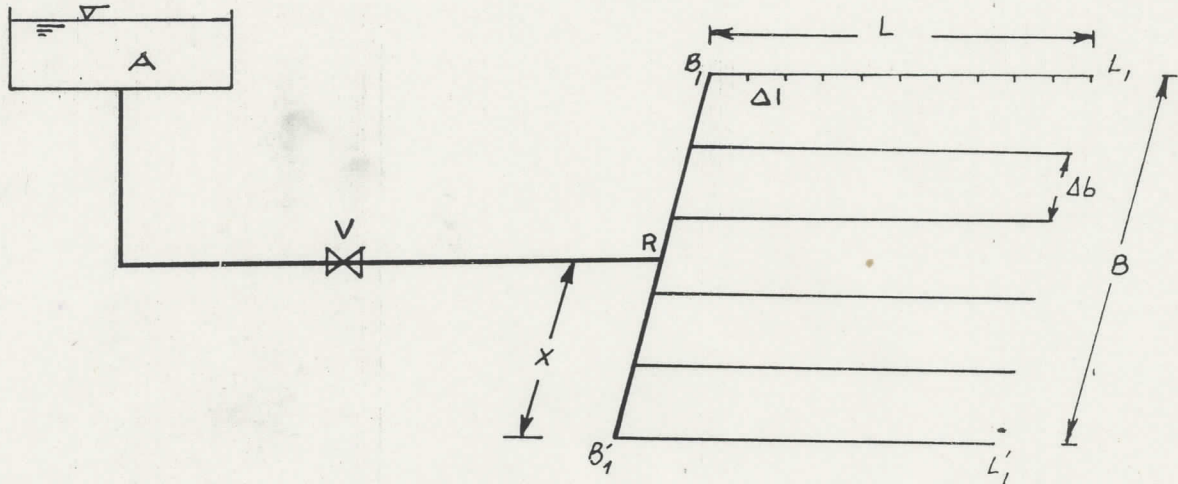
H_g : charge géométrique (distance entre les niveaux des côtes de la surface d'eau dans le bassin et du périmètre irrigué).

$\Sigma \Delta h$: Somme des pertes de charge dans le système

: somme des pertes de charge dans la conduite d'aspiration AP, la conduite de refoulement PR et la principale ligne du système ramifié (le plus long trajet).

H_o : charge de base pour assurer le débit au dernier goutteur dans la ligne principale (le goutteur le plus défavorisé).

2^{ème} Cas : Fig.n°12 : Système de micro-irrigation par adduction gravitaire



- A - Bassin d'eau sur côte élevée (ou château d'eau)
- AR - conduite d'adduction
- B1R B'1 - conduite principale
- B1 L1 - Conduite secondaire ou branchement
- Δb - Intervalle entre deux branchements
- Δl - Intervalle entre deux goutteurs, débit spécifique q
- V - Vanne de régulation

Dans ce second cas, la charge totale que doit avoir le bassin d'eau doit être :

$$H_{\text{totale}} = \sum \Delta h + H_0$$

$\sum \Delta h$: somme des pertes de charge dans tout le système (de la conduite d'adduction gravitaire et de la ligne principale de distribution).

H_0 : charge de base pour assurer le débit du dernier goutteur de la ligne principale.

3.2. Principes de calcul

- L'aire irriguée considérée est généralement de forme rectangulaire ou carrée (B.L). Suivant la longueur B se dispose la conduite principale de diamètre D (longueur totale = B = B1RB1).

Cette conduite est munie de 2X branchements (ou rampes) de diamètre d, espacés de Δb . Chacun des branchements est muni de N goutteurs, espacés de Δl .

- Pour la configuration du périmètre choisi, les caractéristiques hydrauliques et géométriques de la conduite principale, des branchements et des goutteurs sont identiques (conduites en plastique, branchement de même diamètre d, de même coefficient de rugosité, goutteurs de mêmes caractéristiques et même débit sp.q).

- Le système présente donc un réseau ramifié dont :

$$\text{le nombre total de branchements est de } 2.X = \frac{B}{\Delta b}$$

où :

X : nombre de branchements à droite ou à gauche de R

$$\text{le nombre de goutteurs d'une rampe est de : } N = \frac{L}{\Delta l}$$

Le système est un réseau ramifié avec des branchements de mêmes longueurs, de mêmes caractéristiques hydrauliques et géométriques, espacés parallèlement. La disposition optimale de la conduite d'adduction, pour assurer la perte de charge minimale est au centre de la conduite principale.

Le nombre de branchements de part et d'autre est le même, dans ce cas, la ligne principale dans le calcul des pertes de charge (ligne qui représente la plus grande perte de charge) est la ligne qui relie le point R aux extrémités du périmètre irrigué : soit RB1L1 ou RB'1L1.

Le calcul hydraulique se réalise comme suit :

- Calcul de la perte de charge du branchement

- Calcul de la perte de charge sur la moitié de la conduite principale
- Calcul de la perte de charge dans la conduite de refoulement, conduite d'aspiration (pour le 1^{er} cas) ou de la perte de charge dans la conduite d'adduction gravitaire (2^{ème} cas)
- Calcul de la charge totale du système, et enfin la détermination de la puissance nécessaire de la pompe (1^{er} cas) ou la côte du château d'eau (2^{ème} cas).

Les méthodes de calcul des conduites à écoulement en charge ont été présentées dans de nombreuses publications et sont basées généralement sur l'équation générale de DARCY-WEISBACH ou CHEZY (49) (14) (11).

Nous présentons à présent, notre méthodologie de calcul de pertes de charge linéaires dans les rampes de micro-irrigation.

4. Le calcul hydraulique

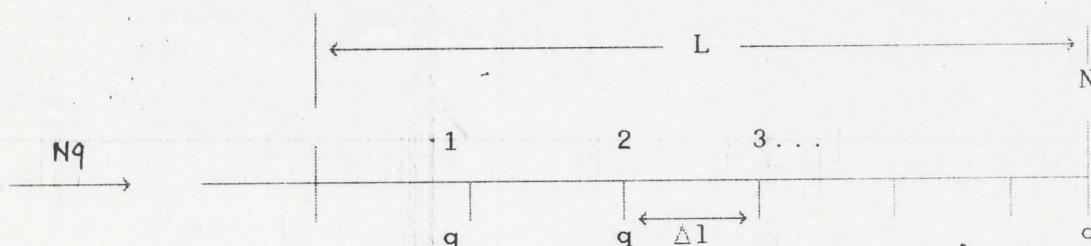
4.1. Calcul des pertes de charge linéaires du branchement

Comme nous l'avons signalé précédemment dans la discussion sur les relations de calcul, de nombreux auteurs ont négligé le changement de l'état d'écoulement dans les rampes ainsi que l'influence de l'intervalle Δl entre les goutteurs.

4.1.1. Critères d'écoulement dans le branchement

Le régime d'écoulement dans un branchement de longueur L , muni de N goutteurs dépend du nombre de Reynolds (Re) dans chaque tronçon du branchement.

Prenons un branchement du peigne : schéma Fig.n°16.



Le nombre des goutteurs du branchement est $N = \frac{L}{\Delta l}$

Si le branchement est muni de N goutteurs, nous aurons N tronçons où le premier véhicule un débit de Nq et le dernier un débit égal à q. Or, le régime d'écoulement dépend du nombre de Reynolds.

Ce nombre de Reynolds dans le branchement diminue du premier tronçon jusqu'au dernier au même titre que le débit varie de Nq à q.

Pour le $i^{\text{ème}}$ tronçon dans le branchement nous aurons :

$$q_i = q (N - i + 1) \quad [1]$$

Et le nombre de Reynolds dans le tronçon est de :

$$Re_i = \frac{4 q_i}{\pi d \nu} \quad [2]$$

Sachant que $Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$

avec :

V : vitesse dans le tronçon

d : diamètre dans la conduite

ν : viscosité cinématique de l'eau, fonction de la température T(49)

$$\nu = \frac{1,7 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337T + 0,00022T^2} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

d'où :

$$Re_i = \frac{4q (N - i + 1)}{\pi d \nu} \quad [3]$$

La condition critique pour que l'écoulement dans le $i^{\text{ème}}$ tronçon soit un écoulement turbulent est que :

$$Re_{icr} = 2300 = \frac{4q (N - i + 1)}{\pi d \nu}$$

De cette manière nous aurons :

$$i_{cr} = N - \frac{2300 \pi d \nu}{4q} + 1 \quad [4]$$

Ayant déterminé le $i^{\text{ème}}$ tronçon critique, le tronçon $(i + 1)$ sera soumis à un écoulement laminaire ($Re < 2300$).

Donc, un branchement muni de N goutteurs sera soumis totalement à un écoulement laminaire si :

$$i < 0 \text{ ou } N - \frac{2300 \pi d \nu}{4q} + 1 < 0 \quad [5]$$

Un branchement muni de N goutteurs aura une partie soumise à l'écoulement turbulent si :

$$i > 0 \text{ ou } N - \frac{2300 \pi d \nu}{4q} + 1 > 0 \quad [5-1]$$

Un branchement muni de N goutteurs sera soumis totalement à l'écoulement turbulent si :

$$i = N$$

ou :

$$N - \frac{2300 \pi d \nu}{4q} + 1 = 0$$

ou :

$$2300 \frac{\pi d \nu}{4q} = 1$$

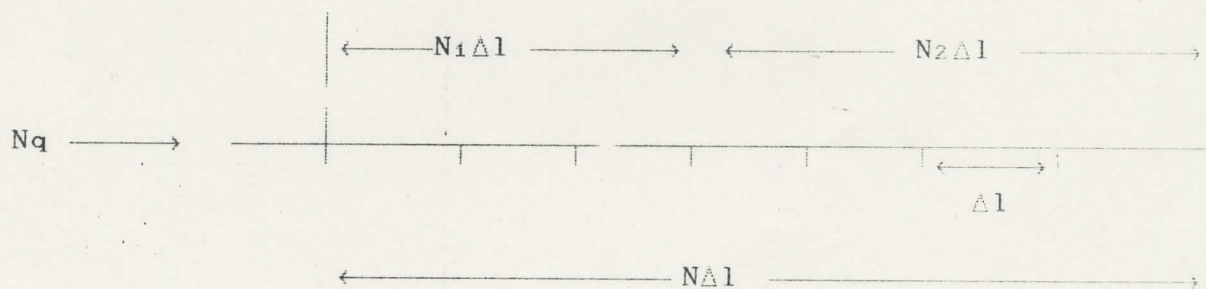
d'où :

$$q_N = \frac{2300 \pi d \nu}{4} \quad [5-2]$$

Le débit qui traverse le Nième tronçon doit être assez grand pour assurer un nombre de Reynolds élevé ($Re > 2300$) - condition de l'état turbulent - . Ce qui est irréalisable, puisque ce débit n'est autre que le débit spécifique du goutteur qui est généralement faible, 2 l/h à 4 l/h, dans ce type de système d'irrigation au goutte à goutte.

Donc, dans un branchement muni de N goutteurs, selon le nombre "N", le diamètre de la conduite du branchement "d", le débit spécifique "q", il existe généralement une partie avec N_1 tronçons (ou goutteurs) fonctionnant selon un régime d'écoulement turbulent et l'autre partie restante en régime laminaire. Fig. n°17. Il n'existe pas de rampe à écoulement totalement turbulent. En revanche les branchements munis d'un nombre faible de goutteurs (< 50) peuvent fonctionner totalement en régime laminaire. Ce cas se rencontre tout de même en pratique.

Fig. n°14 : Etat d'écoulement dans le branchement muni de N goutteurs



$N_1 \Delta l$: longueur de la partie où l'écoulement est turbulent (première partie)

N_1 : nombre de tronçons de la première partie (ou nombre de goutteurs)

$N_2 \Delta l$: longueur de la partie ($2^{\text{ème}}$) où l'écoulement est laminaire

N_2 : nombre de tronçons de la partie en aval ($2^{\text{ème}}$)

$N \Delta l = L$: longueur du branchement

Nq : débit traversant le 1^{er} tronçon

$N=N_1+N_2$: nombre total des goutteurs sur le branchement

A l'aide de la relation [5], nous avons dressé des tableaux pour déterminer le nombre de tronçons soumis à l'écoulement turbulent et le nombre de tronçons soumis à l'écoulement laminaire. L'application est élaborée pour une gamme de conduite de différents diamètres (12-16 -18 mm) portant séparément des goutteurs de différents modèles (2l/h, 3l/h, 4l/h) sous des conditions de températures différentes ($T = 20^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}$). Tableau n°29

4.1.1.1. Applications aux conditions expérimentales

Données de départ : $d = 0,016\text{m}$

$$v = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Pi = 3,14$$

$$\Delta l = 0,4\text{m}$$

$$N = 30$$

$$q_n = 4,098 \text{ l/h}$$

Le choix de la valeur de N a été réalisé après l'avoir déterminé selon la relation:

$$N = 2300 \frac{\Pi d v}{4q} + (i - 1)$$

dans la condition critique $Re_{cr} = 2300$.

Cette condition nous permet d'avoir deux types d'écoulement (turbulent + laminaire) au niveau d'un même branchement.

$$N = \frac{2300 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{4,098} + (i - 1)$$
$$4 \cdot \frac{10^{-3}}{3600}$$

$$N = 25,648 + (i - 1)$$

$$N_{cr} = 24,648 + i ; N_{cr} = 25$$

$N > N_{cr} + 1$ itération (1 goutteur) \longrightarrow écoulement turbulent existant

$$i = 0,352 < 1$$

L'écoulement turbulent dans la condition critique ne concerne pas totalement le premier tronçon. Il se localise juste en tête de rampe.

Vérifions par le $Re_1 = \frac{4q (N_1 - i + 1)}{\pi d \nu}$ avec $N_1 = 1$

$$Re_1 = \frac{4.4.098.10^{-3} (1 - 1 + 1)}{3600.3.14.0.016.1.01.10^{-6}} = 2243 < 2300$$

Donc, à partir de $N > 25 \longrightarrow Re > 2300$
l'écoulement turbulent sera présent dans la rampe.

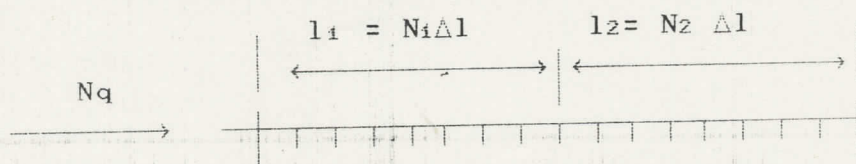
4.1.2. Calcul des pertes de charge linéaires dans la partie à écoulement turbulent (L_1)

Hypothèses : Nombre de tronçon N_1 (c'est aussi le nombre de goutteurs)

- Débit spécifique : $q = q_1 = q_2 = \dots = q_{N1} = q_{N2} = q_N$

- Distance identique entre goutteurs : Δl ; $\Delta l N_1 = l_1$

4.1.2.1. Schéma de calcul fig.n°15



4.1.2.2. Détermination

À partir de l'équation de DARCY-WEISBACH, la perte de charge linéaire dans un tronçon quelconque "ième" du branchement est déterminée par la relation :

$$\Delta h_i = \lambda_i \frac{\Delta l}{d} \frac{V_i^2}{2g}$$

Avec :

λ : coefficient de résistance hydraulique (en régime turbulent).

V_i : vitesse moyenne du tronçon

Δl : longueur du tronçon

d : diamètre de la conduite du branchement

Pour déterminer λ , nous avons choisi la relation* faisant intervenir le coefficient de CHEZY (14) (17).

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}$$

Avec :

C : coefficient de CHEZY ; $C = \frac{1}{n} R^y$

n : coefficient de rugosité

R : rayon hydraulique de la conduite

y : $\frac{1}{6}$ (d'après Manning) (14) et (34).

$$\text{donc : } \Delta h_i = \frac{8g}{C^2} \cdot \frac{\Delta l}{d} \cdot \frac{q_i^2}{[\pi d/4]^2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{64}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta l}{C^2} \cdot \frac{q_i^2}{d^5}$$

d'où :

$$\Delta h_i = \frac{64}{\Pi^2} \cdot \frac{\Delta l}{C^2} \cdot \frac{q_i^2}{d^5} \quad [6]$$

Si l'on remplace $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ avec $R = \frac{d}{4}$, on aura la relation [6] sous d'autres formes :

$$\Delta h_i = \frac{64}{\Pi^2} \frac{\Delta l}{\frac{1}{n^2} \left[\frac{d}{4} \right]^{1/3}} \frac{q_i^2}{d^5} \quad [6-1] \text{ ou } \Delta h_i = 10,30 n^2 \frac{\Delta l}{d^{5,33}} q_i^2 \quad [6-2]$$

* . Le choix de la relation déterminant λ est à la base de différences qui existent entre les différentes relations de calcul de pertes de charges .

- La perte de charge du dernier tronçon (dans la partie où l'écoulement est turbulent avec $i = N_1$).

$$\Delta h_{N_1} = \frac{64}{\Pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} (N - N_1 + 1)^2$$

La somme des pertes de charge dans la première partie (l_1) est :

$$\Sigma \Delta h = \frac{64}{\Pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} [N^2 + (N - 1)^2 + \dots + (N - N_1 + 1)^2]$$

d'où :

$$\Sigma \Delta h_{\text{turb}} = \frac{64}{\Pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} \sum_{i=1}^{N_1} (N - i + 1)^2 \quad [8]$$

ou :

$$\Sigma \Delta h_{\text{turb}} = 10,3 n^2 \frac{\Delta l}{d^{5,33}} \cdot q^2 \sum_{i=1}^{N_1} (N - i + 1)^2 \quad [8-1]$$

ou :

$$\Sigma \Delta h_{\text{turb}} = \frac{1}{k^2} \cdot \Delta l q^2 \sum_{i=1}^{N_1} (N - i + 1)^2 \quad [8-2]$$

La relation [8] que nous proposons ci-dessus tient compte de deux caractéristiques essentielles :

- Le régime turbulent existe seulement dans une partie du branchement sachant que le nombre de tronçons soumis à un tel régime d'écoulement pourrait être déterminé par la relation [5] ou en utilisant le tableau n°29 a, 29 b, 29 c, et 29 d.

- De l'influence de Δl qui pourrait être non négligeable pour ne pas considérer que les débits des émetteurs ne sont pas répartis régulièrement (continus) tout le long du branchement.

Remarque

Tenant compte des remarques de J. Bonnin (14) qui, selon lui, les pertes de charge dans les tuyaux en plastique sont déterminées de la même manière que celles des tuyaux lisses, majorées de 10% et dans ce

Si on introduit la notion de module de débit $k = wC\sqrt{R}$

$$w = \frac{\pi d^2}{4} \text{ nous aurons :}$$

$$\frac{\Delta h_i}{\Delta l} = j = \frac{q_i^2}{k_i^2}$$

d'où :

$$\Delta h_i = \frac{1}{K_i^2} \Delta l \cdot q_i^2 \quad [6-3]$$

Remplaçons q_i par sa valeur (éq.[1])

$q_i = q (N - i + 1)$, nous aurons des relations déterminant des pertes de charge linéaires dans le ième tronçon en fonction du débit traversant ce tronçon :

$$\Delta h_i = \frac{64}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta l}{C^2} \cdot \frac{q^2}{d^5} (N - i + 1)^2 \quad [7]$$

ou :

$$\Delta h_i = 10,30 n^2 \frac{\Delta l}{d^{5,33}} \cdot q^2 (N - i + 1)^2 \quad [7-1]$$

ou :

$$\Delta h_i = \frac{1}{k^2} \Delta l \cdot q^2 (N - i + 1)^2 \quad [7-2]$$

Prenons, par exemple, la relation [6] nous aurons :

- La perte de charge du 1^{er} tronçon : $\Delta h_1 = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} N^2$

- La perte de charge du 2^{ème} tronçon : $\Delta h_2 = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} (N-1)^2$

- La perte de charge du ième tronçon : $\Delta h_i = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} (N-i+1)^2$

Tableau N°29 a : Répartition des tronçons d'un branchement selon le régime d'écoulement ($T^{\circ} = 20^{\circ}C$)

$T^{\circ}C$ $20^{\circ}C$	d (mm)	Q (l/h)	N = 25		N = 30		N = 40		N = 50		N = 100		N = 150		N = 200		N = 250		N = 300		N = 350		N = 400		N = 500			
			N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
$\nu = 0.0101 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/s$	12	2	0	25	0	30	2	38	12	38	62	38	112	38	162	38	212	38	262	38	312	38	362	38	412	38	462	38
		3	0	25	5	25	45	25	25	25	75	25	125	25	175	25	225	25	275	25	325	25	375	25	425	25	475	25
		4	7	18	12	18	22	18	32	18	82	18	132	18	182	18	232	18	282	18	332	18	382	18	432	18	482	18
		4	0	25	0	30	0	40	0	50	49	51	99	51	149	51	199	51	249	51	299	51	349	51	399	51	449	51
	16	2	0	25	0	30	0	40	0	50	49	51	99	51	149	51	199	51	249	51	299	51	349	51	399	51	449	51
		3	0	25	0	30	6	34	16	34	66	34	116	34	166	34	216	34	266	34	316	34	366	34	416	34	466	34
		4	0	25	5	25	15	25	25	25	75	25	125	25	175	25	225	25	275	25	325	25	375	25	425	25	475	25
		4	0	25	0	30	0	40	0	50	42	58	92	58	142	58	192	58	242	58	292	58	342	58	392	58	442	58
	18	2	0	25	0	30	0	40	0	50	42	58	92	58	142	58	192	58	242	58	292	58	342	58	392	58	442	58
		3	0	25	0	30	2	38	12	38	62	38	112	38	162	38	212	38	262	38	312	38	362	38	412	38	462	38
		4	0	25	1	29	11	29	21	29	71	29	121	29	171	29	221	29	271	29	321	29	371	29	421	29	471	29
		4	0	25	0	29	11	29	21	29	71	29	121	29	171	29	221	29	271	29	321	29	371	29	421	29	471	29

Tableau N° 29 b : Répartition des tronçons d'un branchement selon le régime d'écoulement (T° = 25°C)

T° C 25°C	d (mm)	q (l/h)	N = 25		N = 30		N = 40		N = 50		N = 100		N = 150		N = 200		N = 250		N = 300		N = 350		N = 400		N = 500			
			N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
$\nu = 0.00900 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	12	2	0	25	0	30	6	34	16	34	66	34	116	34	166	34	216	34	266	34	316	34	366	34	466	34	478	22
		3	3	22	8	22	18	22	28	22	78	22	128	22	178	22	228	22	278	22	328	22	378	22	478	22	483	17
		4	8	17	13	17	23	17	33	17	83	17	133	17	183	17	233	17	283	17	333	17	383	17	483	17	483	17
		4	0	25	0	30	0	40	4	46	54	46	104	46	154	46	204	46	254	46	304	46	354	46	454	46	454	46
	16	2	0	25	0	30	10	30	20	30	70	30	120	30	170	30	220	30	270	30	320	30	370	30	470	30	470	30
		3	0	25	0	30	10	30	20	30	70	30	120	30	170	30	220	30	270	30	320	30	370	30	470	30	470	30
		4	3	22	8	22	18	22	28	22	78	22	128	22	178	22	228	22	278	22	328	22	378	22	478	22	478	22
		4	0	25	0	30	0	40	0	50	48	52	98	52	148	52	198	52	248	52	298	52	348	52	448	52	448	52
	18	2	0	25	0	30	0	40	0	50	48	52	98	52	148	52	198	52	248	52	298	52	348	52	448	52	448	52
		3	0	25	0	30	6	34	16	34	66	34	116	34	166	34	216	34	266	34	316	34	366	34	466	34	466	34
		4	0	25	0	30	6	34	16	34	66	34	116	34	166	34	216	34	266	34	316	34	366	34	466	34	466	34
		4	0	25	5	25	15	25	25	25	75	25	125	25	175	25	225	25	275	25	325	25	375	25	475	25	475	25

Tableau N° 29 c : Répartition des tronçons d'un branchement selon le régime d'écoulement ($T^{\circ}=30^{\circ}$ c)

T° C	d (mm)	Q (l/h)	N=25		N=30		N=40		N=50		N=100		N=150		N=200		N=250		N=300		N=350		N=400		N=500	
			N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
30	12	2	0	25	0	30	10	30	20	30	70	30	120	30	270	30	220	30	270	30	320	30	370	30	470	30
		3	5	20	10	20	20	20	20	20	80	20	130	20	180	20	230	20	280	20	330	20	380	20	480	20
		4	10	15	15	15	25	15	35	15	85	15	135	15	185	15	235	15	285	15	335	15	385	15	485	15
		4	0	25	0	30	0	40	9	41	59	41	109	41	159	41	209	41	259	41	309	41	359	41	459	41
	16	2	0	25	0	30	0	40	9	41	59	41	109	41	159	41	209	41	259	41	309	41	359	41	459	41
		3	0	25	1	29	11	29	21	29	71	29	121	29	171	29	221	29	271	29	321	29	371	29	471	29
		4	5	20	10	20	20	30	20	20	80	20	130	20	180	20	230	20	280	20	330	20	380	20	480	20
		4	0	25	0	30	0	40	4	46	54	46	104	46	154	46	204	46	254	46	304	46	354	46	454	46
	18	2	0	25	0	30	0	40	4	46	54	46	104	46	154	46	204	46	254	46	304	46	354	46	454	46
		3	0	25	0	30	10	30	20	30	70	30	120	30	170	30	220	30	270	30	320	30	370	30	470	30
		4	3	22	8	22	18	22	28	22	78	22	128	22	178	22	228	22	278	22	328	22	378	22	478	22
		4	0	25	0	30	0	40	4	46	54	46	104	46	154	46	204	46	254	46	304	46	354	46	454	46

$$D = 0.008 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tableau N° 29 d : Répartition des tronçons d'un branchement selon le régime d'écoulement ($T^{\circ}=35^{\circ} \text{ c}$)

$T^{\circ} \text{C}$	d (mm)	Q (l/h)	N=25		N=30		N=40		N=50		N=100		N=150		N=200		N=250		N=300		N=350		N=400		N=500	
			N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
35	12	2	0	25	3	27	13	27	23	27	73	27	123	27	173	27	223	27	273	27	323	27	373	27	423	27
		3	7	18	12	18	22	18	32	18	82	18	132	18	182	18	232	18	282	18	332	18	382	18	432	18
		4	12	13	17	13	27	13	37	13	87	13	137	13	187	13	237	13	287	13	337	13	387	13	437	13
		2	0	25	0	30	4	36	14	36	64	36	114	36	164	36	214	36	264	36	314	36	364	36	414	36
	16	3	1	24	6	24	16	24	26	24	76	24	126	24	176	24	226	24	276	24	326	24	376	24	426	24
		4	7	18	12	18	22	18	32	18	82	18	132	18	182	18	232	18	282	18	332	18	382	18	432	18
		2	0	25	0	30	0	40	9	41	59	41	109	41	159	41	209	41	259	41	309	41	359	41	409	41
		4	7	18	12	18	22	18	32	18	82	18	132	18	182	18	232	18	282	18	332	18	382	18	432	18
	18	3	0	25	3	27	13	27	23	27	73	27	123	27	173	27	223	27	273	27	323	27	373	27	423	27
		4	5	20	10	20	20	20	30	20	80	20	130	20	180	20	230	20	280	20	330	20	380	20	430	20

$$v = 0.0072 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

cas la valeur de λ est déterminée par la formule de Blasius (14) (34)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

La relation déterminant les pertes de charge serait :

$$\Delta h_i = 0,0264 \nu^{1/4} \frac{\Delta l}{d^{4,75}} q_i^{1,75} \quad [8-3]$$

ou :

$$\sum \Delta h_i = 0,0246 \cdot \nu^{0,25} \frac{\Delta l}{d^{4,75}} q^{1,75} \sum (N - i + 1)^{1,75} \quad [8-4]$$

C'est une relation similaire à la formule Française citée précédemment.

4.1.3. Calcul des pertes de charge linéaires dans la zone (L₂) où l'écoulement est laminaire

4.1.3.1. Hypothèses

- Nombre de tronçons N_2 (ou nombre de goutteurs)
- Débit spécifique $q = q_1 = q_2 \dots = q_{N_1} = q_{N_2} = q_N$
- Distance identique entre goutteurs : Δl
 $\Delta l_{N_2} = L_2$
- Diamètre constant de la conduite "d".

Le schéma de calcul est le même que celui de l'écoulement turbulent.

4.1.3.2. Détermination

A partir de l'équation universelle de DARCY, nous déterminons la perte de charge du ième tronçon :

$$\Delta h_i = \lambda_i \frac{\Delta l}{d} \frac{V_i^2}{2g} = \frac{8\lambda_i}{g\pi^2} \frac{\Delta l}{d^5} q_i^2 \quad [9]$$

avec :

$$\lambda_i = \frac{64}{Re_i} = \frac{16\pi d \nu}{q_i}$$

Dans cette partie "amont" du branchement, le débit de ce dernier varie de $N_2 \cdot q$ à q . Sachant que $q_i = (N_2 - i + 1) \cdot q$. Nous avons :

$$\Delta h_i = \frac{8,16 \pi d \nu}{g \pi^2 q_i} \cdot \frac{\Delta l}{d^5} q_i^2 = \frac{128}{g \pi} \frac{\Delta l}{d^4} q_i$$

d'où :

$$\Delta h_i = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} q (N_2 - i + 1) \quad [10]$$

Cette dernière relation [10] prend l'allure de la formule de Poiseuille .

Pour le premier tronçon de la deuxième partie du branchement (L_2), nous aurons :

$$\Delta h_1 = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} \cdot q_{N_2} \quad [10-1]$$

- Pour le second tronçon:

$$\Delta h_2 = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} q (N_2 - 1) \quad [10-2]$$

- Pour le $i^{\text{ème}}$ tronçon : $\Delta h_i = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} q (N_2 - i + 1)$

Donc, la somme de perte de charge linéaire dans la partie à écoulement laminaire est de :

$$\Sigma \Delta h_{\text{lamin}} = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} q [N_2 + (N_2 - 1) + \dots + (N_2 - i + 1) + \dots + 1] \quad [10-3]$$

La somme de la série $[N_2 + (N_2 - 1) + (N_2 - 2) + \dots + 1]$ de pas 1 est :

$$\sum_{i=1}^{N_2} N_2 = \frac{N_2}{2} (1 + N_2)^2 \quad \sum_{i=1}^{N_2} N_2 = \frac{N_2}{2} (1 + N_2)$$

En supposant que le débit est réparti régulièrement et en utilisant la notion de débit équivalent nous avons :

$$\sum \Delta h_{\text{linéaire}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{C^2} \frac{(0,55Q)^2}{d^5} \quad \text{C'est à dire :}$$

$$\sum \Delta h_{\text{linéaire}} = 2,33 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Q^2}{d^5} L \quad [12-1]$$

Il apparaît donc que c'est seulement avec ces hypothèses qu'on pourrait trouver la forme des formules utilisées par les autres auteurs cités précédemment. Néanmoins, nous avons démontré que l'écoulement dans tout le branchement ne peut être totalement turbulent.

Par conséquent, l'emploi de la relation [12] que nous proposons donnerait des résultats beaucoup plus exacts et proche de la réalité de l'état d'écoulement surtout quand Δl est grand ($\Delta l = 4m$)... où l'écoulement est laminaire ($N \leq 25$).

- La démarche de calcul que nous proposons est la suivante :

a. Connaissant les données : N, q et d , on déterminerait d'abord N_1 et N_2 .

b. En utilisant les relations [10], [11] et [12] nous avons dressé un tableau (n°30) pour le calcul du coefficient de CHEZY ($n = 0,0101$ à $0,014$) sachant qu'il n'existe pas de tableau pour la détermination du coefficient de CHEZY (Module de débit pour les conduites à petits diamètres particulièrement dans les conduites en plastique).

