



OPTIMISATION DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES EN IRRIGATION



D. XANTHOULIS

**Unité d'Hydraulique agricole – Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques
GEMBLoux**

S. REJEB, F. CHENINI, MN. KHELIL et Z. CHAABOUNI
**Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêt
TUNIS**

M. FRANKINET et JP. DESTAIN
**Département production végétale – Centre de Recherches Agronomiques
GEMBLoux**

OPTIMISATION DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES EN IRRIGATION

D. XANTHOULIS

Unité d'Hydraulique agricole – Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques
GEMBLoux

S. REJEB, F. CHENINI, MN. KHELIL et Z. CHAABOUNI

Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêt
TUNIS

M. FRANKINET et JP. DESTAIN

Département production végétale – Centre de Recherches Agronomiques
GEMBLoux

Avril 2002

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport ont le plaisir de remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont collaboré à ce programme de recherche et en particulier :

Pour l'INRGREF :

M.N. REJEB Directeur Général de l'INRGREF qui nous a facilité le travail ainsi que A. BAHRI coordinatrice du projet PISA.

Le personnel de la station expérimentale de Oued Souhil et plus particulièrement M. Sfaihi.

Le personnel technique permanent et contractuel de l'équipe physiologie végétale et plus particulièrement M. Oueslati et A. Takrouni.

Pour la FUSAG : Le personnel de l'unité d'hydraulique agricole

Pour le CRA :

J.L. Herman

C. Roisin

J.P. Goffart

Le personnel du laboratoire de la section sol et fertilisation

1	INTRODUCTION	5
1.1	PROBLEMATIQUE	5
1.2	INTERET ET CONTRAINTES DE LA REUTILISATION AGRICOLE DES EAUX USEES ...	6
1.3	POTENTIEL DE MOBILISATION DES EAUX USEES EN TUNISIE.....	6
1.4	EVOLUTION DES PERIMETRES IRRIGUES AVEC LES EAUX USEES TRAITEES.....	7
1.5	OBJECTIFS ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE.....	7
2	METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	9
2.1	APPROCHE GENERALE ET CONTRAINTES	9
2.2	STATION EXPERIMENTALE	9
2.3	CARACTERISATION DU SOL	9
2.4	CARACTERISTIQUES DES EAUX D'IRRIGATION.....	10
2.5	PROTOCOLES D'ESSAI	11
2.5.1	<i>Optimisation de la fertilisation azotée.....</i>	<i>11</i>
2.5.2	<i>Impact de l'utilisation des eaux usées traitées sur les systèmes d'irrigation localisée d'une culture de pomme de terre.....</i>	<i>16</i>
3	RESULTATS ET INTERPRETATION.....	21
3.1	OPTIMISATION DE LA FERTILISATION AZOTEE	21
3.1.1	<i>Expérimentations en plein champ sur une succession de cultures (1998- 2000): le sorgho, l'aubergine, l'orge et le sorgho</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Culture en plein champ du maïs 2001</i>	<i>31</i>
3.1.3	<i>Expérimentation sur maïs en cases lysimétriques 2001</i>	<i>35</i>
3.1.4	<i>Résultats des expérimentations annexes à l'aide de l'isotope lourd ¹⁵N sur sorgho</i>	<i>41</i>
3.1.5	<i>Conclusion</i>	<i>44</i>
3.2	IMPACT DE L'UTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES SUR LES SYSTEMES D'IRRIGATION LOCALISEE D'UNE CULTURE DE POMME DE TERRE.....	45
3.2.1	<i>Effet des eaux usées sur la durabilité des systèmes d'irrigation localisée 45</i>	
3.2.2	<i>Effet des eaux usées sur les paramètres agronomiques.....</i>	<i>50</i>
3.2.3	<i>conclusion</i>	<i>52</i>
4	LES BONNES PRATIQUES AGRICOLES	54
4.1	CHOIX DU SYSTEME D'IRRIGATION	54
4.2	PRATIQUES POUR MINIMISER LA LIXIVIATION DES NITRATES	56
5	CONCLUSION GENERALE.....	58
6	ANNEXE	60

OPTIMISATION DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES EN IRRIGATION

AVANT PROPOS

Le projet de recherche intitulé «Optimisation de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation» a été identifié parmi les priorités dans la programmation de la recherche en matière d'économie de l'eau en irrigation en Tunisie. Afin de donner à ce projet l'appui scientifique et financier, une coopération Tuniso-Belge a été établie et s'inscrit dans le cadre de transfert de technologie de l'AGCD.

Les contacts avec la Faculté universitaire et le Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux ont débuté en 1998 et depuis, un grand nombre d'échanges ont eu lieu qui ont permis l'élaboration des protocoles expérimentaux répartis sur les 4 années du projet. Ces échanges ont permis également d'assurer la mise en œuvre des différentes actions prévues, le suivi du déroulement des cultures et l'interprétation des résultats.

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

La Tunisie est caractérisée, dans la plupart de ses régions, par un climat semi-aride à aride. Le pays souffre autant de l'insuffisance des pluies que de leur mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace. Les contraintes du climat, la croissance démographique et les transformations économiques et sociales sont à l'origine d'une demande en eau sans cesse croissante. Parallèlement, le recours à l'irrigation est devenu une nécessité, étant donné l'importance du déficit hydrique climatique et l'intensification de l'agriculture. Or, face à ces demandes, les ressources en eau sont rares et insuffisantes. Ainsi, pour satisfaire l'ensemble des besoins en eau du pays et afin de réserver les eaux de bonne qualité à l'alimentation en eau potable, on est contraint d'utiliser des eaux de qualité marginale en agriculture. Dans ce contexte, l'utilisation des eaux usées traitées est devenue une nécessité et fait partie intégrante de la stratégie actuelle de mobilisation de toutes les ressources disponibles. Il a donc paru

nécessaire de mettre en place des programmes de recherche relatifs à la fixation des modalités d'utilisation des eaux usées en irrigation dans les conditions agro - climatiques tunisiennes. Ces travaux ont démarré vers les années 1980 et se poursuivent actuellement pour permettre de couvrir les différents aspects de la réutilisation. Les principaux travaux réalisés en Tunisie ont permis de préciser la faisabilité de la réutilisation. Toutefois, certaines questions, d'ordre agronomique et sanitaire, demandent à être maîtrisées afin de prévenir les risques de pollution et de contamination qui peuvent limiter cette utilisation à grande échelle et à long terme.

1.2 Intérêt et contraintes de la réutilisation agricole des eaux usées

Dans un souci de protection de l'environnement et de la santé publique, le pays ne cesse d'accroître ses efforts dans le domaine de l'assainissement et du traitement des eaux usées à travers la création et l'amélioration des stations d'épuration indépendamment de la réutilisation de cette ressource. Il serait dommage que cette eau ne soit pas valorisée chaque fois qu'il est possible. Parmi les domaines de la réutilisation, l'irrigation constitue le secteur le plus intéressant. En effet, elle procure à l'agriculture une ressource précieuse et renouvelable et libère un volume supplémentaire d'eau de bonne qualité pour des utilisations prioritaires. Elle constitue en outre, une alternative aux rejets dans les milieux récepteurs qui peuvent présenter des capacités d'absorption limitées. Par ailleurs, le contenu de ces eaux en fertilisants, notamment l'azote, le potassium et le phosphore, permet de diminuer les frais de fertilisation des sols. L'utilisation des eaux usées peut également prévenir l'eutrophisation et éviter la croissance des algues dans les étendues d'eau fermées, telles que lacs et étangs.

Si cette ressource constitue une valeur hydrique et un potentiel de matières fertilisantes, elle peut être également une source de pollution. Son contenu en éléments traces et en pathogènes et sa teneur élevée en azote peuvent présenter un risque pour la santé humaine.

1.3 Potentiel de mobilisation des eaux usées en Tunisie

Le traitement des eaux usées en Tunisie connaît actuellement un grand essor avec la création et le renouvellement des stations d'épuration. Actuellement, on compte environ 61 stations réparties sur l'ensemble du pays. La capacité totale de ces stations avoisine 207 millions de m³ par an. Pour l'année 2000, le volume traité a atteint 148 millions de m³ soit 85% du volume d'eaux usées collectées (174 millions de m³). Ce volume d'eaux

usées traitées atteindra 266 Mm³ en 2011. Les eaux usées sont à 74% d'origine domestique, 16% industrielle et 10% touristique et subissent un traitement secondaire biologique. Actuellement, un programme d'équipement en traitement tertiaire est mis en place pour une vingtaine de stations dont quelques unes sont déjà fonctionnelles. Cette nouvelle stratégie a pour objectif d'élargir la réutilisation des eaux usées traitées et d'enlever les restrictions imposées dans le cas de l'irrigation et, en même temps, de diminuer les risques d'eutrophisation et la pollution dû à l'excès d'azote ammoniacal.

Actuellement environ 30% de la totalité des effluents sont réutilisés pour l'irrigation. Afin de limiter les rejets d'eaux usées traitées dans le milieu récepteur, de nombreux projets d'irrigation sont en cours de réalisation et d'autres projets sont programmés.

1.4 Evolution des périmètres irrigués avec les eaux usées traitées

Parallèlement à la création de nouvelles stations d'épuration, plusieurs projets et périmètres irrigués avec les eaux usées traitées ont été créés. Au début des années 80, ces eaux ont été utilisées pour alimenter les périmètres agrumicoles du Cap-Bon et pour la création de nouveaux périmètres. Les superficies irriguées avec les eaux usées traitées se sont rapidement accrues entre 1988 et 2000 en passant de 1140 ha à 6630 ha dont la majorité est située aux alentours du grand Tunis. Les cultures céréalières et fourragères occupent 68% de ces terres, 28% étant occupées par l'arboriculture, le reste par des cultures industrielles. Le taux trop faible d'utilisation des eaux usées en irrigation est dû à l'absence de stockage, à la qualité des eaux, à la restriction d'usage pour certaines cultures et surtout aux réticences de l'agriculteur tunisien d'adopter cette pratique.

1.5 Objectifs et justification de l'étude

L'utilisation de ces eaux usées à grande échelle et à long terme sur des terres agricoles nécessite qu'on précise les conditions pour la rendre optimale. Il s'agit entre autre d'élargir la gamme des cultures utilisées, d'adapter les systèmes d'irrigation à la qualité des effluents et à la culture irriguée et d'ajuster la fertilisation aux besoins des cultures.

La fertilisation chimique et particulièrement azotée à apporter en fonction de la qualité des eaux usées traitées (EUT) n'est pas maîtrisée et exige des recherches en vue de valoriser au mieux les potentialités des eaux usées, d'économiser les engrais chimiques en adaptant la fumure aux besoins de la plante afin d'assurer une meilleure qualité des produits récoltés tout en minimisant la charge résiduelle en azote dans le sol (les excès

pouvant nuire aux cultures et contaminer la nappe). Les eaux usées sont surtout caractérisées par leur richesse en N et K, qui sont habituellement appliqués sous forme d'engrais minéraux et dont il faudra recalculer l'apport en fonction de l'irrigation. Cette question de fertilisation préoccupe les agriculteurs et les différentes Commissariats Régionaux de développement agricole.

Par ailleurs, les cultures actuellement irriguées avec ces eaux sont les agrumes, la vigne, les oliviers, les fourrages, les céréales et le coton ainsi que les terrains de golf et les jardins d'hôtel. Pour valoriser au mieux les eaux usées traitées et permettre l'extension de leur utilisation, il est nécessaire de diversifier les cultures et définir des assolements qui répondent au mieux aux exigences de la réutilisation et qui tiennent compte de la vocation régionale, tout en préservant la production tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

Les risques de contamination des sols, des cultures, des nappes, des utilisateurs et des consommateurs sont dépendants des systèmes d'irrigation. Sur certains périmètres irrigués par les eaux usées traitées (EUT), l'aspersion a provoqué l'apparition de brûlures sur les feuilles des végétaux. Ainsi, le choix des modes d'irrigation doit se faire en fonction de la qualité de l'eau et il est important d'identifier les techniques qui présentent le moins de risque.