Nous avons trouvé également utile de dresser un tableau de calcul donnant : $\sum (N - i + 1)^2$ pour différentes valeurs de N . (voir annexe 4)

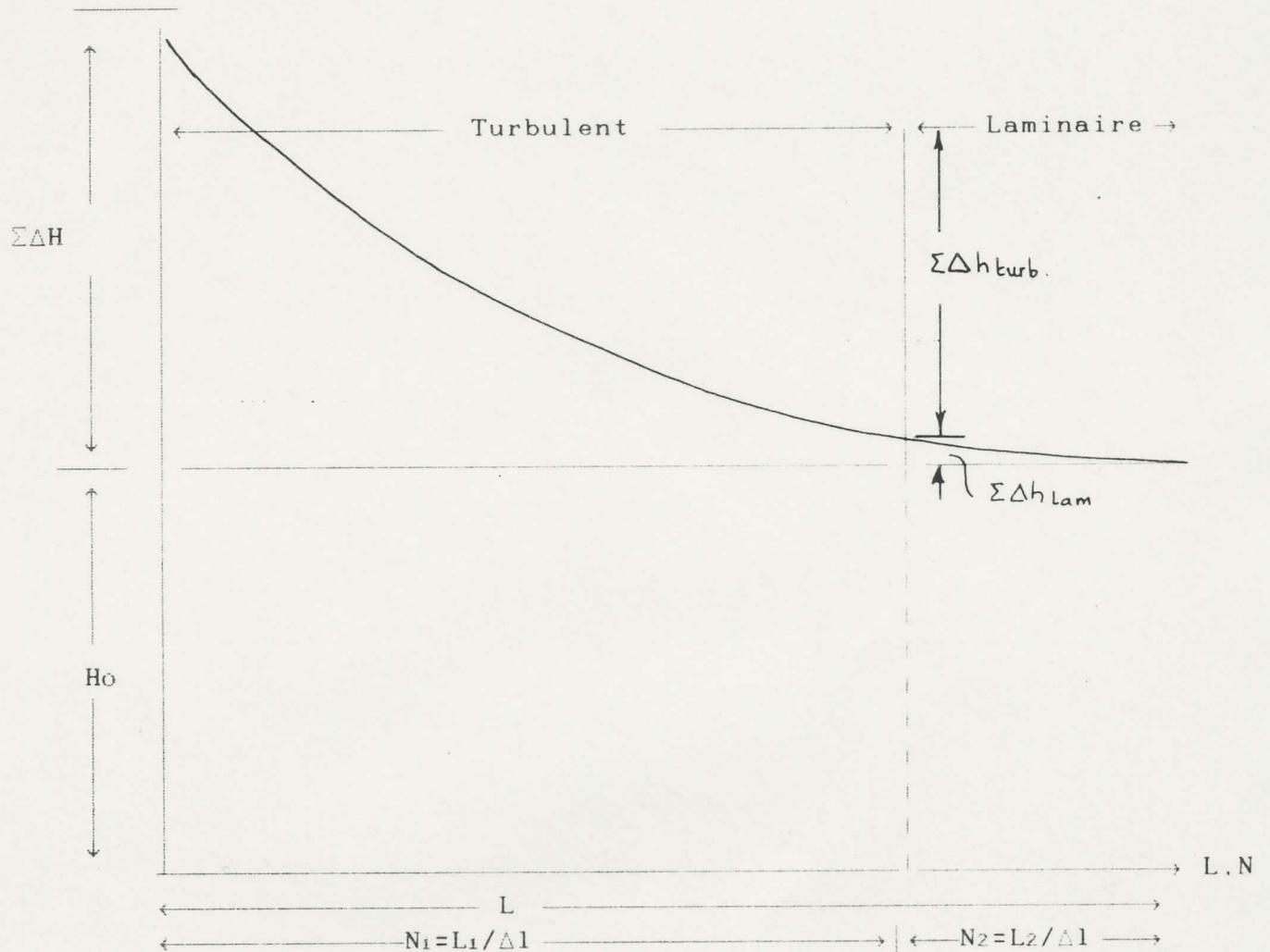
Tableau N°30 : Valeurs des constantes K et C pour de faibles diamètres

$$K = W c \sqrt{R} , C = 1/n \cdot R^{1.06}$$

D (mm)	D/4=R (m)	R ^{1/4} (m)	n = 0.01				n = 0.0111				n = 0.012				n = 0.013			
			1/n	C	w.10 ⁻⁶ (m ²)	K.10 ⁻⁶ (m ³ /s)	1/n	C	w.10 ⁻⁶ (m ²)	K.10 ⁻⁶ (m ³ /s)	1/n	C	w.10 ⁻⁶ (m ²)	K.10 ⁻⁶ (m ³ /s)	1/n	C	w.10 ⁻⁶ (m ²)	K.10 ⁻⁶ (m ³ /s)
12	0.0030	0.3842	100	38.12	9.42	19.39	90.09	34.34	9.42	17.46	83.33	31.76	9.42	16.15	76.92	29.32	9.42	14.91
16	0.0040	0.3998	100	39.98	12.56	31.63	90.09	36.01	12.56	28.49	83.33	33.31	12.56	26.35	76.92	30.75	12.56	24.33
18	0.0045	0.4077	100	40.77	14.13	38.59	90.09	36.72	14.13	34.76	83.33	33.97	14.13	32.15	76.92	31.36	14.13	29.68
20	0.0050	0.4149	100	41.49	15.70	45.59	90.09	37.37	15.70	41.06	83.33	34.57	15.70	37.99	76.92	31.91	15.70	35.06
22	0.0055	0.4215	100	42.15	17.27	53.86	90.09	37.97	17.27	48.52	83.33	35.12	17.27	44.88	76.92	32.42	17.27	41.43
28	0.0070	0.4388	100	43.88	21.98	80.63	90.09	39.53	21.98	72.63	83.33	36.56	21.98	67.18	76.92	33.75	21.98	62.01
30	0.0075	0.4438	100	44.38	23.55	90.57	90.09	39.98	23.55	81.53	83.33	36.98	23.55	75.41	76.92	34.13	23.55	69.65
32	0.0080	0.4486	100	44.86	25.12	100.74	90.09	40.41	25.12	90.74	83.33	37.38	25.12	83.94	76.92	34.50	25.12	77.47
40	0.0100	0.4655	100	46.55	31.40	146.16	90.09	41.93	31.40	131.64	83.33	38.79	31.40	121.80	76.92	35.80	31.40	112.41
50	0.0125	0.4831	100	48.31	39.25	211.99	90.09	43.52	39.25	190.97	83.33	40.25	39.25	176.62	76.92	37.16	39.25	163.06
63	0.0157	0.5017	100	50.17	49.45	310.60	90.09	45.19	49.45	279.77	83.33	41.80	49.45	258.78	76.92	38.59	49.45	238.91
75	0.0187	0.5165	100	51.65	58.87	415.60	90.09	46.53	58.87	374.45	83.33	43.03	58.87	346.28	76.92	39.72	58.87	319.64
100	0.025	0.5420	100	54.20	78.50	672.66	90.09	48.82	78.50	605.89	83.33	45.16	78.50	560.47	76.92	41.69	78.50	517.40

4.1.3.3. Représentation graphique fig.n°16

Le graphique de la perte de charge dans la rampe (branchement) est de la forme :



$$N_1 = i = N - \frac{2300 \pi d v}{4q} + 1$$

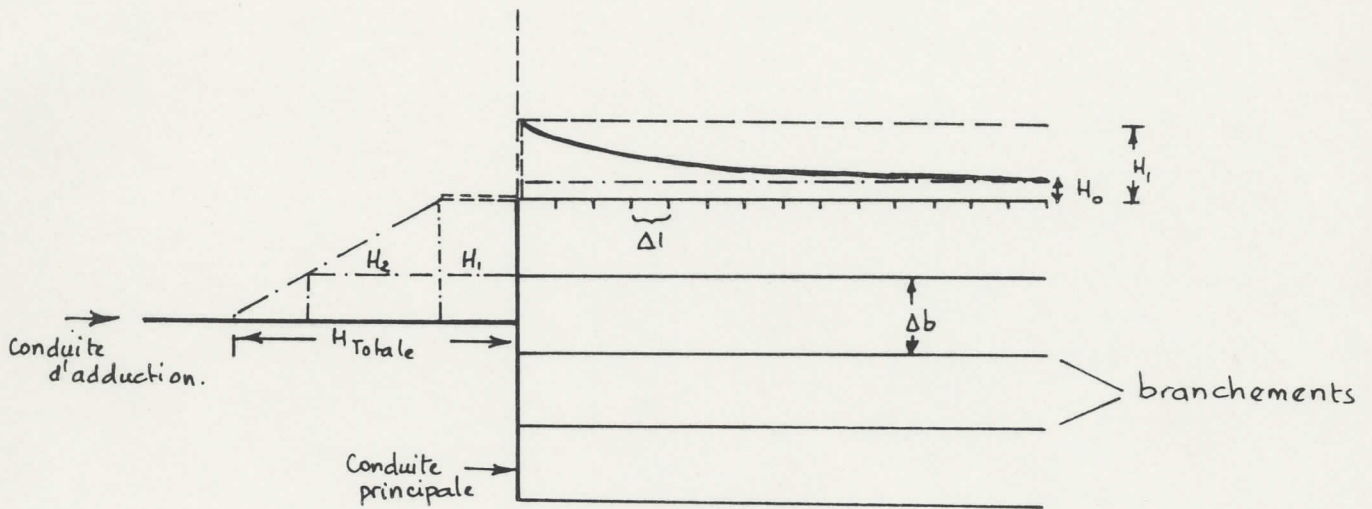
$$N_2 = \frac{2300 \pi d v}{4q} - 1$$

$$\Sigma \Delta H = \Sigma \Delta h_{turb} + \Sigma \Delta h_{lam}$$

\$H_0\$: pression nécessaire au fonctionnement du dernier goutteur le plus défavorisé .

\$\Sigma \Delta H + H_0\$: pression nécessaire en tête de rampe

Le graphique pour un réseau serait : fig.N°17



$$\sum \Delta H_1 + H_0 = H_1$$

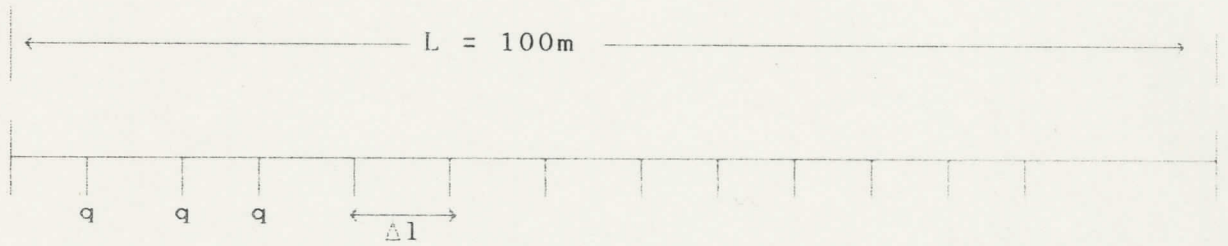
H_1 : charge nécessaire pour le dernier branchement

4.1.3.4. Application

Sachant qu'en micro-irrigation, les unités parcelaires sont de faible superficie (1 à 2 ha), généralement de l'arboriculture ou des serres. Nous prenons un exemple concret concernant un périmètre équipé en micro-irrigation de superficie égale à 1 ha (100m x 100m).

Le raisonnement que nous allons suivre concerne un seul branchement de tout le réseau, le plus défavorable.

Le périmètre a une longueur $L = 100\text{m}$ et une largeur $l = 100\text{m}$. La longueur du branchement serait alors de 100m.



Selon le type de cultures mises en place, on distingue :

1^{er} Cas : cultures serrées : $\Delta l = 0,20\text{m}$;

$$N = \frac{L}{\Delta l} = 500 \text{ goutteurs}$$

2^{ème} Cas : cultures moins serrées : $\Delta l = 0,4\text{m}$;

$$N = \frac{L}{\Delta l} = 250 \text{ goutteurs}$$

3^{ème} Cas : cultures moins espacées : $\Delta l = 0,50 \text{ m}$;

$$N = \frac{L}{\Delta l} = 200 \text{ goutteurs}$$

4^{ème} Cas : Cultures espaceés : $\Delta l = 1\text{m}$;

$$N = \frac{L}{\Delta l} = 100 \text{ goutteurs}$$

5^{ème} Cas : cultures très espacées : $\Delta l = 4\text{m}$;

$$N = \frac{L}{\Delta l} = 25 \text{ goutteurs}$$

Données

Les conditions seront les mêmes pour les 5 cas :

$d = 16\text{mm}$, température de l'eau = 20°C ; $q_n = 4\text{l/h}$

Calculs

1^{er} Cas : $N = 500$, $\Delta l = 0,20\text{m}$ fonctionnement

$N_1 = 475$ (d'après tableau n°29) E.Turbulent

$N_2 = 25$ (d'après tableau n°29) E.Laminaire

$$\sum \Delta h_{\text{turb}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta l}{C^2} \frac{q^2}{d^5} \sum_{i=1}^{N_1} (N - i + 1)^2 : \text{relation [8]}$$

Avec : $C \approx 30$ (Voir tableau n°30)

$$\sum \Delta h_{\text{turb}} = 74,38 \text{ m}$$

$$\sum \Delta h_{\text{lamin}} = 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} \cdot q \cdot \sum_{i=1}^{N_2} N_2 : \text{relation [11-1]}$$

$$\sum \Delta h_L = 0,46 \text{ cm}$$

$$\sum \Delta h_{\text{total}} = \sum \Delta h_t + \sum \Delta h_L = 74,384 \text{ m}$$

2^{ème} Cas : $N = 250$, $\Delta l = 0,14 \text{ m}$

$$N_1 = 225$$

$$N_2 = 25$$

$$\sum \Delta h_t = 18,63 \text{ m}$$

$$\sum \Delta h_L = 0,46 \text{ cm}$$

$$\sum \Delta h_T = 18,634 \text{ m}$$

3^{ème} Cas : $N = 200$, $\Delta l = 0,50 \text{ m}$

$$N_1 = 175$$

$$N_2 = 25$$

$$\sum \Delta h_t = 11,93 \text{ m}$$

$$\sum \Delta h_L = 0,46 \text{ cm}$$

$$\sum \Delta h_T = 11,934 \text{ m}$$

4^{ème} Cas : $N = 100$, $\Delta l = 1 \text{ m}$

$$N_1 = 75$$

$$N_2 = 25$$

$$\sum \Delta h_t = 2,96 \text{ m}$$

$$\sum \Delta h_L = 0,46 \text{ cm}$$

$$\sum \Delta h_T = 2,964 \text{ m}$$

5^{ème} Cas : $N = 25$, $\Delta l = 4m$

$$N_1 = 0$$

$$N_2 = 25$$

$$\Sigma \Delta h_t = 0$$

$$\Sigma \Delta h_L = 0,46cm$$

$$\Sigma \Delta h_T = 0,46 cm$$

Nous avons dressé un tableau comparatif de la valeur de $\Sigma \Delta h_{tot}$ déterminée selon notre relation [12] et les autres relations existantes dans la littérature citée précédemment [a],[b],[c].

Cet aspect mérite une recherche poussée pour déterminer l'exactitude des résultats et l'erreur admise relative à chaque relation de calcul utilisée.

4.1.3.5. Discussions

Sur la base de cette application et à partir des trois relations: [a],[b],[c] exposées précédemment, nous avons essayé de déterminer les différences qui peuvent exister dans le calcul des pertes de charge avec la relation [12] que nous proposons.

Tableau N°31 : Récapitulatif des résultats

Cas	Nombre de goutteurs	$\Sigma\Delta h$ [12] formule proposée	$\Sigma\Delta h$ [a] (m) relation de Christensen	$\Sigma\Delta h$ [b] (m) relation utilisée en Pologne	Ecart relatif			
					[12]/[a]		[12]/[b]	
					m	%	m	%
1	500	74.348m	86.4	95.65	12.05	13.9	21.30	22.23
2	250	18.634m	21.6	23.9	2.96	13.75	5.26	22.05
3	200	11.934m	13.82	15.3	1.88	13.67	3.36	22.02
4	100	2.964m	3.45	3.8	0.48	15.94	0.84	23.6
5	25	0.460(cm)	0.86	0.950	0.85	99.46	0.94	99.5

$$\text{Ecart relatif en \%} = \frac{\Sigma\Delta h[a] - \Sigma\Delta h [12]}{\Sigma\Delta h [a]} \cdot 100$$

La relation Française donne des résultats très éloignés sachant qu'il est précisé qu'elle ne s'applique que pour des rampes ayant un nombre de goutteurs supérieur à 50 .C'est-à-dire pour des rampes à écoulement turbulent.Cette condition fausse dès le départ la comparaison.

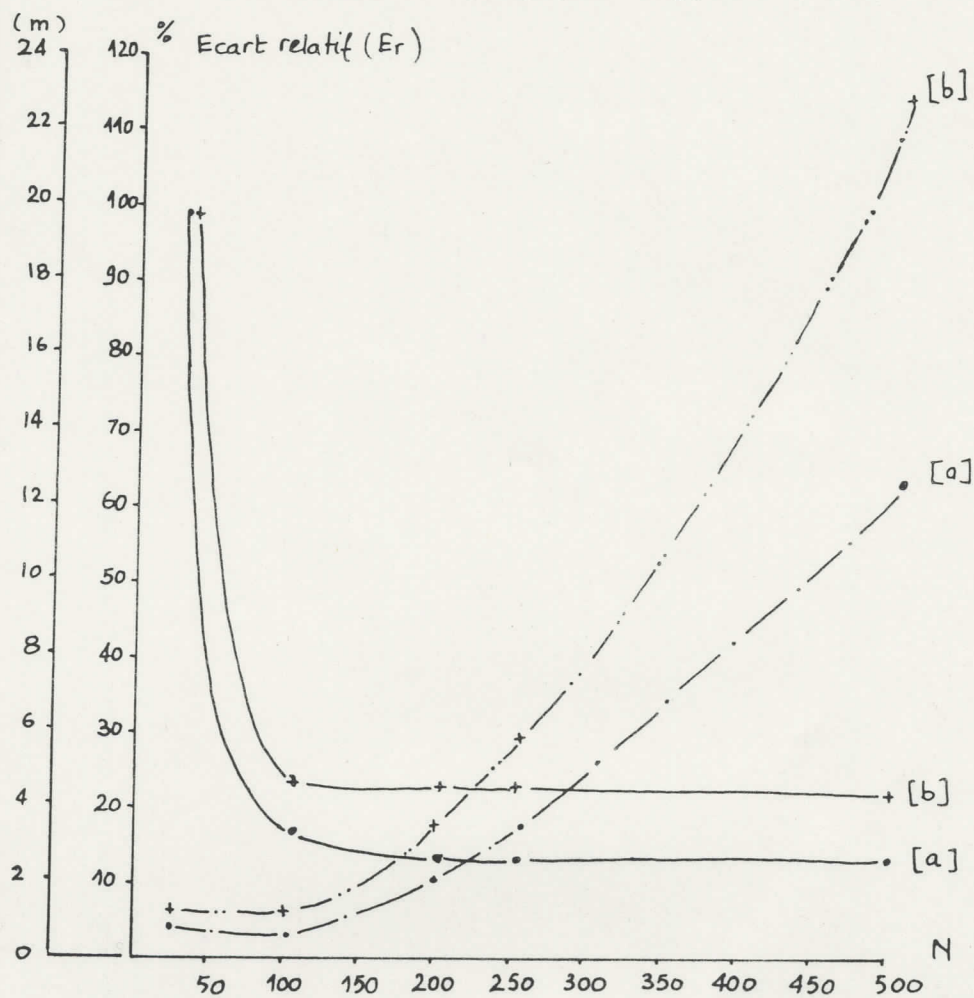
A la suite de cet exemple, nous pouvons constater que l'écart relatif dans les résultats (en %) augmente au fur et à mesure que Δl augmente comme le montre le tableau n°31 et le graphique n°18.

Néanmoins la différence dans les pertes de charge (en mètre) entre [a], [b] avec [12] évolue de manière inversement proportionnelle.

Cette constatation nous permet de déduire que la différence relative bien qu'elle est faible, pour N élevé (Δl petit) elle exprime cependant un écart considérable en énergie soit 12 m à 21 m pour le 1^{er} cas.

Fig N°18 :

Graphique $E_r = f(N)$ Ecart relatif entre les différentes relations [a],[b] et [12] par rapport à ΔN



[a] : Relation de christiansen

[b] : Relation utilisée en pologne

[12] : Relation proposée

Donc, en définitive, nous concluons que même pour les rampes à dominance de tronçons à écoulement turbulent les relations [a] et [b] surestiment la perte de charge.

L'importance de cette différence (en %) est due, en passant du 1er cas au 5ème cas, à la diminution de la longueur du branchement ayant un écoulement turbulent au profit de tronçons à écoulement laminaire.

Cela veut dire que pour les petits réseaux dont les rampes sont moyennes et les intervalles entre les goutteurs sont grands, cas de l'arboriculture fruitière, l'utilisation de la relation [12] minimise les pertes de charge dans les rampes en tenant compte du régime d'écoulement laminaire et par conséquent, offre un avantage économique important (moindre coût d'énergie et de tuyauterie).

Ainsi, à partir des valeurs de $\Sigma\Delta h$ déterminées à l'aide de la relation [12], l'on peut déduire les diamètres correspondants en utilisant respectivement les relations [a] et [b].

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau n°32.

Tableau N°32 : Comparaison des relations de calcul des pertes de charges en micro-irrigation

Cas	Valeur de $\Sigma\Delta h$ [12] avec $d=16\text{mm}$	Diamètre en mm correspondant	
		Relation [a]	Relation [b]
1	74,38 m	15,84	15,84
2	18,63 m	16,32	16,65
3	11,93 m	16,32	16,65
4	2,96 m	16,34	16,67
5	0,0046 m	34,22	34,92

Nous constatons à travers cet exemple que les diamètres correspondants aux valeurs de $\Sigma\Delta h$ [12] doivent du 1^{er} cas au 5^{ème} cas, c'est-à-dire selon le sens croissant de l'écartement Δl , augmenter au delà de la valeur initiale de calcul soit 16 mm. Pour le premier cas, ayant un écartement entre goutteurs trop petit, le diamètre déterminé à partir des relations [a] et [b], est trop proche de 16 mm (valeur donnée par $\Sigma\Delta h$ [12]). On en déduit que la différence entre les trois relations est insignifiante car le rapport L_1/L_2 est très élevé.

Pour le 5^{ème} cas, avec Δl relativement grand, les diamètres déterminés doivent être deux fois plus grands pour maintenir la valeur de calcul de $\Sigma\Delta h$ [12]. Dans ce cas, L_1 est nulle et l'écoulement laminaire est dans toute la longueur de la rampe.

En reprenant l'exemple de 1 ha équipé de 20 rampes de 100m, le choix de la relation [12] proposée représente soit un gain d'énergie au niveau de la puissance de pompage soit une économie dans le coût relatif à la tuyauterie, notamment dans le cas où Δl est grand. Ainsi, un calcul simple permet d'évaluer ces différences :

L'équipement de 1 ha avec 20 rampes de 100 m de longueur nécessite 2000 m linéaires de conduite de diamètres différents du 1^{er} au 5^{ème} cas :

- 1^{er} cas : $d = 16$ mm

Coût de l'investissement : 2000 mL.4 DA = 8.000,00 DA

- 5^{ème} cas : $d = 34$ mm

Coût de l'investissement : 2000 mL 10 DA = 20.000,00 DA

En utilisant la relation [12], nous dégagons un gain de 12.000,00 DA/ha ou 6,00 DA au mL.

Sur le plan énergétique, l'utilisation de la relation [12] dégage un gain par rapport aux relations [a] et [b].

En effet, en analysant le tableau n°33 et 34, nous constatons que l'utilisation des relations [a] et [b] induirait une consommation en énergie supplémentaire dépassant de 10 à 30 % celle relative à la relation [12]

Pour le 5^{ème} cas, l'accroissement est de 0.36 kw/h, soit 36 kw pour 100 heures de fonctionnement.

Tableau N°33 : Ecart dans la consommation d'énergie relative a l'utilisation des relations de calcul [12], [a] et [b]

Hypothèses

$q_n = 41/h$

$H_{tot} = \Sigma \Delta h + H_o$

$H_o = 5m \text{ de CE} - \text{démontré dans le chapitre IV}$

$d = 16 \text{ mm}$

$P = 9.81 Q \cdot H_{tot} / \eta$

P : Puissance totale de pompage en kw

Q : Débit traversant la rampe en m^3/s

H_{tot} : Charge totale du réseau en m

H_o : Charge nécessaire au fonctionnement du dernier goutteur (en m)

η : Rendement de la pompe : 60 %

Cas	N	$\Sigma \Delta h$ [12] (m)	H_{tot} (m)	Q m^3/s 10^{-6}	P [12] kw	$\Sigma \Delta h$ [a] (m)	P [a] kw	$\Sigma \Delta h$ [b] (m)	P [b] kw
1	500	74,380	79,38	555,50	0,720	86,40	0,830	95,65	0,913
2	250	18,630	23,63	277,75	0,107	21,60	0,120	23,90	0,131
3	200	11,930	16,93	222,20	0,061	13,82	0,068	15,30	0,073
4	100	2,960	7,96	111,10	0,014	3,45	0,015	3,80	0,016
5	25	0,005	5,00	27,77	0,002	0,86	0,003	0,95	0,003

En une heure de fonctionnement, la puissance théorique relative au pompage selon les trois relations, est la suivante :

Tableau N°34 : Différences de puissances relatives aux relations

Cas	P [12] kw/h	P [a] kw/h	P [b] kw/h	Différence en %	
				[a]/[12]	[b]/[12]
1	259,00	298,80	328,68	13,30	21,19
2	38,52	43,20	47,16	10,83	22,42
3	21,60	24,48	26,28	11,76	17,80
4	5,04	5,40	5,76	6,66	24,32
5	0,72	1,08	1,08	33,33	97,84

Le calcul pourrait être reconduit pour la même superficie (1 ha) mais avec des dimensions de rampes importantes, exemple : 50 x 200 m . Avec les mêmes hypothèses que précédemment [$\Delta l = 4m$, $d = 16 \text{ mm}$, $t = 20^\circ\text{C}$] , le régime d'écoulement dans la rampe évolue de la manière suivante .

- 100 m en écoulement laminaire
- 100 m en écoulement turbulent

Le nombre de goutteurs par rampe serait alors de :

$$N = 200 / 4 = 50 \text{ goutteurs}$$

avec $N_1 = N_2 = 25 \text{ goutteurs}$

Les résultats de la comparaison sont résumés par le tableau n°35

	Relation [12]	Relation [a]	Relation [b]
Perte de charge	0,187m + 0,3mm	1,64m	1,82m
Différence relative /[12]	0	88,64%	89,74%

Malgré que la perte de charge relative aux tronçons à écoulement laminaire est faible, l'écart entre les résultats de [a] et [b] est grand (88 à 89 %).

Cette différence est due à la longueur importante des tronçons à écoulement laminaire pour lesquels on applique les relations [a] et [b] qui considèrent que toute la rampe est en régime turbulent.

Pour mettre en évidence ces différents cas, nous avons établi les tableaux n°29 a-29 b-29 c et 29 d qui montrent la tendance du rapport L_1/L_2 dans les différents cas. On constate une tendance à la diminution de L_1/L_2 dans le sens des N faibles, des débits faibles et des températures faibles. Inversement, le rapport L_1/L_2 diminue pour les diamètres élevés.

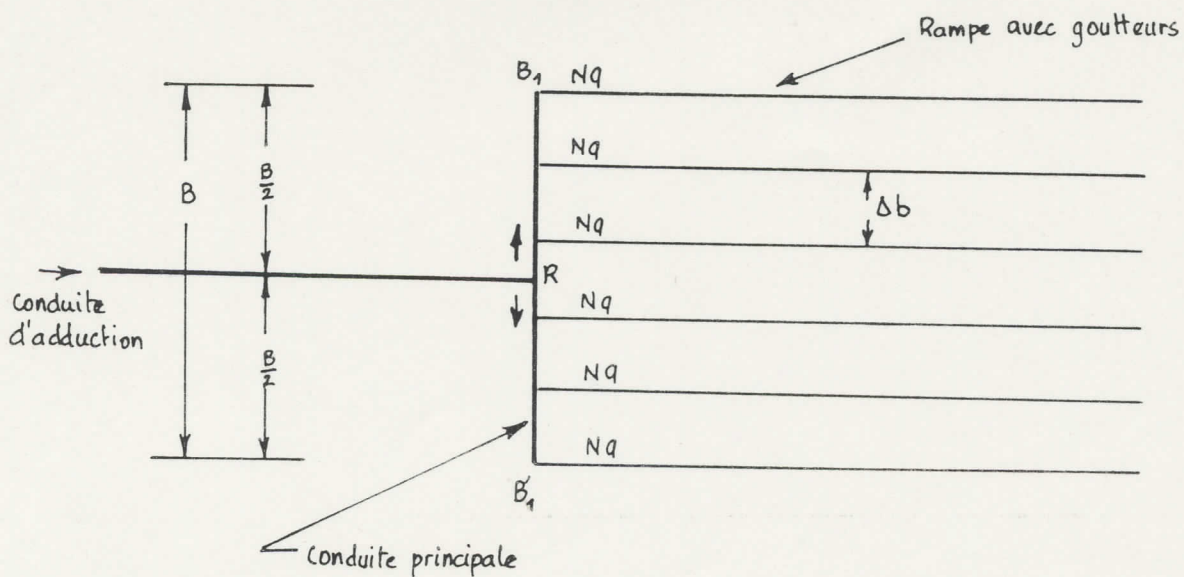
Notons aussi que les tronçons à régime turbulent diminuent et s'annulent, en opposition aux tronçons à régime laminaire qui s'allongent en sens inverse sans s'annuler.

Nous constatons également que l'écoulement turbulent est omniprésent dans toutes les conditions pratiques où le nombre de goutteurs est supérieur à 50. C'est sans doute ce qui a permis aux chercheurs Français de fixer cette condition pour l'emploi de leurs relations.

5. Calcul des pertes de charge dans la conduite principale

5.1. Schéma de calcul

Fig N°19: Schéma de calcul



N : nombre de goutteurs de chaque branchement

q : débit Sp de chaque goutteur

$RB_1 + RB'_1 = B$: largeur du périmètre à irriguer

5.2. Principe de calcul

La conduite principale est alimentée par la conduite d'adduction dont la jonction la plus rationnelle (du point de vue des pertes de charge) doit être située au centre de la conduite principale $B_1 B'_1$.

Sachant que la répartition des branchements sur la conduite principale est symétrique de part et d'autre du point de jonction R, le calcul effectué pour une partie serait le même pour l'autre.

De R à B_1 , il existe un nombre de branchement égal à X dont le débit à l'entrée est égal à Nq .

Nous avons donc X conduites en série sur la longueur RB_1 . Le calcul des pertes de charges de la partie RB_1 de la conduite principale se détermine de la même manière que celui du branchement puisque le R_e diminue du premier tronçon (avec NqX) jusqu'au dernier tronçon avec un débit Nq .

L'ordre de calcul est le suivant :

- Détermination de l'état d'écoulement de chaque tronçon.
- Calcul des pertes de charge
- Calcul de la somme des pertes de charge.

5.3. Détermination de l'état d'écoulement dans la partie RB_1

Sachant que pour le i ème tronçon, le débit délivré est de :

$$Q_i = Nq (X - i + 1) \quad [13]$$

Le nombre de Reynolds est de :

$$\text{Re} = \frac{4Nq (X - i + 1)}{\pi \nu D} \quad [14]$$

X : nombre de branchement

D : diamètre de la conduite principale (D > d)

d : diamètre du branchement

La condition critique pour que l'écoulement dans ce tronçon soit turbulent est que :

$$\text{Re}_i > 2300$$

d'où :

$$\frac{4 Nq (X - i + 1)}{\pi \nu D} > 2300$$

ou :

$$i = X - \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} + 1 \quad [15]$$

Quand $i = X$, dans tous les tronçons, il n'y a que l'écoulement turbulent : la relation [15] nous donnera dans ce cas : (jusqu'au X^{ième} tronçon $\text{Re} = 2300$).

$$\frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} > 1$$

ou :

$$Nq \geq \frac{2300 \pi \nu D}{4} \quad [16]$$

C'est à dire le débit dans le dernier tronçon ou autrement dit, le débit de chaque branchement doit satisfaire la condition [16].

Quand $i < 0$, il n'existe seulement que l'état d'écoulement laminaire dans tous les tronçons.

Dans ce cas, l'équation [15] nous donnera :

$$X - \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} + 1 < 0 \quad [16-1]$$

ou :

$$X \leq \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} - 1 \quad [17]$$

Quand $i > 0$, il existe des tronçons où l'écoulement est turbulent, et d'autres où l'écoulement est laminaire.

$$X > \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} - 1 \quad [18]$$

Dans ce cas, si X_1 est le nombre de tronçons où l'écoulement est turbulent (premiers tronçons) et X_2 le nombre de tronçons où l'écoulement est laminaire (derniers tronçons), nous aurons :

$$X_2 = \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} - 1 \quad [19]$$

et :

$$X_1 \geq X - X_2 \quad [20]$$

5.4. Applications numériques

Données :

D : 20mm, 32mm, 40mm

ν : $0,0101 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. (T = 20°C)

q : 2l/h, 3l/h, 4l/h

a./- Pour que le régime d'écoulement soit turbulent dans toute la conduite principale, le débit qui traverse chaque branchement doit être égal à :

$$Nq = \frac{2300 \pi \nu D}{4}$$

Si q est connu, le nombre de goutteurs (N) nécessaire dans chaque branchement est donné par le tableau n°36.

Tableau N°36 : Détermination du nombre de goutteurs N

T°C 20°C	D	q l/h	Nq l/h	N
$\nu = 0,0101 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	20	2	131	66
		3	131	44
		4	131	33
	32	2	209	104
		3	209	70
		4	209	52
	40	2	262	131
		3	262	87
		4	262	66

$$2\text{l/h} = 0,555 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$3\text{l/h} = 0,8333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$4\text{l/h} = 1,111 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Remarques

Selon le nombre de goutteurs N par rapport à la longueur L du périmètre irrigué (par exemple 100m avec $\Delta l \leq 0,8\text{m}$).

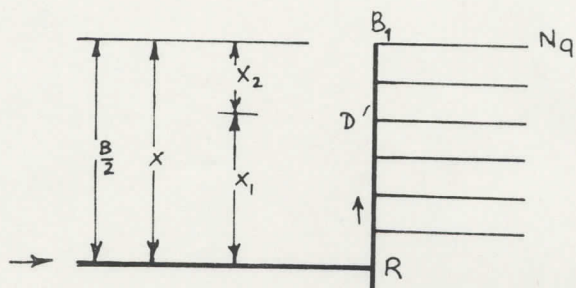
$D \leq 40$ mm le débit spécifique $q > 2l/h$, l'existence du régime turbulent dans toute la conduite principale est réelle.

Si le nombre de goutteurs N est plus faible par rapport à celui indiqué dans le tableau n°36, en supposant que tout autre paramètre est constant, il peut exister des tronçons laminaires sur toute la conduite (N trop faible).

b. - Pour que l'état d'écoulement soit totalement laminaire dans la conduite principale, le nombre de branchement serait :

$$X \leq \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} - 1$$

5.5. Schema de calcul fig.n°20.



$$X = X_1 + X_2$$

$$X_2 = \frac{2300 \pi \nu D}{4 Nq} - 1$$

$$X_1 = X - X_2$$

X : nombre de tronçons sur la longueur $B/2$ de la conduite principale

X_1 : nombre de tronçons à écoulement turbulent

X_2 : nombre de tronçons à écoulement laminaire

Exemple d'utilisation

$$N = 20$$

$$q = 2l/h$$

Le nombre de tronçons soumis à l'écoulement laminaire est de 2 (les deux derniers tronçons de la conduite principale). Le reste des tronçons est soumis à l'écoulement turbulent.

On remarque que le nombre de tronçons laminaires diminue quand on augmente le nombre de goutteurs par rampe.

Ainsi, pour $N = 50$, tous les tronçons sont à écoulement turbulent.

Ainsi connaissant le nombre de goutteurs, leur débit et le diamètre de la conduite principale, on pourrait déterminer à l'aide du tableau n°36 bis le nombre de tronçons dans cette conduite ayant un écoulement turbulent, laminaire ou mixte et appliquer la relation de calcul correspondante.

6. Calcul des pertes de charge de la conduite de refoulement (ou d'adduction)

6.1. Principe de calcul

La longueur l_{ref} et le diamètre D_{ref} de cette conduite dépend du calcul d'optimisation entre les dépenses dues aux pertes d'énergie et les dépenses totales dues au coût de la conduite.

L'écoulement dans cette conduite est en principe un écoulement turbulent pour le dimensionnement de la conduite.

Pour le calcul des pertes de charge, nous pouvons utiliser la relation [8], sachant que le débit circulant dans la conduite de refoulement est de : $2XNq$.

avec :

$2X$: nombre total de branchements dans le système (ou sur la conduite principale)

N : nombre de goutteurs sur un branchement (constant)

q : débit spécifique de chaque goutteur (constant)

Tableau N°36 bis : Répartition des tronçons de la conduite principale selon le régime d'écoulement

D : Diamètre extérieur (en PEHD -6 bars) de la conduite principale (mm)

q_n : débit nominal des goutteurs en l/h

N : nombre des goutteurs par rampe

T°C	D	q_n	N=20	N=25	N=30	N=50	N=70	N=100	N=15	N=200
20°C	mm	l/h	X_2	X_2	X_2	X_2	X_2	X_2	X_2	X_2
$\nu = 0.0101 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	20	2	2	2	1	0	0	0	0	0
		3	1	1	0	0	0	0	0	0
		4	1	0	0	0	0	0	0	0
	25	2	3	2	2	1	0	0	0	0
		3	2	1	1	0	0	0	0	0
		4	1	1	0	0	0	0	0	0
	32	2	4	3	3	1	1	0	0	0
		3	3	2	1	1	0	0	0	0
		4	2	1	1	0	0	0	0	0
	40	2	5	4	3	2	1	0	0	0
		3	3	2	2	1	0	0	0	0
		4	2	2	1	0	0	0	0	0
	50	2	7	6	4	2	1	1	0	0
		3	4	3	3	1	1	0	0	0
		4	3	2	2	1	0	0	0	0
	63	2	9	7	6	3	2	1	0	0
		3	6	5	4	2	1	0	0	0
		4	4	3	2	1	0	0	0	0

6.2. La relation utilisée

$$\sum_{\substack{\text{ref} \\ \text{add}}} \Delta h = \frac{64}{\pi^2} \cdot \frac{1}{C^2} \cdot \frac{L}{D^5} (2.X.Nq)^2 \quad [21]$$

Dans le cas où il existe une conduite d'aspiration (premier schéma du système), la perte de charge linéaire dans cette conduite serait déterminée par la relation [21] et seuls L et D varieront selon le dimensionnement de la conduite d'aspiration.

$$\sum \Delta h_{\text{asp}} = \frac{64}{\pi^2} \cdot \frac{1}{C^2} \cdot \frac{L}{D_{\text{asp}}^5} (2.X.Nq)^2 \quad [21-1]$$

7. La charge totale nécessaire de la station de pompage ou du bassin d'accumulation (y compris les pertes de charges singulières)

7.1. Premier cas : adduction par refoulement

$$H_{\text{totale}} = H_g + \sum \Delta h + H_o$$

$$\sum \Delta h_T = \sum \Delta h_{\text{linéaire}} + \sum \Delta h_{\text{singulière}}$$

ou :

$$\sum \Delta h_T = 1.1 \sum \Delta h_{\text{linéaire}} \quad [22]$$

Pour les conduites longues, la somme des pertes de charge singulières représente 10% de la somme des pertes de charge linéaires totales. Néanmoins beaucoup d'auteurs considèrent de nos jours qu'il est plus correct de déterminer les pertes de charges singulières par le calcul.

En effet les embouts des goutteurs pénètrent suffisamment a l'intérieur de la rampe et génèrent des pertes de charges élevées.

Le CTGREF en France propose la relation :

$$\Sigma H_{\text{embout}} = k Q^2$$

avec ΣH_{embout} : perte de charge en bar
 Q : Débit de la rampe m³/h
 k : Coefficient de perte de charge = f(d)

La perte de charge linéaire totale serait :

$$\Sigma \Delta h_{\text{linéaire}} = \Sigma \Delta h_{\text{asp}} + \Sigma \Delta h_{\text{ref}} + \Sigma \Delta h_{\text{princ}} + \Sigma \Delta h_{\text{branchement}} \quad [23]$$

avec :

$$\Sigma \Delta h_{\text{asp}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{C^2} \frac{L_{\text{asp}}}{D_{\text{asp}}^5} (2.X.Nq)^2$$

$$\Sigma \Delta h_{\text{ref}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{1}{C^2} \frac{L_{\text{ref}}}{D^5} (2.X.Nq)^2$$

$$\Sigma \Delta h_{\text{princ}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta b}{C^2} \frac{(Nq)^2}{D_{\text{princ}}^5} \sum_{i=1}^X (X-i+1)^2 + 4,15 \nu \frac{\Delta b}{D_{\text{princ}}^4} Nq \sum_{i=1}^X X^2 \quad [23-1]$$

$$\Sigma \Delta h_{\text{branc.}} = \frac{64}{\pi^2} \frac{\Delta b}{C^2} \frac{q^2}{d^5} \sum_{i=1}^{N_1} (N-i+1)^2 + 4,15 \nu \frac{\Delta l}{d^4} q \sum_{i=1}^{N_2} N_2$$

Avec, C_{asp} , D_{asp} : coefficient de CHEZY, longueur et diamètre de la conduite d'aspiration

C_{ref} , L_{ref} , D_{ref} : coefficient de CHEZY, longueur entre deux branchements et diamètre de la conduite de refoulement

C_{prin} , Δh_{prin} , D_{prin} : coefficient de CHEZY, l'intervalle entre goutteurs et diamètre de la conduite du branchement.