En vue de répondre à ces questions, une série d'expérimentations a été entreprise. Les unes sont relatives à la gestion de la fumure azotée en présence d'irrigation avec les eaux usées traitées sur une succession de cultures. Les autres expériences consistent à évaluer l'impact sanitaire ou encore à comparer l'efficacité de différents systèmes d'irrigation et à déterminer leurs effets sur une culture de pomme de terre.

2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL

2.1 Approche générale et contraintes

L'expérimentation a été menée en plein champ. Les eaux de nappe disponibles dans la station expérimentale de Nabeul en quantité suffisante pour assurer les besoins des cultures se sont avérées chargées en nitrates. Ainsi, les traitements irrigués avec ces eaux ne peuvent être considérés comme témoin zéro azote. Toutefois, ces traitements permettent une comparaison des formes chimiques d'azote nitrique et ammoniacale contenues dans les deux types d'eau.

2.2 Station expérimentale

Les essais ont été installés à la station expérimentale de Oued Souhil à Nabeul. Cette station est située dans la région de Nabeul à environ 60 km de Tunis. Elle présente une superficie de 26 ha, parfaitement équipée pour réaliser des essais d'irrigation. Elle est connectée au réseau de distribution des eaux usées traitées provenant de la station d'épuration SE4. Elle compte 12 puits fonctionnels et 4 réseaux d'irrigation (souterrains) renouvelés à 80%. La vocation du domaine expérimental est agrumicole mais une parcelle est réservée pour les cultures annuelles.

2.3 Caractérisation du sol

Le protocole d'essai a été implanté sur la parcelle F5. Il s'agit d'un sol sableux présentant un pH de 7,3. Les teneurs en azote organique total (le tableau 1) diminuent en fonction de la profondeur.

Tableau 1 : Teneurs en azote des différents horizons du sol de la parcelle d'essai

Horizon	Teneurs en azote (%MS)
0 – 20 cm	0.141
20 – 40 cm	0.113
40 – 60 cm	0.072

La granulométrie et le PF du sol, les principales caractéristiques sont reprises dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : granulométrie du sol de la parcelle expérimentale (exprimé en %)

Horizon	Argile 0 - 2 μ	Limon 2 - 20 μ	Sable Très Fin 20 - 50 μ	Sable Fin 50 - 200 μ	Sable Grossier 200 - 2000 μ
0 - 20 cm	3.9	1.0	4.2	44.1	45.9
20 - 40 cm	3.9	1.0	4.2		
40 - 60 cm	3.9	1.0	4.2		
60 - 80 cm	3.9	1.0	4.2		
80 -100 cm	4.7	0.2	6.5	75.5	13.8
100-140 cm	4.7	0.2	6.5		
140-160 cm	4.9	0.8	6.5	50.8	36.4
160-180 cm	4.7	0.2	4.4	75.1	15.6

Tableau 3 : Détermination du PF du sol

Horizon	PF 2.5	PF3	PF4.2
0 - 20 cm	6.5	6.1	2.3
80-100 cm	5.1	3.9	1.3
160-180 cm	4.8	4.3	1.1

En supposant que le PF au ressuyage est de l'ordre de 2.5, on peut estimer une hauteur d'eau disponible sur une profondeur de sol de 1m de l'ordre de 80mm.

2.4 Caractéristiques des eaux d'irrigation

Les eaux d'irrigation sont de deux types :

- Les eaux usées proviennent de la station d'épuration SE₄ de Daar Châabane. Elles sont d'origine urbaine ayant subi un traitement biologique à boues activées.

Les teneurs en N, P et K sont variables au cours du temps mais on peut qualifier ces eaux de riches en azote (38.4 mg N/l) et en potassium (53.8 mg K/l) et pauvres en phosphore (3.4 mg P/l). Pour l'azote, les concentrations sont indiquées au niveau de chaque culture. Par ailleurs, la concentration en métaux lourds est faible et inférieure à la norme tunisienne. L'élément le plus représenté est le fer avec une teneur de 0.19 mg/l. Les teneurs des autres éléments (Cd, Co, Cu, Mn, Pb et Zn) varient entre 0.007 mg/l pour Cd et 0.05 mg/l pour Mn.

- les eaux de nappe disponibles sur la parcelle expérimentale sont chargées en nitrate

(30.3 mg N/l).

2.5 Protocoles d'essais

2.5.1 Optimisation de la fertilisation azotée

Cette étude a débuté en 1998 avec un protocole installé sur la parcelle F5 à la station expérimentale de Oued Souhil. Il s'agit de comparer différentes doses d'azote en fonction de deux qualités d'eau sur une succession de cultures à savoir le sorgho fourrager, l'aubergine, l'orge fourrager, le sorgho fourrager et le maïs grain.

L'expérimentation de plein champ a été complétée par une étude en cases lysimétriques où, en plus de la comparaison des différentes doses d'apport d'engrais N-minéral, le régime d'apport d'eau a varié.

2.5.1.1 Matériel végétal

Les cultures choisies font partie de la liste des cultures dont on autorise l'irrigation avec les eaux usées sauf l'aubergine qui est étudiée à titre expérimental.

* **Le sorgho fourrager (*Sorghum sudanense*)**, variété «Golden west» est une plante annuelle à croissance estivale (saison chaude). Durant la période de végétation, le nombre de coupes est variable selon la date de semis, la texture du sol et les conditions climatiques ; on pratique généralement 3 coupes si les conditions sont favorables. La période de semis la plus favorable en Tunisie se situe en mai.

* **L'aubergine (*Solanum melongena*)**, est traditionnellement produite en culture de primeur, de demi primeur ou précoce et de pleine saison. En culture de saison, il s'agit d'une plante annuelle à croissance estivale (saison chaude) ; les semis sont effectués en pépinière et sont suivis d'un repiquage en plein champ. La récolte commence en juillet et concerne les fruits entièrement colorés et brillants. La variété choisie est «Bonica obt INRAT»

* **L'orge (*Hordeum vulgare*)** est une graminée annuelle autogame. En Tunisie, l'orge est généralement semée entre la mi-octobre et la mi-décembre et récoltée à partir de mai jusqu'à juin. L'orge est utilisée soit sous forme de grain pour l'alimentation animale et humaine, soit en fourrage. Elle est également destinée à la fabrication d'alcool. La variété choisie est « Rihane »

* **Le maïs (*Zea mays*)** est une graminée annuelle à croissance estivale (saison chaude). La germination demande une température du sol supérieure à 10°C, et comprise entre 12 et 15°C. Le maïs est utilisée soit sous forme de grain, soit en fourrage. La variété choisie est « ARRAS »

2.5.1.2 Dispositif expérimental et Conduite des cultures en plein champ

Pour éviter tout risque de contamination par les eaux d'irrigation, la parcelle F5 a été divisée en deux parties, l'une irriguée avec l'eau de nappe, l'autre avec l'eau usée. Pour chaque qualité d'eau, quatre traitements dont un témoin sans apport d'azote minéral et trois doses croissantes d'azote minéral sont distribuées selon un carré latin comportant quatre répétitions. Les parcelles élémentaires ont une superficie de 45 m² et la parcelle utile est de 21 m² (figure 1).

Au fur et à mesure du déroulement de l'expérimentation, quelques modifications du protocole d'essai ont été apportées. Les doses d'azote minéral apportées pour chaque culture sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4 : dates et doses d'azote apporté sur la succession des cultures

Culture	compagne	Eaux de nappe				Eaux usées			
		N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
Sorgho fourrager	Juin –octobre 1998	0	100	200	250	0	25	50	75
Aubergine	Mai - septembre 1999	0	50	100	200	0	50	100	200
Orge fourrager	Novembre – avril 1999/2000	0	50	100	150	0	50	100	150
Sorgho fourrager	Mai – septembre 2000	0	50	100	150	0	0	0	0
				Eau de nappe					
Maïs grain	Mai – septembre 2001	90	90	90	90	0	0	0	0

91 m

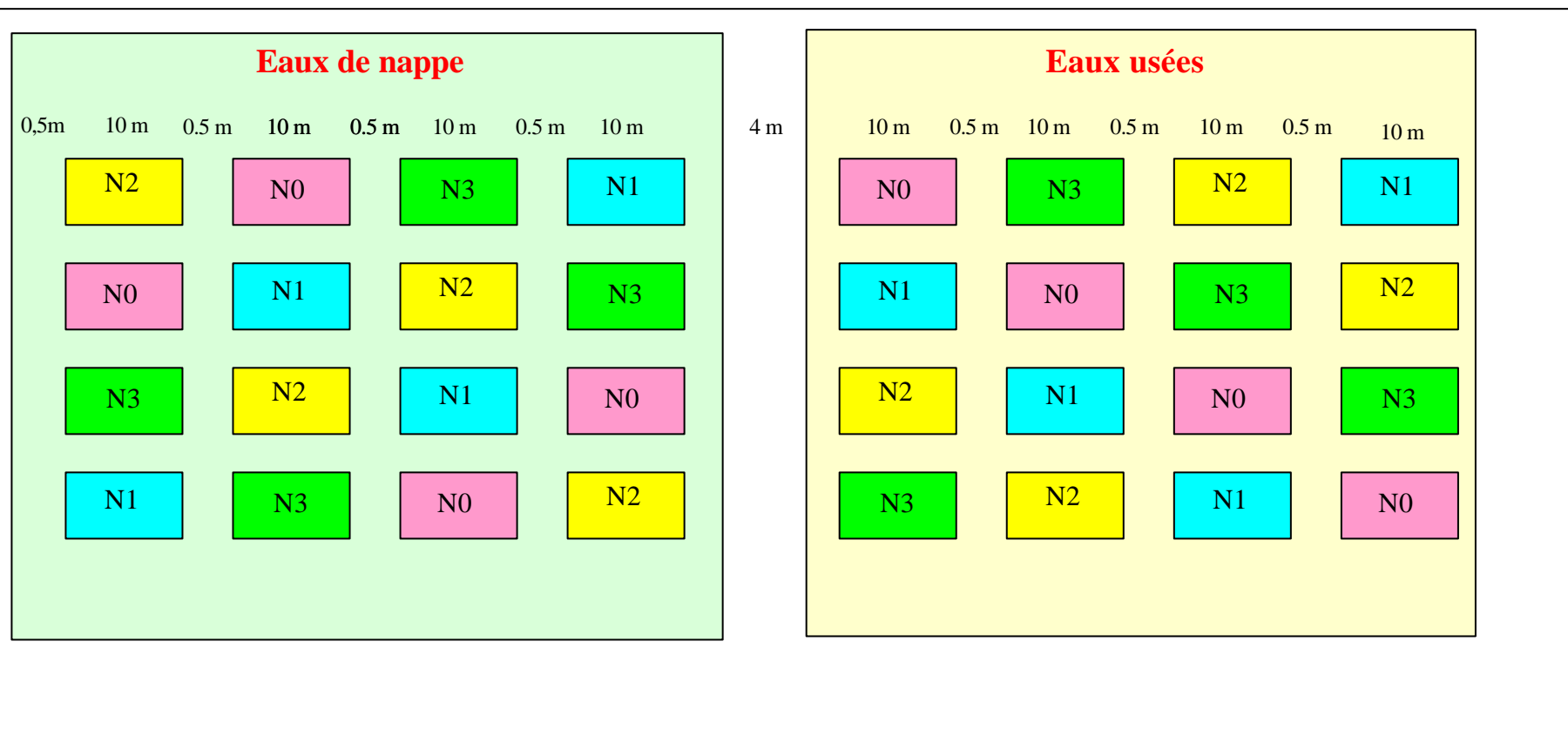


Figure 1 : Dispositif expérimental plein champ – Essai optimisation de la fertilisation azotée

Première campagne : le sorgho fourrager

Avant le semis, il a été procédé à un nivellement de la parcelle F5, à deux passages d'offset et à un labour profond. Par ailleurs, nous avons apporté comme fumure de fond :

- 300 kg/ha de superphosphate (45% de P_2O_5)
- 300 kg/ha de sulfate de potassium à 50%

Le semis a été effectué à la main le 9 et 10 juin 1998 en lignes espacées de 30 cm et avec un écartement de 15 cm. Une levée homogène a été observée sur toute la parcelle une semaine après le semis.