ν : coefficient de viscosité cinématique m^2/s

$2X$: nombre total de branchements

X_1 : nombre de tronçons de la conduite principale soumis à l'état d'écoulement turbulent

X_2 : nombre de tronçons de la conduite principale soumis à l'état d'écoulement laminaire.

N : nombre total de goutteurs sur le branchement

N_1 : nombre de tronçons du branchement soumis à l'écoulement turbulent

N_2 : nombre de tronçons du branchement soumis à l'écoulement laminaire.

7.2. Deuxième cas : adduction gravitaire

$$H_{\text{totale}} = \sum \Delta h_T + H_0 \quad [24]$$

Le calcul de Δh_t se réalise de la même manière que celui du premier cas avec $\sum \Delta h_{\text{asp}} = 0$ (pas de conduite d'aspiration)

7.3. Détermination de H_0

En se basant sur les résultats de plusieurs expériences et selon nos propres résultats, les goutteurs fonctionnent à débit relativement stable à partir de $H = 0.5$ bar (ou 5m de C.E.):

Nous proposons donc pour le dimensionnement des systèmes de micro-irrigation une charge de base $H_0 = 5\text{m}$ de C.E (ou 0.5 bars).

8. Détermination de la puissance de la pompe

$$\text{Puissance} = \frac{9.81QH_{\text{tot}}}{\eta} \quad (\text{en kw}) \quad [25]$$

H_{tot} : charge totale (en m)

Q : débit pompé = $2.X.Nq$. en m^3/s

η : rendement de la pompe en %

N.B : Le raisonnement que nous avons suivi jusque là ne fait pas intervenir la pente du terrain. Ainsi, les pertes de charge totales peuvent être réduites sur des parcelles à pente descendante ou élevées dans le cas contraire.

9. Conclusion

Les relations de calcul des chercheurs s'écrivent sous une forme commune permettant la détermination des pertes de charge dans les rampes de m.I en considérant le régime turbulent dans toute la rampe.

Sachant que le régime d'écoulement dans la rampe de m.I change de turbulent à laminaire, de l'amont à l'aval la rampe. Il arrive que l'écoulement soit un régime laminaire sur toute la rampe, en revanche, il n'existe pas de branchement, à diamètre constant, soumis totalement au régime d'écoulement turbulent.

Cette différence constitue le point de divergence avec les relations citées [a] [b] et [c], surtout dans le cas où l'écartement entre goutteurs est grand.

En effet, pour une même rampe, la longueur fixe et pour différentes densités de plantation, Δl varie d'une culture à l'autre. Le rapport L_2/L_1 , serait faible (< 1) pour les cultures de forte densité de plantation (Δl trop petit) et l'on peut effectivement négliger les pertes de charge dans la zone L_2 .

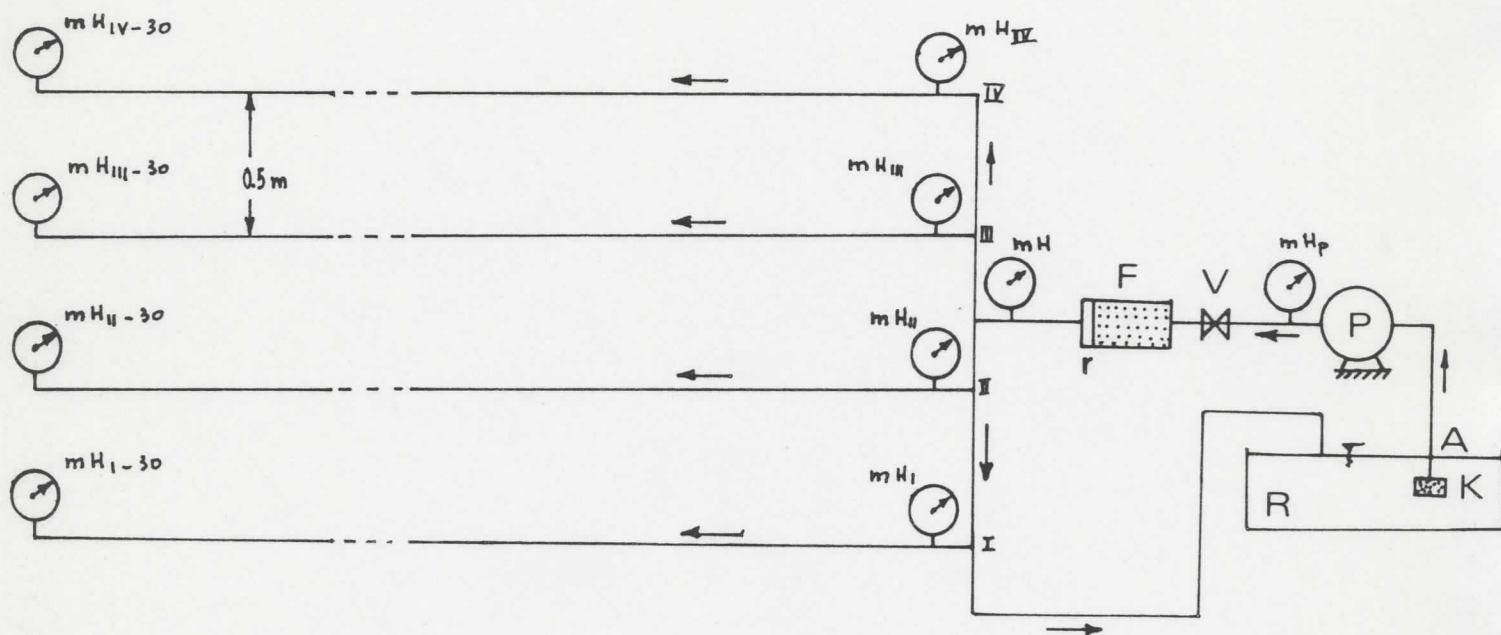
Dans le cas contraire (Δl grand), cas d'une plantation espacée, le rapport L_2/L_1 n'est plus négligeable et la valeur de la perte de charge relative à L_2 ne peut être sous estimée auquel cas la perte de charge calculée par les autres relations serait "gonflée".

Déterminer les pertes de charge en considérant que l'écoulement turbulent sur-dimensionnerait le réseau par conséquent induirait des déficits équivalents à 12.000DA/ha ou 6 DA/mL.

En tenant compte des exigences des plantes, le dimensionnement des réseaux de m.I exigent un calcul beaucoup plus poussé pour valoriser les éventuels projets de m.I.

B . Détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs utilisés

1 . Schema de calcul du pilote de micro-irrigation (Fig N°21)



- R : Réservoir d'eaux usées épurées (12 m³)
- AP : Conduite d'aspiration ϕ 50
- K : Crepine fine + clapet
- P : Groupe électropompe (voir caractéristiques)
- m.HP : Manomètre, charge fournie par la pompe
- V : Vanne de régulation
- F : Filtre à tamis 120 μ .8m³/h
- r : Régulateur de pression (max 2 bars)
- m : Manomètre 10 bars \pm 0.020 bar
- m.H : Manomètre donnant charge à l'entrée du pilote
(charge totale du système)
- Pc : Conduite de refoulement ϕ 40, réduction ϕ 32
- I : Branchement I muni de goutteurs I, ϕ 16, L = 15m,
- II : Branchement II muni de goutteurs II, ϕ 16, L = 15m
- III : Branchement III muni de goutteurs III, ϕ 16, L = 15m

IV : Branchement IV muni de goutteurs IV, ϕ 16, L = 15m
m HI : Manomètre donnant la charge à l'entrée du branchement I
m HII : Manomètre donnant la charge à l'entrée du branchement II
m HIII : Manomètre donnant la charge à l'entrée du branchement III
m HIV : Manomètre donnant la charge à l'entrée du branchement IV
I DR : Conduite de trop plein du système ϕ 16
mHI-30 : Manomètre donnant la charge à l'extrémité du brachement I
mHI-30 : Manomètre donnant la charge à l'extrémité du branchement II
MHIII-30 : Manomètre donnant la charge à l'extrémité du branchement III
mHIV- 30 : Manomètre donnant la charge à l'extrémité du branchement IV
NB : Pente nulle

Caratéristiques du groupe motopompe

Moteur : électrique triphasé 380 V

P : 2,2Kw

W : 2880 tr/mn

Marque : ENIE

Pompe : Marque : SONACOME (ENPMH)

Types 40 NVA - 150 - 5

Paramètres	PK (Kw)	Q m/h	H (m)	NPSH (m)	n (tr/mn)	DI/PN ASP (mm/bar)	DI/PN ref (mm/bar)	Poids (Kg)
Valeur	1.85	18	23,5	2.7	2900	50/10	40/10	23.1

2. Objectifs

La conception et l'installation de ce protocole expérimental tel qu'il est décrit par la figure N°21 nous a permis de réaliser plusieurs séries d'expériences.

Parmi les objectifs de notre expérimentation, il s'agit de déterminer les caractéristiques hydrauliques et techniques des goutteurs de la S.T.T.F. qui continuent d'être commercialisés sur le

marché Algérien sans certificat technique de conformité pourtant exigé par la chambre de Commerce

A priori, nous ne savons pas si les goutteurs de la S.T.T.F. sont de qualité valable sachant qu'aucune caractéristique technique de ce produit n'est garantie ou délivrée lors de la commercialisation. Le même constat est fait pour les produits des autres fabricants en Algérie.

Par ailleurs, il semble qu'aucune institution Algérienne n'a pris en charge ce problème et que notre expérience lance les prémisses d'un règlement éventuel sachant que le respect des normes en vigueur a une grande importance en micro-irrigation

La gamme des émetteurs sur lesquels nous avons réalisé notre expérimentation est décrite dans les figures N°22, 23 et 24.

Cependant, pour que les caractéristiques techniques soient conformes, elles doivent d'abord obéir à une expérimentation standardisée et aux normes internationales en cours. Ce genre d'expériences est souvent réalisé au CEMAGREF (19)(20). Ainsi, dans le domaine des émetteurs, les critères techniques sont jugés selon les normes ISO-AFNOR 1983 révisées et votées le 10/30/1988. C'est sur la base de ces critères que nous avons orienté nos séries d'expériences.

3. Détermination des caractéristiques hydrauliques des goutteurs

3.1. Condition préliminaires

La première série d'expériences avait pour but la détermination des caractéristiques hydrauliques de fonctionnement : Courbes $q = f(H)$ spécifiques à chaque goutteur. Cette caractéristique est très importante dans la conception des réseaux de micro-irrigation.

Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des émetteurs dans un état neuf (42).

Fig N°22 : Schéma du gouteurs I

- : Goutteur de fabrication americaine
- : Auto-regulant, placé en dérivation
- : qn : commercial : 4 l/h à 1 bars
- : qn déterminé exp : 4,098 l/h à 1 bars
- : démontable

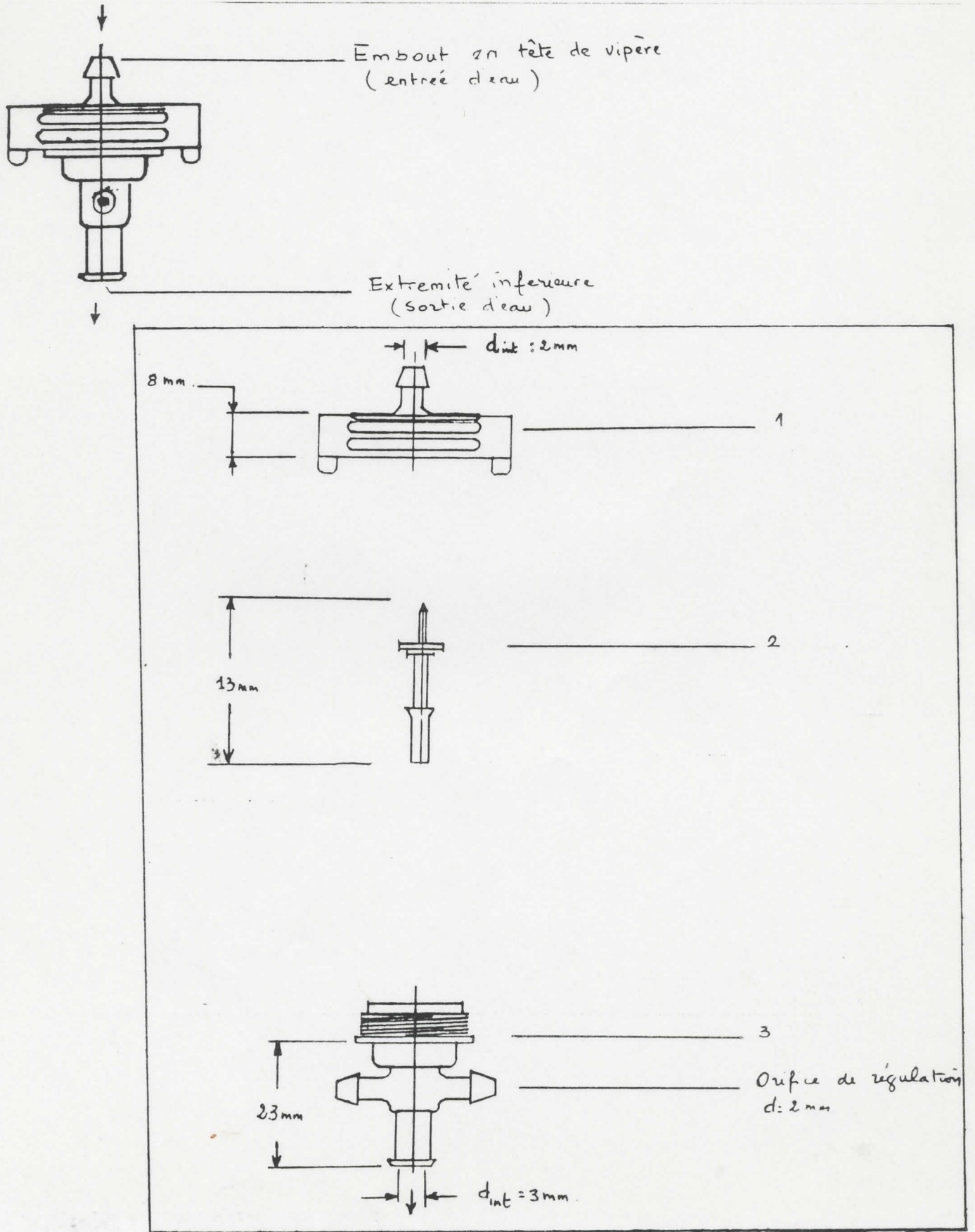


Fig N°23 : Schéma du goutteur II

: Goutteur de fabrication Algerienne (STTF)

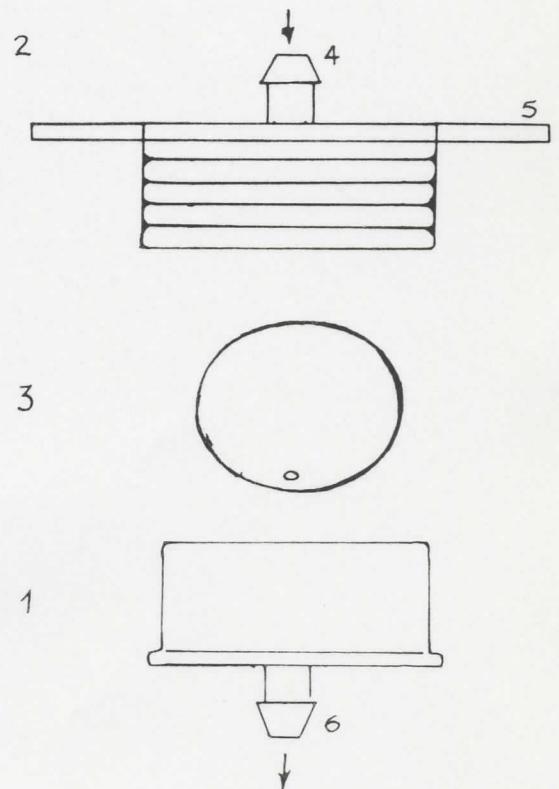
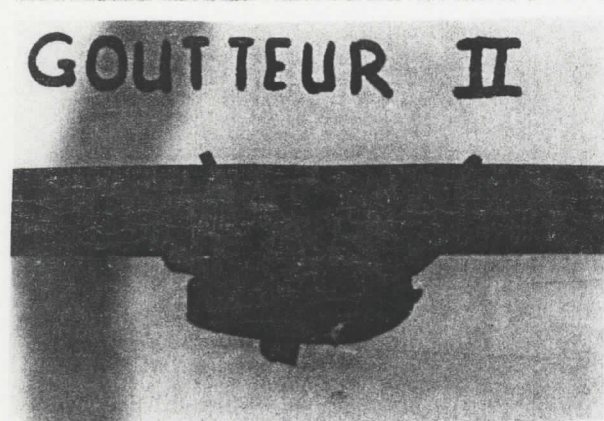
: Auto-regulant

: Placé en dérivation

: qn commercial : 4 l/h a 1 bars

: qn exp : 4.66 l/h a 1 bars

: démontable



1- 1^{ere} partie du goutteur, celle qui contient l'orifice d'émission d'eau.

2- pastille en plastique souple de Ø 30, 3^{eme} pièce du goutteur assure la regulation, percée d'un trou de Ø2mm, 1mm épaisseur

3- 2^{eme} pièce du goutteur, qui se fixe à la rampe à l'aide de l'embout (6)

4- Embout supérieur Øint 2,5mm, pénétré dans la rampe par pression assure l'étanchéité.

5- crochet fixant le goutteur sur la rampe.

6- Embout inférieur Ø 3,5

Fig N°24 : Schéma du goutteur III

- : Goutteur de fabrication Algerienne (STTF)
- : Non auto-regulant
- : qn commercial : 4 l/h à 1 bars
- : qn exp : 1,17 l/h à 1 bars
- : Placé en serie et non démontable

Schéma du goutteur IV

- : Goutteur de fabrication Algerienne (STTF)
- : Non auto-regulant
- : qn commercial 8 l /h à 1 bars
- : qn exp : 1.3 l /h à 1 bars
- : Placé en serie et non démontable

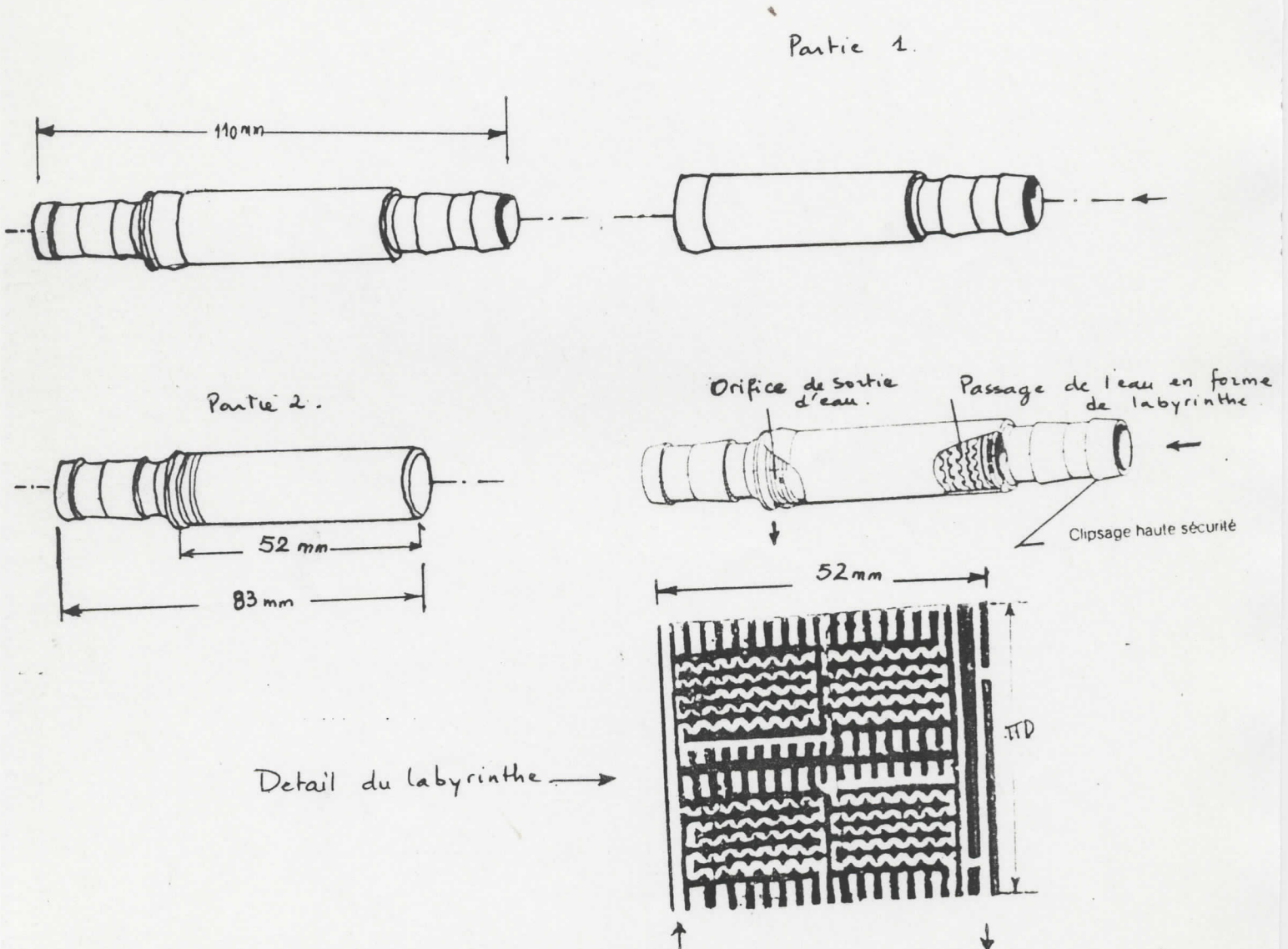
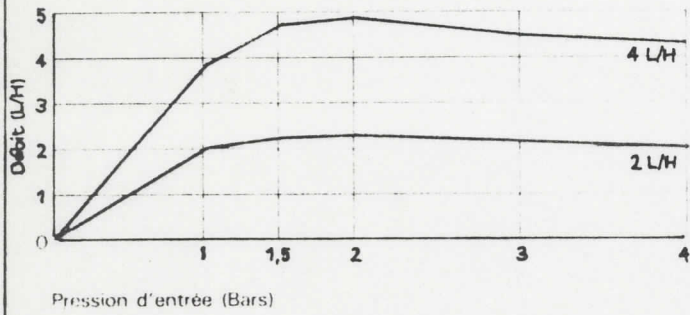


Fig:24 COURBE DEBIT-PRESSION

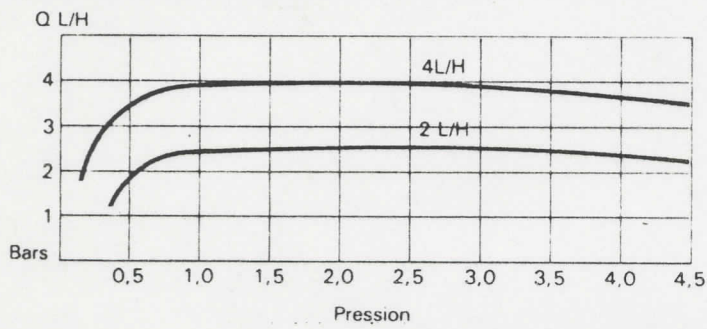
• Le goutteur GARI



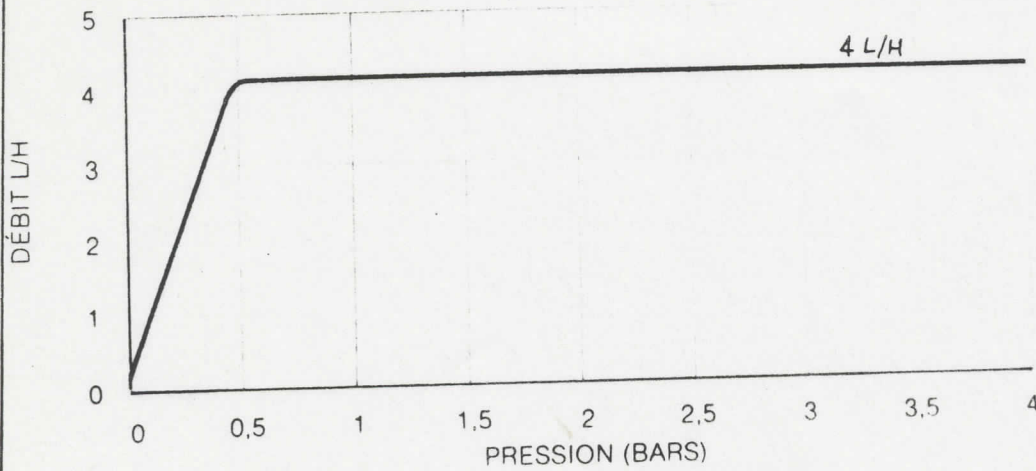
DIMENSIONS DU PASSAGE DE L EAU

Modele	2 L/H	4 L/H
Section minimum de passage	0,9 mm	1,1 mm
Longueur du cheminement	93 mm	85 mm

Le goutteur IRRISELF



Le goutteur KULKER SA



Section du passage de l'eau - mm ²	2,02
Longueur du cheminement - cm.	5,08

En référence aux normes, les goutteurs soumis à l'essai sont numérotés en ordre croissant en fonction du débit d'émission mesuré. Le numéro 1 étant attribué à l'émetteur de faible débit, le numéro 30 à l'émetteur au débit le plus élevé.

Ensuite, on prélève quatre valeurs dans les séries obtenues le N°3, le N°12, le N°13 et le N°23 et on mesure l'écart de leurs débits d'émission en fonction de la pression de fonctionnement.

L'expérience a été réalisée à l'aide de l'eau du robinet (eau douce). Elle consistait à charger le mini-réseau et donc permettre aux trente goutteurs par branchement de débiter.

Dix valeurs de pression de service (0,1;0,3;0,5;0,6;0,8;1;1,2;1,6;1,7;2) bars ont été appliquées pour déterminer $q = f(H)$. L'essai a été soumis à la plage de pression dans le sens croissant et décroissant.

Les pressions (H) ont été fixées en manipulant la vanne (V) jusqu'à fixer la valeur de pression sur le manomètre (Hm). Les résultats des débits sont lus au moins trois minutes après avoir atteint la pression d'essai.

Les débits des goutteurs ont été déterminés par voie volumétrique pour une durée d'une heure.

Avant chaque essai, la température de l'eau est relevée par un thermomètre plongé en permanence dans le réservoir (R).

Connaissant les couples (q,H), les valeurs des constantes K et x peuvent être déterminées par différentes méthodes.

3.2. Méthodes de détermination

- La méthode la plus simple consiste à remplacer les valeurs des couples (q,H) dans l'équation $q = KH^x$. Nous aurons ainsi autant d'équations que d'inconnues. Les valeurs de K et de x sont alors déterminées assez facilement.

On vérifie enfin à l'aide de l'équation $q = KH^x$ par superposition, la correspondance de la courbe avec l'originale obtenue après lissage.

- La seconde méthode consiste à transformer l'équation

$q = KH^x$ obtenue à la forme logarithmique :

$$\text{Log } q = \log KH^x$$

$$\text{ou } \text{Log } q = \log K + x \log H.$$

Cette équation est selon la forme $y = a + xb$, équation d'une droite ne passant pas par l'origine.

Ainsi, une fois la droite tracée, K est déterminée par l'ordonnée à l'origine et x étant la pente de la droite

- La détermination de l'exposant x peut être évaluée par la méthode suivante (42) :

$$x = \frac{\sum (\log p_i) (\log q_i) - \frac{1}{n} (\sum \log p_i) (\sum \log q_i)}{\sum (\log p_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log p_i)^2}$$

avec :

x = exposant de l'équation $q = KH^x$

n = nombre de valeurs de pression utilisées

q = débit moyen d'émission en l/h

p = valeurs de la pression d'admission en K pascal (Kpa).

Connaissant H et q , on peut déterminer à l'aide de cette relation la valeur de x et ensuite celle de K .

3.3 . Résultats et commentaires

Ainsi, les couples de valeurs obtenus ($q.H$) ont été reportés sur un graphique avec q en l/h et H en mètre ou en bar (Voir tableaux N°37,38,39 et 40 et graphiques N°25,26 27,28).

Les points représentent un nuage que nous avons lissé par une méthode statistique (Méthode de Newton) à l'aide d'un logiciel sur micro-ordinateur. Nous aboutissons, par analogie, à la relation :

$q = \mu w \sqrt{2g}$ (écoulement d'un fluide par un orifice) à une courbe dont l'équation est $q = KH^x$.

Tableau N°37 : Valeurs du débit moyen en fonction de la charge
Goutteur I

H	repetitions										q̄
bar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,1	4,36	2,52	2,92	2,3	5,4	5,06	4,6	3,6	4,2	2	3,696
0,3	3,36	3	2,96	2,92	2,92	2,7	3	2,56	3,52	1,84	2,878
0,5	4,04	3,8	3,2	4,2	4,04	4,2	4,04	3,48	4,2	3,8	3,9
0,6	3,64	3,38	3,16	3,68	3,36	1,18	3,12	2,8	3,44	2,6	3,036
0,8	3,88	3,88	3	3,8	3,12	3,68	3,6	3,72	3,8	2,92	3,54
1	3,8	4,4	3,72	4,4	4	4,4	4	3,76	3,92	4	4,04
1,2	4,24	4,16	3,84	4,48	4,4	4,7	4,16	4,32	4	3,8	4,21
1,6	4	4,88	4	4,8	5,72	3,4	4,4	4	3,8	3,8	4,28
1,7	4,8	5,92	4	4,36	4,4	4,84	4,2	4,4	4,4	4,1	4,532
2	4,6	4,76	4,4	4,8	2,52	4,8	4,2	4,6	4,4	4,1	4,318

Tableau N°38 : Valeurs du débit moyen en fonction de la charge
Goutteur II

H	répétitions										\bar{q}
bar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{q}
0,1	1,18	0,26	2,52	2,24	2,24	0,88	2,6	2,24	1,3	1,36	1,682
0,3	3,44	3,8	5,36	3,24	4	2,32	4,7	5,55	4	4	4,041
0,5	4,4	4,36	5,36	2	5,8	3,72	4	4,8	4,2	4,4	4,304
0,6	3,68	4,4	5,4	4,4	3,36	3,4	4,4	5,64	4	4,4	4,308
0,8	4,2	4,4	5,2	3,6	3,8	3,2	4,8	3,8	4,2	4,4	4,16
1	4,2	5,2	5,5	4,2	6	5,4	4,48	4,4	4,32	5,6	4,93
1,2	4	4,24	5,52	3,6	2,7	5,12	1,88	6,08	4,8	4	4,194
1,6	4,2	3,88	5,12	3,8	5,72	5,8	4,2	3,96	3,8	4	4,448
1,7	3,76	3,64	5	3	1,24	3,76	3,2	4,68	3,72	3,1	3,51
1,72	4	3,72	5,2	2,8	1,56	7,68	4	3,2	3,6	2,8	3,856

Tableau N°39 : Valeurs du débit moyen en fonction de la charge
Goutteur III

H	repetitions										\bar{q}
bar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,1	0,11	0,18	0,2	0,24	0,22	0,2	0,72	0,36	0,2	0,2	0,263
0,3	0,6	0,64	0,84	0,76	0,64	0,72	2,16	0,92	0,72	0,68	0,868
0,5	0,8	0,8	0,8	1,06	0,8	0,84	0,82	0,76	0,68	0,8	0,816
0,6	0,44	0,64	0,84	0,8	0,7	0,84	2,3	1,08	0,76	0,76	0,915
0,8	0,88	0,88	1,4	1	0,88	1,08	0,96	1,12	0,92	0,88	1
1	1,2	0,96	0,92	1,64	0,92	0,98	1,2	0,96	1,12	0,88	1,078
1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,24	1,52	1,56	1,56	1,16	1,36	1,36
1,6	1,44	1,36	1,44	2,68	1,4	1,56	1,32	1,4	1,5	1,44	1,554
1,7	1,6	1,36	1,4	1,6	1,4	1,64	1,52	1,98	1,44	1,44	1,538
1,72	1,64	1,6	1,56	2,56	1,6	1,72	1,6	1,84	1,56	1,72	1,74

Tableau N°40 : Valeurs du débit moyen en fonction de la charge
Goutteur IV

H	répétitions q_i l/h										\bar{q}
bar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{q}
0,1	0,24	0,16	0,18	0,56	0,22	0,16	0,25	0,25	0,2	0,28	0,25
0,3	0,76	0,68	0,64	1,6	0,68	0,64	0,7	0,64	0,5	0,76	0,76
0,5	0,84	1,44	0,88	2,24	0,8	0,8	1	1,6	0,8	0,8	1,12
0,6	0,76	0,2	0,8	1,84	0,88	0,8	0,95	0,82	0,7	0,92	0,867
0,8	0,92	1,4	0,96	2,28	1	1	1	0,88	1,12	1	1,156
1	0,94	2,46	0,94	2,98	1,2	0,93	1,24	1,16	0,96	1,12	1,393
1,2	1,2	1,4	1,2	2,96	1,44	1,4	1,52	1,4	1,2	1,4	1,512
1,6	1,44	0,68	1,56	4,08	1,6	1,4	1,4	1,52	1,36	1,56	1,66
1,7	1,56	1,6	1,4	3,4	1,56	1,52	1,64	1,48	1,36	1,6	1,712
1,72	0,88	1,68	1,64	4,76	1,68	1,68	1,76	1,6	1,58	1,64	1,89

Fig N°25 a : Graphique q = f(H) branchement I

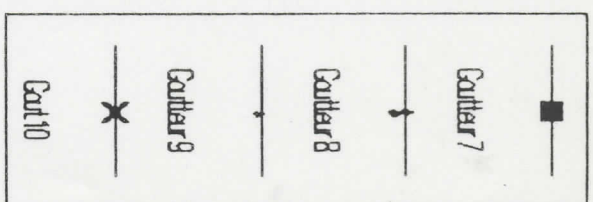
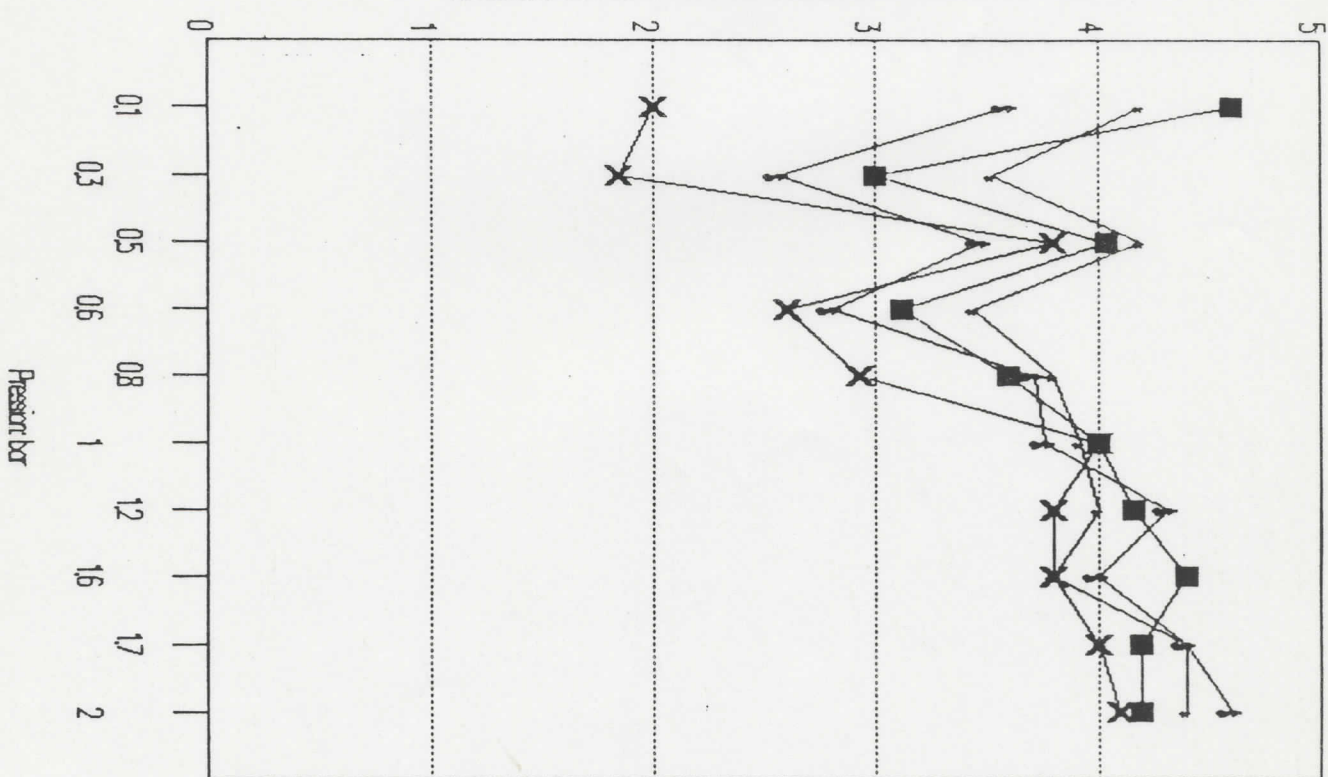
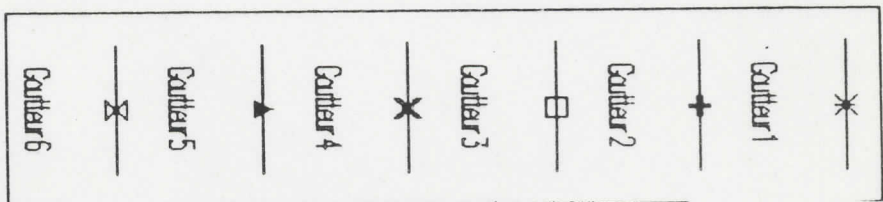
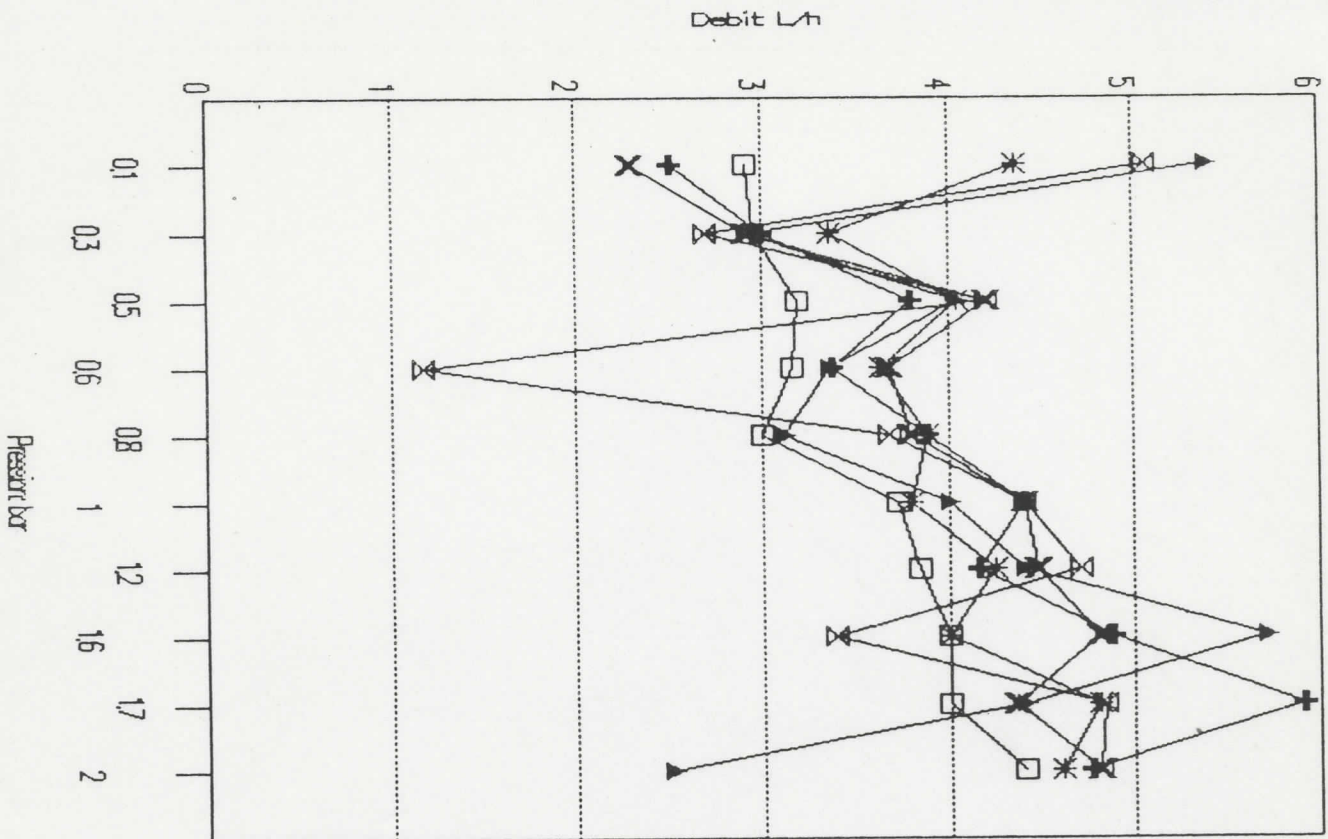


Fig N°25 b : Graphique $q = f(H)$ Courbe moy. branchement I

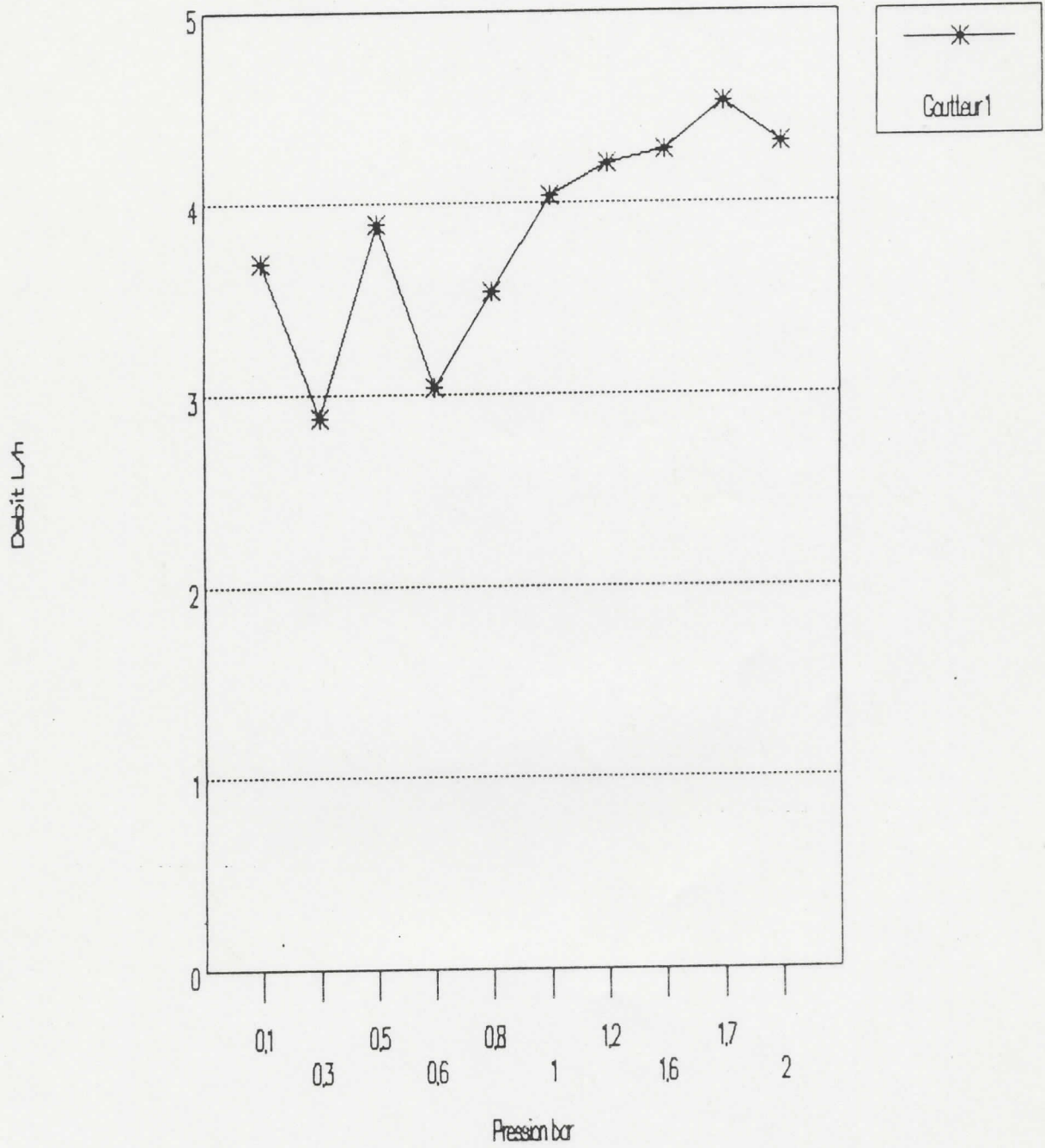


Fig N°26 a : Graphique q = f(H) branchement II

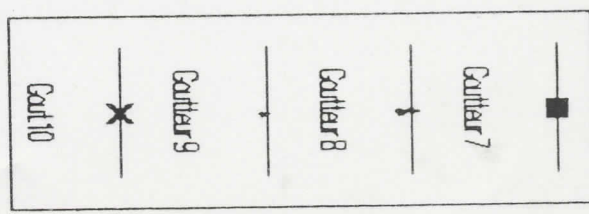
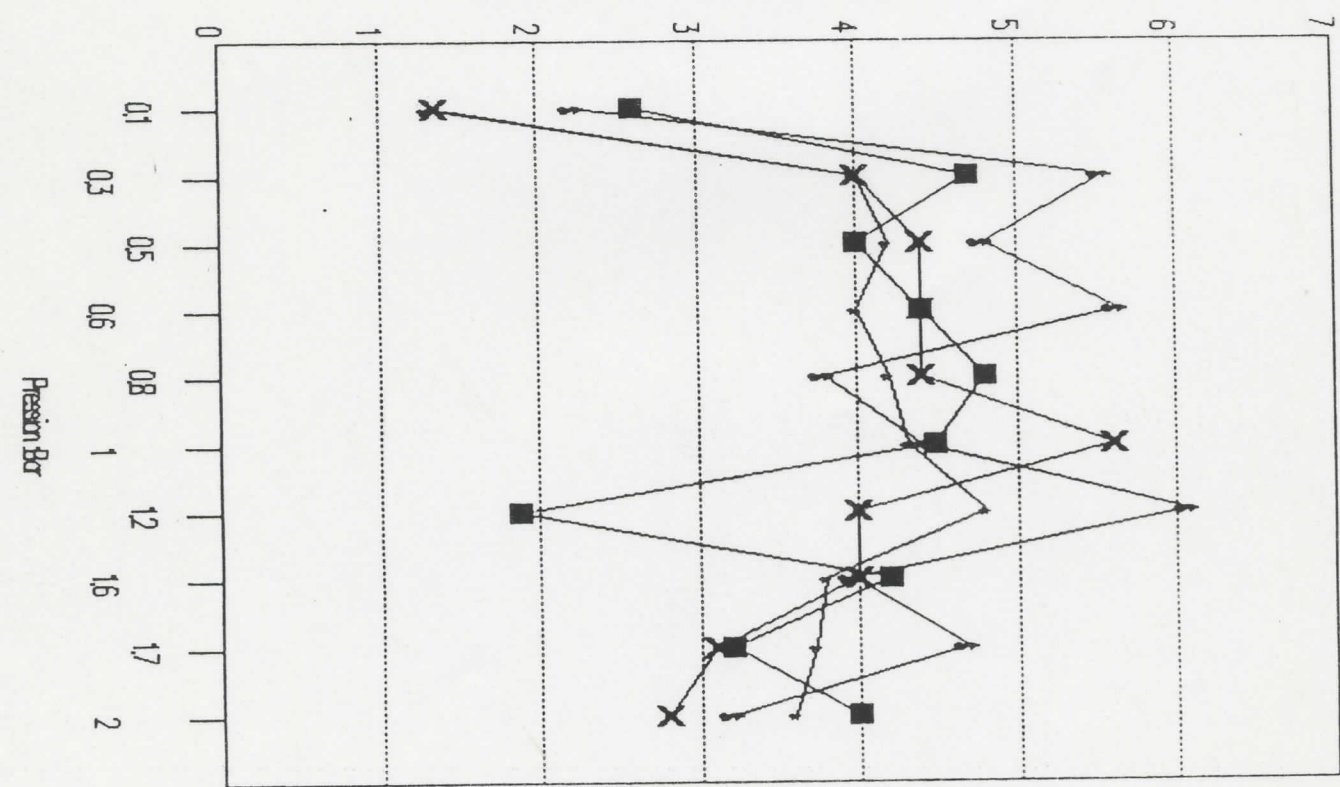
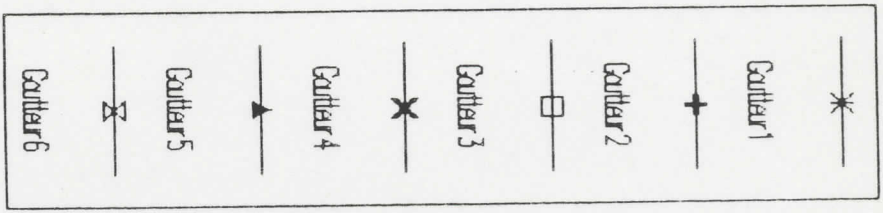
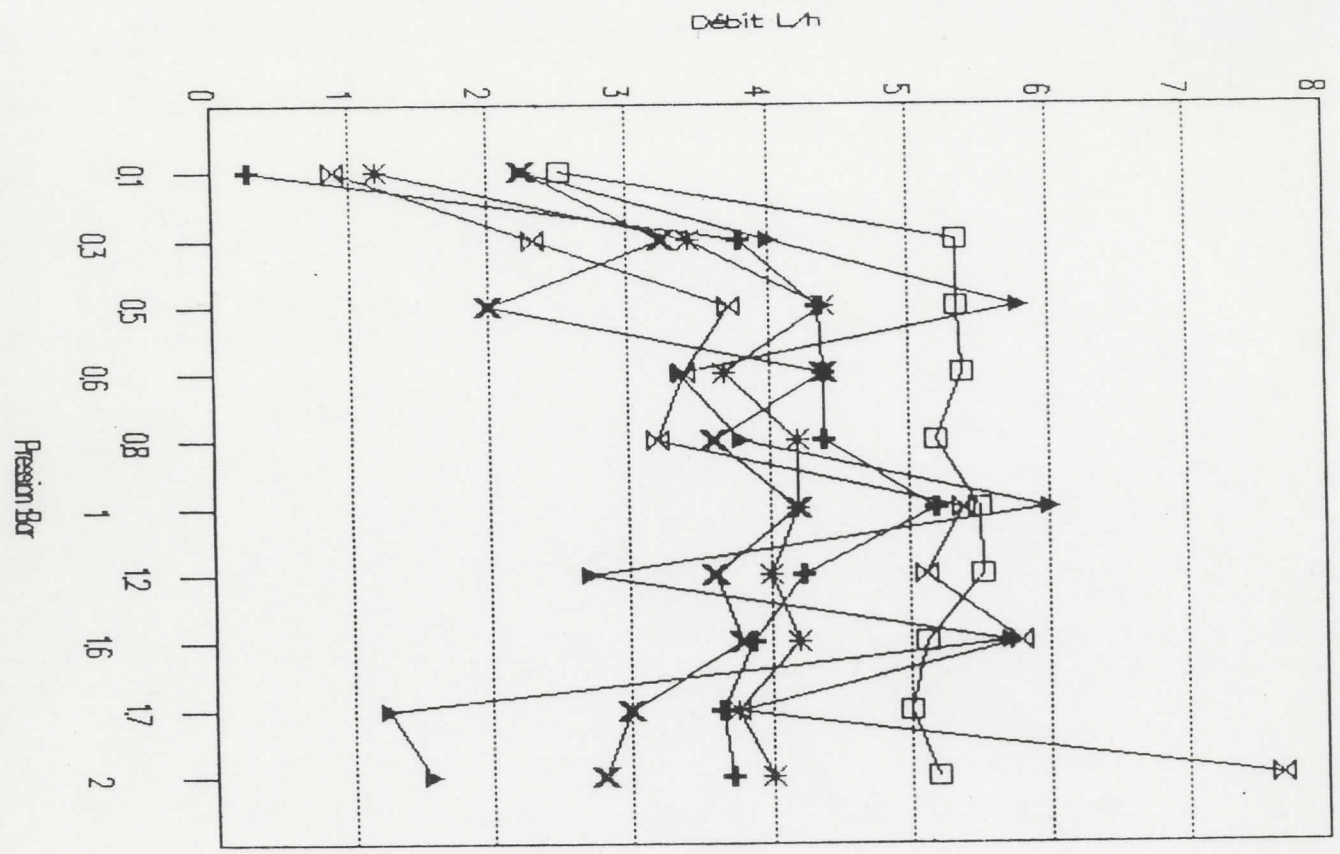


Fig N°26 b : Graphique $q = f(H)$ Courbe moy. branchement II

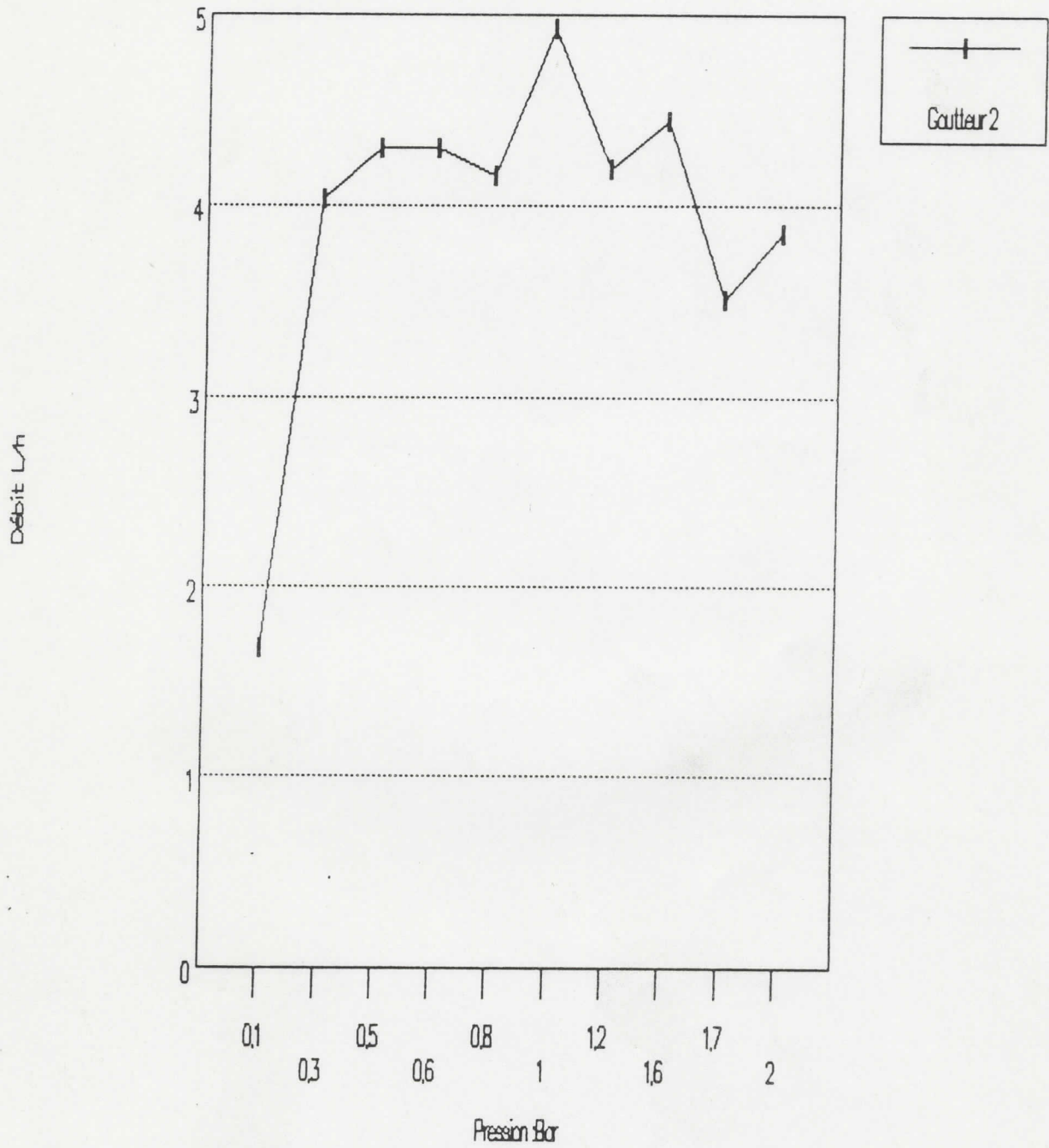


Fig N°27 a : Graphique q = f(H) branchement III

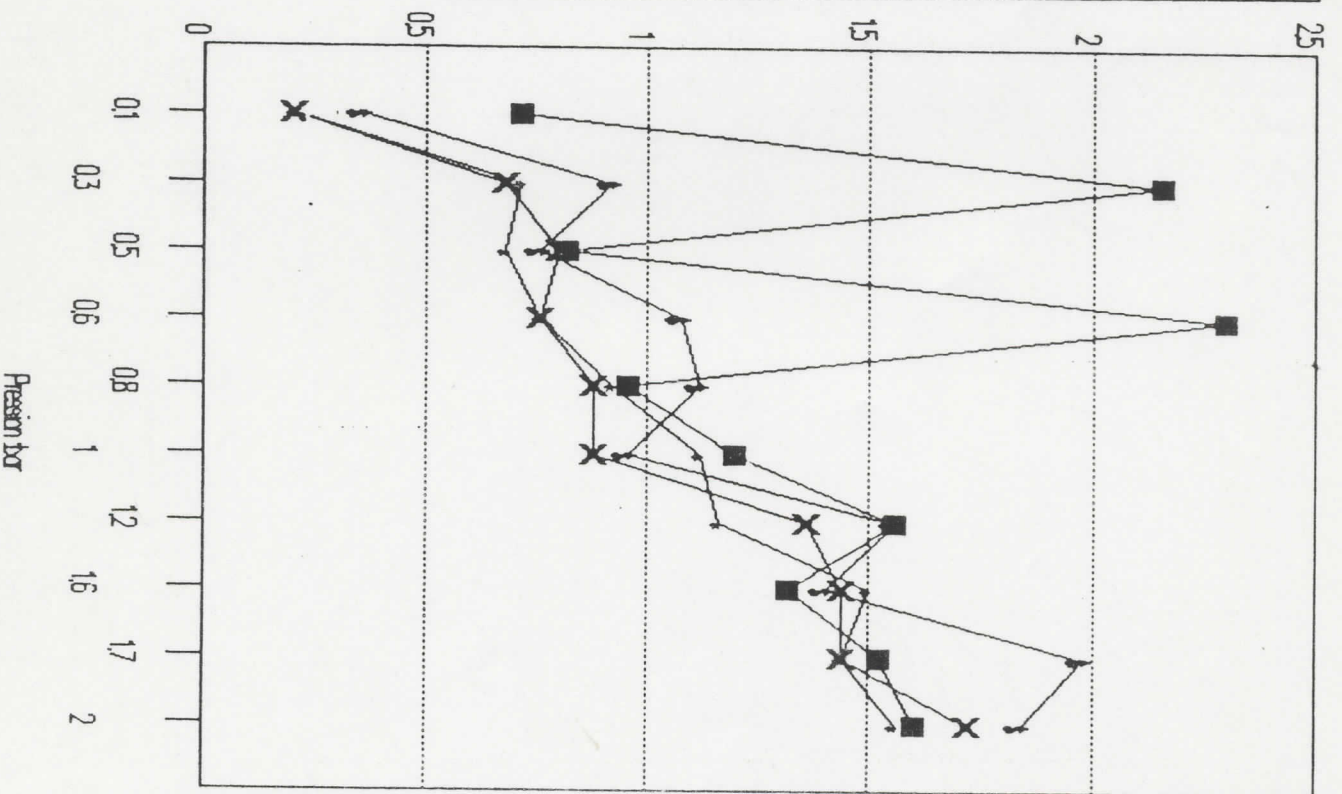
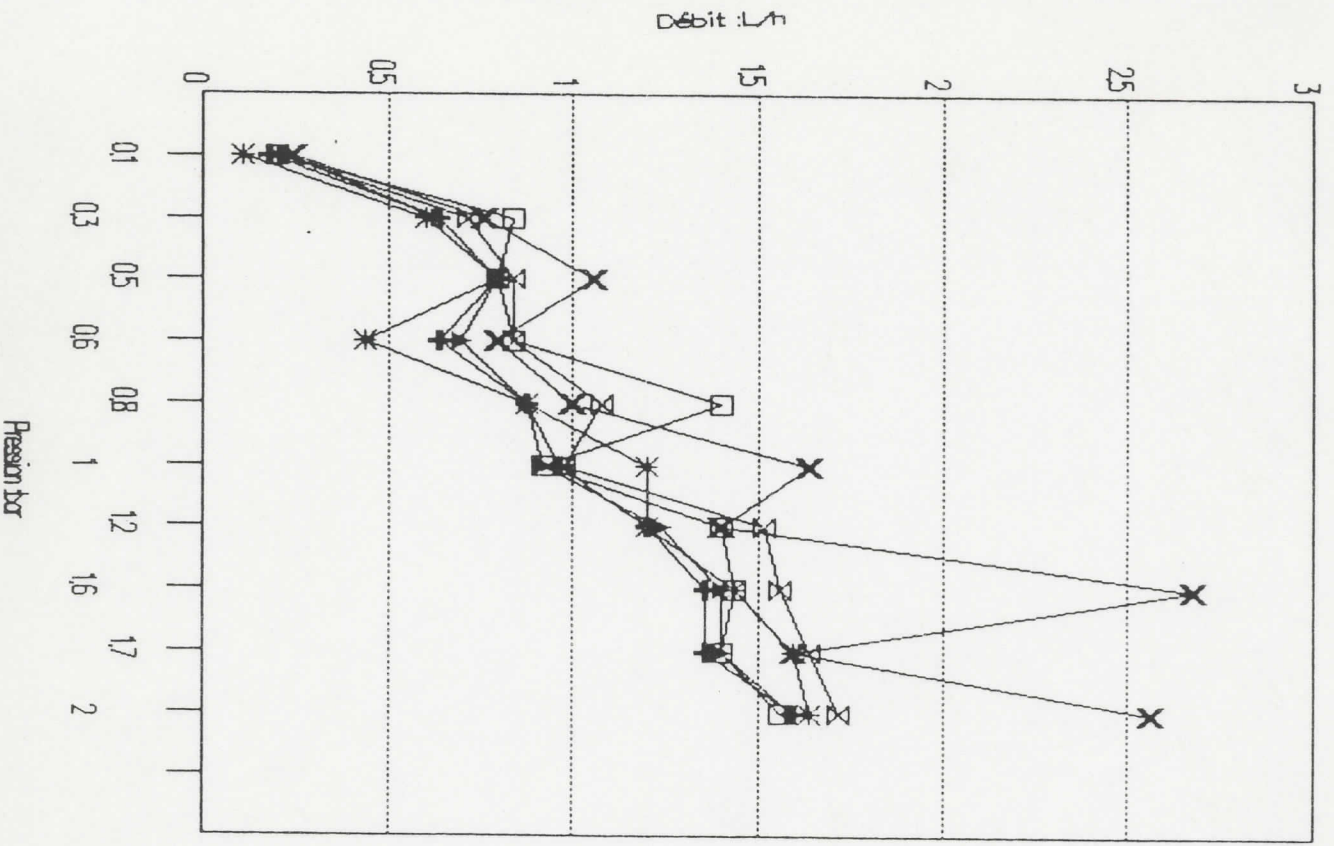