Pour tous les traitements, l'apport d'azote a été réalisé en deux fois soit le 30 juin 1998 et le 14 août 1998 (après la 1^{ère} coupe). La culture a été fauchée deux fois soit en début de floraison, le 7/8/98, environ 8 semaines après le semis, et la deuxième coupe le 27/10/98.

Deuxième campagne : l'aubergine

Pour l'aubergine, le semis a été effectué en pépinière puis repiqué en plein champ le 8 mai 1999 avec un écartement de 50 cm entre les lignes et de 45 cm sur la ligne.

Les récoltes ont démarré en juillet 1999 et se sont poursuivies jusqu'à fin septembre 1999. Quatre récoltes sont intervenues.

Troisième campagne : l'orge

Pour l'orge, le semis a été réalisé au semoir en novembre 1999 avec une densité de 182 kg/ha. Deux coupes (respectivement le 28 février et le 4 avril 2000) ont été réalisées.

Quatrième campagne : le sorgho fourrager

Au cours de la campagne 2000, des modifications ont été apportées au niveau du protocole expérimental. En effet, considérant les apports importants d'azote au cours des cycles culturaux précédents, résultant à la fois de la fumure minérale et des irrigations avec les deux types d'eau, la culture prévue de pomme de terre a été remplacée par le sorgho qui pompe beaucoup d'azote et nous avons décidé d'irriguer l'ensemble du dispositif expérimental avec de l'eau de nappe. L'engrais minéral a été uniquement appliqué sur les parcelles - eau de nappe du protocole initial et après la première coupe.

Cinquième campagne : le maïs en grain

Au cours de la campagne d'été 2001 et toujours en raison des apports importants d'azote par les eaux, il n'est plus prévu de construire une courbe de réponse à des apports croissants de fumure minérale. La comparaison porte sur l'eau usée d'une part et sur l'eau de nappe d'autre

part, cette dernière étant complétée en nitrate pour atteindre le même apport d'azote total quelque soit le type d'eau utilisé.

2.5.1.3 Dispositif expérimental en cases lysimétriques

Les cases lysimétriques sont installées sur la station expérimentale de Nabeul. L'essai entrepris a un double objectif. Il permet d'introduire un témoin zéro azote et d'essayer de diluer l'eau usée par des mélanges en proportions différentes entre l'eau usée et l'eau de distribution. Le protocole expérimental est résumé dans le tableau 5.

Tableau 5 : Protocole expérimental en cases lysimétriques

EAU CLAIRE DE DISTRIBUTION			EAU USEE		
	Irrigation	traitement		Irrigation	traitement
1	ETM/0,95	0 kg/ha N	6	ETM/0,95	1/3 usée - 2/3 distribution
2	ETM/0,95	80 kg/ha N	7	ETM/0,95	2/3 usée - 1/3 distribution
3	ETM/0,95	160 kg/ha N	8	ETM/0,95	eau usée
4	ETM/0,95	240 kg/ha N	9	ETM/0,95	eau usée + 80 N/ha*
5	ETM/0,95	320 kg/ha N	10	2/3 ETM/0,95	eau usée

Pour les traitements de 1 à 9, l'irrigation totale est de 840 mm alors qu'elle est de 559 mm pour le traitement 10. L'eau usée présente une teneur en azote de 42 mg/l.

2.5.1.4 Echantillonnages et analyses

Pour la croissance, la production et les analyses minérales des plantes, les prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble des traitements et des répétitions au moment des coupes ou des récoltes sauf pour le maïs où on a réalisé des prélèvements échelonnés au cours du cycle végétatif. L'évolution de la production de biomasse a été déterminée par la mesure de la matière sèche. Le jour même du prélèvement, les racines extraites sont débarrassées soigneusement des particules de terres adhérentes par lavage au jet et trempage répété dans un récipient contenant de l'eau puis elles sont séchées rapidement avec du papier filtre. Chaque partie a ensuite été pesée pour la détermination des poids frais. La matière sèche (MS) a été

déterminée après séchage à 80°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Ces mêmes échantillons ont été utilisés pour l'analyse chimique. Chaque partie a été finement broyée et la poudre végétale obtenue a, par la suite, été minéralisée en vue du dosage de l'azote.

A chaque irrigation, un prélèvement d'eau usée est effectué en vue de déterminer sa teneur en azote.

Au niveau du sol, des prélèvements ont été réalisés après la culture du sorgho et la culture du maïs sur l'ensemble de la parcelle.

• Dosage de l'azote dans la plante

La méthode utilisée est celle de Kjeldahl. La poudre végétale est attaquée avec de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur. La matière organique est ainsi transformée en CO₂ et H₂O par oxydation et l'azote est fixé par H₂SO₄ à l'état de sulfate d'ammonium. La distillation effectuée à l'aide d'un appareil Büchi, est réalisée en présence de soude et l'ammoniac libéré est entraîné par un courant de vapeur d'eau et recueilli dans un excès de solution d'acide borique en présence de rouge de méthyle et de vert de bromocrésol et titré par HCl (N/20).

• Dosage de l'azote minéral dans le sol

Le sol est prélevé jusqu'à une profondeur de 60 cm et les carottes sont scindées en (0-20 ; 20-40 et 40-60 cm).

On utilise comme extractif une solution de chlorure de potassium à 0.5N. Le dosage des nitrates est fait par colorimétrie à 410 mn à l'aide de la brucine.

Le dosage de l'ammonium est fait par distillation par entraînement à la vapeur après transformation de l'ammonium en ammoniac avec MgO.

2.5.2 Impact de l'utilisation des eaux usées traitées sur les systèmes d'irrigation localisée d'une culture de pomme de terre

2.5.2.1 Aspect technique et hydraulique

Afin d'évaluer la durabilité et les performances techniques et hydrauliques des distributeurs d'irrigation localisée avec des eaux usées traitées et des eaux de nappe et d'étudier l'efficacité des différentes techniques d'irrigation utilisées en Tunisie pour la pomme de terre, des essais ont été menés durant 1998/99, 2000 et 2001, d'une part à la station expérimentale d'Oued

Souhil à Nabeul sur une parcelle de pomme de terre de 1ha de superficie divisée en deux blocs, et d'autre part, des essais au laboratoire de l'INRGREF à Tunis. Le premier bloc est irrigué avec des eaux usées traitées et le deuxième avec des eaux de la nappe.

Les deux blocs ont été équipés avec les mêmes systèmes d'irrigation suivant la figure 2.

- 10 rampes de goutteurs intégrés de débit 4 l/h sous une pression de 1 bar avec un espacement entre goutteurs de 40 cm.
- 5 rampes de goutteurs en dérivation autorégulants d'un débit unitaire égal à 4 l/h sous une pression de 1 bar avec un espacement entre goutteurs de 40 cm.
- 5 rampes de goutteurs en dérivation non-autorégulants d'un débit égal unitaire à 4 l/h sous une pression de 1 bar avec un espacement entre goutteurs de 40 cm.
- 4 rampes de micro-aspiration espacées de 3 mètres correspondant à 20 lignes de culture de pomme de terre avec 15 micro-asperseurs par rampe, ayant un débit unitaire de 80 l/h et une portée de 2,5 mètres sous une pression de 1 bar.
- 20 raies améliorées sachant qu'elles sont alimentées tous les 10 mètres par une vanne régulatrice de débit dépendante d'un réseau en polyéthylène en couverture totale installé sur les raies.

Les essais au laboratoire de l'INRGREF ont permis dans un premier temps d'évaluer les performances hydrauliques des différents distributeurs utilisés en irrigation localisée ainsi que leurs sensibilités au colmatage physique dans un second temps. Pour cela, un banc d'essais permettant de réaliser le test d'homogénéité de fabrication et celui de l'établissement de la loi débit-pression conduits conformément aux spécifications de la norme ISO 9260 et 9261 a été utilisé.

BLOC I
Eaux usées traitées

BLOC II
Eaux de nappe

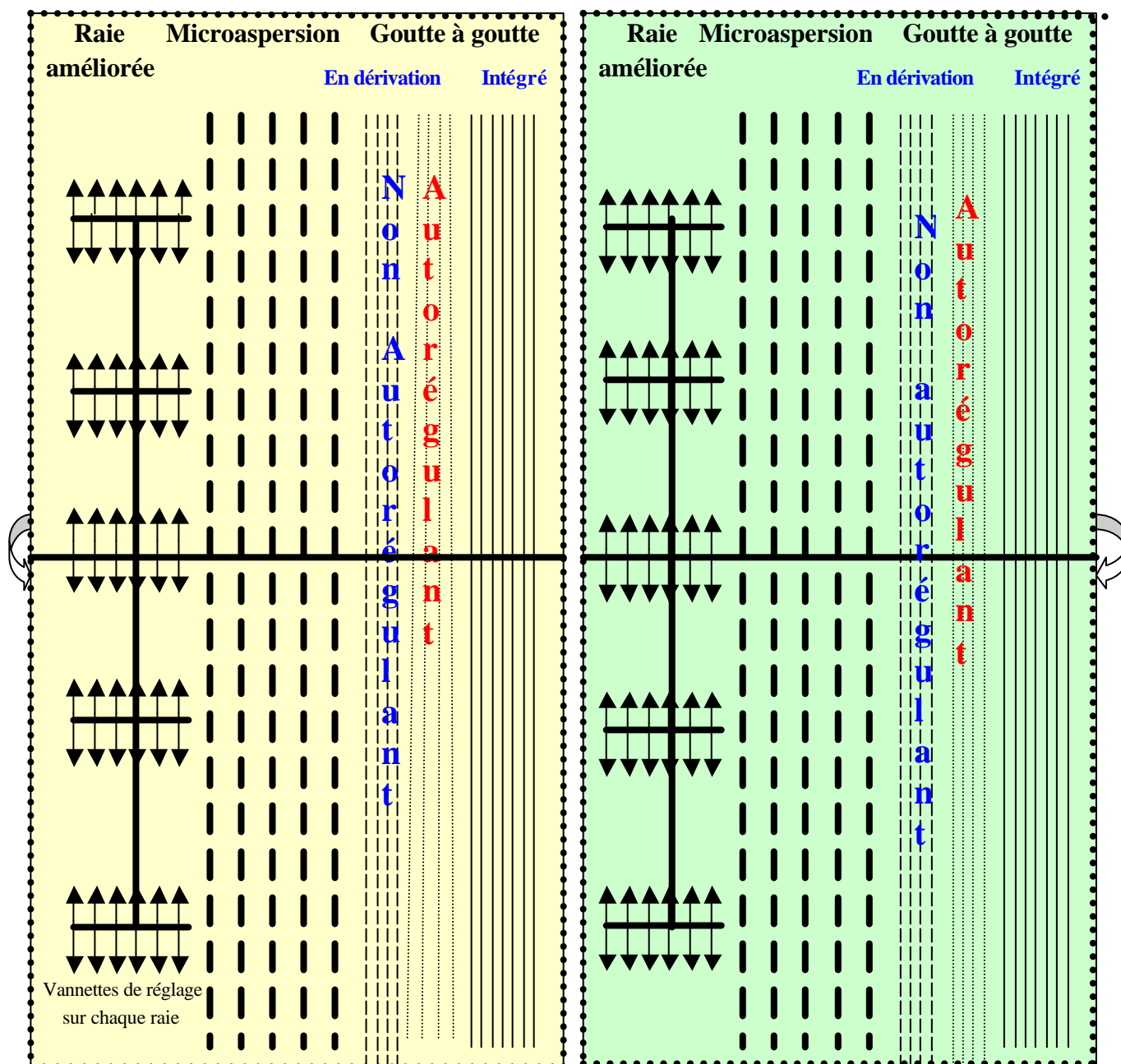


Figure 2 : dispositif expérimental systèmes d'irrigation

Les essais de colmatage selon le protocole CEMAGREF et les essais avec des eaux usées traitées ont été réalisés comme suit :

La mise sous pression des distributeurs a été assurée par un groupe électro-pompe multicellulaire équipé d'un by-pass à débit réglable et puisant dans un bac métallique galvanisé de 500 l de contenance. La pression des essais était contrôlée en milieu de rampe et mesurée à 0.01 bar près par un manomètre de précision ayant une étendue de mesure variable entre 0 et 5 bar. Les volumes écoulés ont été mesurés par pesée à l'aide d'une balance de précision. Les temps de remplissage mesurés au chronomètre ont été de 3 minutes pour les goutteurs et de 1 minute pour les micro-asperseurs. Ce test a été réalisé avec un contrôle de la température qui a varié entre 23 et 24 °C.