Fig N°27 b : Graphique $q = f(H)$ Courbe moy.mbranchement III

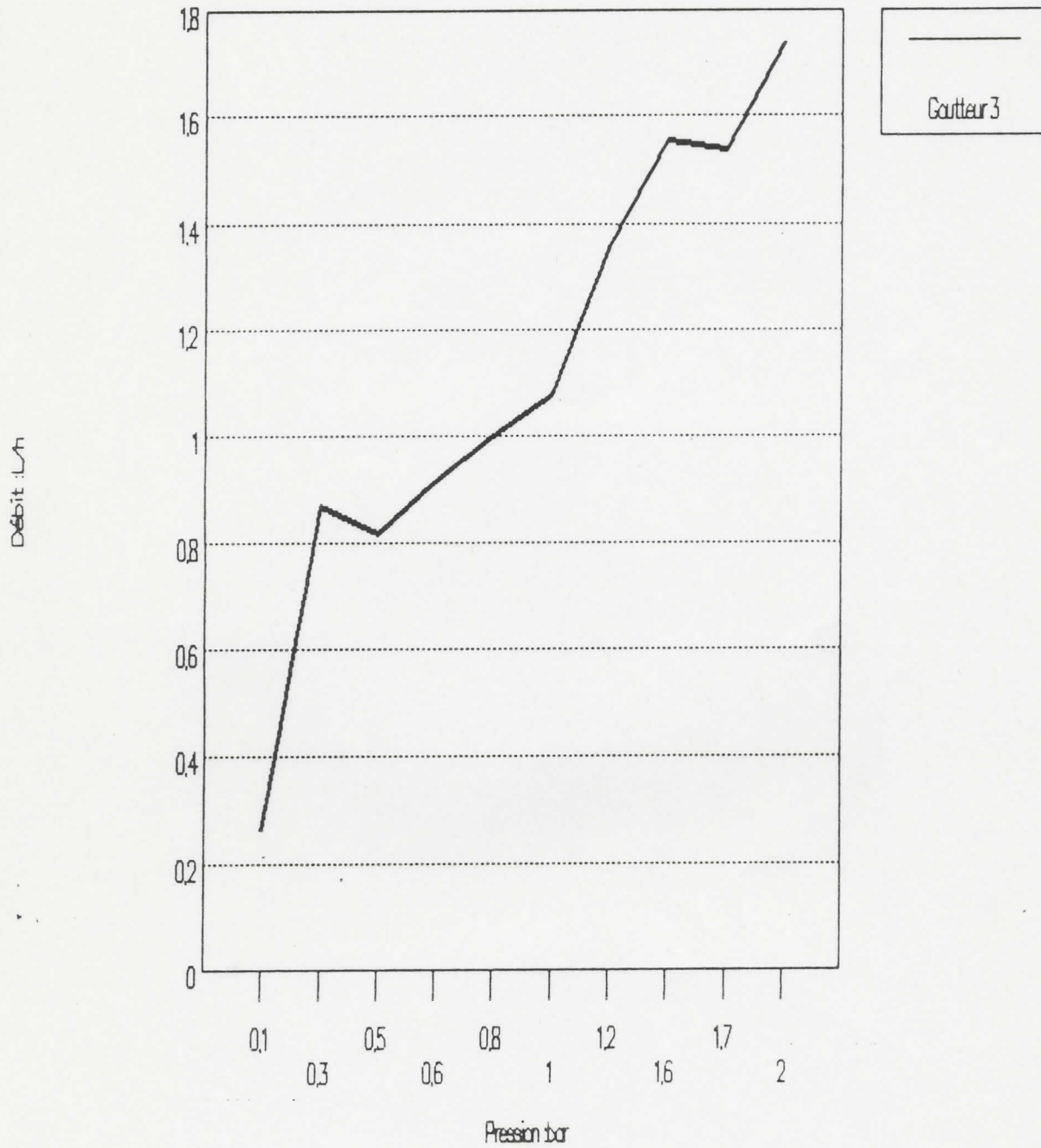


Fig N°28 a : Graphique q = f(H) branchement IV

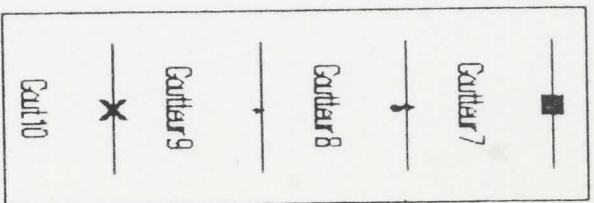
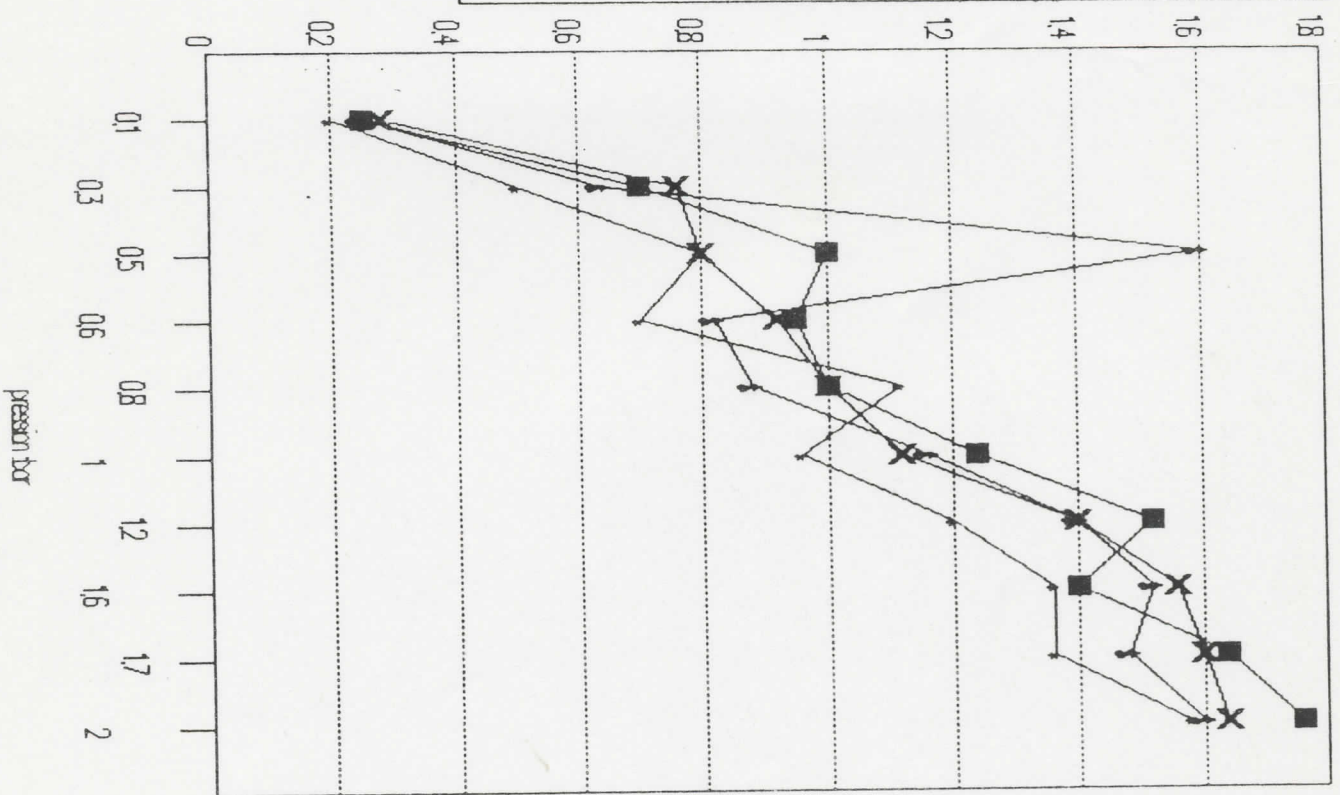
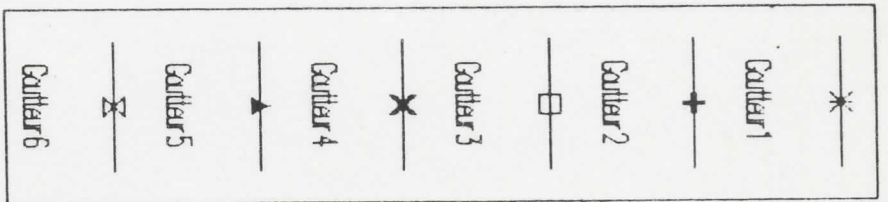
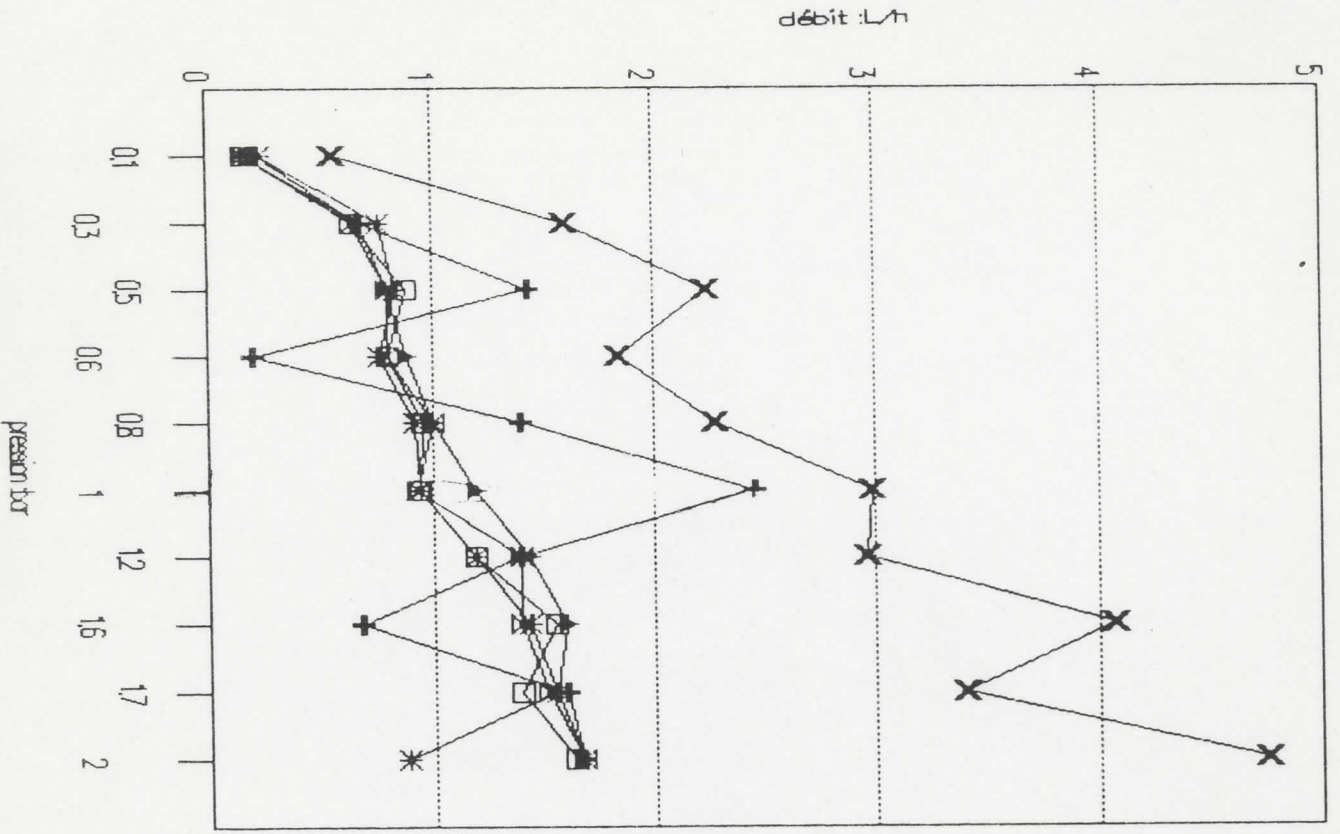
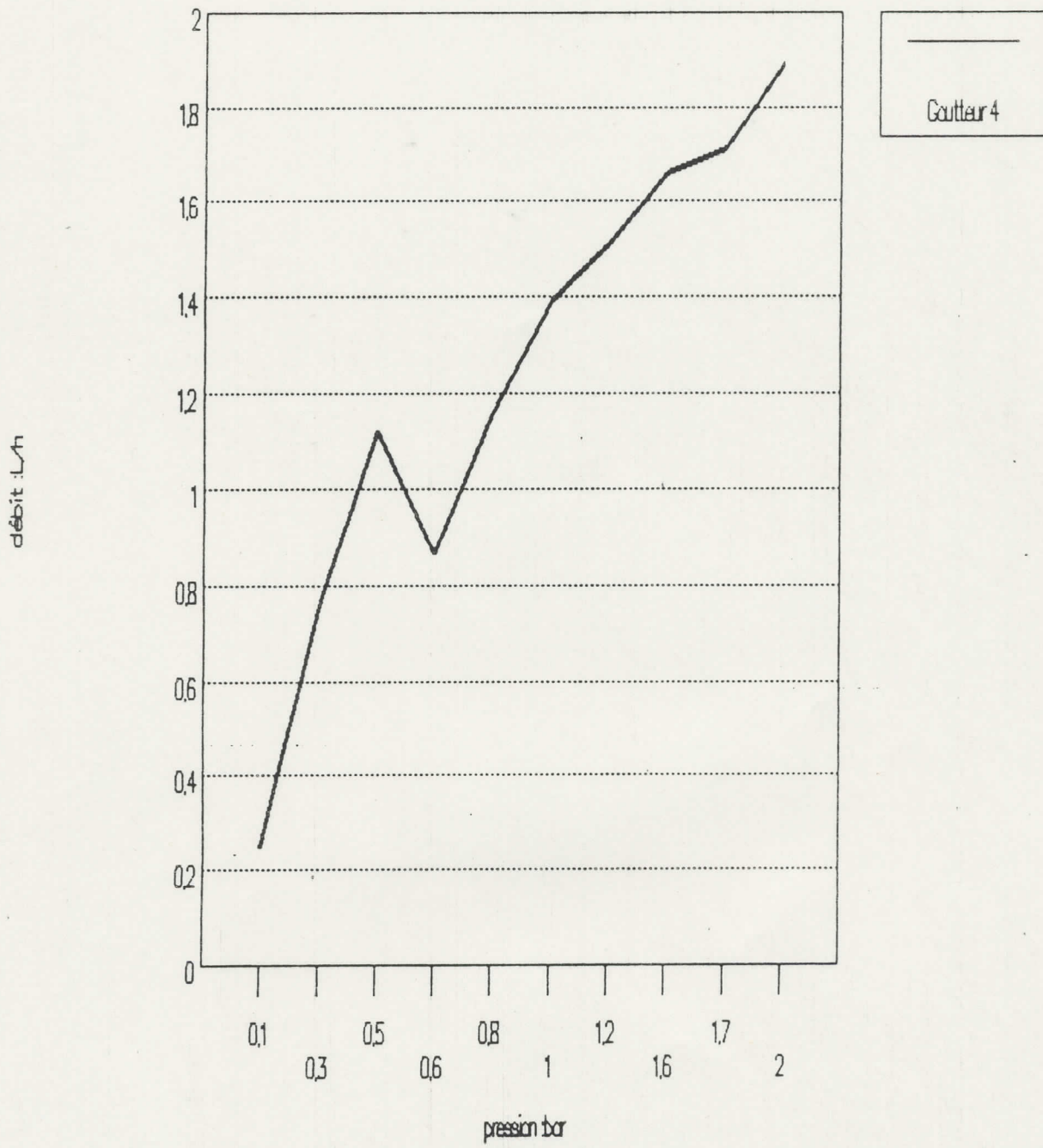


Fig N°28 b : Graphique $q = f(H)$ Courbe moy. branchement IV



Les graphiques N° 29,30,31 et 32 ainsi obtenus représentent les courbes de fonctionnement des goutteurs selon l'équation :

$$q = K H^x$$

La détermination des constantes K et x permet d'écrire les équations caractéristiques des courbes de fonctionnement des quatre goutteurs choisis et utilisés :

$qI = 3,1523 H^{0,0754}$
$qII = 2,6537 H^{0,2064}$
$qIII = 0,596 H^{0,2708}$
$qIV = 0,7293 H^{0,2024}$

La relation reliant un goutteur et la pression de service est fonction de la conception structurelle et géométrique de l'appareil.

Habituellement, le débit obéit à la relation $q = K H^x$ où K nous informe sur les dimensions de l'orifice et x sur le régime d'écoulement développé dans le goutteur

Selon les valeurs trouvées de x (inférieures à 0,5) nous pouvons conclure que les quatre goutteurs développent un régime sub-turbulent que laminaire, ce qui rend les appareils moins sensibles aux variations de pression donc moins vulnérables à l'obstruction interne.

Avec une distribution à régime turbulent, le débit est proportionnel à la racine carrée de la pression "on peut admettre 15 à 20 % de la variation de pression pour 10 % de variation de débit". Le débit des goutteurs à régime laminaire est très dépendant de la température du fait de la viscosité de l'eau. Une augmentation du débit est souvent liée à une variation positive de la température.

Fig N° 29 : Courbe caractéristique du goutteur I

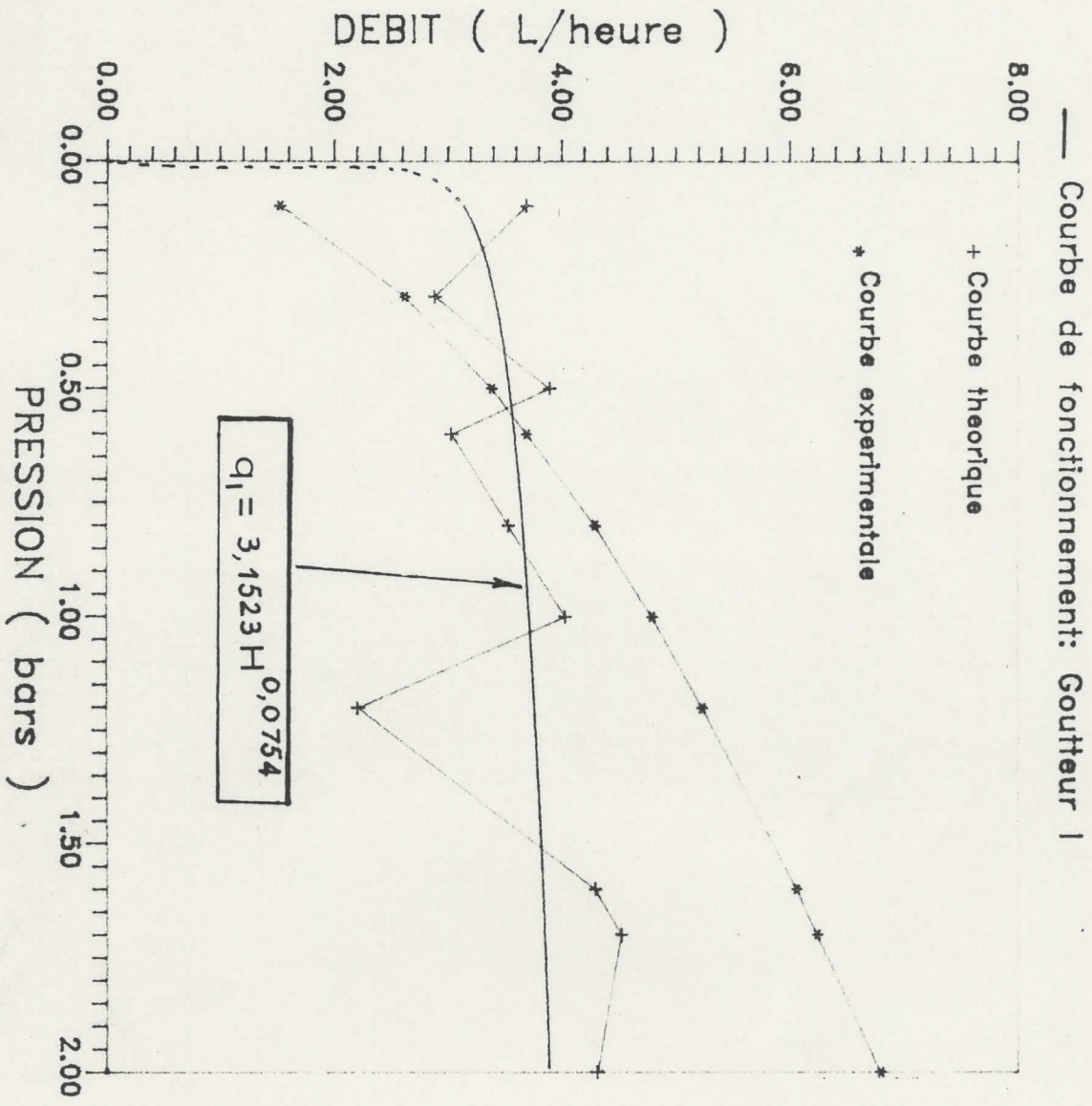
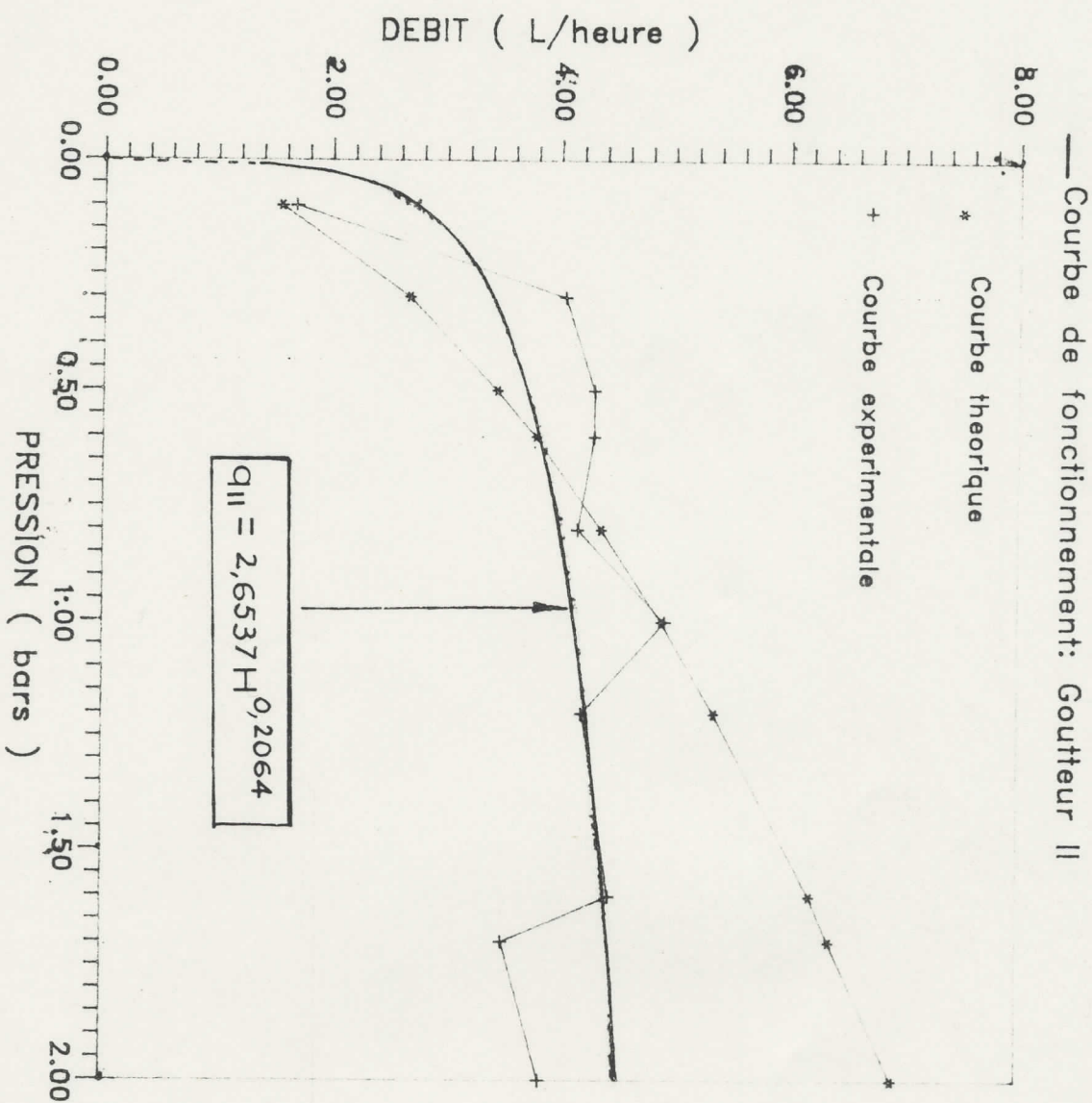


Fig N° 30 : Courbe caractéristique du goutteur II



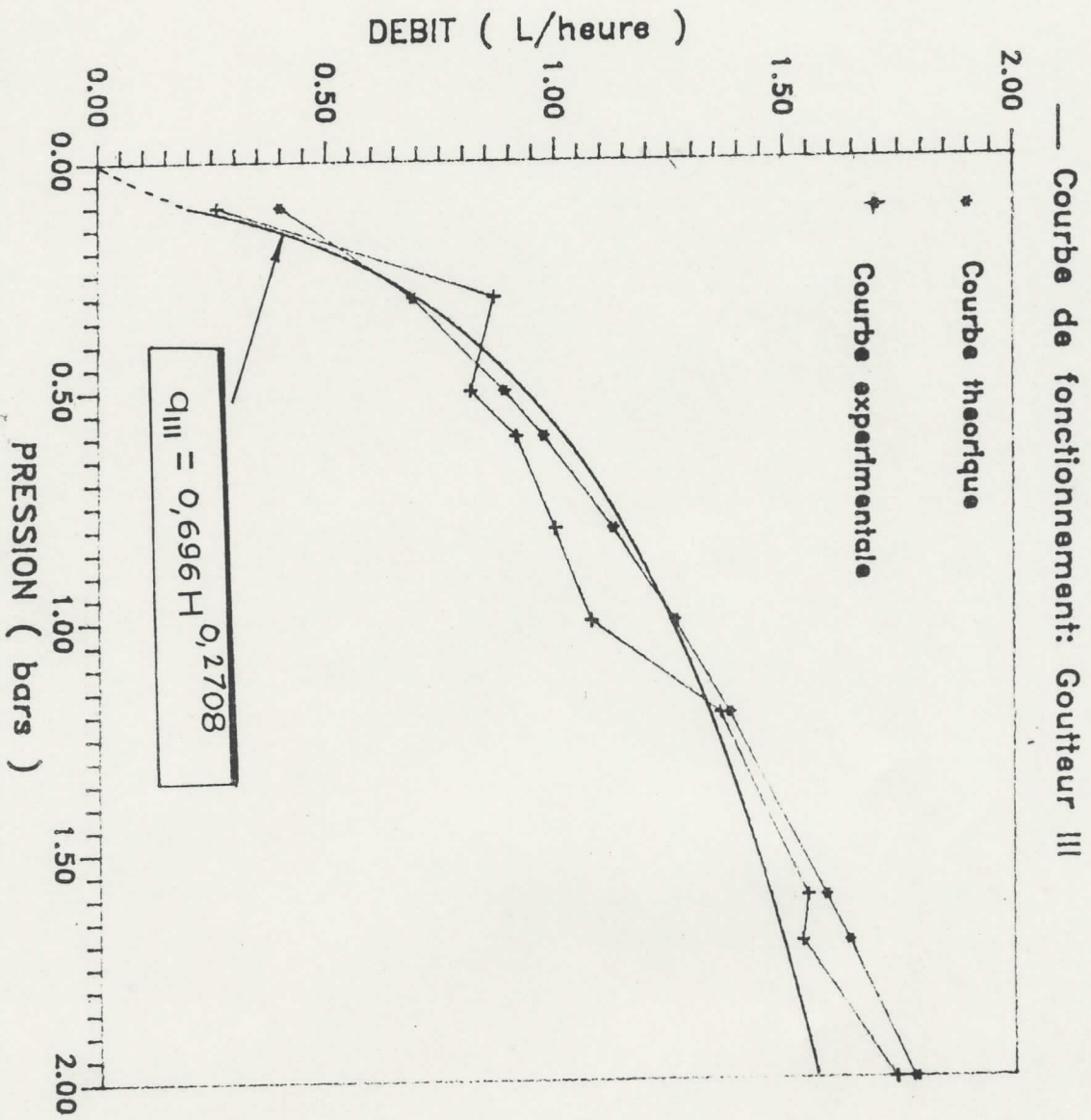
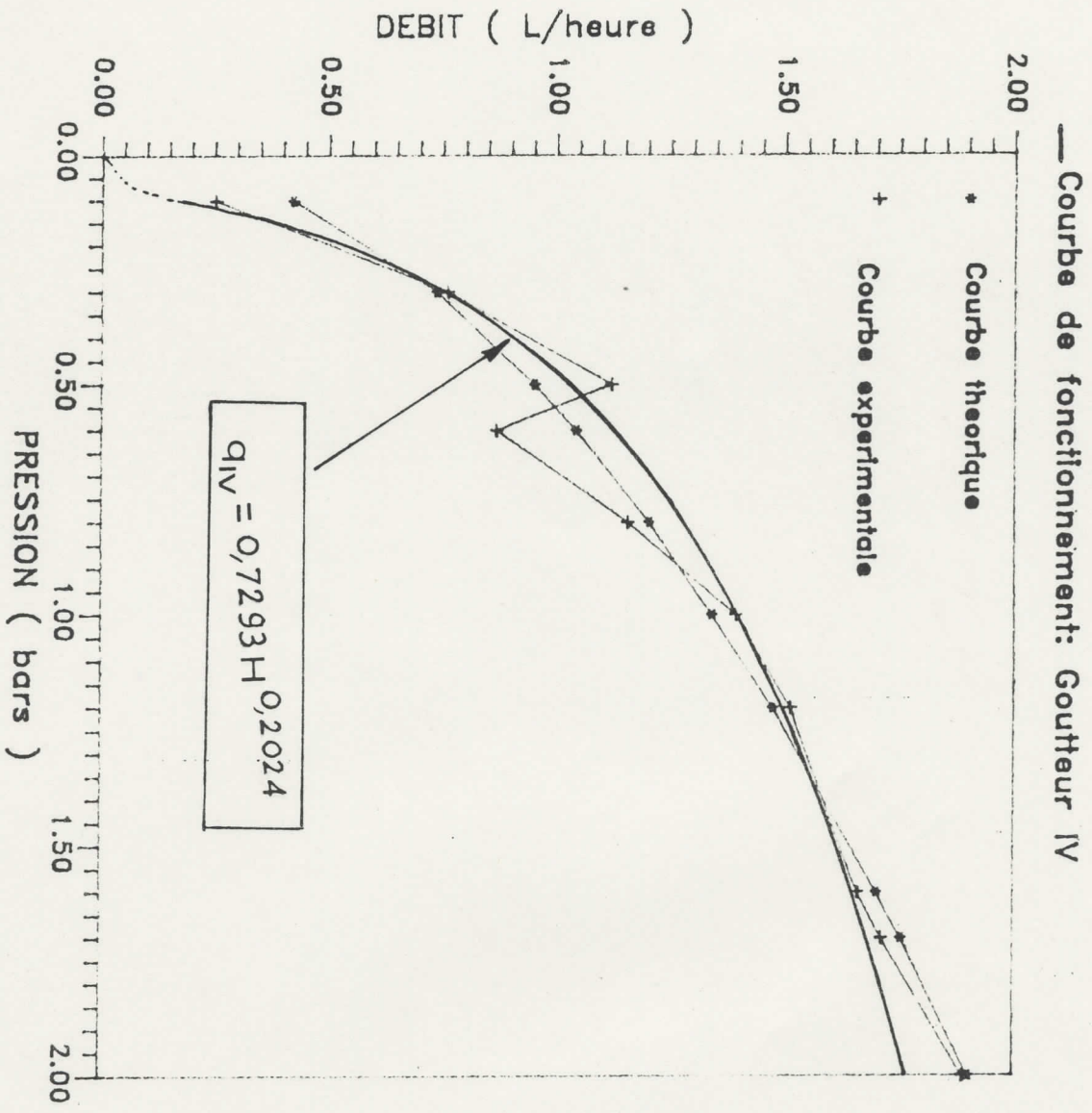


Fig N° 31 : Courbe caractéristique du goutteur III

Fig N° 32 : Courbe caractéristique du goutteur IV



NB - Il faut signaler à ce propos, surtout pour les rampes exposées au soleil, qu'un gradient de température s'installe de l'amont à l'aval de la rampe. L'effet peut compenser partiellement la perte de charge à l'extrémité et augmenter les débits des émetteurs.

A présent nous allons présenter le comportement des goutteurs un par un après cette première série d'expériences.

Goutteur I : de 0 à 0,5 bar, on constate une instabilité de fonctionnement. Les écarts sont très importants. Cependant, il convient de ne pas faire fonctionner ce type de goutteur dans cette plage de pression mais de l'utiliser à des pressions au-delà de 0,5 bar où les débits présentent une stabilité remarquable. Cela confirme le type auto-régulant du goutteur et ses performances.

Goutteur II : Ce goutteur étant auto-régulant, sa courbe de fonctionnement montre également une variabilité importante pour des valeurs de pressions inférieures à 0,5 bar et une régularité moyenne pour des pressions élevées.

A la suite des résultats expérimentaux, il semble clair que l'auto-régulation des goutteurs I et II ne s'enclenche qu'à partir des pressions supérieures à 0,5 bar. L'auto-régulation est assurée par les capsules à l'intérieur du goutteur (capsule amorphe dimensionnée pour le GI et capsule déformable pour le GII).

Goutteur III et IV : L'augmentation du débit se fait de manière exponentielle à partir des faibles valeurs de la pression (valeurs élevées du GIII et GIV). Cette augmentation est tout à fait normale en absence de pièces d'auto-régulation et du type de goutteur lui-même. La différence qui existe entre les deux goutteurs n'est pas significative, bien qu'ils soient commercialisés sous deux caractéristiques différentes (Le GIII avec $q_n = 41/h$ et le GIV avec $q_n = 81/h$)

3.5. Conclusion

Il semble évident que la zone de stabilité de la courbe : $q = f(H)$ commence à partir de $H > 0,5$ bar. Ceci pourrait être dû à un besoin relativement important en pression pour que l'auto-régulation fonctionne.

Le goutteur I (Américain) a montré une auto-régulation relativement correcte par rapport au goutteur II (S.T.T.F.). L'instabilité des débits pourrait être due également à la mauvaise fabrication des différentes pièces du goutteur ou de la matière même de la pastille en plastic déformable, responsable de l'auto-régulation. La stabilité des débits est remarquable pour les quatre goutteurs, à partir de $H > 0,5$ bar.

4. Test d'homogénéité de fabrication et classification des goutteurs (selon Normes ISO - AFNOR 1988)

Selon la littérature spécialisée et quelque soit le processus de fabrication des goutteurs, il existe toujours des différences entre les débits d'un même goutteur.

Les variations du débit d'un même goutteur à une position donnée sur la rampe sont essentiellement dues à la qualité de fabrication (matériaux et finissage).

Ces variations dites " verticales ", contrôlées à l'aide du coefficient de variation (Cv), ne doivent pas dépasser au plus 10% (59)

On considère aussi que ces défauts sont répartis suivant une distribution normale sur les émetteurs de même modèle (SALOMON - 1979 in 59).

4.1. Méthodes

L'opération a été conduite sur un lot de plus de 30 goutteurs neufs, pour chaque type, fournis par le fabricant (S.T.T.F.).

Elle consiste à déterminer le coefficient de variation du débit (Cv) des quatre prototypes de goutteurs expérimentés dans les conditions suivantes:

- Pression de service : 1 bar
- Durée de fonctionnement : 1 heure
- Température de l'eau $\simeq 20^{\circ}\text{C}$

Le Cv a été déterminé à l'aide de la relation :

$$Cv = \frac{\hat{\sigma}(q)}{\bar{q}} 100 \text{ avec : } \hat{\sigma}(q) = \sqrt{\frac{\sum(\bar{q}-q_i)^2}{N-1}}$$

Cv : Coefficient de variation en %

$\hat{\sigma}(q)$: Ecart type de l'échantillon (débit)

\bar{q} : Débit moyen en l/h

q_i : Débit de chaque goutteur de même type

N : Nombre d'échantillons (exemplaires testés).

4.2. Normes

Selon la norme AFNOR 1988, les goutteurs sont classés par rapport à l'écart qui pourrait exister entre le débit moyen d'émission (\bar{q}) et le débit moyen à un bar de pression (q_n).

Le GEMAGREF en France (1989) s'est inspiré de la norme AFNOR et a dressé une autre classification basée également sur le Cv .

- Norme AFNOR 1988

Classes	Cv en %
A	< 5
B	5 < Cv < 10
non Classé	Cv > 10

- Norme GEMAGREF

Valeur du Cv en %	0	5	10	15
Classes	Très bonne	Bonne	Médiocre	Mauvaise

4.3. Résultats du calcul de Cv et commentaires

Tableau N°41 : Valeurs de Cv et classification des goutteurs
selon norme AFNOR et CEMAGREF

Caractéristiques	$\delta(q)$	Cv en %	Classe selon AFNOR	Classe selon CEMAGREF
Goutteur I	0,177	4,320	A	Très bonne
Goutteur II	0,470	10,080	B	bonne
Goutteur III	0,353	30,270	Non classé	Mauvaise
Goutteur IV	0,587	44,980	Non classé	Mauvaise

Les valeurs de q et du Cv sont calculées à partir des valeurs moyennes
Tableau N°42.

Par ailleurs, une étude statistique détaillée a été entreprise pour mieux comprendre les variations du Cv des débits aussi bien "verticalement" qu'"horizontalement" (voir annexe N°5).

L'examen des valeurs du Cv montre que ce dernier augmente globalement de la tête à l'extrémité de la rampe. Cette instabilité des débits en fin de rampe nous semble normale en raison de l'effet des pertes de charges (à pression constante).

Les moyennes du Cv pour les quatre goutteurs expérimentés ont été resumées dans les tableaux qui suivent Tableau N°42 et 43.

En observant les valeurs moyennes (goutteur I), l'on constate que le Cv moyen se stabilise à partir de la valeur $H = 0,5$ bar avec la tendance à une légère diminution pour les valeurs élevées de H.

Aussi, il est recommandé d'éviter les pressions inférieures à 0,5 bar et même les pressions supérieures à 1 bar.

Tableau N° 42 : Calcul d'homogeneite des goutteurs utilises

Goutteurs	Type	Pression de service (bar)	Debit moy. \bar{q} (l/h)	$\sigma(q)$	Cv (%)	q_{max} (l/h)	q_{min} (l/h)	$(\bar{C}u)_c$	$(Cu)_H$	Tolérance	
										observee %	calculee %
GI	4 l/h	1 bar	4,098	0.177	4.32	4.4	3.78	97.07	96.80	31	12.96
GII	4 l/h	1	4,66	0.47	10.08	5.76	4.17	92.52	91.95	17.06	30.24
GIII	2 l/h	1	1,168	0.353	30.27	2.1	0.86	80.40	75.84	53.08	90.81
GIV	2 l/h	1	1,3065	0.587	44.98	2.88	0.83	75.96	64.10	78.45	134.94

Nombre d'échantillon 50

$$\sigma(q) : \text{Ecart type du debit} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{q} - q_i)^2}{N-1}}$$

N : Nombre d'exemplaires testes

\bar{q} : debit moy. en l/h.

q_i : debit de chaque goutteur de même type : l/h.

$$(Cu)_H : \text{Coefficient d'uniformité (Hart - 1961)} = 1 - 0.798 Cv \cdot 100.$$

$$(Cu)_c : \text{Coefficient d'uniformité de Christiansen (1942)} = 1 - \frac{|\Delta \bar{q}|}{\bar{q}} \cdot 100$$

$$Cv : \text{Coefficient de variation} = \frac{\sigma(q)}{\bar{q}} \cdot 100$$

$$\text{Tolérance observée dans le lot} = \pm \frac{1}{2} \frac{q_{max} - q_{min}}{\bar{q}} \cdot 100.$$

$$\text{Tolérance calculée} = \pm 3 \sigma(q) / \bar{q} \cdot 100 = 3 \cdot Cv.$$

Tableau N°43 : Etude statistique du Cv et du Cu.

<u>Goutteur I</u>										
H (bar)	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,6	1,7	2
Cv moy	0,207	0,230	0,164	0,176	0,117	0,107	0,096	0,102	0,098	0,087
Cv (Cv)	0,273	0,247	0,161	0,199	0,140	0,197	0,246	0,196	0,306	0,444
Cu moy	0,647	0,735	0,839	0,719	0,858	0,899	0,893	0,838	0,852	0,852
<u>Goutteur II</u>										
Cv moy	0,176	0,094	0,097	0,084	0,123	0,099	0,129	0,123	0,143	0,150
Cv (Cv)	3,076	3,877	4,458	3,600	3,194	4,093	3,174	4,160	2,821	2,889
Cu moy	0,547	0,763	0,758	0,825	0,829	0,854	0,691	0,804	0,695	0,576
<u>Goutteur III</u>										
Cv moy	0,402	0,249	0,350	0,384	0,269	0,324	0,259	0,203	0,181	0,173
Cv (Cv)	3,210	3,120	4,280	4,100	4,850	3,850	4,440	5,180	3,830	4,400
Cu moy	0,336	0,456	0,682	0,413	0,724	0,670	0,751	0,700	0,817	0,777
<u>Goutteur IV</u>										
Cv moy	0,370	0,260	0,270	0,310	0,250	0,200	0,150	0,170	0,160	0,140
Cv (Cv)	5,740	5,340	3,660	2,850	3,730	3,440	3,530	1,690	2,850	3,270
Cu moy	0,477	0,578	0,559	0,491	0,602	0,506	0,658	0,476	0,450	0,501

Cette zone de parfaite stabilité est indiquée par des faibles valeurs de la variation du Cv ou Cv(Cv).

Pour le goutteur II, le long de la rampe le Cv est très variable, cependant les valeurs moyennes sont beaucoup plus stables.

Le goutteur II possède des écarts faibles de débits, ce qui confirme ses performances assez bonnes d'auto-régulation indiquées dans le tableau N°41.

Pour le goutteur III, sur toute la longueur de la rampe, le Cv a tendance à diminuer alors que le Cv moyen de même que le Cv(cv) est très élevé, ce qui démontre l'hétérogénéité remarquable du débit de ce goutteur, donc une fabrication non conforme à la norme standard.

Pour le goutteur IV, le Cv moyen diminue avec l'augmentation de H et donne une valeur minimale pour H = 2 bars. Il semble que ce goutteur est surdimensionné par rapport aux valeurs usuelles de pression car il fonctionne assez bien pour les valeurs de forte pression.

Le long de la rampe, la pression varie en raison des pertes de charge provoquant en conséquence une variation du débit-variation horizontale-que l'on étudie à l'aide du coefficient d'uniformité (Cu).

Exception faite pour le goutteur I, pour lequel le Cu moyen déterminé est relativement élevé (83 %), les 3 autres goutteurs donnent des Cu instables et faibles. La valeur élevée du Cu (supérieur à 85 %) est un critère de choix de ce type d'appareils. Voir annexe 5 tableau n°42 et 43.

4.4. Conclusion

Malgré les mauvaises performances du goutteur II et les défauts visiblement importants de fabrication, celui-ci est bien classé selon les deux normes. Ce qui veut dire que les écarts entre les débits moyens q et le débit nominal q_n ne sont pas très importants. Contrairement aux goutteurs III et IV qui donnent des débits très fluctuants par rapport aux débits nominaux, ils sont donc hors normes.

L'écart des débits (mesuré par le calcul des C_v) a une grande importance dans le rythme d'alimentation en eau des plantes. Ce défaut peut se traduire par une baisse de la production due à la non maîtrise des apports d'eau par les goutteurs (sur-irrigation ou sous-irrigation). La consommation en eau des plantes de la même culture est supposée identique dans un périmètre irrigué (monoculture).

L'hétérogénéité des débits d'un même émetteur (C_v élevé) favorise le mauvais fonctionnement et le colmatage des goutteurs. C'est pour cette raison que le contrôle du C_v est exigé périodiquement lors des campagnes d'irrigation.

5. Classification des émetteurs utilisés vis à vis de la sensibilité à la pression de service (selon normes AFNOR 1988 et CEMAGREF 1989)

Selon que le goutteur soit auto-régulant ou pas, nous avons procédé à la classification des émetteurs utilisés d'après la répartition admise au CEMAGREF. Cette classification est basée sur la valeur de l'exposant x qui représente le rythme d'augmentation du débit en fonction de l'élévation de la pression.

La sensibilité du débit aux variations de pression est différente selon qu'il s'agisse d'un goutteur auto-régulant ou pas.