Les 4 distributeurs ayant servi à l'établissement de la loi débit-pression (ISO9260) ont subi le test d'obstruction physique. Leurs débits ont été mesurés sous une pression de 2 bar et en eau claire. Ce débit sert par la suite de référence pour la détermination du degré d'obstruction des distributeurs en suivant le protocole « CEMAGREF ». Ce dernier comporte 4 phases distinctes et successives de 40 heures, scindées en 5 temps de colmatage de 8 heures et séparés par un temps de repos de 16 heures. Ceci permet de simuler un fonctionnement pratique en plein champ et d'éviter une élévation trop importante de la température de l'eau du bac inévitable en circuit fermé en fonctionnement continu. La pression de fonctionnement est maintenue à 2 bar.

Les diverses phases correspondent à l'ajout d'une charge constante en particules minérales de l'eau du bac mais à granulométries croissantes. Il y a eu donc un enrichissement progressif de l'eau du bac en éléments de texture de plus en plus grossière, sans retrait des éléments déjà ajoutés.

- 1^{ère} phase : 125 mg/l de particules de granulométrie inférieure à 63 µm.
- 2^{ème} phase : 125 mg/l de particules de granulométrie comprise entre 63 et 106 µm.
- 3^{ème} phase : 125 mg/l de particules de granulométrie comprise entre 106 et 212 µm.
- 4^{ème} phase : 125 mg/l de particules de granulométrie comprise entre 212 et 600 µm.

L'ensemble du débit prélevé (distributeur + débit d'extrémité) étant réinjecté dans le bac, il y a eu constance pratique de la teneur de l'eau en éléments solides. Un agitateur à hélice installé au fond du bac et fonctionnant simultanément avec le groupe électropompe de mise en pression permet de maintenir une bonne homogénéité du mélange, les particules étant maintenues en suspension dans l'eau.

La sensibilité à l'obstruction physique est appréciée à partir du comportement des distributeurs au cours de ces quatre phases d'obstruction avec recommandation de la finesse de filtration à adopter pour éviter le bouchage selon la classification bien définie.

Pour les essais avec les eaux usées traitées, le même banc ainsi que le protocole de mesure ont été utilisés sauf que l'alimentation du bac a été renouvelée après chaque 8 heures de fonctionnement. Aucune charge en particules n'a été apportée.

L'évaluation au champs des performances hydrauliques des différents distributeurs a été basé sur la méthode du quartile inférieur (Méthode de Keller et Karmelli). Elle consiste à suivre l'évolution des débits dans le temps de 16 distributeurs choisis suivant un plan qui coupe chaque sous bloc en trois parties dans les sens longitudinal et transversal.

Dans le bloc eau usée et pendant le déroulement des irrigations, l'intervention humaine pour le décolmatage des distributeurs ayant des débits réduits visuellement ou complètement nuls, a été comptabilisée.

2.5.2.2 Mesure du rendement de la pomme de terre

A la récolte, le rendement a été mesuré. En outre, les tubercules récoltés ont été répartis en diverses catégories suivant le calibre : <40, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 mm et plus.

3 RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1 Optimisation de la fertilisation azotée

Pour l'interprétation des résultats, il a semblé important de faire le bilan de l'utilisation de l'azote depuis le début de l'expérimentation en 1998. Ainsi, l'ensemble des cultures entreprises en plein champ (sorgho, aubergine, orge et sorgho) a été prise en compte. Quant au maïs de l'année 2001, il sera traité indépendamment par la suite en raison des trop faibles rendements observés (autre élément limitant que N comme le Mg par exemple ou place de la culture dans la rotation inadéquate). De plus, l'étude réalisée en cases lysimétriques en 2001 sur le maïs sera commentée séparément.

3.1.1 Expérimentations en plein champ sur une succession de cultures (1998-2000): le sorgho, l'aubergine, l'orge et le sorgho

3.1.1.1 Bilan de l'azote apporté par les eaux et les fumures depuis le début de l'expérimentation en plein champ

Le tableau 6 reprend les quantités totales d'azote apportées par les eaux d'irrigation et l'engrais minéral sur le dispositif expérimental pour l'ensemble des 4 cultures successives (sorgho, aubergine, orge et sorgho)

Tableau 6: Apport d'azote sur le dispositif expérimental depuis le début de l'expérimentation

Culture –Année	Apport N/Eau	N Engrais minéral				Apport N total			
		N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
EAU NAPPE									
Sorgho 1998	327	0	100	200	250	327	427	527	577
Aubergine1999	545	0	50	100	200	545	595	645	745
Orge 2000	226	0	50	100	150	226	276	326	376
Sorgho 2000	233*	0	50	100	150	233	283	333	383
TOTAL	1331	0	250	500	750	1331	1581	1831	2081
EAUX USEES									
Sorgho 1998	414	0	25	50	75	414	439	464	490
Aubergine1999	674	0	50	100	200	674	724	774	874
Orge 2000	237	0	50	100	150	237	287	337	387
Sorgho 2000	233*	0	0	0	0	233	233	233	233
TOTAL	1558	0	125	250	425	1558	1683	1808	1983

* eau de nappe sur tout le protocole

On peut observer que dès le niveau N2, la quantité totale de N apporté se révèle équivalente pour les deux types d'eau en raison de la richesse en N nitrique de l'eau de nappe. Il faut rappeler que les eaux de nappe présentent une teneur en N de 30,3 mg/l sous forme NO₃ et les eaux usées ont des teneurs de 31 à 38 mg/l (NH₄).

3.1.1.2 Effet des traitements sur la production de différentes cultures

Une analyse de la production est d'abord faite culture par culture, ensuite, l'interprétation concerne toute la succession culturale.

Les résultats relatifs à la culture du sorgho fourrager réalisée au cours de la campagne 1998 sont repris dans le tableau 7.

Tableau 7 : Evolution de la production du sorgho au cours des deux coupes réalisées

		Production en en matières fraîche et sèche (t/ha)			
		matière fraîche		matière sèche	
		1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe
EAU NAPPE	N0	22,143	19,405	3,682	5,202
	N1	31,071	12,687	5,704	3,323
	N2	30,952	12,619	6,132	3,326
	N3	36,072	12,857	6,423	3,474
EAUX USEES	N0	47,262	4,524	7,311	1,170
	N1	48,228	7,976	7,759	1,906
	N2	45,476	5,476	8,077	1,066
	N3	43,691	9,524	6,833	2,471

MF: matière fraîche

MS: matière sèche

Pour l'irrigation avec les eaux usées, aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements. Ainsi, l'apport de N par l'eau usée a semblé conduire au rendement le plus élevé, les besoins en N étant couverts par cette seule source. L'azote de la fumure minérale n'est donc pas valorisé. Lors de la deuxième coupe, les rendements obtenus sont nettement plus faibles et beaucoup plus variables que ceux de la première coupe. Ceci pourrait être une conséquence de la forte croissance enregistrée pendant la première coupe ce qui a épuisé la plante en ses réserves.

Concernant les eaux de nappe et pour la première coupe, l'apport d'azote minéral a amélioré significativement la production du sorgho par rapport au témoin non fertilisé. Toutefois, aucun effet dose n'a été noté. Au cours de la seconde coupe, les rendements obtenus sont plus faibles et tendent à diminuer en présence d'apport d'azote par rapport au témoin non fertilisé, toutefois, les différences obtenues n'étant pas significatives au seuil 5%.

Pour la première coupe, les rendements obtenus sous irrigation avec les eaux usées sont meilleurs que ceux obtenus avec les eaux de nappe. Les rendements du témoin irrigué avec les eaux usées sans apport d'azote minéral (N0) sont significativement plus élevés que ceux du traitement "eau de nappe avec ou sans apport d'azote minéral". Par contre lors de la deuxième coupe, les rendements obtenus avec les eaux usées sont inférieurs à ceux obtenus sous irrigation avec les eaux de nappe.

Il semble que les différences de développement du sorgho lors de la première coupe ainsi que les apports d'azote en excès aient un effet dépressif sur la réponse de la deuxième coupe. Ce phénomène se marque particulièrement sous eaux usées traitées où la repousse est non seulement faible mais aussi irrégulière.

Pour les deux qualités d'eau, les doses d'azote apportées n'induisent pas de différences au niveau des rendements en matière sèche cumulés et l'optimum de fumure azotée est probablement déjà dépassé.

Pour l'aubergine cultivée en 1999, les rendements en fruits (tableau 8) des parcelles irriguées avec les eaux usées subissent une légère augmentation à la dose N2 puis diminuent à la dose N3 pour laquelle la production est inférieure au témoin N0 (eau usée et eau de nappe). Pour l'eau de nappe, une légère augmentation est notée pour les fortes doses. Excepté pour la dose N3, les rendements obtenus en présence d'eau usée et d'eau de nappe sont similaires.

Concernant, la production de matières fraîche et sèche de la partie aérienne végétative (tableau 8), elle subit une diminution avec l'apport de l'engrais minéral dès la dose la plus faible au niveau des eaux usées. Pour l'irrigation avec les eaux de nappe, elle augmente pour les doses N1 et N2 puis diminue pour la dose la plus élevée. Ces chutes de production peuvent être reliées à un excès d'azote.

Tableau 8 : Evolution de la production en matières fraîche et sèche de l'aubergine en fonction des traitements (t/ha).

		Production en matières fraîche et sèche			
		fruits (t/ha)		feuilles et tiges (t/ha)	
		MF	MS	MF	MS
Eau de nappe	N0	60.6	4.70	19.817	3.824
	N1	59.3	4.65	27.010	5.644
	N2	65.4	5.13	24.911	4.765
	N3	64.7	5.52	17.098	3.203
Eau usée	N0	61.1	5.15	22.202	4.398
	N1	60.9	4.92	18.262	3.504
	N2	65.1	5.28	16.245	3.178
	N3	56.5	4.69	19.340	3.319

Les résultats relatifs à la production de biomasse par la culture d'orge sont repris dans le tableau 9.

Tableau 9 : Evolution de la production de la partie aérienne de l'orge (t/ha)

Production en matières fraîches et sèche de l'orge (t/ha)						
EAU DE NAPPE						
	Matière fraîche			Matière sèche		
	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	Coupes cumulées	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	Coupes cumulées
N0	9.50	5,8	15.25	1.53	1,07	2.60
N1	10.19	7,4	17.56	1.51	1,33	2.84
N2	15.31	6,0	21.31	2.23	1,00	3.23
N3	14.44	7,6	22.06	1.98	1,24	3.22
EAUX USEES						
	Matière fraîche			Matière sèche		
	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	Coupes cumulées	1 ^{ère} coupe	2 ^{ème} coupe	Coupes cumulées
N0	8.31	9,94	18.25	1.12	1,76	2.88
N1	10.06	11,25	21.31	1.18	1,87	3.05
N2	12.13	11,13	23.25	1.54	1,78	3.32
N3	13.44	9.88	23.31	1.63	1,60	3.23

Il ressort qu'au cours de la première coupe, les rendements en orge subissent une augmentation avec l'apport d'azote minéral en présence d'eau usée. Il faut également remarquer que pour l'eau de nappe, les rendements augmentent dans les traitements N2 et N3 et dépassent les rendements obtenus en présence des eaux usées. Quand on considère le cumul des deux coupes, les rendements augmentent légèrement avec l'apport d'azote minéral et sont presque équivalents pour les deux types d'eau.

La production de matière sèche de la partie aérienne suit l'évolution de la matière fraîche.

Pour le sorgho fourrager cultivé en 2000, les résultats relatifs à la production en matières sèches sont indiqués dans le tableau 10. Il faut rappeler que cette culture a été irriguée uniquement avec de l'eau de nappe.

Tableau 10: Production de matière fraîche et sèche par le sorgho 2000 (t MS/ha)

Précédent	EAU DE NAPPE					
	Matière fraîche			Matière sèche		
	1^{ère} coupe	2^{ème} coupe	Total	1^{ère} coupe	2^{ème} coupe	Total
N0	31.7	14.4	46.1	7.9	4.1	12.1
N1	29.2	18.1	47.3	7.2	5.1	12.3
N2	31.0	22.6	53.6	7.8	6.5	14.3
N3	28.9	24.9	54.7	7.0	7.0	14.0
Précédent	EAU USEE					
	Matière fraîche			Matière sèche		
	1^{ère} coupe	2^{ème} coupe	Total	1^{ère} coupe	2^{ème} coupe	Total
N0	32.1	9.3	41.4	8.6	2.5	11.2
N1	29.4	12.4	41.8	8.4	3.5	11.8
N2	31.4	11.7	43.1	9.1	3.3	12.4
N3	31.0	11.9	42.9	8.7	3.3	12.0

La production de matière sèche totale est du même ordre de grandeur (supérieure à 10 t MS/ha) pour les deux précédents «types d'eau» mais se répartit différemment en fonction de la coupe, la deuxième coupe produisant moins de matière sèche dans le traitement précédent «eau usée». Dans le traitement eau de nappe, l'azote apporté par l'engrais en 2^{ème} coupe a un effet bénéfique.

La production totale de matière sèche des parties aériennes des différentes cultures étudiées est reprise au tableau 11.

Tableau 11: Production de matière sèche (kg/ha) des différentes cultures

	Production de matière sèche (kg/ha)			
EAU NAPPE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	8884	9027	9458	9897
Aubergine	8524	10294	9895	8723
Orge	2600	2840	3230	3220
Sorgho	12100	12300	14300	14000
TOTAL	32108	34461	36883	35840
EAU USÉE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	8481	9665	9143	9304
Aubergine	9548	8424	8458	8009
Orge	2880	3050	3320	3220
Sorgho	11200	11800	12400	12000
TOTAL	32109	32939	33321	32533

Pour l'eau de nappe, la production de matière sèche est croissante de N0 à N2 alors qu'elle ne varie pas en présence des eaux usées traitées. Par ailleurs, la production apparaît légèrement supérieure en eau de nappe pour les traitements N1 à N3. Au niveau du traitement N0, la matière sèche produite est de même ordre de grandeur pour les deux qualités d'eau.

Le sorgho cultivé en 2000 a conduit à des rendements supérieurs à ceux obtenus en 1998 alors qu'il n'avait pourtant reçu qu'une fumure pour les traitements eau de nappe et pas de fumure pour les traitements eaux usées. Manifestement, ce sorgho a valorisé des apports d'azote antérieurs.

3.1.1.3 Quantités d'azote exportées depuis le début de l'expérimentation

En ce qui concerne la quantité totale d'azote exportée (tableau 12), elle est régulièrement croissante avec le niveau d'azote apporté. Au niveau N0, elle se révèle toutefois supérieure en présence des eaux usées par rapport à l'eau de nappe. Pour N2 et N3, l'exportation apparaît équivalente pour les deux types d'eau reflétant un même niveau de disponibilité (tableau 1).

Au niveau N0, les deux cultures de sorgho ont conduit à des exportations du même ordre de grandeur. Il n'en est pas de même au niveau N3 où les exportations ont doublé en 2000 par rapport à 1998 traduisant ici un enrichissement important en N de la matière sèche produite.

Tableau 12 :Quantité d'azote exportée (kg N/ha) depuis le début de l'expérimentation

	Quantité d'azote exportée (kg N/ha)			
EAU NAPPE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	113	129	139	117
Aubergine	130	169	171	145
Orge	65	72	94	98
Sorgho	123	162	211	265
Total	431	532	615	625
EAU USEE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	126	145	144	142
Aubergine	180	167	163	135
Orge	94	97	118	115
Sorgho	131	152	171	236
Total	531	561	596	628

3.1.1.4 Efficience de l'azote apporté depuis le début de l'expérimentation

Après la culture du sorgho, l'efficience de l'azote apporté depuis le début de l'expérimentation en englobant l'ensemble des cultures étudiées a été estimée.

- Efficience agronomique

L'efficience agronomique traduit la production de matière sèche obtenue par chaque kg d'azote apporté (tableau 13). Elle se situe globalement en moyenne à 20 kg MS/kg N. Elle décroît avec la dose totale apportée. Elle est surtout influencée par la culture du sorgho et par la culture de 2000. Le sorgho apparaît comme une culture susceptible de valoriser des apports élevés d'azote et particulièrement des reliquats engendrés par des apports antérieurs (sorgho eau usée sans apport d'azote minéral frais). A l'opposé, c'est la culture d'orge qui valorise le moins bien l'azote en terme de production de matière sèche. La performance modeste de l'aubergine à cet égard est plutôt à attribuer à l'excès d'eau d'irrigation apporté.

Tableau 13: Efficience agronomique depuis le début de l'expérimentation (kg MS/ kg N apporté)

	Efficience agronomique(kg MS produit/kg N apporté)			
EAU NAPPE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	27	21	18	17
Aubergine	16	17	15	12
Orge	12	10	10	9
Sorgho	52	43	43	37
TOTAL	24	22	20	17
EAU USEE	N0	N1	N2	N3
Sorgho	21	22	20	19
Aubergine	14	12	11	9
Orge	12	11	10	8
Sorgho	48	51	53	51
TOTAL	21	20	18	16

- Efficience d'utilisation de l'azote

En moyenne, l'azote total apporté est apparemment utilisé à raison de 30% par l'ensemble des cultures (tableau 14). Ici aussi le sorgho de 2000 apparaît comme la culture la plus efficiente conduisant jusqu'à une efficience apparente de 100% pour N3 et en présence d'eau usée, toujours en raison des reliquats antérieurs de N. Pour cette raison, il a semblé utile d'exprimer ces efficaciences en fonction du cumul des apports d'azote (tableau 15).

Tableau 14: Efficience d'utilisation de l'azote (N exporté/N apporté)

	Efficience d'utilisation de l'azote (N exporté/N apporté)			
EAU NAPPE	No	N1	N2	N3
Sorgho	35	30	26	20
Aubergine	24	28	27	20
Orge	29	26	29	26
Sorgho	53	57	63	69
TOTAL	32	34	34	30
EAU USEE	No	N1	N2	N3
Sorgho	30	33	31	29
Aubergine	27	23	21	15
Orge	40	34	35	30
Sorgho	56	65	73	101
TOTAL	34	33	33	32

Tableau 15 : Efficience d'utilisation de l'azote sur base de l'apport total de N cumulé

	Efficience d'utilisation de l'azote (N exporté/N apporté)			
Eau nappe	N0	N1	N2	N3
Sorgho	35	30	26	20
Aubergine	15	17	15	11
Orge	6	6	6	6
Sorgho	9	10	12	13
TOTAL	32	34	34	30
Eau usée	N0	N1	N2	N3
Sorgho	30	33	31	29
Aubergine	17	14	13	10
Orge	7	7	8	7
Sorgho	8	9	10	12
TOTAL	34	33	33	32

On observe dès lors qu'au fur et à mesure du déroulement de l'expérimentation, et à supposer que l'azote ait été conservé dans le profil, l'efficience d'utilisation de l'azote est progressivement décroissante jusqu'à ce qu'on limite l'apport (2^{ème} culture de sorgho).

3.1.1.5 Evaluation de l'azote dans le sol

Une évaluation de l'azote excédentaire (c'est à dire supposé stocké dans le sol et perdu) a été faite après la culture de sorgho 2000 (tableau 16).

Tableau 16 : Azote stocké dans le profil et perdu depuis le début l'expérimentation

	Azote (kg/ha)	
	Eau de nappe	Eau usée
N0	900	1027
N1	1049	1122
N2	1223	1226
N3	1456	1355

Lorsqu'on analyse le profil en N minéral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$), il apparaît (tableau 17) qu'il est globalement plus riche et distribué sur toute la profondeur pour l'irrigation avec les eaux de nappe traduisant un risque de perte par lessivage.

Tableau 17: Profil en azote minéral après récolte du sorgho 2000 (exprimé en total N-nitrique +ammoniacal :kg/ha)

	N minéral (kg/ha)							
	Eau de nappe				Précédent Eau usée			
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	Total	0-20cm	20-40cm	40-60cm	Total
N0	22,2	21,3	22,1	65,6	13,2	12,3	10,1	35,6
N1	20,9	22,7	21,2	64,5	17,2	17,0	14,9	49,1
N2	24,6	21,5	20,8	66,9	18,6	18,5	17,3	54,4
N3	20,6	22,2	23,6	66,4	13,1	12,9	12,6	38,5

Il apparaît évident aussi que la phase minérale ne reflète nullement les différences observées au bilan et qu'il est probable qu'une partie importante de cet azote excédentaire soit immobilisée dans le sol sous forme organique.

L'examen du tableau 18 montre que le résidu minéral du sol se présente principalement sous forme ammoniacale. Pour l'eau de nappe cependant, la fraction nitrique apparaît plus élevée alors qu'elle est négligeable pour le précédent eau usée. Rappelons qu'au cours de l'année 2000, l'eau de nappe n'apporte de l'azote que sous forme nitrique. En outre, il n'y a pas d'influence de la fumure apportée en seconde coupe dans le traitement «eau de nappe».

Tableau 18: Profil en azote nitrique (NO_3^-) et ammoniacal (NH_4^+) du sol après culture du sorgho 2000 (kg/ha)

	Eau de nappe						Eau usée					
	0-20cm		20-40cm		40-60cm		0-20cm		20-40cm		40-60cm	
	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
N0	17,9	4,3	17,3	4,0	17,7	4,4	12,0	1,2	11,3	1,0	9,3	0,8
N1	16,7	4,2	18,9	3,8	17,6	3,3	15,7	1,5	15,6	1,4	13,5	1,4
N2	20,3	4,3	18,0	3,5	16,8	4,0	16,8	1,8	16,7	1,8	15,4	1,9
N3	16,6	4,0	18,2	4,0	19,6	4,0	12,1	1,0	12,0	0,9	11,8	0,8

3.1.2 Culture du maïs 2001 en plein champ

Se basant sur les résultats antérieurs et sur les reliquats en N minéral observés, il a été décidé pour 2001 d'en revenir à un protocole où les deux types d'eaux sont comparés sans complémentation de fumure minérale pour l'eau usée.

Les conditions d'implantation se sont avérées normales et la densité de population observée peut être qualifiée de proche de l'optimum (66 000 pieds par ha). Par contre en cours de culture, il est apparu une croissance hétérogène des plants et des signes de jaunissement. A ce stade, et compte tenu de l'historique de l'expérimentation, on ne peut attribuer ces symptômes à une carence en azote. Alors qu'un effet rotation et précédent cultural (sorgho) peut être suspecté, on ne peut cependant pas exclure un autre élément nutritif devenant limitant comme le magnésium. Il est, en effet, bon de rappeler que les eaux usées apportent du potassium en quantité importante (concentration >50mg K/l) et en tout cas, pour la plupart des cultures, excédentaire par rapport aux besoins.

De plus, à cause de divers aléas expérimentaux (hétérogénéité, pertes d'épis), il n'a pas été possible de considérer les résultats jusqu'à la récolte grain sec.

3.1.2.1 Quantité d'eau d'irrigation et d'azote appliqué au cours de la campagne du maïs 2001

Le tableau 19 reprend les quantités d'eau d'irrigation et les apports d'azote (eau et engrais) réalisés en 2001. Il est à signaler que pour les 2 premières irrigations (avant le premier prélèvement), l'eau usée n'était pas disponible et a été remplacée par de l'eau de nappe.