C'est pour cette raison qu'on trouve deux types de classification.

5. 1 Classification des goutteurs non auto-régulants

Valeur de x	0.2	0.5	0.6	0.8
Position des goutteurs utilisés	0,2708 (GIII) 0,2924 (GIV)	_____	_____	_____
Classe CEMAGREF	(TT) très tolérant	(T) tolérant	(PT) peu tolérant	(TPT) très peu tolérant

5.2. Classification des goutteurs auto-régulants

Valeur de x	0	0.05	0.1	0.15	0.2
Classe CEMAGREF	Très bonne (TB)	Bonne (B)	Médiocre (Me)	Mauvaise (Ma)	Hors norme (Hn)
Classification des goutteurs utilisés	_____	0,0754 (GI)	_____	0,2064 (GII)	

5.3. Conclusion

Bien que les autres normes citées précédemment n'ont pas été respectées par la S.T.T.F. dans la fabrication, leurs goutteurs non auto-régulants, tout comme le goutteur I, présentent selon ces résultats une très bonne résistance à la pression.

Inversement le goutteur II (classe Ma) est sensible aux variations de pression et peut manifester des fissures ou des phénomènes de cracking lors des variations de températures.

Ces défauts peuvent réduire considérablement la durée de vie du matériel d'irrigation ce qui se répercute sur la rentabilité de l'opération d'irrigation.

6. Conclusion sur les caractéristiques techniques des émetteurs utilisés

En établissant les courbes de fonctionnement des quatre goutteurs, on constate que pour les goutteurs auto-régulants, la stabilité de la courbe commence à partir de H supérieure 0.5 bar ou 5m de C.E.

Le goutteur I a montré une auto-régulation relativement correcte par rapport au goutteur II. Ce dernier pourrait être décrit selon les tests du Cv, comme un appareil ayant une homogénéité modeste des débits d'émission.

Inversement, les goutteurs en ligne III et IV donnent des débits très hétérogènes et selon les normes de classification, ils seront non conformes, donc non commercialisables.

Globalement, le goutteur I a montré incontestablement ses très bonnes performances.

L'homogénéité des débits a une grande importance dans l'alimentation en eau des plantes. L'hétérogénéité, par contre, a des conséquences néfastes sur la production agricole, sur le dosage de la fertilisation, sur le colmatage des émetteurs et donc sur la rentabilité des investissements.

Il apparaît nécessaire de faire le bon choix du type de goutteur et d'assurer leur entretien en procédant au calcul systématique des coefficients de variations.

"Une eau de qualité médiocre est souvent préférable à pas d'eau du tout et si une eau peut servir, il vaut mieux que l'agriculture lui trouve un emploi que de la mettre au "rebut" ".

R.S AYERS (1976)

Chapitre V : L'impact de la REUE sur le réseau de m.I

1. Introduction

L'objectif que nous nous sommes fixé dans ce chapitre repose sur l'évaluation quantitative du phénomène d'obstruction pour les quatre types de goutteurs utilisés. Sachant que l'obstruction constitue l'handicap majeur des systèmes de m.I, nous essayons aussi de déterminer l'impact des paramètres hydrauliques et technologiques sur l'évolution de l'obstruction des goutteurs. En plus de ces paramètres, la qualité de l'eau est classiquement connue la cause explicite de l'obstruction des goutteurs.

On distingue cependant deux types d'obstruction : L'une pouvant être produite à l'intérieur de l'émetteur, l'autre pouvant provenir de l'environnement extérieur du goutteur (vers, racines, plantes).

L'obstruction externe pourrait être évitée en surelevant les rampes par rapport à la surface du sol.

Les émetteurs sont plutôt "vulnérables" à l'obstruction interne que nous étudions dans ce chapitre.

L'obstruction peut apparaître de deux manières : L'une brusque, facile à déceler, l'autre, la plus fréquente, plus lente qui ne peut être détectée que par des mesures systématiques du débit ou de la pression ou les deux à la fois.

L'étude de ce phénomène est d'une importance capitale pour le cas de la REUE en m.I. Sachant que le colmatage diminue les débits des émetteurs, donc l'uniformité des débits qui est un paramètre important dans le calcul de dimensionnement des réseaux.

Nous avons jugé utile de définir le phénomène de l'obstruction qui peut résulter selon trois origines différentes : physique, chimique ou biologique.

L'obstruction peut naître de la combinaison des trois origines.

- L'obstruction physique

Elle est provoquée par des particules solides en suspension au niveau de l'orifice de sortie de l'eau que des purges soigneusement exécutées peuvent éliminer. La filtration des eaux joue un rôle primordial dans l'atténuation du phénomène de colmatage. On utilise les hydrocyclones ou la clarification des eaux dans des bacs décanteurs. Les filtres à tamis peuvent aussi arrêter beaucoup de particules.

- L'obstruction chimique

Dûe essentiellement à une précipitation du calcaire, et du fer (cas des eaux entartrantes).

Les variations de la température, et du pH sont des catalyseurs majeurs de l'entartrage. Ces dépôts sont réduits par l'injection de solution d'acide chloridrique (1 fois/semaine, 10mm à 36 à 2%) ou d'acide nitrique (40).

- L'obstruction biologique

L'eau d'irrigation contient d'énormes particules de micro-organismes vivants ou morts (algues, bactéries, protozoaires), de dimensions généralement inférieures aux vides des mailles des filtres.

La prévention de ce type d'obstruction est l'injection de solution javalisée, ou du chlore gazeux ($1g/m^3$ d'eau).(40).

2. Evaluation de l'obstruction : méthodes, résultats

2.1. Méthodes

Notre objectif étant d'évaluer le phénomène de l'obstruction des goutteurs en analysant trois (03) facteurs :

- Temps de service ou volume d'eau écoulé à travers le goutteur :
Des mesures de débit ont été effectuées après 140h de fonctionnement pour tous les goutteurs.

- L'emplacement du goutteur sur la rampe :
Ainsi 10 emplacements ont été retenus sur la rampe selon les positions suivantes : 1-2-3-8-12-13-17-23-29 et 30.

Le principe de la méthode utilisée se résume par un contrôle systématique des débits des émetteurs fixés sur le réseau de micro-irrigation figure N°21.

Les débits des goutteurs numérotés ont été relevés quotidiennement après dix heures de fonctionnement sous une pression constante égale à 1 bar.

Le temps a été mesuré par un chronomètre standard et la température a été suivie régulièrement pendant les mesures.

Le troisième facteur est celui de la qualité de l'eau. L'eau utilisée est celle de l'effluent épurée de la station de Beni Mered, dont la qualité a été "balisée" par les analyses physico-chimiques et microbiologiques suivantes :

2.2. Qualité des eaux usées épurées de la station d'épuration de Beni Mered

2.2.1. Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux usées épurées de la station de Beni Mered.

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées à l'ANRH de Blida et les analyses bactériologiques à l'Institut Pasteur d'Alger.

Les résultats sont représentés dans les tableaux N°44. Toutes les précautions de l'échantillonnage (horaire, endroit, position et volume prélevé, les bouteilles servant aux prélèvements stérilisés) ont été soigneusement respectées selon les prescriptions des établissements spécialisés dans ce domaine.

2.2.1.1. Résultats

Tableau N°44 : Résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des eaux usées épurées

Echantillon	1		2		3		4		5		Moyenne	
Date de prélèvement	28.05.9		01.06.90		11.06.90		11.06.90		25.06.90			
Ca (mg/l, meq/l)	43	2,15	71	3,54	74	3,69	64	3,22	65	3,25	36,4	3,17
Mg (mg/l, meq/l)	16	1,32	18	1,54	26	2,2	38	3,14	28	2,32	25,2	2,104
Na (mg/l, meq/l)	52	2,26	85	3,70	100	4,35	118	3,13	100	4,35	91	3,958
K (mg/l, meq/l)	6	0,15	14	0,36	17	0,44	22	0,56	21	0,54	16	0,41
Cl (mg/l, meq/l)	40	1,13	8	2,25	30	2,25	75	2,11	75	2,11	55,6	1,97
So4 (mg/l, meq/l)	43	0,93	93	1,94	78	1,63	150	3,13	100	2,08	92,8	1,942
CO ₃ (mg/l, meq/l)	110	3,65	21	0,70	-	-	-	-	-	-	65,5	2,175
HCO ₃ (mg/l, meq/l)	113	2,83	301	4,93	346	5,68	482	7,9	318	5,22	324	5,312
NO ₃ ⁻ (mg/l, meq/l)	5	0,02	2	0,03	76	1,23	0	0	53	0,85	27,2	0,438
Balance cations (meq/l)	5,88		9,14		10,68		12,05		10,46		9,642	
Balance anions (meq/l)	8,59		9,85		10,79		13,14		10,45		10,526	
Somme des ions (meq/l)	488		685		797		949		760		735,2	
Nitrites NO ₂ (mg/l)	0,079		1,08		0,43		0,107		1,08		0,5552	
Ammonium NH ₄ (mg/l)	0,9		20,0		0,69		46		0,3		13,978	
Phosphate (mg/l)	3,55		16		2		22		22,25		13,16	
pO ₄ (mg/l)	3,075		13		1,975		21,25		22		12,25	
Azote organique (mg/l)	0,6		13		0,50		29,5		-		10,9	

Suite

N° Echantillon	1	2	3	4	5	Moyenne
Fe (mg/l)	0,13	0,14	0,16	0,84	0,11	0,276
Cr (mg/l)	Nd	Nd	Nd	Nd	0	Nd
Zn (mg/l)	0,01	0,02	0,15	0,15	0,12	0,09
Mn (mg/l)	0,02	0,05	Nd	0,07	0,09	0,0575
Pb (mg/l)	Nd	Nd	Nd	Nd	0	Nd
Cd (mg/l)	Nd	Nd	Nd	Nd	0	Nd
Cu (mg/l)	Nd	Nd	Nd	0,03	0,01	0,02
Conductivité elect.mmhos/cm 25°C	0,6	0,9	1,1	1,3	1,0	0,960
Minéralisation (mg/l)	384	556	676	775	639	606,4
Residu sec 110°C (mg/l)	408	597	707	820	655	637,4
SiO ₂ (mg/l)	15,4	23,8	27,6	31,4	28	25,04
m.o en milieu acide en O ₂ (mg/l)	26,6	41	2,8	36	20	25,28
m.e.s. 105°C (mg/l)	20	44	82	54	88	57,6
m.e.s 600°C (mg/l)	0	8	66	32	66	34,4
DBO ₅ (mg/l)	-	10,8	-	32	4,4	35,73
Dco (mg/l)	90	160	30	180	70	106
Turbidité eau brute eau décantée (N.T.U)	3,6 8,0	23 11	3,8 2,2	57 33	4,3 2,1	19,04 11,26

Suite

N° Echantillon	1	2	3	4	5	Moyenne
PH	9,9	8,6	8,0	8,0	8,1	8,52
TH	17	25	29	32	28	26,2
TAC	32	28	28	40	26	30,8
TA	18	4	0	0	0	4,4
SAF	11	21	26	-	-	19,33
IS	10	17	19	-	-	15,33

NB : Nd = Non décelable

NTU = Unité de turbidité néphélomètre

Tableau N°45 : Résultats des analyses bactériologiques des
eaux usées épurées-station de Beni-Mered-1990

Paramètres analysés	Eaux usées brutes	Eaux usées traitées		
		1	2	3
Germes totaux				
Coliformes	>24000/100ml	2400/100ml	480/100ml	2400/100ml ^l
Colibacilles	>24000/100ml	2400/100ml	480/100ml	2400/100ml ^l
Entérocoques	>24000/100ml	2400/100ml	240/100ml	240/100ml
Germes anaérobies				
Sulfito-réducteur (Clostridium)	>24000/20ml	2400/20ml	2100/100ml	
Autres germes				
Salmonella vibrion	Abs./300ml	Abs./300ml	Abs./100ml	Abs./200ml
Cholérique NAG.	Abs./450ml	Abs./450ml	Abs./450ml	Présence/ 450ml
Helminthes	-	-	-	-
Date	11.06.90	11.06.90	18.06.90	25.06.90

N.B. Les helminthes n'ont pas été déterminés faute de moyens
à l'Institut Pasteur

Tablau N°46 : Salinité des eaux usées épurées de la station de Beni Mered

Caratéristiques	SAR	PH	Phc	SARaj	CE mmhos cm	Minéra lisation en mg/l	Conclusions sommaires
1 ^{er} Essai	1,716	9,9	7,2	3,7756	0,6	0,38	Pas de problème
2 ^{ème} Essai	2,322	8,9	7,2	5,1086	0,9	0,558	Pas de problème
3 ^{ème} Essai	2,534	8,0	6,9	6,33569	1,1	0,676	Prob.croissant
4 ^{ème} Essai	2,608	8,0	6,9	6,51769	1,3	0,775	Prob.croissant
5 ^{ème} Essai	6,444	8,1	6,8	16,7549	1,0	0,639	Prob.croissant

2.2.1.2. Commentaires

A partir des résultats de l'analyse chimique, nous avons essayé de classer l'effluent, à la sortie du décanteur secondaire, théoriquement prêt à la réutilisation, en se basant sur le pH, le pH_c , la CE et le SAR ajusté.

- Durant les irrigations, le pH de l'eau était relativement élevé (8,6-9,9) constituant un danger potentiel à la culture puisque les valeurs normales pour une eau d'irrigation oscillent entre 6,5 et 8,4.

Les valeurs inférieures à 8,4 indiquent une tendance à dissoudre la chaux du sol (9), inversement les valeurs supérieures traduisent une tendance à la précipiter.

Les grandes variations du pH ont été heureusement éphémères car nous avons constaté une stabilité autour de la valeur de 7,2 (voir annexe n°6) après quelques jours de fonctionnement de la station.

- La salinité des eaux d'irrigation évaluée à l'aide de la conductivité électrique est comprise entre 0,75 et 3 mmhos/cm. C'est à dire, selon tableau n°44, une salinité génératrice de problèmes en cas de sur-utilisation. Globalement les mêmes conclusions sont données par le tableau n°46.

Par rapport aux normes USDA. (Tableau n°21), les eaux usées épurées de Beni Mered font partie de la classe $C_3 S_1$. Ce qui nous permet de l'admettre comme une eau d'irrigation, moyennant certaines restrictions relatives aux cultures dites sensibles au sodium.

Pour les autres formations d'ions ou de complexes, en raison de l'immense variété des ions dans ce type d'eau, nous nous sommes limités aux formations chimiques qui sont présentées dans le tableau n°44. Selon les normes, il n'a pas été constaté de dépassement. Selon l'indice de stabilité (IS) de RYZNAR qui détermine les conditions réelles de formation de dépôt de calcaire et des phénomènes de

corrosions, les eaux usées épurées de Beni Mered sont jugées corrosives (IS supérieur à 6).

Sur le plan bactériologique, en référence aux normes OMS (tableau n°45), les résultats de l'analyse ont montré, en tenant compte de la variabilité fréquente de la qualité de l'eau dans le temps, une eau dont l'utilisation directe en irrigation nécessite quelques précautions :

La présence, même temporaire de vibron cholériques dans les eaux, exige le contrôle systématiques de la qualité bactériologique et surtout le stockage prolongé aux UV avant l'utilisation.

En définitive, nous pouvons dire que la qualité bactériologiques des eaux usées épurées de la station de Beni-Mered est variable, ce qui n'est pas un cas particulier, et nécessite désormais pour son utilisation quelques précautions sommaires.

2.3. Evaluation de l'obstruction

2.3.1. Critère de la qualité de l'eau

Certains auteurs (56) - (40) utilisent la qualité des eaux pour prévoir le colmatage des emetteurs.

Nous utilisons cette classification en "prélude" à la détermination expérimentale de l'obstruction.

Tableau N°47 : classification physico-chimique des eaux usées traitées de Beni-Mered Blida 1990 en fonction du risque d'obstruction des goutteurs

Facteurs d'obstruction	Unité	Risque d'obstruction		
		Faible	Moyen	Fort
Physique m.e.s	max-ppm (a)	50 (* *) (b)	50-100 (* * *) (b)	100
Chimique				
pH		7	7-8 (* *)	8 (* * *)
Sels dissous totaux		500	500-2000	2000
Mn		0,1 (* * * * *)	0,1-1,5	1,5
Fe		0,1	0,1-1,5	1,5
Hydrogène sulfuré		0,5	0,5-2	2,0

(source:40)

(a) : concentration maximale mesurée selon une méthode normalisée sur un nombre représentatif d'échantillons.

(*) : l'astérisque entre parenthèses indique le nombre d'essai sur 5 dont la valeur correspond à la norme.

(b): exemple : sur 5 essais d'analyses, deux essais ont des valeurs de m.e.s < 50 ppm et 3 autres des valeurs comprises entre [50-100]; mg/l = ppm.

En analysant le tableau n° 47, il apparait que l'eau épurée utilisée présente un risque à l'obstruction des goutteurs allant de moyen à fort. Ce risque est crée par les concentrations élevées des ions de manganèse et des m.e.s. , favorisé par un pH basique .

Cette classification ,comme nous le remarquons ne tient pas compte des caractéristiques techniques et technologiques des émetteurs , par conséquent ,nous la qualifions de peu précise et moins évidente . Le moyen le plus sûr reste l'expérimentation et le contrôle de la variation du débit spécifique des goutteurs .

2.3.2. Critère du contrôle systematique du debit

Nous présentons dans une première étape, l'évolution du debit en fonction des variables : temps de fonctionnement et emplacement du goutteur sur la rampe. Tableau n°48.

L'analyse du comportement des goutteurs à la REUE selon les debits moyens est présentée dans les tableaux n°49-50-51-52.

Dans une seconde étape, et à partir des données du tableau n°48 il a été procédé à l'étude statistique (analyse de la variance - voir annexe n°7) du colmatage des goutteurs selon les deux facteurs : Temps et emplacement.

2.3.2.1-Resultats

Tableau N°48 : Evolution du debit (l/h) des gouteurs en fonction de la durée de fonctionnement (h) et de la position du gouteur sur la rampe P = 1 bar

Position du gouteur sur la rampe	Branchement I : q _n = 4.096 l/h							Branchement II : q _n = 4.66 l/h							Branchement III : q _n = 4.468 l/h							Branchement IV : q _n = 4.306 l/h						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.10	4.00	3.88	3.80	3.50	3.80	3.80	3.00	3.6	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.28	4.04	0.98	0.98	0.98	0.9	
2	4.12	4.12	4.00	4.00	3.80	3.80	3.80	3.78	4.50	3.78	3.0	3.0	3.0	3.0	4.20	0.92	0.88	0.60	0.52	0.0	0.0	4.28	4.10	1.40	1.10	1.00	0.88	
3	3.60	3.00	1.40	4.40	4.40	4.30	4.30	5.91	5.20	5.14	5.14	5.10	5.10	5.00	4.12	4.04	4.04	4.00	0.50	0.0	0.0	4.04	4.06	1.06	1.00	0.80	0.60	
8	4.40	4.40	3.90	3.50	3.40	3.40	3.40	3.78	3.26	2.26	2.00	1.80	1.30	1.30	4.02	4.04	0.98	0.90	0.90	0.50	0.50	2.12	2.40	2.40	2.40	2.00	2.00	
12	4.10	4.02	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.20	4.60	4.30	0.88	0.80	0.00	0.00	4.04	0.86	0.86	0.80	0.30	0.30	0.30	4.24	4.0	0.94	0.95	0.85	0.50	
13	4.40	4.20	4.20	4.30	4.20	4.00	4.00	4.20	4.04	3.80	3.80	3.00	2.80	2.80	4.04	0.96	0.96	0.50	0.35	0.30	0.30	4.00	0.84	1.00	1.00	0.80	0.6	
17	3.80	3.40	3.60	3.50	3.40	3.40	3.30	3.80	4.00	3.60	3.30	3.20	3.20	3.20	4.40	4.60	0.96	0.96	0.50	0.30	0.30	4.34	4.0	0.84	0.85	0.85	0.85	
23	3.96	2.16	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	5.00	5.10	4.60	3.28	3.20	3.20	3.00	4.16	4.12	4.12	1.10	1.00	1.00	1.14	0.96	0.96	0.96	0.90	0.95	0.95	
29	4.10	2.44	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	4.80	3.60	3.60	3.40	3.40	3.00	2.50	1.08	0.90	0.90	0.80	0.80	0.50	1.10	0.84	0.84	0.84	0.80	0.80	0.90	
30	5.72	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00	3.00	3.00	2.80	2.20	2.00	4.20	4.20	4.20	4.20	4.10	4.10	4.10	1.40	0.80	0.80	0.80	0.80	0.6	
$\bar{q}(l/h)$	4.03	3.20	2.78	2.66	2.40	2.30	2.30	3.84	3.78	3.48	3.14	2.90	2.80	4.10	4.00	0.94	0.80	0.80	0.30	0.30	0.30	4.24	4.04	1.04	1.04	0.8		
$\Sigma \bar{q} \text{ en l/h}$	40.30	32.02	27.96	26.60	24.00	23.70	23.50	38.04	37.70	34.08	31.46	29.50	29.30	41.00	40.00	0.94	0.80	0.80	0.30	0.30	0.30	42.84	41.04	10.92	10.88	0.90	0.8	
% Goutteurs % bouchés	0	0	0	20	30	30	30	0	0	0	0	0	10	10	0	10	10	10	10	30	40	0	0	0	0	10		
\bar{q} cumulé (l)	4.03	7.23	10.01	12.61	15.01	17.45	19.80	23.64	26.42	30.12	33.26	35.16	36.96	41.06	45.06	46.00	46.80	47.60	48.40	49.90	51.40	53.84	55.88	55.88	55.88	6.44	7.2	
Durée de fonctionnement en (h)	10	20	30	40	50	60	70	10	20	30	40	50	60	70	10	20	30	40	50	60	70	10	20	30	40	50	60	70
Dates de contrôle	09.05.90	17.06.90	14.06.90	28.06.90	06.07.90	07.07.90	08.07.90	29.05.90	04.06.90	14.06.90	28.06.90	06.07.90	07.07.90	08.07.90	29.05.90	09.06.90	14.06.90	28.06.90	06.07.90	07.07.90	08.07.90	29.05.90	09.06.90	14.06.90	28.06.90	06.07.90	07.07.90	09.07.90

2.3.2.2. Commentaires

Bien que les comportements des quatre types de goutteurs testés se sont montrés différents les uns des autres, l'analyse de la variance des débits nous permet de constater que les débits des émetteurs ont évolué, de manière globale, selon une distribution normale (voir annexe 7).

Pour cela, il est nécessaire de les examiner cas par cas :

- Goutteur I :

[Fabrication Américaine, type auto-régulant, $q_n = 4.098 \text{ l/h}$]

Le goutteur I, malgré ses bonnes performances techniques et technologiques, son auto-régulation a montré un taux de colmatage égal à 30% des échantillons testés après 140 heures de service (ou de 3381 d'eau écoulés).

L'écart du débit moyen par rapport au débit nominal passe de 1,66% pour les 10 premières heures à 74% après 70 heures de service tableau n°49.

Le coefficient de variation, selon les débits moyens passe de 6,6% en début d'expérience à 83,6% en fin d'expérience.

L'analyse statistique du facteur temps (annexe n°7) montre que la majorité des échantillons se sont comportés de la même manière dans l'intervalle de temps 50h-100h.

Ce comportement a permis l'apparition d'un groupe de goutteurs (CDE) dont le débit oscille entre 2,4 et 2,081/h. C'est à dire un comportement plus ou moins homogène.

Les débits moyens ont évolué après 140 heures de fonctionnement de 4,03 à 1,76 l/h. Soit une chute de débit due au colmatage de 56,31%. Cette tendance commune du comportement à l'eau usée épurée limitée entre 50h et 100h laisse supposer que ce type de goutteurs a réagit mal à l'état neuf et après 100h de fonctionnement, à la REUE.

L'analyse du facteur emplacement montre clairement que ce type de goutteur réagit normalement à l'emplacement sur la rampe où les goutteurs en debut de rampe (groupe A, voir annexe n°7) et les goutteurs en fin de rampe (groupe C) réagissent différemment. Le colmatage de ces derniers est nettement plus accentué, ce qui corrobore les résultats de l'analyse théorique développée au chapitre IV. Rappelons qu'en fin de rampe, le régime d'écoulement est inévitablement laminaire.

En conclusion, nous pouvons dire que ce goutteur et au vue de la quantité des eaux utilisées ne peut être recommandé, car si le taux de colmatage est acceptable (30%), le coefficient de variation est très élevé et cause ainsi des dégâts aux cultures lors de son utilisation.

Goutteur II

[Fabrication STTF, type auto-régulant $q_n = 4,65$ l/h]

Le goutteur II, qui rappelons le, a des caractéristiques techniques assez bonnes, a réagit relativement bien à l'obstruction que le goutteur I.

En effet, après 140h de service (ou 390 litres de volume d'eau usée épurée écoulés), le goutteur II a été affecté dans 10% des échantillons après 130h et 20% après 140heures. Voir tableau N°50.

La chute du debit moyen par rapport au q_n progresse de 18,4% après 10h de service à 52% en fin d'expérience avec une pointe de 83%. tableau N°50 et fig n°-33.

L'analyse de la variation du debit moyen (C_v) montre que l'hétérogénéité des debits de ce type de goutteur est très élevée en début d'expérience (32%) et s'accroît au cours du service. Les résultats se confirment lors de l'analyse de la variance des valeurs du debits relatifs au facteur temps d'où l'apparition de 6 groupes de goutteurs A, AB, BC, CD, DE, et E avec dominance du groupe E.

La majorité donc des échantillons manifeste une vulnérabilité à l'obstruction après 6h de fonctionnement où les débits chutent de 2,54 à 2,22 l/h par rapport à q_n avec un débit moyen en début d'expérience égal à 3,8 l/h.

L'effet de l'emplacement ne semble pas se repercuter pour ce type de goutteur et l'on constate un classement des goutteurs très homogène selon la position (voir annexe n°7).

Cette hétérogénéité semble être liée à la qualité de fabrication du goutteur.

En définitive, nous pouvons dire que malgré le faible taux d'obstruction des goutteurs, il est prudent de ne pas recommander ce type de goutteur en REUE (conditions de l'expérience) en raison de l'hétérogénéité très élevée des débits.

Goutteurs III

- [Fabrication STTF - non auto-régulant - $q_n = 1,168$ l/h]

Les débits moyens de ce type de goutteur ont regressé de 1,106 l/h après 10h de service à 0,27 l/h après 140h de service (ou 79 l de volumé écoulé) avec des chutes de débit par rapport à q_n respectivement égales à 5,3% et 76%. Le maximum de chute étant 143%, voir tableau N°51 et fig n°-33.

Les coefficients de variation calculés à partir du débit moyen (\bar{q}), faibles au départ 14% ont dépassé 110% en fin d'expérience.

Le pourcentage des goutteurs obstrués après 140l a atteint 50% des échantillons. C'est à dire, dans la pratique, au bout d'une campagne d'irrigation nous aurons la moitié du réseau "bouché".

La chute des débits s'est faite de manière graduelle d'où la fabrication d'un groupe dominant (B) et d'un groupe singulier A.

Selon le facteur emplacement, les débits ont regressé progressivement depuis la tête à la fin de rampe de 0,166 l/s.

En guise de recommandation, nous pouvons dire que le goutteur III et en dépit de sa qualité technique et technologique est a déconseillés pour la REUE.

Goutteur IV

[fabrication STTF - non régulant- $q_n = 1,306$ l/h]

En fournissant un débit moyen de 1,28 l/h après 10h de service, le goutteur IV ne peut débiter que 0,72 l/h en fin d'expérience. L'écart a augmenté respectivement de 1,68% à 68% (tableau N°52) d'où un coefficient de variation calculé à partir des débits moyens variant entre 25% et 84%.

Malgré le faible pourcentage d'obstruction 10% à 70h de service, ces goutteurs comme le goutteur III, ne permet de faire l'objet d'un choix pour la REUE en raison de l'hétérogénéité des débits.

L'analyse de la variance a permis de constater 5 groupes homogènes dont les débits varient de 1,17 l/h pour le groupe A à 0,671/h pour le groupe C. Il apparait donc que l'obstruction ne s'est pas faite de manière régulière dans le temps pour tous les goutteurs d'où un coefficient de variation moyen de 25%.

Pour l'emplacement, la tendance que l'obstruction affecte les goutteurs en fin de rampe s'est manifestée puisque les groupes BC-CD et D (voir annexe n°7) sont des goutteurs de fin de rampe ayant une chute de débit importante (82,43%).

Tableau N°49 : Comportement du goutteur I à l'utilisation des eaux usées épurées (qn = 4,098 l/h)

Contrôles	Dates		
	N°		
Debit moy. \bar{q} (l/h)	1	29.05.90	4.030
	2	09.06.90	3.202
	3	16.06.90	2.798
	4	28.06.90	2.650
	5	06.07.90	2.400
	6	13.07.90	2.370
	7	20.07.90	2.350
	8	30.07.90	2.170
	9	10.08.90	2.130
	10	20.08.90	2.080
	11	30.08.90	2.000
	12	10.09.90	1.940
	13	20.09.90	1.829
	14	30.09.90	1.760
Ecart $\bar{q} - q_n$ $\frac{q_n}{qn}$ chute du débit/ q_n .			-1.66
			-27.98
			-46.46
			-54.64
			-70.75
			-72.91
			-74.38
			-47.04
			-48.02
			-49.24
			-51.49
			-52.65
			-53.36
			-57.05
Ecart type S(q)			0.265
			1.341
			1.541
			1.672
			1.825
			1.820
			1.795
			1.650
			1.659
			1.613
			1.567
			1.512
			1.479
			1.471
Cv. 100			6.593
			41.88
			55.09
			63.10
			76.07
			76.41
			76.42
			76.03
			77.90
			77.54
			78.35
			77.90
			80.86
			83.59
% des goutteurs obstrués			0
			0
			0
			20
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
			30
Durée de fonctionnement (h)			10
			20
			30
			40
			50
			60
			70
			80
			90
			100
			110
			120
			130
			140
Volumes écoulés (l)			40.30
			72.32
			100.30
			126.8
			150.8
			174.5
			198.0
			219.70
			241.0
			261.8
			281.8
			301.2
			319.49
			337.09

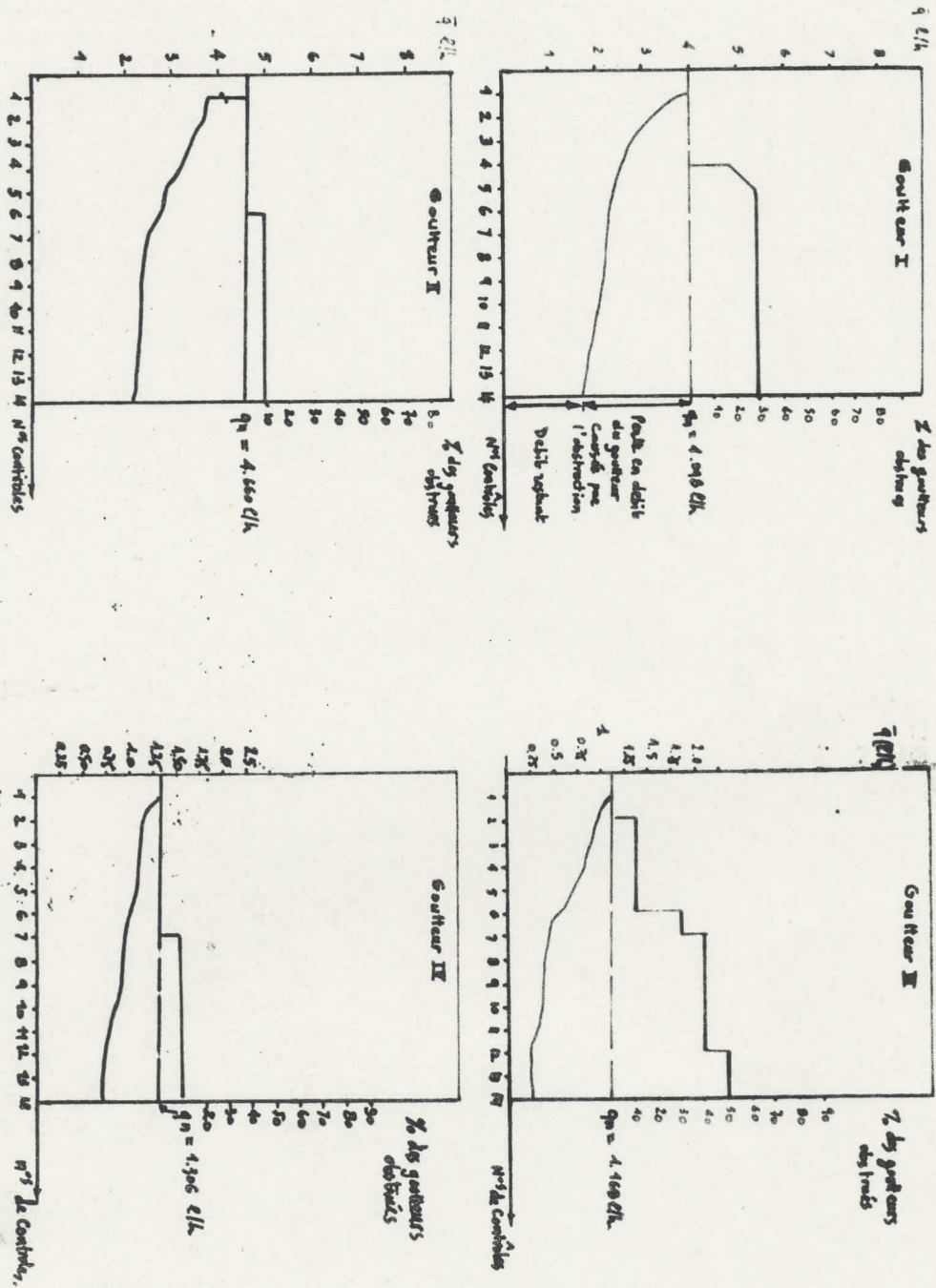
Commentaires : Le goutteur I, malgré ses bonnes performances techniques et son autorégulation, s'est colmaté rapidement; 30 % des échantillons testés ont été atteints après 140h de fonctionnement. L'hétérogénéité du débit s'est élevée à 84 %

Tableau N° 50 : Comportement du goutteur II à l'utilisation des eaux usées épurées (qn = 4.66 l/h)

Contrôles	Dates															
	N°															
Debit moy. \bar{q} (l/h)	1	29.05.90	3.804	3.720	3.408	3.146	2.950	2.730	2.540	2.490	2.450	2.410	2.370	2.360	2.310	2.230
	2	09.06.90														
	3	16.06.90														
	4	28.06.90														
	5	06.07.90														
	6	13.07.90														
	7	20.07.90														
	8	30.07.90														
	9	10.08.90														
	10	20.08.90														
	11	30.08.90														
	12	10.09.90														
	13	20.09.90														
	14	30.09.90														
	Ecart $\frac{\bar{q}-q_n}{q_n} \cdot 100$ Chute du débit/ q_n .			-18.37	-23.60	-36.73	-48.12	-57.96	-70.69	-83.46	-46.56	-47.42	-48.28	-49.14	-49.35	-50.42
Ecart type S(q)		1.223	1.045	1.099	1.094	1.080	1.285	1.342	1.361	1.343	1.457	1.351	1.383	1.427	1.481	
Cv. 100		32.15	27.73	32.26	34.78	36.62	47.09	52.85	54.67	54.83	60.45	57.00	58.60	61.79	66.42	
% des goutteurs obstrués		0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20
Durée de fonctionnement (h)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
Volumes écoulés (l)		38.04	75.74	109.82	141.29	170.78	198.08	223.48	248.38	272.88	296.98	320.68	344.28	367.38	389.68	

Commentaires : L'hétérogénéité a atteint 67 % après un volume (d'eau usée épurée) écoulé de 390 l. Malgré que ce goutteur soit auto-régulant, le pourcentage d'obstruction est relativement élevé par rapport aux goutteurs à circuit long

Fig N°33 : Phénomène d'obstruction des goutteurs
(Evaluation quantitative)



3. Conclusion

Ce que nous retenons de ce chapitre, c'est que malgré le pourcentage des goutteurs obstrués, parfois faible, nous ne pouvons opter pour le choix de ces goutteurs en REUE, car l'hétérogénéité augmente dès que l'on dépasse 10h de service. Ce qui se repercute négativement sur la répartition de l'eau aux plantes qui doit être homogène.

Cette hétérogénéité des débits en fonction du temps à concerner beaucoup plus les goutteurs à débit nominale élevé que les goutteurs à qn faible.