Tableau 19: Quantités d'eau d'irrigation et d'azote appliquées au cours de la campagne du maïs 2001

	Volume d'eau d'irrigation cumulé avant chaque prélèvement (mm)	Eau de nappe			Eau usée		
		N engrais kg/ha	N eau	Total kg/ha	N engrais kg/ha	N eau	Total kg/ha
1^{er} P	255	30	77	107	0	61 + 22	83
2^{ème} P	532	60	161	221	0	61+ 139	200
3^{ème} P	644	60	195	255	0	61+ 186	247
4^{ème} P	780	90	236	326	0	61+ 243	304

P : prélèvement

3.1.2.2 Effets des traitements sur la production et les exportations de l'azote du maïs

Le tableau 20 reprend les productions de biomasse aérienne (MS) et les exportations d'azote pour la partie aérienne et pour la plante entière observées jusqu'au stade hiteux du maïs. On observe une production plus importante sur les parcelles eau de nappe avec probablement un effet bénéfique de la fumure azoté starter de 30 kg N/ha avant le premier prélèvement, 60 kg N/ha avant les 2^{ème} et 3^{ème} prélèvements, 90 kg N/ha pour le 4^{ème} prélèvement. L'exportation de N est également plus importante jusqu'au 3^{ème} prélèvement pour l'eau de nappe, mais au 4^{ème} prélèvement, elle est fort semblable pour les deux types d'eau.

Tableau 20: Evolution de la production de matière sèche et de l'exportation de N par le maïs

	Matière sèche de la partie aérienne	Partie aérienne Exportation de N
Eau de nappe	kg/ha	kg/ha
1^{er} P	520	14,32
2^{ème} P	3555	60,70
3^{ème} P	4825	74,24
4^{ème} P	5985	81,20
Eau Usée		
1^{er} P	125	3,26
2^{ème} P	1355	28,66
3^{ème} P	2345	41,33
4^{ème} P	4595	77,06

P : prélèvement

3.1.2.3 Efficience de l'azote apporté au cours de la culture du maïs 2001

- Efficience agronomique

L'efficience agronomique (Ea) est indiquée dans le tableau 21.

Tableau 21: Efficience agronomique (Ea) (en kg MS/kg N apporté)

	Efficience agronomique	
	EAU DE NAPPE	EAU USEE
1^{er} P	4,86	1,51
2^{ème} P	16,1	6,8
3^{ème} P	18,9	9,5
4^{ème} P	18,4	15,1

P : prélèvement

L'efficience agronomique a logiquement progressé du 1^{er} au 3^{ème} prélèvement en eau de nappe et jusqu'au 4^{ème} prélèvement en eau usée où elle est restée constamment inférieure à celle observée en eau de nappe. L'apport de fumure minérale starter sur les parcelles eau de nappe s'avère donc bénéfique. Il est difficile de prévoir l'évolution de Ea jusqu'à la récolte (données manquantes par suite de divers aléas expérimentaux) car d'une part, Ea pour l'eau usée semblait se rapprocher de Ea eau nappe (4^{ème} prélèvement), mais d'autre part, l'apport d'azote plus important par l'eau usée à un moment où les besoins des plantes diminuent ou deviennent très faibles pourrait également faire chuter ce paramètre.

- Efficience apparente d'utilisation

L'efficience d'utilisation de l'azote (tableau 22) évolue parallèlement à l'efficience agronomique ; elle est cependant équivalente pour les deux types d'eau au 4^{ème} prélèvement (stade laitieux du grain). Les valeurs atteintes sont par ailleurs comparables à celles observées jusqu'à présent dans l'expérimentation.

Tableau 22: Efficience d'utilisation de l'azote par la partie aérienne du maïs (en %)

	Efficience d'utilisation N (%)	
	EAU DE NAPPE	EAU USEE
1^{er} P	13,4	3,9
2^{ème} P	27,5	14,3
3^{ème} P	29,1	16,7
4^{ème} P	24,9	25,4

Il faut signaler qu'en présence d'eau de nappe, la fumure minérale fractionnée a favorisé l'efficacité d'utilisation jusqu'après le 2^{ème} apport, par la suite l'efficacité y a décru. Par contre, avec les eaux usées, l'efficacité a continué à croître. Si l'effet starter N s'avère bénéfique au départ, il n'est donc pas persistant et on peut prévoir qu'il n'est guère justifié d'apporter un complément de fumure minérale dans le cas où l'eau d'irrigation est chargée.

3.1.2.4 Evaluation de l'azote dans le sol après culture du maïs 2001

L'azote minéral dans le sol est déterminé après la culture du maïs 2001 (tableau 23).

Tableau 23: Profil en azote nitrique et ammoniacal du sol après culture du maïs 2001

	Horizons	EAU USEE		EAU DE NAPPE	
		N-NO ₃	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NH ₄
1^{er} P	0 – 20 cm	18,7	3,7	43,5	3,5
	20 – 40 cm	13,3	5,1	31,8	5,2
	40 – 60 cm	12,2	5,6	17,0	6,3
2^{ème} P	0 – 20 cm	29,4	5,8	33,1	5,4
	20 – 40 cm	8,2	4,4	20,9	7,5
	40 – 60 cm	4,0	5,3	9,2	9,3
3^{ème} P	0 – 20 cm	56,7	4,9	31,9	10,0
	20 – 40 cm	30,7	5,2	29,5	6,7
	40 – 60 cm	19,0	3,4	20,1	4,9
4^{ème} P	0 – 20 cm	49,7	5,4	60,0	4,9
	20 – 40 cm	29,9	4,9	22,4	3,6
	40 – 60 cm	16,2	5,4	17,6	4,0

Les quantités de nitrates présentes dans le sol sont en général importantes et souvent plus élevées en eau de nappe (effet des 3 apports d'engrais minéraux) que dans les parcelles irriguées avec les eaux usées. Elles augmentent au cours de la période de végétation traduisant probablement une saturation du milieu et surtout de la capacité d'absorption de la plante. On observe également des quantités appréciables de nitrates au delà de 40 cm (jusqu'à 20kg N/ha). Comparativement, les quantités d'ammonium sont faibles en raison d'une probable nitrification rapide.

3.1.3 Expérimentation sur maïs en cases lysimétriques 2001

Etant donné que la seule source d'eau de nappe disponible en quantité suffisante pour assurer les besoins des cultures est chargée en nitrate, un essai en cases lysimétriques est envisagé où l'eau de nappe est remplacée par une eau de distribution peu chargée en nitrate. Cette eau de distribution a été transportée en citerne sur le site.

Les quantités d'azote apportées au cours de la culture de maïs dans les cases lysimétriques sont reprises dans le tableau 24.

Tableau 24: quantités d'azote apportées au cours de la culture de maïs dans les cases lysimétriques (exprimées en kg/ha)

	Kg/ha		
	N apporté par l'eau	N apporté par l'engrais	N apporté total
(1) distribution +0 kg/ha N	0	0	0
(2) distribution + 80kgN/ha	0	80	80
(3) distribution +160kgN/ha	0	160	160
(4) distribution +240kgN/ha	0	240	240
(5) distribution +320kgN/ha	0	320	320
(6) 1/3 usée + 2/3 distribution	118	0	118
(7) 2/3 usée + 1/3 distribution	235	0	235
(8) eau usée	353	0	353
(9) eau usée + 80 kg N/ha*	353	80	433
(10) 2/3 eau usée	235	0	235

3.1.3.1 Production de matière sèche, exportation et efficience de l'azote en cases lysimétriques

La production en matière sèche des différentes parties du maïs et les exportations d'azote sont reprises dans le tableau 25.

La biomasse végétative aérienne (total partie aérienne) augmente sensiblement, avec les doses croissantes d'N, en présence des eaux de distribution jusqu'à 160 kg N/ha, au delà les augmentations décroissent. Elle est maximale en eau usée (traitement 6) et un apport d'engrais minéral s'avère inutile, voir excessif (traitement 9). La limitation de l'irrigation à 2/3 des besoins limite très fort le rendement (traitement 10). La production de grains

s'améliore jusque 240 kg N/ha avec les eaux de distribution alors qu'elle s'avère très variable lorsque l'eau usée est utilisée. Pour le traitement eau usée seule, la production en grains s'élève à 3650 kg/ha ce qui est supérieur au maximum obtenu en eau de distribution. Mais la meilleure production est obtenue dans le traitement 6 (1/3 eau usée +2/3 eau de distribution) soit 5700 kg/ha. Les valeurs observées dans les traitements 7 et 9 apparaissent anormalement basses en regard de la production de biomasse végétative. Pour le traitement 10, cela apparaît plus logique dans la mesure où le stress hydrique limite la production de grains. La biomasse aérienne évolue parallèlement à la production de grains. Il en est de même de la biomasse totale incluant les racines.

Tableau 25: Production de matière sèche et exportation de N du maïs cultivé en cases lysimétriques (exprimée en kg/ha)

	Feuilles et tiges		Rafles		Grains		Total partie aérienne		Racines		Total		Fumure N kg/ha
Traitement	MS	Nexp	MS	Nexp	MS	Nexp	MS	Nexp	MS	Nexp	MS	Nexp	
	kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha		
(1) distribution +0 kg/ha N	8160	46	160	1	1170	11	9490	58	1055	7	10550	65	0
(2) distribution +80 kg N/ha	9064	67	280	1.5	1690	18	11030	86	855	8	11890	94	80
(3) distribution +160 kg N/ha	10023	88	267	1.6	2310	30	12600	120	1441	16	14040	136	160
(4) distribution +240 kg N/ha	10341	101	423	2.5	3330	40	14090	144	1202	14	15300	158	240
(5) distribution +320 kg N/ha	10529	125	438	3.2	3320	63	14290	192	1046	13	15330	205	320
(6) 1/3 usée +2/3 distribution	12528	54	882	6.9	5700	90	19110	151	1665	18	20780	169	118
(7) 2/3 usée +1/3 distribution	10344	103	205	1.6	930	15	11480	120	887	11	12370	130	235
(8) eau usée	11628	97	563	5.2	3650	58	15840	159	600	8	16440	167	353
(9) eau usée +80 kg N/ha*	11819	117	288	2.4	2010	36	14110	155	679	8	14790	164	433
(10) 2/3 eau usée	7865	75	61	0.6	950	17	8880	92	365	4	9240	97	235

Les efficacités agronomiques du maïs en cases lysimétriques sont portées dans le tableau 26.

Tableau 26: Efficacité agronomique (Ea) du maïs (kg MS/kg N apporté)

	Ea (kg MS/kg N apporté)	
	Grains	Biomasse aérienne
(1) distribution + 0 kg/ha N	-	-
(2) distribution + 80kgN/ha	21	138
(3) distribution + 160kgN/ha	14	79
(4) distribution + 240kgN/ha	14	59
(5) distribution + 320kgN/ha	10	45
(6) 1/3usée + /3distribution	48	162
(7) 2/3usée+1/3 distribution	4	49
(8) eau usée	10	45
(9) eau usée + 80 kg N/ha*	5	33
(10) 2/3eau usée	4	38

L'exportation d'azote par les feuilles et tiges augmente constamment avec l'apport d'engrais avec l'eau de distribution. Alors qu'elle est variable sous irrigation avec les eaux usées. Toutefois, un complément d'azote sous forme d'engrais semble bénéfique (traitement 9 avec 117kg/ha de N exporté). La dilution avec de l'eau de distribution au 2/3 (traitement 6) diminuant la disponibilité totale de N s'avère défavorable. Si l'exportation de N par le grain progresse régulièrement en eau de distribution, en eau usée, on observe une évolution liée à la production de matière sèche ; il en est de même pour l'exportation totale de N.

Pour l'eau de distribution, l'efficacité agronomique (Ea) est décroissante avec la dose d'engrais azoté apportée. Elle est très variable pour les traitements où l'eau usée est utilisée. Pour le traitement eau usée seule (traitement 8), « Ea » est très similaire à celle obtenue avec l'apport de 320 kg N/ha en eau de distribution sachant que l'apport d'azote par l'eau usée est

de 353 kg N (très proche de 320 kg). L'efficacité agronomique de l'azote de l'eau usée s'avère ici équivalente à celle de l'engrais. Toujours en raisonnant uniquement sur base de l'azote apporté en comparant les traitements 4 et 10, on observe que la limitation d'apport d'eau s'avère très défavorable à l'efficacité. L'efficacité d'utilisation (tableau 27) présente certaines valeurs supérieures à 100% en raison du fait que le sol libère évidemment de l'azote pour la culture (il faut noter qu'on raisonne en terme d'efficacité apparente).

Tableau 27: Efficacité d'utilisation de l'azote apporté au cours de la culture du maïs en cases lysimétriques (exprimée en %)

Traitement	Efficacité d'utilisation (%)	
	Grains	Biomasse aérienne
(1) distribution +0 kg/ha N	-	-
(2) distribution +80kgN/ha	23	108
(3) distribution +160kgN/ha	19	75
(4) distribution +240kgN/ha	17	60
(5) distribution +320kgN/ha	20	60
(6) 1/3 usée +2/3 distribution	76	128
(7) 2/3 usée+1/3 distribution	6	51
(8) eau usée	16	45
(9) eau usée + 80 kg N/ha*	8	36
(10) 2/3 eau usée	7	39

En réalité, les 58 kg N exportés dans la biomasse aérienne du témoin 0N représentent la contribution du sol. Par ailleurs, l'efficacité décroît avec la dose totale de l'azote apporté dans le cas de l'eau de distribution puis se stabilise à 60%. Elle est, comme l'efficacité agronomique, plus variable en présence des eaux usées. Dans le cas de la limitation d'apport

d'eau, elle devient plus faible.

3.1.3.2 Percolation et stockage de l'azote dans le sol

Les quantités d'azote percolées à travers les cases lysimétriques ont été déterminées au cours de la culture du maïs (tableau 28). Il ressort que la percolation se fait uniquement sous forme nitrique.

Tableau 28: Quantités d'azote dans les percolats des cases lysimétriques

Traitements	Volume (mm)	N- No_3 (Kg/ha)
(1) distribution +0 kg/ha N	126,5	11,1
(2) distribution +80kgN/ha	110,4	11,8
(3) distribution +160kgN/ha	101,2	22,0
(4) distribution +240kgN/ha	114,8	15,3
(5) distribution +320kgN/ha	118,7	20,8
(6) 1/3usée +2/3distribution	90,0	18,8
(7) 2/3usée+1/3 distribution	113,5	26,1
(8) eau usée	97,1	32,2
(9) eau usée + 80 kg N/ha*	104,0	43,0
(10) 2/3eau usée	74,0	23,5

Les quantités percolées sont plus élevées dans les cases ayant reçu les eaux usées. Il est à remarquer la valeur élevée du lessivage dans le cas de l'eau usée additionnée de fumure

minérale (80kg N). En présence d'eau de distribution, il n'y a pas d'effet net de la fumure minérale.

L'azote minéral a été déterminé dans le sol des cases lysimétriques après la récolte du maïs (tableau 29). Il apparaît que comme les percolats, le sol des cases ayant reçu les eaux usées présente une concentration en nitrate importante sauf pour le traitement 2/3 ETM. En outre, l'effet de la fumure minérale n'apparaît pas en présence d'eau de distribution.

Tableau 29: Profil en azote nitrique et ammoniacal du sol au niveau des cases lysimétriques après culture du maïs.

Traitement	N-NO ₃ (kg/ha)				N-NH ₄ (kg/ha)			
	0-20 cm	20-40cm	40-60cm	Total	0-20 cm	20-40cm	40-60cm	Total
(1) distribution +0 kg/ha N	29,2	17	13,6	59,8	2,3	3	2,5	7,8
(2) distribution +80 kg N/ha	36	13,6	13,6	49,6	3,7	5	5,3	14,0
(3) distribution +160 kg N/ha	40,8	34	25,8	100,6	6,5	2,5	2,6	11,6
(4) distribution +240 kg N/ha	27,2	13,6	5,4	46,2	6,1	5,2	3,8	15,1
(5) distribution +320 kg N/ha	25,8	12,2	5,4	43,4	2,9	3	2,5	8,4
(6) 1/3 eau usée +2/3distribution	27,2	15,6	6,8	49,6	2,4	7,4	5,8	15,6
(7) 2/3usée+1/3 distribution	20,4	12,2	5,4	38	5	4,9	4,9	14,8
(8) eau usée	53	42,8	32,6	128,4	3,9	5,1	4,3	13,3
(9) eau usée + 80 kg N/ha*	53	34	30,6	117,6	4,8	4,6	5,4	14,8
(10)2/3eau usée	13,6	12,2	10,2	36	2,9	4,8	3,1	10,8

3.1.4 Résultats des expérimentations annexes à l'aide de l'isotope lourd ^{15}N sur sorgho

Des expérimentations annexes menées à l'isotope lourd ^{15}N ont permis de mieux appréhender l'utilisation réelle de l'azote par la plante et surtout le stockage de l'azote excédentaire dans le sol. L'essai est réalisé sur du sorgho. Les différents traitements sont résumés dans le tableau 25. L'eau de distribution ne contient que des quantités très minimes d'azote.

La contribution des diverses sources d'azote à l'alimentation de la plante a été évaluée (tableau 30).

Tableau 30: Contribution des diverses sources d'azote à l'alimentation de la plante (% du total exporté) cas du sorgho

Traitements		Contribution (% du total exporté)			kg/ha
N°	N apporté (kg/ha)	Engrais	Eau	Sol	N total exporté par la plante entière
4	Irrigation eau de distribution + 75 kg/ha N minéral				
1a	Irrigation eau usée (présentant 70kg N/ha)		43	57	4
2a	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 25kg/ha N minéral	57		44	62
3a	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 50 kg/ha N minéral	62		39	59
1	Irrigation eau distribution + 0 kg N/ha N minéral	-	-	100	10
2	Irrigation eau distribution +25 kg N/ha N minéral	48		52	25
3	Irrigation eau distribution 50 kg N/ha N minéral	62		38	39
4	Irrigation eau distribution 75 kg N/ha N minéral	71		29	52
5	Irrigation eau distribution 100 kg N/ha N minéral	66		35	62
6	Irrigation eau distribution 150 kg N/ha N minéral	66		34	69

a : eau usée

Lorsqu'il n'y a que deux sources de N disponibles pour la plante soit l'engrais et le sol (traitements eau de distribution 1 à 6), la contribution de l'engrais est importante (48 à 71%) et s'accroît avec la dose jusqu'à 75 kg N/ha dans le cas du sorgho. Par contre, la contribution du sol décroît avec la dose et se stabilise pour des fumures importantes à $\pm 35\%$.

Lorsqu'on utilise les eaux usées sans apport d'engrais, l'azote apporté par l'eau entre en compétition uniquement avec la fourniture du sol ; dans ce cas, la contribution de l'eau est de 43% et celle du sol est de 57% ce qui apparaît plus élevée que dans le cas d'eau de distribution (traitements 4 et 1a).

Lorsque l'eau usée est complétée par de l'engrais minéral, la contribution conjointe de l'engrais et de l'eau se rapproche de celle de l'engrais seul dans le cas de l'eau de distribution. Par ailleurs, l'exportation totale d'azote s'accroît en passant de 49 Kg N/ha (eau usée seule) à 62 Kg N/ha dans le cas d'un apport modéré de 25 kg/ha N minéral ; ce qui est quasi identique à l'exportation maximale observée avec une fumure de 150kg N dans le cas de l'eau de distribution (65 kg N/ha).

Pour évaluer l'utilisation de l'azote provenant des deux sources (eau et engrais) par la plante, les coefficients réels d'utilisation (CRU) ont été calculés (tableau 31).

A doses équivalentes, le CRU de l'azote provenant de l'engrais est supérieur à celui de l'eau usée (49 contre 31 %). Le CRU global N (eau usée + engrais) est favorablement influencé par une dose faible d'azote minéral de 25 kg/ha mais il baisse avec une dose plus élevée (50kg N). En présence d'eau de distribution, le CRU de l'engrais minéral est de l'ordre de 48% jusqu'à 75 kg N et s'abaisse ensuite pour les plus fortes doses d'engrais apporté.

Disposant d'un témoin N0 (eau de distribution sans apport d'engrais), on a pu calculer les coefficients apparents d'utilisation (CAU) de l'azote des eaux usées et de l'engrais (tableau 32) selon l'expression :

$$CAU(\%) = \frac{(N_x - N_0)}{X} 100$$

Avec : N_x : quantité d'azote prélevée par la culture à la dose X

N_0 : quantité d'azote prélevée par cette même culture à la dose nulle

X : dose totale d'azote apporté

Tableau 31: Evolution des coefficients réels d'utilisation (CRU) de l'azote par le sorgho (exprimés en %)

Traitements		C R U (%)	
N°	N apporté (kg/ha)	Engrais	Eau
4	Irrigation eau de distribution + 75 kg/ha N minéral	49	31
1a	Irrigation eau usée (présentant 70kg N/ha)		
2a	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 25kg/ha N minéral	38	
3a	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 50 kg/ha N minéral	31	
2	Irrigation eau distribution +25 kg N/ha N minéral	48	
3	Irrigation eau distribution 50 kg N/ha N minéral	48	
4	Irrigation eau distribution 75 kg N/ha N minéral	49	
5	Irrigation eau distribution 100 kg N/ha N minéral	40	
6	Irrigation eau distribution 150 kg N/ha N minéral	31	

a :eau usée

Considérant que le sol n'intervient dans cette expérimentation que pour 10 kg N, le coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'eau usée est de 56 %. Lorsqu'un complément d'engrais minéral intervient, le coefficient apparent se situe à 55% pour un apport de 25 kg d'azote et à 41% pour 50 kg. En comparaison, les coefficients apparents des différentes doses de N apporté en présence d'eau de distribution sont plus ou moins constants jusqu'à 75 kg d'azote puis décroissent à 52% et 39% respectivement pour des apports de 100 et 150 kg N/ha.

Ces évolutions traduisent non seulement une immobilisation de l'azote dans les différents compartiments organiques du sol mais aussi la possibilité de substitution de pool qui pourrait être plus importante dans le cas de l'eau usée (apportée au fur et à mesure de la végétation et pas ponctuellement comme l'engrais).

En plus, il faut aussi considérer qu'une partie de l'eau irrigation peut ne pas être utile surtout dans les parcelles de plein champ irriguées gravitairement.

Tableau 32: Evolution du coefficient apparent d'utilisation (CAU%)

Traitements		C A U (%)	
N°	N apporté (kg/ha)	Engrais	Eau
1 (a)	Irrigation eau usée (présentant 70kg N/ha)		56
2 (a)	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 25kg/ha N minéral	55	
3 (a)	Irrigation eau usée (70 kg N/ha) + 50 kg/ha N minéral	41	
2	Irrigation eau distribution +25 kg N/ha N minéral	60	
3	Irrigation eau distribution 50 kg N/ha N minéral	58	
4	Irrigation eau distribution 75 kg N/ha N minéral	56	
5	Irrigation eau distribution 100 kg N/ha N minéral	52	
6	Irrigation eau distribution 150 kg N/ha N minéral	39	

(a): eau usée

3.1.5 Conclusion

Un accent particulier a été mis sur les efficacités agronomiques et d'utilisation de l'azote par culture et pour l'ensemble des cultures. Ces paramètres s'avèrent très influencés par l'espèce ; la meilleure efficacité observée était pour le sorgho. En outre, les effets cumulatifs des apports précédents d'azote sont observés en culture de sorgho 2000. L'efficacité d'utilisation de l'ensemble de l'azote mis en jeu dans les deux dispositifs (eau usée et eau de nappe) apparaît similaire et proche de 30% pour des apports au total assez équivalents.