Ceci nous permet de dire qu'on ne peut fixer les normes d'obstruction en fonction uniquement du temps mais aussi en tenant compte du volume d'eau écoulé. A temps égal, les volumes délivrés par les quatres goutteurs sont différents, d'où une vitesse de colmatage différente qui concerne en premier lieu les goutteurs à débit nominal élevé que les goutteurs à débit nominal faible.

Il est cependant utile de préciser et sans optimisme que les goutteurs I et II peuvent être vraisemblablement utilisés en REUE, en raison de leur auto-régulation, en raison de la possibilité de nettoyage moyennant d'autres conditions d'utilisation telles que : filtration poussée, javélisation, forte pression. Ces résultats laissent la voie ouverte à d'autres recherches.

L'effet de l'emplacement des goutteurs sur le débit a été mis en évidence pour les quatres types de goutteurs. Cependant il concerne beaucoup les goutteurs auto-régulants que les non-auto-régulant. Nous savons que les débits de ces derniers augmentent considérablement avec la pression alors les goutteurs auto-régulants ont un débit constant (voir courbes caractéristiques des goutteurs). Cette différence pourrait être à l'origine de ce phénomène.

En raison de l'influence du facteur emplacement sur le colmatage des goutteurs, il semble utile de prévoir, dans le cas de la REUE, des rampes assez longues afin de favoriser les tronçons de rampes à écoulement turbulent qui atténue sans doute le colmatage.

In 1868, victo Hugo gave voice to this point of view in
les miserables : "All the human and animal manure which the world
loses... by discharge of sewage to rivers... if returned to the land
instead of being thrown into the sea, would suffice to nourish the
world".

Chapitre VI : L'impact de la REUE sur la culture du maïs, sur le régime d'irrigation et sur le sol

Introduction

Le recul que prennent certains agriculteurs, certains scientifiques vis à vis de la "domestication" de la REUE, nous exhorte à se poser un certain nombre de questions à savoir :

- Qu'apporte la REUE de positif ou de négatif à la culture du maïs ?
- Comment évolue le régime d'irrigation en REUE en utilisant la m.I ?
- La REUE a t'elle un impact sur le sol cultivé ?

Pour être clair et précis et en raison de l'inter-dépendance des questions, du volume et de la complexité du travail que ça exige, les réponses à ces interrogations, qui constituent notre objectif dans ce chapitre, ne peuvent être que générales. Par conséquent, elles constituent un point de départ à d'autres recherches complémentaires.

A. L'impact de la REUE sur la culture du maïs

1. Choix de la culture

Le choix de la culture du maïs se justifie par son importance dans l'alimentation humaine et animale, et par la position du fruit par rapport au sol étant donné que la contamination par les eaux usées est très limitée, voire inexistante en m.I.

L'Algérie consomme beaucoup de cette culture : elle importe entre 800.000 et 900.000 t/an de maïs* pour un coût annuel d'importation en devise d'environ 10.530.000 dollars US (tableau N°53).

Malgré l'importance du maïs dans l'alimentation en aviculture et en élevage bovin (voir tableau n°54), la culture du maïs ne couvre que 3000 à 4000 ha/an*.

La culture du maïs est favorable dans différentes régions d'Algérie et surtout en zones côtières. Ces exigences minimales sont :

* ministère de l'agriculture . 1990 .

- Profondeur du sol : 40 à 150 cm
- Pluviométrie minimale : 80 à 100 mm (stade floraison)
- Température journalière moyenne : 12°C (semis).

Sur le plan des exigences en eau, le maïs (selon Doorenbos, 1980 in (43)) est un très efficace rentabilisateur du mètre cube d'eau, mais vulnérable au déficit durant la floraison où un stress hydrique peut faire chuter le rendement de 50 % .

Tableau N°53 : Prévision des importations du maïs et évolution des prix

Année	1974	1975	1976	1977	1979	1980
Importation t/an	15.000	19.000	30.000	62.000	63.000	81.000
Prix en \$ US/t	—	—	—	—	—	—

Suite

Année	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Importation t/an	558.000	-	-	-	-	878.000
Prix en \$ US/t	—	112	88	76	107	117

source : (*)

Tableau N° 54 : Les besoins en maïs pour la fabrication des aliments de bétail

	O.N.A.B.	Autres secteurs	Total
Besoins en maïs (tonnes)	934.090	338.000	1.272.646

Source : (*)

IL est évident, compte tenu de cette dépendance, de redoubler les efforts pour combler les déficits et diminuer les importations.

2. Conduite de la culture du maïs

Le semis du maïs a été entrepris de 28.06.1990 dans des fertil-pots contenant du terreau et arrosés régulièrement à l'eau douce du robinet.

Les fertil-pots ont été déposés dès le départ sous abri-serre afin d'éviter les phénomènes de stress dûs aux changements du milieu.

Quand les plants avaient atteint la taille de 10 à 15cm nous avons procédé au repiquage le 15.07.1990 (soit 29 jours après le semis) dans des pots* en plastique pour y rester durant toute l'expérimentation.

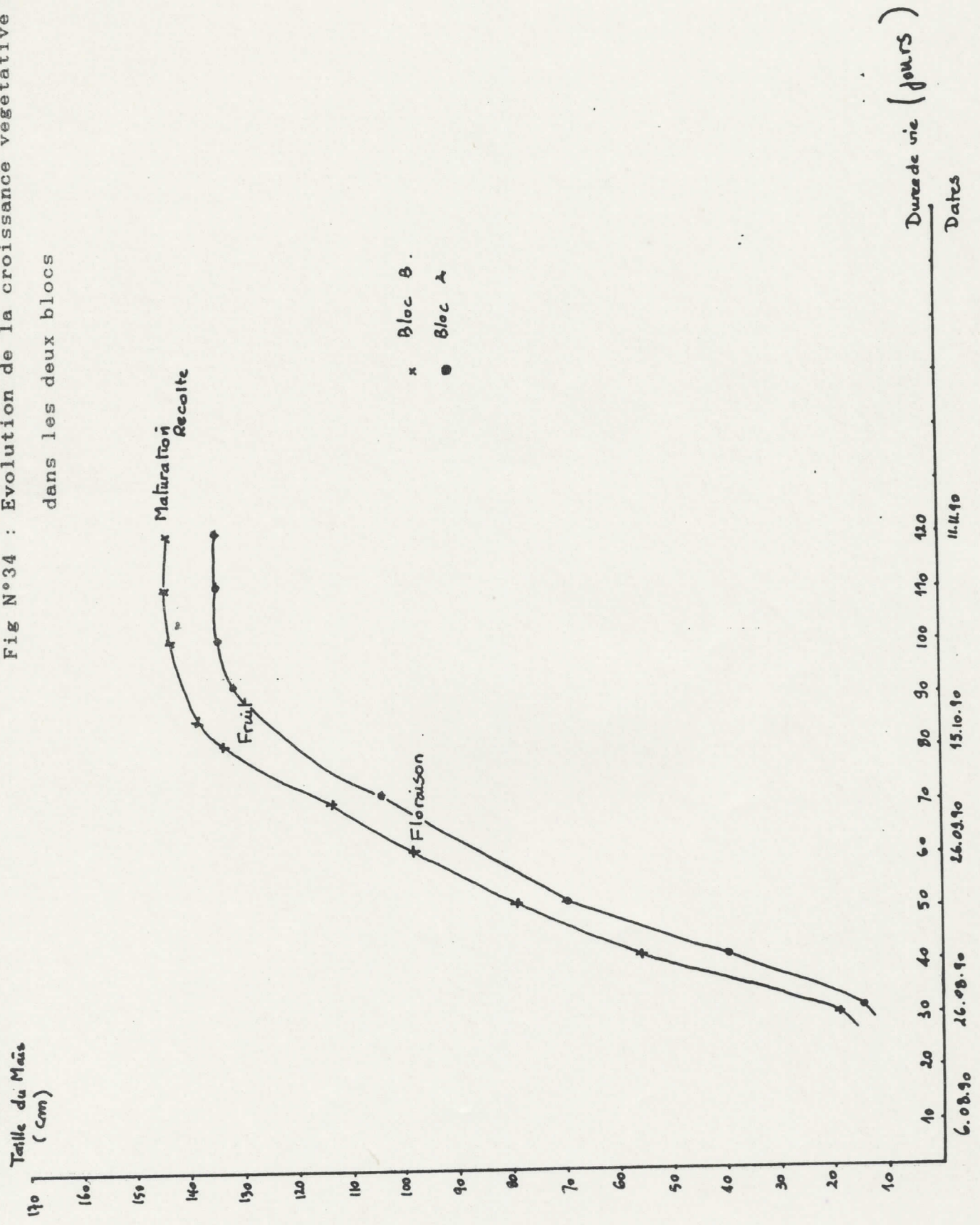
Nous avons utilisé un maximum de pots (soixante) afin de pouvoir éliminer au fur et à mesure de l'évolution des plantes, des échantillons en faisant des prises d'humidité du sol à l'intérieur du pot. Cette destruction nous a permis de contrôler le niveau de développement des racines.

L'irrigation des plantes de maïs a été maintenue, avec de l'eau douce jusqu'au 03.08.1990. Une précaution nécessaire afin d'éviter d'éventuels problèmes de stress, de toxicité qui pourraient être dûs à l'excès des éléments fertilisants contenus dans les eaux usées épurées, étant donné la sensibilité des jeunes plants.

Nous avons jugé utile de démarrer l'arrosage localisée à l'eau usée épurée de la station, à l'aide de notre pilote, une semaine après le repiquage.

Parallèlement, un échantillon témoin constitué de 60 plants a été séparé du lot afin de pouvoir mettre en évidence l'effet singulier de la REUE sur le développement des plants. Le mode d'irrigation n'étant pas le même. Le développement des plants, du maïs, constitués en

Fig N°34 : Evolution de la croissance végétative du maïs dans les deux blocs



deux blocs : bloc A irrigué à l'eau douce ; bloc B : irrigué à l'eau usée épurée, représentés sur la figure N°34 mettant en évidence la différence.

Pour les rendements en fin d'expérimentation, les résultats sont présentés dans les tableaux N°55 et N°56

Nous avons conduit volontairement la culture sans aucun apport en fertilisant pour les deux blocs pour apprécier l'apport en fertilisant des eaux usées épurées.

3. Résultats

Tableau N°55 : Rendements du maïs - Bloc A

N° pot Rdt\	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy.
Kg/pot	0,28	0,030	0,25	0,23	0,25	0,27	0,20	0,22	0,15	0,30	0,245
qx/ha	50,9	54,5	45,4	41,4	45,8	49,0	36,3	40	27,2	54,5	44,5
T/ha	5,09	5,45	4,54	4,18	4,54	4,90	3,63	4,0	2,72	5,45	4,45

Tableau N°56 : Rendements du maïs - Bloc B

N° pot Rdt/	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy
Kg/pot	0,25	0,30	0,36	0,04	0,40	0,35	0,47	0,35	0,37	0,25	0,35
qx/ha	45,4	54,5	65,4	72,7	27,7	63,6	85,4	63,6	67,2	45,4	63,6
T/ha	4,54	5,45	6,54	7,27	7,27	6,36	8,54	6,36	6,72	4,54	6,36

4. Commentaires

En observant le graphique n°34, nous constatons que les deux courbes A et B sont parallèles mettant en évidence un écart synonyme d'une différence dans la croissance végétale des plants de maïs dans les deux blocs.

La différence est matérialisée à l'échelle de la plante par un bon développement de la partie végétative (feuillage dense, couleur verte, taille importante) des plants du bloc B irrigués à l'eau usée épurée. Il faut signaler qu'au cours de l'expérience, aucune anomalie phénotypique n'a été constatée pour les plants du bloc B.

Dans une première étape, il nous a semblé logique de croire, sans optimisme, que ce développement est relatif à la REUE caractérisée par l'abondance des éléments fertilisants contenus dans les eaux usées épurées.

Parallèlement, les plants témoins (bloc A) irrigués à l'eau du robinet ont montré un développement végétatif relativement insuffisant où l'écart avec le bloc B se creuse dans la phase de fructification.

Cette constatation est confirmée par les résultats des rendements (tableau n°55) compte tenu du gain dans les rendements évalué à 1,9T/ha dans le bloc B.

Ce dernier résultat représente un taux d'accroissement par rapport au bloc A, de 42%.

5. Conclusion

L'utilisation des eaux usées épurées a permis d'accroître le développement végétatif des plants du maïs ainsi que les rendements. L'accroissement du rendement relatif au bloc B par rapport au bloc A a été évalué à 42% soit 1,9T/ha

b. Impact sur le Régime d'irrigation du maïs

1. Conditions expérimentales

Le sol utilisé dans les pots est représentatif des sols de la région de la station. Sa texture, ainsi que sa structure ont été déterminées.

La composition de cet échantillon du sol de la Mitidja a révélé la dominance des argiles et des limons d'où sa classe d'argilo-limon-euse sur le triangle textural.

Les autres caractéristiques déterminées sont :

- La densité apparente à l'état sec (ou poids spécifique du sol) $a = 1,26\text{g/cm}^3$
- L'humidité équivalente (capacité de rétention de ce sol)

Hr en % = 30 .

L'humidité au point de flétrissement Hf en % = 16,5 . Ces caractéristiques sont déterminantes dans le calcul de la RU (réserve utile) et la RFU (réserve facilement utilisable) liées directement au développement racinaire de la plante. A ce propos, cinq niveaux de profondeur racinaire (Pr) ont été retenus : 5cm - 10cm - 15cm et 20cm durant le cycle développement de la plante.

2. Principe de calcul de la dose d'arrosage

Ces caractéristiques préalablement déterminées nous ont permis d'approcher la valeur de la dose d'arrosage qui constitue la réserve d'eau disponible (m^3/ha) pour les plantes dans un "sol" de profondeur Pr variable dans le temps.

La relation que nous avons utilisée pour la détermination de la dose d'arrosage (m) est la suivante :

$$m (\text{m}^3/\text{ha}) = 10^4 \cdot \text{Pr} \cdot (\text{Hr} - \text{Hf}) \cdot a$$

Sachant que :

$$\text{Hf} = 0,55 \text{ Hr}$$

$$\text{Hr} - \text{Hf} = 0,45 \text{ Hr}$$

$$\text{d'où : RU } (\text{m}^3/\text{ha}) = 10^4 \cdot \text{Pr} \cdot 0,45 \text{ Hr} \cdot a = 4500 \text{ Pr} \cdot \text{Hr} \cdot a$$

$$\text{et : RFU } (\text{m}^3/\text{ha}) = \frac{2}{3} \text{ RU} = 3000 \text{ Pr} \cdot \text{Hr} \cdot a$$

Ces méthodes sont certes classiques (52) dans le calcul des doses d'arrosage néanmoins, elles restent serviables et utilisables là où les conditions expérimentales "confortables" font défaut, comme c'est le cas.

Ainsi, la dose pratique d'arrosage a pour valeur maximale la RFU correspondant à la profondeur explorée par les racines (Pr) que nous évaluons à chaque destruction de pots. Voir tableau N°57

La capacité d'emmagasinement d'eau dans le "sol" qui doit refléter l'équilibre qui s'établit entre les débits sortants (pertes d'eau) et les débits entrants (apports), eu égard au cumul d'erreurs et de simplifications à différents niveaux, n'est cependant qu'une valeur approximative.

Le contrôle systématique du taux d'humidité dans le sol par la méthode gravimétrique nous conduit à la méthode grapho-analytique pour la détermination du régime d'irrigation.

Ainsi, la dose globale d'irrigation M serait la somme des doses régulières d'arrosages journaliers (m) :

$$M = \sum_{i = \text{initiale}}^{\text{finale}} m. \text{ (en m}^3\text{/h)}$$

Connaissant les apports quotidiens des plantes, nous adaptons le débit des goutteurs par un réglage de la pression et par la durée de fonctionnement du système de m.I.

Tableau N°57 : Evolution de la RU, de la RFU selon les quatres niveaux de Pr

Pr en (cm)	RU		RFU mm	RFU mm/cm de Pr	Phases de développement de la plante Dates
	m ³ /ha	mm			
5	85	8,5	6	1,2	Développement herbacé-stade 4 feuilles du 28.07. au 28.08.90
10	170	17	11	1,1	Stade 8 feuilles du 28.08. au 28.09.90
15	255	25,5	17	1,13	Floraison du 28.09.au 28.10.90
20	340	34	23	1,15	Fructification-maturation 28.10. au 11.11.90

3. Méthode grapho-analytique ou méthode de Kostiakov

La méthode de Kostiakov permet de déterminer le régime d'arrosage d'une culture en place.

Son principe est basé sur le bilan hydrique du sol, partie active prospectée par les racines de la culture, en une période déterminée.

Ainsi, le contrôle régulier du régime d'humidité dans la couche active, réalisé soit à l'aide d'humidimètres, de tensiomètres ou à défaut de moyens classiques mais précis par la méthode gravimétrique.

Néanmoins, la méthode, gravimétrique bien que ce soit une méthode de référence, n'est pas pratique et efficace dans la conduite des irrigations. Elle exige une destruction du sol en place et fait perdre beaucoup de temps. (Décalage de 24h entre résultat de l'humidité et apport d'eau correspondant).

4. Résultats

Tableau N°58 : Consommation en eau du maïs durant l'expérimentation

bloc A

1er Mois : du 03/08/90 au 03/09/90

N° Irrig	Hv (%)	Apport d'eau (l)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau/RFU(%)	Consom.-d'eau Cumulée (mm)	TC°	Date	Obs.
	Pr=5cm					28		
1	20.2	0.33	6.0	100	6	29	03.08.90	
2	23.5	0.22	4.0	66.66	10	30	05.08.90	RFU=6mm
3	23.7	0.21	3.9	65	13	27	06.08.90	
4	24.2	0.20	3.8	63.33	17	28	08.08.90	St.4
5	24.2	0.20	3.8	63.33	21	30	10.08.90	feuilles
6	24.4	0.19	3.5	58.33	25	32	12.08.90	
7	24.3	0.19	3.6	60.00	28	32	13.08.90	
8	24.3	0.19	3.6	60.00	32	30	14.08.90	
9	24.3	0.20	3.7	61.6	35	28	16.08.90	
	Pr=10cm							
10	26.9	0.20	3.8	34.5	39	27	17.08.90	
11	26.5	0.21	3.9	35.45	43	28	19.08.90	RFU=11mm
12	26.5	0.23	4.2	38.18	47	30	20.08.90	
13	25.7	0.27	5.0	45.45	52	32	21.08.90	
14	24.8	0.33	6.0	54.54	58	28	24.08.90	
15	24.8	0.33	6.0	54.54	64	28	26.08.90	
16	23.3	0.44	8.0	72.72	72	29	27.08.90	
17	23.3	0.44	8.0	72.72	80	25	28.08.90	
18	23.2	0.44	8.0	72.72	88	28	28.08.90	
19	24.2	0.38	7.0	63.63	95	26	30.08.90	
20	23.3	0.44	8.0	72.72	103	26	02.09.90	

- Besoins en eau mensuel : 103 mm

- Consommation moyenne journalière en eau : 3.46 mm.

- Fréquence théorique des irrigations : 1/j.de 5,15 mm (50 m³/ha).

Suite du Tableau N°58

2ème Mois : du 03/09/90 au 03/10/90

N° Irrig	Hv (%)	Apport d'eau (l)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau/RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	TC°	Date	Obs.
	Pr=15cm							
21	25.2	0.44	8.0	47.00	111	23	03.09.90	RFU=17mm
22	25.2	0.44	8.0	47.00	119	25	05.08.90	
23	24.5	0.49	9.0	52.49	128	24	07.09.90	
24	24.5	0.49	9.0	52.82	137	25	09.09.90	
25	24.2	0.55	10.0	58.82	147	26	11.09.90	
26	24.2	0.55	10.0	58.82	157	27	13.08.90	
27	23.5	0.60	11.0	64.70	167	26	14.09.90	
28	23.5	0.60	11.0	64.70	178	28	16.09.90	
29	23.5	0.60	11.0	64.70	189	32	17.09.90	
30	23.5	0.60	11.0	64.70	200	32	18.09.90	
31	23.5	0.60	11.0	64.70	211	34	19.09.90	
32	23.1	0.66	12.0	70.58	223	35	20.09.90	
33	23.1	0.66	12.0	70.58	235	30	22.09.90	
34	23.1	0.66	12.0	70.58	247	30	23.09.90	
35	23.1	0.66	12.0	70.58	259	29	24.09.90	
36	22.5	0.72	13.0	76.47	272	30	26.09.90	
37	22.5	0.77	14.0	82.35	286	28	28.09.90	
38	22.0	0.77	14.0	82.35	300	29	29.09.90	
39	21.5	0.83	15.0	82.32	315	29	30.09.90	
40	21.5	0.83	15.0	88.23	330	28	03.10.90	

Besoins en eau mensuel : 227mm

Consommation moyenne journalière en eau : 7.5mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 11.35mm.

Suite du Tableau N°58

3ème Mois : du 03/10/90 au 03/11/90

N° Irrig	Hv (%)	Apport d'eau (1)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau/RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	TC°	Date	Obs
	Pr=20cm							
41	24.1	0.83	15.0	75	345	31	04.10.90	RFU=20mm
42	24.1	0.83	15.0	75	360	29	05.10.90	
43	24.1	0.83	15.0	75	375	25	07.10.90	
44	23.7	0.88	16.0	80	391	26	09.10.90	
45	23.7	0.88	16.0	80	407	28	10.10.90	
46	23.7	0.88	16.0	80	423	30	11.10.90	
47	23.7	0.94	17.0	85	440	28	12.10.90	
48	20.6	0.94	17.0	85	457	27	14.10.90	
49	20.6	0.94	17.0	85	474	29	20.10.90	
50	20.6	0.94	17.0	85	491	28	18.10.90	
51	22.8	0.99	18.0	90	509	29	20.10.90	
52	22.8	0.99	18.0	90	527	30	21.10.90	
53	22.8	0.99	18.0	90	545	31	22.10.90	
54	22.8	0.99	18.0	90	563	34	24.10.90	
55	22.5	1.04	19.0	95	582	30	26.10.90	
57	22.1	1.10	20.0	100	621	34	30.10.90	

Besoins en eau mensuel : 291mm

Consommation moyenne journalière en eau : 9.7mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 17.11mm

Suite tableau N°58

4ème Mois : du 03/11/90 au 11/11/90

N° Irrig	Hv (%)	Apport d'eau (1)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau/RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	TC°	Date	Obs
58	21.7	1.16	22.0	110	643	33	03.11.90	
59	21.3	1.21	22.0	110	665	31	04.11.90	
60	21.7	1.16	21.0	105	686	32	05.11.90	
61	21.7	1.16	21.0	105	707	29	06.11.90	
62	22.1	1.10	20.0	100	727	29	07.11.90	
63	22.8	0.99	18.0	90	745	28	08.11.90	
64	23.7	0.88	16.0	80	761	27	09.11.90	
65	23.7	0.88	16.0	80	777	28	10.11.90	
66	23.7	0.88	16.0	80	793	27	11.11.90	

Besoins en eau mensuel : 172mm

Consommation moyenne journalière en eau : 21.5mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 19.11mm.

Tableau N°59: Consommation en eau du maïs durant l'expérimentation

1er Mois : du 03/08/90 au 03/09/90 | Bloc B
qn = 1,311/h

N° Irrigation	Hv (%)	Apport d'eau (l)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	Durée d'arr- osage (mn)	Date	Obs
	Pr=5cm							
1	20.0	0.330	6.0	100.0	6	15	03.08.90	
2	23.5	0.220	4.0	66.6	10	10	05.08.90	RFU=6mm
3	24.4	0.19	3.5	58.3	13	09	06.08.90	
4	24.6	0.18	3.4	56.6	16	08	08.08.90	St.4
5	24.3	0.20	3.6	60.0	20	09	10.08.90	feuilles
6	24.4	0.19	3.5	58.3	24	08	12.08.90	
7	24.4	0.19	3.5	58.3	27	08	13.08.90	
8	24.4	0.19	3.6	58.3	31	08	14.08.90	
9	24.3	0.19	3.6	58.3	34	09	16.08.90	
	PR=10cm							
10	26.4	0.19	3.6	32.7	38	09	17.08.90	PR=10cm
11	26.2	0.24	4.5	40.9	42	11	19.08.90	RFU=11mm
12	26.5	0.22	4.0	36.4	46	10	20.08.90	
13	26.5	0.22	4.0	36.4	50	10	21.08.90	
14	26.5	0.22	4.0	36.4	54	10	24.08.90	
15	25.7	0.27	5.0	45.4	59	12	26.08.90	
16	25.7	0.27	5.0	45.4	64	12	27.08.90	
17	24.8	0.33	6.0	54.5	70	16	28.08.90	
18	24.2	0.38	7.0	63.6	77	17	28.08.90	
19	24.2	0.38	7.0	63.6	84	17	30.08.90	
20	23.3	0.44	8.0	72.7	92	20	02.09.90	

Besoins mensuels en eau : 92mm

Consommation moyenne journalière en eau : 3.09mm

Fréquence théorique des irrigations: 1/j.avec 4,63mm

Suite tableau n° 59.

N° Irrigation	Hv (%)	Apport d'eau (1)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	Durée d'arrosage (mn)	Date	Obs
	Pr=5cm							
21	25.2	0.44	8	47.0	100.7	20	03.09.90	Pr=5cm
22	25.2	0.44	8	47.0	108.7	20	05.09.90	RFU=6mm
23	25.2	0.44	8	47.0	116.7	20	07.09.90	
24	25.2	0.44	8	47.0	124.7	20	09.09.90	St.4
25	25.2	0.44	8	47.0	132.7	22	11.09.90	feuilles
26	24.5	0.49	9	52.9	141.7	22	13.09.90	
27	24.5	0.49	9	52.9	150.7	22	14.09.90	
28	24.5	0.49	9	52.9	159.7	22	16.09.90	
29	24.5	0.49	9	52.9	168.7	25	17.09.90	
30	24.5	0.55	10	58.8	178.7	25	18.09.90	
31	24.5	0.55	10	58.8	188.7	25	19.09.90	RFU=11mm
32	24.5	0.55	10	58.8	198.7	25	20.09.90	
33	24.5	0.55	10	58.8	208.7	25	22.09.90	
34	24.5	0.55	10	58.8	218.7	25	23.09.90	
35	24.5	0.55	10	58.8	228.7	25	24.09.90	
36	24.5	0.55	10	58.8	238.7	28	26.09.90	
37	24.5	0.60	11	64.7	249.7	28	28.09.90	
38	23.5	0.60	11	64.7	260.7	28	29.09.90	
39	23.5	0.60	11	64.7	271.7	28	30.09.90	
40	23.5	0.60	11	64.7	282.7	28	03.09.90	

Besoins mensuels en eau : 190mm

Consommation moyenne journalière en eau : 6.3mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 9.5mm

Suite tableau n° 59.

N° Irrigation	Hv (%)	Appor d'eau (1)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau RFU(%)	Consom d'eau Cumulée (mm)	Durée d'arrosage (mn)	Date	Obs
	Pr=20cm							Pr=20cm
41	25.75	0.60	11	47.8	293	28	04.10.90	
42	25.75	0.60	11	47.8	304	28	05.10.90	RFU=23mm
43	25.25	0.66	12	52.2	316	30	07.10.90	
44	25.25	0.66	12	52.2	328	30	09.10.90	
45	25.25	0.66	12	52.2	340	30	10.10.90	
46	25.25	0.66	12	56.5	352	30	11.10.90	
47	25.25	0.71	13	56.5	365	33	12.10.90	
48	25.25	0.71	13	56.5	378	33	14.10.90	Fructification
49	24.80	0.71	13	60.8	319	33	16.10.90	
50	24.50	0.77	14	60.8	405	33	18.10.90	
51	24.50	0.77	14	60.8	419	33	20.10.90	
52	24.50	0.77	14	60.8	433	33	21.10.90	
53	24.50	0.77	14	65.2	447	33	22.10.90	
54	24.00	0.82	15	65.2	462	38	24.10.90	
55	24.00	0.82	15	65.2	477	38	26.10.90	
56	24.00	0.82	15	65.2	492	38	28.10.90	
57	23.60	0.82	16	69.5	508	40	30.10.90	

Besoins mensuels en eau : 226mm

Consommation moyenne journalière en eau : 7.5mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 13,29mm.

Suite du Tableau N°59

4ème Mois : du 30/11/90 au 11/11/90

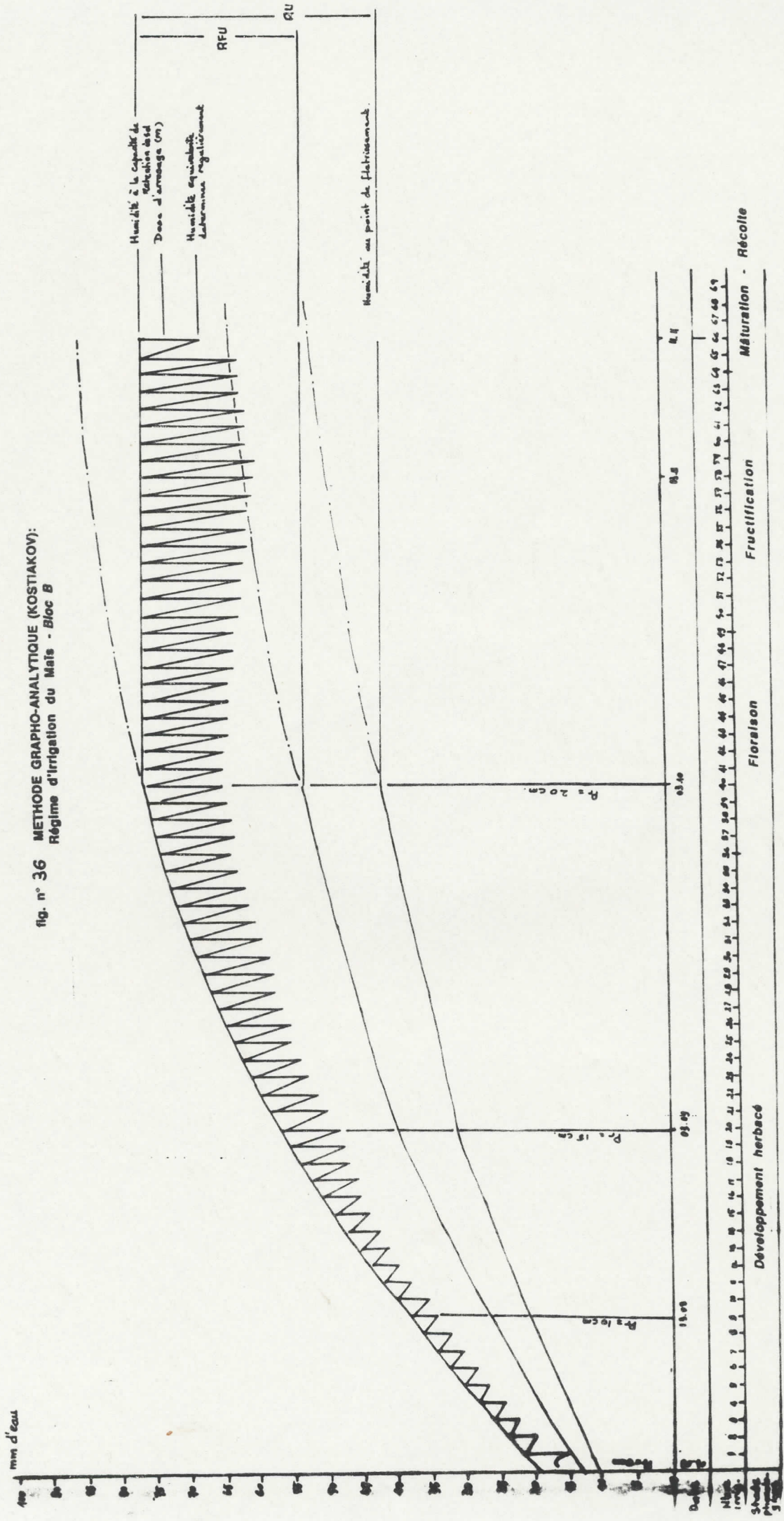
N° Irrigation	Hv (%)	Apport d'eau (l)	Apport d'eau (mm)	Apport d'eau RFU(%)	Consom. d'eau Cumulée (mm)	Durée d'arrosage (mn)	Date	Obs.
58	23.6	0.88	16	69.5	524	40.8	03.11.90	
59	23.6	0.88	16	69.5	540	40.8	04.11.90	
60	24.0	0.82	15	65.2	555	40.8	05.11.90	
61	24.0	0.82	15	65.2	570	40.8	06.11.90	
62	24.0	0.82	15	65.2	585	40.8	07.11.90	
63	24.5	0.77	14	60.8	599	35.6	08.11.90	Matura- tion Récolte
64	24.5	0.77	14	60.8	613	35.6	09.11.90	
65	24.5	0.77	14	60.8	627	35.6	10.11.90	
66	26.25	0.55	10	43.3	637	25.4	11.11.90	

Besoins mensuels en eau : 129mm

Consommation moyenne journalière en eau : 16mm

Fréquence théorique des irrigations : 1/j.avec 14.33mm.

fig. n° 36 METHODE GRAPHO-ANALYTIQUE (KOSTIAKOV):
Régime d'irrigation du Maïs - Bloc B



5. commentaires

Compte tenu des conditions expérimentales, le régime d'irrigation du maïs est représenté pour les deux blocs par les figures N°35 et N°36. Sur chaque figure, l'on constate qu'il y a trois courbes :

La courbe N°1 : représente les limites maximales de l'humidité de rétention dans le temps en tenant compte de l'augmentation de Pr.

La courbe N°2 : représente les limites minimales de l'humidité dans la couche active du sol qu'il ne faut en aucun cas atteindre afin d'éviter le stress hydrique aux conséquences irrémédiables sur la culture.

Les limites de ces deux courbes (1 - 2) nous permettent, connaissant l'évolution de Pr, de corriger les limites du stock d'eau dans le sol.

La courbe N°3, intermédiaire, représente la variation de l'humidité dans la couche active, elle est déterminée régulièrement à l'aide du calcul de l'humidité.

Cette courbe représente en effet le régime d'humidité en relation directe avec l'évapotranspiration effectuée dans le pot.

La courbe nous permet de déterminer les caractéristiques pratiques de l'arrosage : la dose d'arrosage (m) - la durée - l'espacement et, enfin, la dose globale d'irrigation (M).

En analysant le graphique (A ou B), on remarque que le module ainsi que la fréquence des doses d'arrosage sont relativement faibles. Le rapport entre la dose d'arrosage et la faculté de stockage d'eau dans le sol (RFU) varie de 30 à 60 %. Tableau n°59. Les plantes sont soumises à un rationnement d'eau et l'on peut épargner 40 % du stock d'eau dans la couche active du sol sans que cela n'empêche la culture d'être conduite en ETM avec des arrosages tous les deux jours.

Tableau N°60 : Consommation décadaire en eau du maïs. Bloc A et B

Décades		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy
B	Dose (mm)	27	27	38	40	76	74	83	82	77	113	63
	Cumul	27	54	92	132	208	282	365	447	524	637	
A	Dose (mm)	28	30	45,0	44,0	88,0	80	125	105	98	150	77
	Cumul (mm)	28	58	103	147	235	315	440	545	643	793	—
$\frac{A-B}{A}$	(%)	3,80	9,93	15,55	9,09	13,6	7,50	33,6	21,90	21,42	24,66	17,78

Tableau N°61 : Consommation mensuelle en eau du maïs

Mois		Aout	Sept	Oct.	Nov.	Total
Bloc	Dose					
	D'arrosage	103,8	227	291	172	793,8
A	(mm)					
Bloc		92,7	190	226	129	637,7
	B (mm)					
$\frac{A-B}{A}$	en %	10,67	16,29	22,33	25%	19,67

- qcA = Débit caractéristique d'arrosage - Bloc A = 1,12 l/s./ha

- qcB = 226mm = 0,871 l/s./ha

Tableau N°62 : Valorisation du mètre cube d'eau

Bloc	Kg/m3	T/ha (moy.)	m3/ha
A	0,56	4,45	7930
B	0,99	6,36	6370
Ecart relatif%	43,43	30,03	19,67

6. Conclusion

L'influence de l'utilisation des eaux usées épurées sur le régime d'irrigation est concrétisée par une économie d'eau variable selon les stades de croissances des plants de maïs et égale en moyenne décadaire à 17%.

Ce phénomène de diminution de la consommation d'eau pour les plants irrigués à l'eau usée épurée semble être dû à une augmentation sensible du potentiel osmotique de la solution du sol sans même inhiber la croissance végétale et les rendements.

L'avantage de la REUE permet une valorisation relative du mètre cube d'eau d'où un écart de 43,43%.

C. Impact de la REUE sur le sol

1. Objectifs et principes

Les eaux usées épurées sont réputées contenir des quantités considérables d'éléments minéraux et organiques.

La question posée est celle de savoir si effectivement cette charge fertilisante peut substituer la fertilisation "industrielle" étant habituellement prescrite. Le mode d'irrigation étant la m.I., les doses fertilisantes, leur répartition dans le temps et l'espace sont particulièrement rationnées.

Sachant que les sels minéraux sont en majorité solubles, donc facilement assimilables par les plantes, leurs concentrations risquent de saturer la solution du sol, combien même le stock résiduaire dans le sol est négligeable.

Pour éviter une "hyper-fertilisation", la détermination de la composition chimique du sol devient alors une condition nécessaire avant le démarrage des irrigations.

Notre objectif dans cette partie du travail est de s'assurer si les besoins théoriques de la culture du maïs en fertilisants seraient totalement satisfaits par l'apport d'eaux usées épurées.

Connaissant les concentrations en fertilisants du sol (tableau n°63), les besoins théoriques de la culture du maïs (tableau n°64) ainsi que les apports organiques et minéraux des eaux d'irrigation (tableau n°65), nous avons établi un bilan général quantitatif de la capacité fertilisante des eaux usées épurées. Par ailleurs, nous considérons que l'apport relatif à l'eau du robinet pour le bloc A (témoin) est insignifiant et pour cause négligeable. (tableau n°66). Le sol étant le même dans les deux blocs, donc supposé ayant la même composition chimique (facteur commun).

2. Résultats

2.1. Capacité fertilisante du sol

Tableau N°63 : Capacité fertilisante du sol

Eléments fertilisants	Azote	Phosphate	Potassium	calcium
Concentration g/Kg de terre sèche	0,86	0,40	0,18	5

Suite

Eléments fertilisants	Magnésium	Sodium	pH	M.O
Concentration g/Kg de terre sèche	0,12 %	0,04	8	1,56 %

2.2 Besoins des cultures

Les besoins des cultures sont variables d'une variété à une autre mais aussi, ils restent liés aux rendements projetés.

Tableau N°64 : Besoins en éléments fertilisants de quelques cultures

Cultures	Rendements q/ha	Eléments fertilisants exportés par les plante Kg		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Prairies de fauche: 4 à 5 coupes	125 m.s 125 m.s	150-220	100	30
Prairie de foin	100 m.s	120	80	245
Céréales	40-50 grains 40-50 paille	110	70	120
Cultures dérobées	35 m.s	60	40	120
Maïs	600 m.f	100-150	30-80	120-210
Colza	30 grains	100-150	90	200

Source : (51)

2.3. Apports en fertilisants des eaux usées épurées d'irrigation

Les analyses effectuées relatives à la qualité des eaux usées épurées de la station de Beni Mered nous permettent de dresser le tableau suivant :

Tableau N°65 : Apport en éléments fertilisants par les eaux d'irrigation (micro-irrigation)

Eléments fertilisant		Concentration moy. des eaux d'irrigation (mg/l) ou (g/m ³)	Apport par l dose d'irri. de 100mm d'eau usée épurée (kg/ha) Soit	Exportation par les plantes : cas du maïs (valeurs théoriques) Kg/ha pour 1 rdt de 60kg m.f/ha
Azote	org.	10,90	10	100-150
	NO ₃	27,20	30	
	NO ₂	0,55	50	
	NH ₄ ⁺	13,57	13	
Phosphore	total	13,16	13	30-80
	PO ₄	13,26	12	
Potassium	K ⁺ K ₂ O	16	16	210
Calcium	Ca ++	63,4	63	20-200
Magnésium	Mg ++	25,2	25	09-24
Sodium	Na +	91	91	
P H		8,5		6,5 - 7
M O		25,28	25	-
Minéraliation -		606	600	-
m.e.s -		57		-

Tableau N°66 : Analyses chimiques des eaux du robinet
(station de Beni Mered)

Eléments	Concentrations (en mg/l)
NO ₃	16
HCO ₃	2.45
CO ₃	0.08
Cl	30
K ⁺	9
Ca ⁺⁺	36
Mg ⁺⁺	14
Na ⁺	28
PH	7.3
Minéralisation (en g/l)	0.40
m.e.s	6

3. Commentaires

Nous constatons que la capacité fertilisante du sol utilisé, indiquée au tableau n°63 est très insuffisante vis à vis de l'apport des eaux usées épurées et des exportations par la culture du maïs.

Etant donné qu'elle constitue un facteur commun pour les deux blocs, nous avons jugé utile de ne pas en tenir compte lors du calcul du bilan.

Cependant, la comparaison des apports en éléments fertilisants contenus dans les eaux usées épurées, pour une dose de 1000 mm, selon les résultats des analyses chimiques (moyenne sur 5 échantillons) et les exportations théoriques de la culture, permettent de constater la satisfaction de ces dernières voire même un surplus (pour le calcium, et le magnésium)

D'autre part, dans le lot des plants témoins, nous constatons pour une même dose un déficit en fertilisation notamment en potassium.

La question reste posée pour étudier avec exactitude ce phénomène par le biais d'autres recherches.

4. Conclusion

Compte tenu des résultats obtenus dans cette analyse, la réutilisation des eaux usées épurées semble contribuer à resoudre les apports complémentaires des engrais industriels ce qui reconforte le choix de cette nouvelle ressource.

L'utilisation de la m.I permet de fractionner les apports en éléments fertilisants déjà solubles dans l'eau d'où une utilisation efficace par les plantes.

Les avantages réaliseront une valorisation des stations d'épuration et une rentabilité des investissements d'irrigation.

Chapitre VII : Recommandation et conclusion générale

A. Recommandations

Le constat présenté dans la première partie de notre travail donne de lui même et sans complaisance la nécessité de la REUE par la m.I comme un facteur authentique dans l'intensification de l'hydraulique agricole.

Le souci de l'orientation de la production agricole doit se traduire par une attention particulière aux cultures susceptibles de remplacer une importation potentielle.

Cependant, garantir cette production exige des efforts dans la planification d'une stratégie globale d'utilisation de l'eau, des terres et des cultures entraînant une série de mesures corollaires de dimensions importantes.

Pour préserver l'eau potable au profit de l'évolution démographique nationale, il faut réfléchir à une politique de l'eau basée sur une valorisation des ressources non conventionnelles (eaux usées, eaux salées).

Certains pays ayant été confrontés à la même problématique, ont atténué ces contraintes grâce à la REUE et à la m.I. Néanmoins, la valorisation des eaux usées exige certaines précautions qui consistent à :

- Connaître les contraintes du milieu naturel
- Maîtriser les volumes des eaux usées et des eaux usées épurées
- Adapter la qualité physico-chimique et microbiologique de l'effluent aux contraintes du milieu naturel.

La qualité d'un effluent doit être étudiée sous différents aspects :

salinité, valeur fertilisante, métaux lourds et oligo-éléments et risques infectieux. Cependant, les analyses chimiques des eaux usées épurées ne doivent être en aucun cas interprétées de manière brute, indifférenciée mais par rapport à leur devenir dans la solution du sol et à la sensibilité des cultures et des utilisateurs.

Ainsi, la valeur fertilisante des eaux usées ne peut être considérée uniquement d'après les résultats des analyses chimiques.

Elle est évaluée après toutes les modifications que les éléments organiques et minéraux peuvent subir au cours des transformations dans le sol. Ces transformations sont liées aux conditions pédologiques, climatiques et agrologiques.

Le risque infectieux des eaux usées est dû à la forte charge des micro-organismes. Cette flore entérique est accompagnée d'organismes pathogènes variés. Leurs cycles de développement sont très variés et complexes. Leur survie dépend du temps, du degré d'hostilité de l'environnement, de la température, des rayons UV ainsi que du type de support (eau, sol, culture ou l'homme).

Pour une maîtrise beaucoup plus réaliste de cet aspect, il est conseillé de réaliser des études épidémiologiques.

La fiabilité des techniques sur le plan sanitaire est liée aux conditions d'exportation. La désinfection par les procédés physico-chimiques actuels : UV, ozonation ... demeure sujette à des critiques par les chercheurs et les utilisateurs.

Le traitement par lagunage permet d'obtenir une sédimentation des métaux lourds ou leur absorption par les végétaux supérieurs type *Sourpe*.

Si l'effluent est modérément pollué, il peut être utilisé pour irriguer des cultures peu sensibles à la toxicité.

Un classement de différents types de cultures peut être proposé suite aux diverses expérimentations réalisées en fonction du degré de risque croissant :

- 1.- Cultures forestières (haie de cyprès, peupliers, agrumes et pépinières)
 - Plantes industrielles (coton, oléagineux, arachides)
 - Floriculture
- 2.- Fruits poussant sur les arbres et fruits à noyau (pêcher, abricotier, prunier...)
- 3.- Fourrage vert, cultures à graines
- 4.- Plantes à port érigé (vigne, tomate, maïs ...)

5.- L'irrigation par les effluents n'est pas conseillée pour des plantes à tubercules et les plantes au contact du sol (courge, concombre, fraise, radis, pomme de terre, betterave, laitue, persil ...)

L'irrigation de portion de forêt avec des effluents permet de créer des zones humides moins combustibles jouant un rôle de pare-feu.

L'avantage s'élargit à la production de bois, à la couverture de bassins versants et à l'épuration des eaux usées par le sol.

Le stockage des effluents peut s'avérer indispensable dans les zones arides et semi-arides pour permettre une harmonie entre les volumes nécessaires à l'irrigation et les volumes produits par le réseau d'égouts.

Les études et les recherches pourraient mettre en évidence les avantages éventuels de la combinaison : Traitements-stockage-dilution - et réutilisation.

Sachant que le mode d'urbanisation pratiqué actuellement par l'abondance des espaces verts (jardins, pelouses ...), ces espaces verts demeurent des surfaces de grande consommation d'eau : $60 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{jour}$ en été (3). Ils sont souvent éliminés ou abandonnés, faute d'eau.

La réflexion sur la valorisation des eaux usées doit s'inscrire dans un cadre vaste et global d'une politique d'assainissement de la région.

Les stations d'épuration ont été souvent un investissement sans intérêt dans notre pays. Des réseaux d'assainissement ont été conçus sans tenir compte des exigences techniques de l'épuration et encore moins de l'objectif de la REUE.

La valorisation des eaux usées aura donc une incidence directe sur l'élaboration des schémas d'assainissement. Cette prise en compte débouche sur de nouvelles démarches dans la conception des projets d'assainissement. "Le temps des rivières est bien révolu" dit on "celui des égouts commence".

Au schéma classique, il convient de substituer un schéma adapté type :

- Organisation du réseau de collecte - sa gestion
- Détermination des sources de pollution caractéristiques et éventuellement leur traitement spécifique ou leur recyclage.
- Détermination des sources de déversement de saumures par les industries agro-alimentaires et leur prise en charge.
- Adaptation du système de traitement des eaux usées à la REUE en agriculture (eaux + boues)
- Identification et localisation des périmètres irrigables en tenant compte du stockage - transport et répartition.
- Création d'organismes de gestion, de contrôle permanent de la qualité des eaux et l'assistance aux utilisateurs.
- Mise en place de moyens législatifs (redevances pollutions) et le contrôle de leur respect.
- Développement de la REUE initialement à travers les stations pilotes.

Le choix des techniques d'irrigation est un moyen efficace dans la lutte préventive contre les risques sanitaires infectieux. En effet, les études ont montré que dans l'irrigation fréquente à faible dose, l'effluent est directement réutilisé par la plante. L'économie de l'eau et des engrais est remarquable. Les arguments qui favorisent la REUE sont également ceux de la m.I. Ils sont liés:

- Au déficit en eau
- Protection de la frange cotière
- Protection des cours d'eau : Les étiages estivaux sont très marqués et les cours d'eau naturel sont devenus des égouts à ciel ouvert.
- Surexploitation des nappes qui favorisent la remontée du biseau salé.
- Lutte contre l'insalubrité des cotes infra-littorales et littorales .
- La rentabilité de la station d'épuration.

La réussite de la m.I est liée aussi à la détermination efficace des besoins en eau des cultures pratiquées. La détermination des besoins en eau des cultures est actuellement le domaine qui évolue le plus vite. Les objectifs à atteindre sont l'estimation en continu des besoins en eau de la culture afin de lui adapter des programmes d'irrigation entièrement automatisés et efficaces.

Les méthodes et les moyens existants à l'heure actuelle tendent vers cet objectif mais restent non efficientes à 100 % surtout que l'automatisation de l'irrigation demeure liée à la fertilisation équilibrée.

L'essor industriel en étroite intégration avec les résultats et les efforts de la recherche dans le domaine de la m.I a permis de mettre sur le marché un arsenal d'équipements à bas prix afin de permettre une meilleure rentabilité de l'exploitation agricole.

La m.I permet d'augmenter la SAU et par conséquent fait diminuer les terres en jachère et les terres désertiques.

D'autre part, la REUE en m.I bien maîtrisée serait une solution pour les cultures hydroponiques ainsi beaucoup de contraintes seront évitées. Cependant, pour qu'il en soit ainsi et en complément de ce que nous venons de souligner, la réussite de la m.I et de la fertilisation sont liées au dimensionnement du réseau, à la qualité des goutteurs et de la filtration. Les précautions rigoureuses sont à envisager dans ces cas :

- Etablissement d'un calcul détaillé de dimensionnement des débits, des pressions et surtout des pertes de charge dans le réseau.

- Faire un bon choix du système de filtration avec contrôle et nettoyage réguliers.

- Eviter de placer les goutteurs aux pieds des plantes, notamment en arboriculture.

- Pour les réseaux en exploitation, remplacer ou nettoyer les goutteurs bouchés et veiller à ce qu'il n'y ait pas de panne lors des irrigations.

Le matériel de m.I doit être choisi selon les critères technico-économiques liés à la culture envisagée.

Le profit et les solutions de facilités sont encore trop souvent les seuls critères pour notre société mais la prochaine décennie sera certainement plus difficile sur le plan économique. Il faudrait cependant prévoir une meilleure gestion des matières premières.

B. Conclusion générale

L'analyse de la situation de pénurie d'eau en Algérie, les contours qui se dessinent ainsi que les conséquences qu'elle a engendrées, exige du pays des efforts sérieux devant aboutir à la définition d'une politique d'eau rationnelle.

Les solutions que nous proposons reposent sur deux leviers importants qui ont démontré leurs avantages précieux ailleurs dans l'amélioration de la politique d'aménagement hydro-agricole :

- La réutilisation des eaux usées épurées comme potentiel garanti et renouvelable, jusque là en jachère dans notre pays.

- La micro-irrigation, véritable technique de rationnement de l'eau et de rentabilité de projet d'irrigation est restée jusque là mal connue et très peu développée.

Ces deux créneaux nouveaux dans notre pays peuvent constituer un garant à la réussite d'une nouvelle politique de l'eau engendrant un "train" de mesures porteur d'études, de recherches, de technologie, de travail et d'économie.

Les études et les recherches en Algérie dans ce domaine sont au stade embryonnaire. Nous avons essayé de contribuer dans ce sens en proposant de nouvelles relations de calculs hydrauliques dans les systèmes de micro-irrigation tenant compte du régime d'écoulement laminaire dans les rampes. Les calculs ont montré que :

- Pour les rampes courtes (à diamètre constant) avec des goutteurs trop espacés, il convient d'utiliser des relations des calculs faisant intervenir le régime d'écoulement laminaire. Pour cela, déterminer la perte de charge linéaire par les relations [a], [b] et [c] induirait un cart relatif en % de 99 bien qu'il est traduit par une faible différence de hauteur d'énergie.

- Pour les rampes longues, garnies de goutteurs espacés, ($N > 50$), il existe toujours deux (02) types d'écoulements. Le turbulent en amont et le laminaire en aval de la conduite. Les rampes ayant totalement un écoulement turbulent n'existent pas.

Dans ce cas, il est recommandé de tenir compte du rapport L_2/L_1 dans la détermination de la perte de charge dans la rampe.

Si L_2 est insignifiant par rapport à L_1 , nous pouvons nous permettre de calculer les pertes de charge à l'aide de la relation proposée relative au régime turbulent. L'écart relatif en (%) avec les relations [a], [b] et [c] est faible néanmoins la différence en hauteur d'énergie (en mètre) est élevée.

Cependant, l'utilisation de la relation [12] proposée permet de limiter le sur-dimensionnement du réseau de m.I et donc assurer une économie d'énergie considérable (1 à 2 bars).

Si L_2 n'est pas négligeable, il est recommandé de déterminer pour chaque longueur de tronçons (L_1 et L_2) distinctement les pertes de charge.

Ce modèle de calcul peut servir dans la détermination des pertes de charge dans les réseaux munis de diffuseurs ou de distributeurs à faible débit. Les relations de calculs pourront être utilisées dans le calcul de perte de charge pour les pivots d'irrigation ou de systèmes similaires.

L'étude des goutteurs de la STTF nous a permis de juger ce type de matériel et surtout son niveau technique et technologique.

Dans cet axe, nous avons étudié et fourni les caractéristiques hydrauliques des émetteurs de la STTF, ce qui nous a permis de soulever deux points importants :

- Le niveau technologique Algérien actuel est à encourager bien qu'il soit en dessous des normes universelles sachant que la matière première est disponible sur place dans le pays. Les tests réalisés sur les trois types de goutteurs de la STTF ont révélé la non conformité technique et technologique de ce matériel.

- Le manque de structure spécialisée permettant d'effectuer les tests nécessaires sur les produits des fabricants Algériens afin de leur permettre d'être commercialisables légitimement.

Par ailleurs, les eaux usées sont une réserve d'eau renouvelable et inexploitée et constitueront sans nul doute demain l'une des solutions incontournables, d'autant plus que les ressources en eau de surface sont irrégulières et subissent des variations chroniques.

C'est ainsi que nous avons associé ces deux moyens de lutte contre le gaspillage, la pénurie et le déséquilibre en matière d'eau. La REUE en m.I connaît certes des limites que seul les expérimentations peuvent fixer dans les différents cas.

L'utilisation des goutteurs de la STTF en REUE a permis de mettre en évidence la contrainte du bouchage relativement importante pour les goutteurs en ligne non autorégulants que pour les goutteurs autorégulants. Ces goutteurs résistent mieux à l'obstruction et peuvent être démontés occasionnellement pour le nettoyage et la remise en service (cas des petits réseaux).

Pour enrayer complètement ce problème de bouchage, il est sans doute intéressant de tester l'avantage des goutteurs auto-nettoyants en REUE. Quant aux goutteurs non auto-régulants, à faible débit, il est déconseillé de les utiliser dans de pareils cas.

L'influence de la REUE en m.I sur la culture du maïs a été remarquable et l'écart entre les deux blocs expérimentaux a été évalué à 1,9T/ha et une économie d'eau de 19,67% soit $1560\text{m}^3/\text{h}$ par rapport au bloc témoin A.

Les résultats que nous avons obtenus ne constituent pas nécessairement des données définitives mais un point de départ pour de nombreuses recherches.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- 1 - ANONYME (1990). Colloque international sur la stratégie de gestion des eaux dans les pays méditerranéens. H 2010. Alger, 28-29-30 Mai. Rapport final. Ministère de l'équipement
- 2 - ANONYME (1988). La maîtrise de l'irrigation sous pression : Aspersions et goutte à goutte. Ed. AGRI -NATHAN. 91p.
- 3 - ANONYME (1989). Réutilisation des eaux usées. Sémin. 18-22 Sept. Sophia Antipolis. France
- 4 - ANONYME (1976). Drip irrigation, Principles, design and agricultural practices. PP 182-190
- 5 - ANONYME (1988). Revue: l'Eau, l'Industrie, les Nuisances N°119. Mai Ed. JOHANET, Paris n° 119 Mai.
- 6 - ANONYME (1987). Revue Algérie Verte, N°8 Ministère de l'agriculture Alger
- 7 - ANONYME (1990). Plan ORSEC-Sécheresse. Mars - Ministère de l'équipement. Alger. 46p.
- 8 - A. N. R. H (1989). Etudes Pédologiques et Hydrogéologiques. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Alger
- 9 - AYERS R. S. et AL (1976). La Qualité de l'eau en agriculture Bull. F.A.O. d'irrig. drain., N°29, 81p.
- 10 - BAHRI A. (1990). L'expérience Tunisienne en matière d'utilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture. Sémin. Médit. Trait. des Effl. liquides et Techn. U.S.T.H.B. 28-30 Oct. Alger
- 11 - BALOGH J. (1980). Experience With Drip Irrigation in Hungary Symp on Drip Irrig. in Horti Poland. Sept 30-Oct 4. pp 151-164

- 12 - BINNIE et PARTNERS (1983). Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger-Sebaou.
Rapport N°B2.Potent.des Ress.Vol.4
Réutili.des Eaux Usées
- 13 - BLASSE W. (1980). Experience with micro-irrigation in Modern Apple Production.Symp.on Drip Irrig.in Horti.
Poland.Sept 30-Oct 4
- 14 - BONNIN J. (1986). Hydraulique urbaine appliquée aux agglomérations de petite taille et moyenne importance Ed.
Eyrolles pp.63-77
- 15 - BOWER H.CHANEY R.L.(1974). Land treatment of waste water Adv.in Agr.,Vol.26 pp.133-176
- 16 - CADILLON M.MALAVAL A. Valorisation des eaux usées par
RIPERT C.TREMA L. (1986) l'Irrigation en Forêt Méditerranéenne-
Expériment.de COGOLIN (Var),Rev.Forêt
Med.t.VIII.N°2,pp.151-162
- 17 - CAUVIN A.et GUERRE H. (1978). Elément d'hydraulique. Ed.Eyrolles
239 p
- 18- CHOSSA J.C.MARESCA B.(1985). L'Epandage des eaux usées des petites collectivités-Inst.Pilote
de LANDIRAS (Gironde) T.S.M - l'Eau,
Mars pp 129-138
- 19 - C.E.M.A.G.R.E.F (1987). Caractéristiques principales et aptitudes des distributeurs et gaines de micro-irrigation.Etud.Sect.Irrig.Aix en
Provence
- 20 - C.E.M.A.G.R.E.F (1985). Etude au banc d'essai du comportement en eaux usées du matériel de micro-irrigation Etud.N°37 Div.Irrig.Aix en
Provence 21p

- 21 - C.E.M.A.G.R.E.F (1984). Valorisation agricole ou forestière des eaux résiduaires. Cahier du C.E.M.A.G.R.E.F. 56 N°4
- 22 - C.E.M.A.G.R.E.F (1983). Technologie de l'agriculture. L'irrigation aux U.S.A. Les Défis des années 80. Rev. Sept. 83 N°503. 61p
- 23 - C.E.N.E.A.P (1988). Lettre du Centre National des Etudes Economiques Appliquées. Rev. N°4 Sept.
- 24 - DEGREMONT (1983). Rapport du projet de la station d'épuration de Beni-Mered-Blida
- 25 - DUBOST D. HADDAD. KAFI A., MAANE H. (1983) Bull. d'Agricult. Sahar. Alg. N°5 Juill. p 29-60
- 26 - DONNEEN I.D. (1972). Technologie de l'irrigation et gestion des eaux. Bull. F.A.O. Irrig. drain. N°1 Rome 48p
- 27 - DUTHIL J. (1971). Elément d'écologie et d'agronomie t.1 Ed. J.B.B.
- 28 - DURAND J.H. (1983). Les Sols irrigables pp 220-225 et 297
- 29 - EDWARD P. (1985). Aquaculture : A comportement of Low. Cost Sanitation Technology. Washington, DC, Banque Mondiale Etude Techn. N°36 p 25
- 30 - FAECHEM F.G. et AL (1983). Sanitation and Disease : Health Aspects of Excreta and Waste water Management Chichester John Wiley
- 30' - FEYEN J. , LELIAERT J. ; BADJI H. (1980). Traité pratique de l'irrigation S/P. A.G.C.D..
- 31 - FRANK N. KEMMER (1979). Manuel de L'Eau. Ed. Tec. Doc. Paris. 930p
- 32 - GAID A. (1984). Etudes Biologiques des eaux usées (t1 et t2) Ed. OPU. Alger. 495p
- 33 - GOLDSTEIN S.N., MOBERG J.M. (1985). Waste Water Treatment Systems of Rural Communities. Comm. on Rural Water, Washington DC

- 34 - GOMELLA C. et GUERREE H. (1985). Guide de l'alimentation en eau dans les agglomérations urbaines et rurales
- 35 - GRIL J.J (1989). L'Épandage des eaux usées domestiques. Etude du C.T.G.R.E.F. Paris
- 36 - GUY G. (1990). Sècheresse et qualité des eaux. Adaptation du traitement et de la distribution. Rev. G.R. N°11. Nov pp 31-43
- 37 - HILLEL I.S et AL (1986). Waste water Irrigation in Developing Countries : Health Effects and Technic. Solutions. Washington, DC, Banque Mondiale Etude Tech N°51 Rapport N°6
- 38 - HUBERT P. (1984). Eau usée : Une introduction à la gestion de l'Eau. Ed. Ellipses 188p
- 39 - I.N.E.S.G (1988). Etude prospective du problème de l'eau en Algérie. Etude Institut National des Etudes Stratégiques Globales. Alger. Dec. 14 p.
- 40 - INVUFLEC (1977). Le Matériel d'irrigation localisée et problèmes posés par son utilisation. Compte rendu de la Journée d'Information sur l'Irrigation localisée ANGERS-5 Nov. 1976. France
- 41 - IRRIFRANCE (1990). Fiche technique de fabrication du P.E Basse et Moyenne densité. Ed Irrifrance.
- 42 - ISO - AFNOR (1988). Normes relatives aux matériels de micro-irrigation.
- 43 - ISSOLAH A. (1983). Contribution à l'étude de l'évapotranspiration et des besoins en eau du maïs -grain .Thèse de Magister. INA. Alger 230 p

- 44 - KAPORNAY L. (1988). Utilisation de l'eau, des eaux usées et de la boue des eaux d'égout dans l'agriculture.
Sémin. Internat. sur l'irrig.
Drain. El-Oued .27 - 29 Mars
- 45 - KIES B. (1986). Techniques d'irrigation et leurs évolutions.
Sémin. Internat. sur la stratégie Gle d'Amgnt et de Dvpt de la steppe et des zones arides.
Tebessa. 26-30 Avril. pp 175 - 190
- 46 - LAMY H. L (1980). Protozoaires et helminthes. Parasites.
Recherches et identification. 3^e Ed. MALOINE. Paris
- 47 - MARESCA B et IZOULET C. (1985). Réutilisation des eaux usées et mise en valeur de la forêt méditerranéenne:
L'expérience de COGOLIN .T.S.M.L'eau - Octobre
pp 455 - 464 .
- 48 - MESSAHEL M. (1988). L'Irrigation goutte à goutte. Ed. OPU. p 296
- 49 - NONCLERCQ I. P (1982). Hydraulique urbaine et appliquée. 1^{ère} Partie
Principes fondamentaux et compléments
d'hydraulique. Ed. CEDEBOC. 104 p
- 50 - O.M.S. (1989). L'Utilisation des eaux Usées en Agriculture et en aquaculture. Recom. à visées sanitaires. Rapport
O.M.S. - Genève. 82 p
- 51 - RIEUL L. (1989). Conditions et limites d'une irrigation face à la pénurie d'eau. Rev. GR. N°11 Nov
- 52 - ROLLEY P. (1983). Améliorations agricoles - Irrigation. Ed. Nlle
Encycl. Agri. J.B.B. pp 421 - 426
- 53 - SMITH M. A. (1982). Research Project N°78/III Retention of Bacteries Viruses and Heavy Metals on Crops Irrigated With Reclaimed Water. Technical Paper N°74
Publishing Service Cambera pp 82 - 307
- 54 - TABASARAN (1980). Cours d'assainissement urbain. U.S.T.H.B. Alger
Ed. OPU pp 2-23

- 55 - VAILLANT J.R. (1977). Accroissement et gestion des ressources en eau. Ed. Eyrolles. Paris. 245 p
- 56 - VALIRON F. (1983). La réutilisation des eaux usées. Ed. Tec. Doc. 207 p
- 57 - VETTOU M. (1988). Séminaire Internat. sur l'irrigation. Drain. El-Oued .Tome I .
- 58 - VERMEIREN L. et JOBLING G.A. (1983). L'irrigation localisée Bull. FAO d'irrig. Drain. n° 36 .pp

- 55 - VAILLANT J.R. (1977). *Accroissement et gestion des ressources en eau*. Ed. Eyrolles. Paris. 245 p
- 56 - VALIRON F. (1983). *La réutilisation des eaux usées*.
Ed. Tec. Doc. 207 p
- 57 - VETTOU M. (1988). *Séminaire Internat. sur l'irrigation. Drain. El-Oued. Tome I* .
- 58 - VERMEIREN L. et JOBLING G.A. (1983). *L'irrigation localisée*
Bull. FAO d'irrig. Drain. n° 36 .pp

Liste des tableaux

- Tableau N°1 : Evolution de la population algerienne
- Tableau N°2 : Recapitulatif des besion en eaux
- N°3 : Ressources en eaux souterraines et superficilles
- N°4 : Balance des besoins et des potentialités en eau
- N°5 : Quelques indices nationaux d'exploitation
- N°6 : Estimation de la production des eaux usées domestiques dans les villes algeriennes
- N°7 : Production en eaux usées
- N°8 : Demande mensuelle exprimée en % des besoins totaux annuels en eau
- N°9 : Demande mensuelle en eau d'irrigation exprimée en % des besoins totaux en eau
- N°10 : Techniques de filtration et de traitement des eaux usées
- N°11 : Evolution de la pollution entre la 1^{ere} et la 2^{eme} phase
- N°12 : Concentrations projétees des eaux usées traitées
- N°13 : Principales stations d'épuration des eaux en Algerie
- N°14 : La REUE aux USA
- N°15 : Rendements de l'épuration des eaux usées à travers le sol
- N°16 : Composition des eaux menagères en g/m³
- N°17 : Pollution moyenne des eaux usées
- N°18 : Principales caractéristiques épidemiologiques des agents pathogènes
- N°19 : Dimensions des particules pénétrant par le poil absorbant
- N°20 : Directives concernant la qualité microbiologique des eaux
- N°21 : Classification des eaux d'irrigation
- N°22 : Teneurs en métaux lourds dans les eaux résiduaires
- N°23 : Teneurs maximales en métaux lourds tolérables dans les eaux d'irrigation
- N°24 : Faculté de certaines plantes dans l'épuration des eaux usées
- N°25 : Quantités en éléments fertilisants prélevées par les cultures annuelles
- N°26 : Situation des perimètres irrigués en Algerie
- N°27 : Quantités d'eau utilisées par les differentes méthodes d'irrigation
- N°28 : Evolution des superficies équipées en m.l. dans le monde
- N°29 : Répartition des tronçons d'un branchement selon le régime d'écoulement
- N°30 : Valeur des constantes K et C pour de faibles diametres
- N°31 : Recapitulatif des résultats de $\Sigma \Delta h$ tot
- N°32 : Comparaison des résultats de calcul des pertes de charge en m.l.
- N°33 : Ecart dans la consommation d'énergie relative à l'utilisation des relations de calcul [12],[a] et [b]

- N°34 : Différences de puissance relative aux relations de calcul de $\Sigma \Delta h$ tot
- N°35 : Tableau comparatif relatif aux calculs des pertes de charge
- N°36 : Répartition du nombre de goutteur
- N°37 : Valeurs du débit en fonction de la charge G I
- N°38 : Valeurs du débit en fonction de la charge G II
- N°39 : Valeurs du débit en fonction de la charge G III
- N°40 : Valeurs du débit en fonction de la charge G IV
- N°41 : Valeurs du Cv et classification des goutteurs selon AFNOR et CEMAGREF
- N°42 : Calcul de l'homogénéité des goutteurs utilisés
- N°43 : Etude statistique du Cv et du Cu
- N°44 : Résultats des analyses physico-chimiques et biologiques des eaux usées épurées
- N°45 : Résultats des analyses bactériologiques
- N°46 : Salinité des eaux usées épurées
- N°47 : Classification physico-chimiques des eaux usées traitées de Beni-Méred en fonction du risque d'obstruction
- N°48 : Evolution du débit (en l/h) des goutteurs en fonction de la durée de fonctionnement et de la position du goutteur sur la rampe
- N°49 : Comportement du goutteur I à la REUE
- N°50 : Comportement du goutteur II à la REUE
- N°51 : Comportement du goutteur III à la REUE
- N°52 : Comportement du goutteur IV à la REUE
- N°53 : Prévision des importations du maïs et évolution des prix
- N°54 : Les besoins en maïs pour la fabrication des aliments de bétail.
- N°55 : Rendements du maïs-Bloc A.
- N°56 : Rendements du maïs-Bloc B.
- N°57 : Evolution de la RU et de la RFU selon les 4 niveaux de Pr
- N°58 : Consommation en eau du maïs durant l'expérimentation : Bloc A.
- N°59 : Consommation en eau du maïs durant l'expérimentation : Bloc B.
- N°60 : Consommation décadaire en eau du maïs.
- N°61 : Consommation mensuelle en eau du maïs.
- N°62 : Valorisation du m³/d'eau.
- N°63 : Capacité fertilisante du sol.
- N°64 : Besoins en éléments fertilisants de quelques cultures.
- N°65 : Apports en éléments fertilisants par les eaux d'irrigation
- N°66 : Analyses chimiques des eaux du robinet.

Liste des figures

- Figuers N°1 : La variation du flux des eaux naturelles
- N°2 : Disponibiité des eaux "1^{ere} et 2^{eme} main"
- N°3 : Variation saisonnière des ressources et des demandes d'eau
- N°4 : Dose infective minimale
- N°5 : Graphique de l'évolution théorique du rapport de consommation dans le temps
- N°6 : Consommation en eau des plantes et impact du système d'irrigation
- N°7 : Influence du mode d'arrosage
- N°8 : Schéma type d'un réseau de m.l
- N°9 : Goutteurs à circuit long
- N°10 : Goutteurs à circuit court
- N°11 : Système de micro-irrigation avec adduction d'eau
- N°12 : Système de micro-irrigation avec adduction gravitaire
- N°13 : Schéma de calcul -du branchement
- N°14 : Etat d'écoulement dans le branchement muni de N goutteurs
- N°15 : Schéma de calcul des pertes de charge linéaires dans la partie à écoulement turbulent (L_1)
- N°16 : Graphiques des pertes des charge pour une rampe
- N°17 : Graphique les pertes de charge pour un réseau de m.l.
- N°18 : Graphique $E_r = f(N)$ pour trois relations de calcul des pertes de charge
- N°19 : Schéma de calcul des pertes de charge dans la conduite principale
- N°20 : Schéma de calcul
- N°21 : Schéma de calcul du pilote de m.l
- N°22 : Schéma du goutteur I
- N°23 : Schéma du goutteur II
- N°24 : Schéma du goutteur III et IV
- N°25 : Graphique $q = f(H)$ - branchement I
- N°26 : Graphique $q = f(H)$ - branchement II
- N°27 : Graphique $q = f(H)$ - branchement III
- N°28 : Graphique $q = f(H)$ - branchement IV
- N°29 : Courbe caractéristique du goutteur I
- N°30 : Courbe caractéristique du goutteur II
- N°31 : Courbe caractéristique du goutteur III
- N°32 : Courbe caractéristique du goutteur IV
- N°33 : Phénomène d'obstruction des goutteurs
(Evaluation quantitative)
- N°34 : Evolution de la croissance végétative du maïs dans les 2 blocs.
- N°35 : Courbe de KOSTIAKOV- Bloc A.
- N°36 : Courbe de KOSTIAKOV- Bloc B.

Liste des annexes

- N°1 : Temps de survie de certaines agents pathogènes après excretion dans le sol et sur les plantes.
- N°2 -a : Risques relatifs pour la santé lies à l'utilisation d'excreta et d'eaux usées non traitées dans l'agriculture et l'aquaculture.
- b : Prévalence de l'ankylostomiase et de l'ascaridiose parmi les ouvriers agricoles.
- N°3 : Relation entre l'agent pathogène et l'hôte et les voies de transmission possibles des infections causées par les excretas.
- N°4 : Tableaux donnant $\sum (N-i+1)^2$.
- N°5 : Calcul du Cv.
- N°6 : Evolution des m.e.s. DBO_s, DCO et pH des eaux usées épurées de la station de Beni-Mered.
- N°7 : Etude de la variance-colmatage.