En première approche on pourrait conclure que la nature de l'azote apporté (eau-engrais) n'a que peu d'influence sur son efficacité d'utilisation. Une analyse plus fine réalisée avec l'isotope ^{15}N montre toutefois, que le coefficient réel d'utilisation de l'azote présent dans l'eau usée (70 kg N/ha) est en général plus faible que celui d'un apport modéré d'engrais minéral (75 kg N/ha) et cela pour une culture de sorgho (31 vs 49 %). Cependant, l'exportation d'azote s'avère sensiblement égale (49 vs 52), de même que le coefficient apparent d'utilisation (recours à un témoin absolu 0N). On peut donc suspecter que l'azote apporté par l'eau usée et fractionné en doses modérées tout au long de la culture est plus exposé à l'immobilisation ou la réorganisation que l'azote apporté ponctuellement par l'engrais. Une substitution de « pool » (N non marqué libéré - N marqué réorganisé par les microbes) serait donc responsable d'un coefficient réel d'utilisation plus bas de l'azote de l'eau usée. Effectivement, le stockage de cet azote marqué provenant de l'eau usée dans le sol apparaît souvent important (>30% de l'azote appliqué).

L'ensemble de ces observations plaide pour une valorisation équivalente à celle de l'engrais de l'azote contenu dans l'eau usée. Toutefois, et surtout pour des situations en sol très pauvre, une fumure starter modérée modulée en fonction du type de culture et en tout cas inférieure ou égale à 50 kg N/ha pourrait être recommandée.

3.2 Impact de l'utilisation des eaux usées traitées sur les systèmes d'irrigation localisée d'une culture de pomme de terre

3.2.1 Effet des eaux usées sur la durabilité des systèmes d'irrigation localisée

La durabilité des systèmes d'irrigation localisée utilisés durant ces expérimentations a été évaluée par le suivi de mesure de débit des différents distributeurs. Les variations des débits dans le temps avec les deux qualités d'eau et pour chaque distributeur sont représentées par les figures 3 à 6.

La figure 2 montre que jusqu'au 20^{ème} jour de fonctionnement en continu avec les eaux de nappe, pour les goutteurs intégrés, la moyenne des débits n'a pas dépassé le seuil limite de 30% de diminution. Ce seuil a été pris comme valeur limite, au delà duquel, l'uniformité de l'irrigation devient critique.

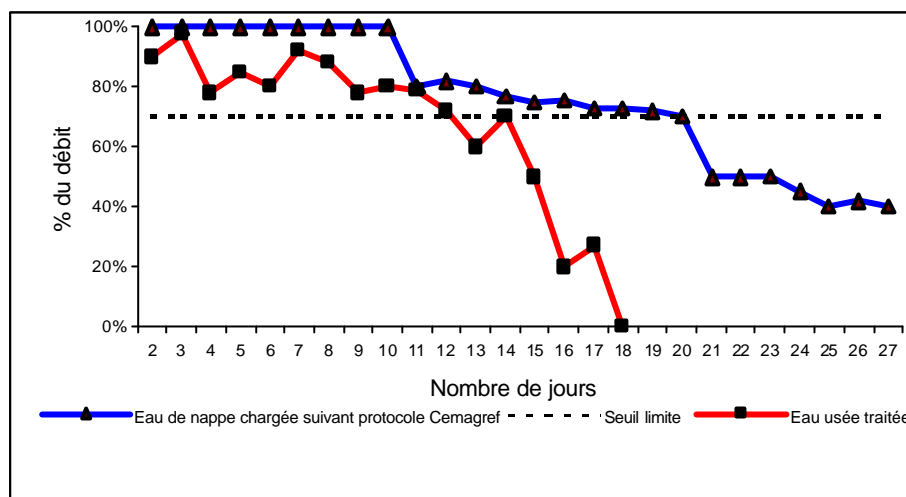


Figure 3 : Essais sur goutteurs intégrés

D'après le protocole Cemagref, ces distributeurs sont jugés peu sensibles au colmatage physique et nécessitent une finesse de filtration de 125 μ m. Par contre avec les eaux usées traitées, ce seuil limite est atteint après le 12^{ème} jour de fonctionnement. Le débit est complètement annulé après 17 jours de fonctionnement en continu. Par contre avec les eaux de nappe, après environ un mois de fonctionnement et à la fin du protocole CEMAGREF, le débit n'a chuté que d'environ 50%.

Les goutteurs en dérivation non autorégulants quant à eux, présentent un degré de sensibilité au colmatage physique avec les deux qualités d'eau utilisée plus important que les précédents. En effet, la figure 3 montre que ces distributeurs ont atteint le seuil limite après le 13^{ème} jour de fonctionnement avec le protocole CEMAGREF. Ils sont classés peu sensibles au colmatage physique et nécessitent aussi une finesse de filtration de 125 μ m.

Avec les eaux usées traitées, cette limite est atteinte après 7 jours de fonctionnement.

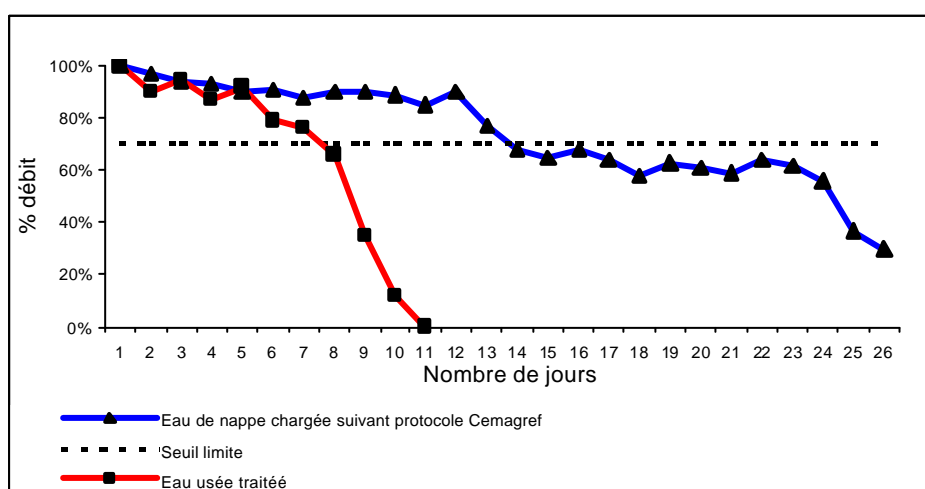


Figure 4 : Essais sur goutteurs non autorégulants en dérivation

Le débit est complètement annulé après le 10^{ème} jour avec les eaux usées traitées, par contre avec l'autre qualité d'eau, il a oscillé jusqu'au 25^{ème} jour aux environs de 60%, puis a chuté jusqu'à 30%.

Les goutteurs en dérivation autorégulants ont manifesté, eux, un fonctionnement hydraulique très instable. Malgré que les mesures aient été réalisées après stabilisation du régime hydraulique, un phénomène de dents de scie concernant la variation du débit en fonction du temps a été identifié avec les deux qualités d'eau. Le seuil limite a été atteint pour les deux protocoles entre le 3^{ème} et le 5^{ème} jour de fonctionnement comme le montre la figure 4. Ils sont classés sensibles et nécessitent une eau filtrée à 100 µm.

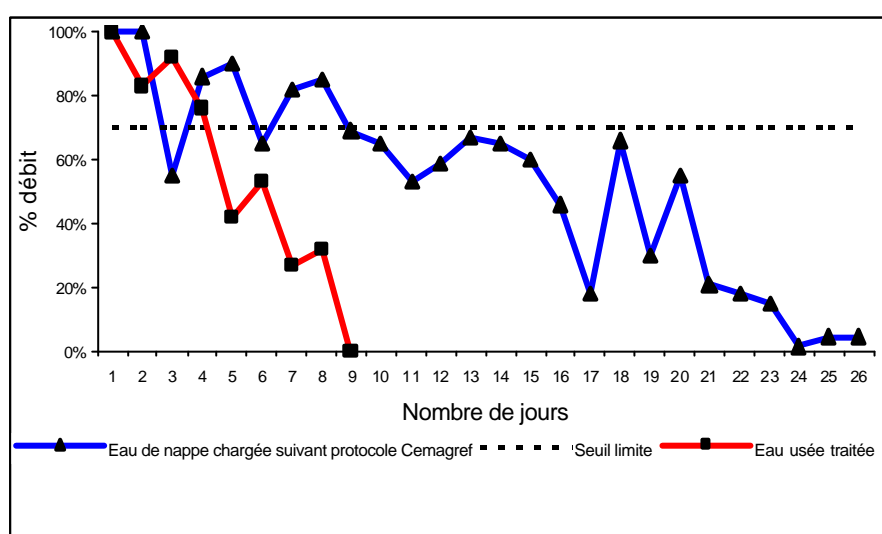


Figure 5 : Essais sur goutteurs autorégulants en dérivation

Concernant les microasperseurs, dont la variation du débit est représentée par la figure 5, ils accusent des chutes de débit pour les deux qualités d'eaux utilisées entre le 4^{ème} et le 6^{ème} jour de fonctionnement. Ces chutes dépassent largement le seuil des 30%. Les débits ont été annulés après le 7^{ème} jour et 20^{ème} jour respectivement avec les eaux usées traitées et les eaux de nappe. Ces distributeurs sont classés très sensibles par le protocole CEMAGREF et nécessitent une finesse de filtration de 100 µm.

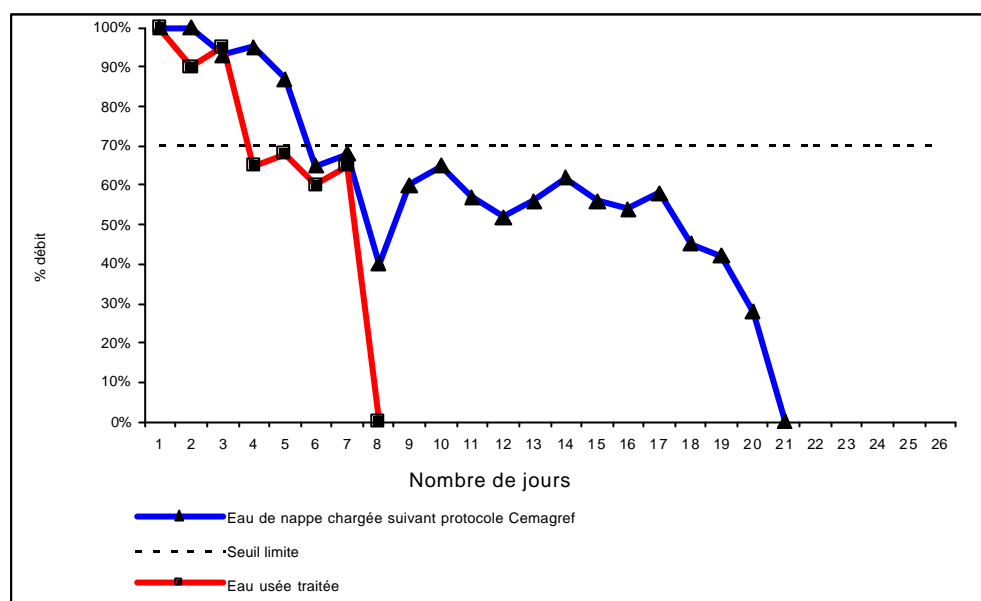


Figure 6 : Essais sur microasperseurs

L'effet de dents de scie a été aussi identifié mais moins important que celui avec les goutteurs en dérivation auto-régulants. Durant tous ces essais, aucune intervention humaine de décolmatage n'a été réalisée.

Les essais au champs ont été réalisés avec deux stations de filtration assurant une finesse de 130 μm . La pression nominale a varié entre 1,8 et 2,1 bar. Le tableau 33 résume les données obtenues sur trois années de suivi et mesure d'après la méthode de Keller et Karmeli.

Tableau 33: Moyenne du coefficient d'uniformité (Méthode Keller & Karmeli)

	Coefficient d'uniformité					
	Irrigation avec des eaux usées traitées			Irrigation avec des eaux de nappe		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
GI⁽¹⁾	92,63	81,80	75,55	92,88	89,31	89,41
GD AR⁽²⁾	69,48	72,16	62,90	64,73	66,82	64,77
GD NAR⁽³⁾	88,23	89,16	88,42	79,32	81,25	80,67
MA⁽⁴⁾	62,11	73,55	45,08	63,16	59,01	60,59

(1) Goutteur intégré

(2) Goutteur en dérivation autorégulant

(3) Goutteur en dérivation non autorégulant

(4) Microaspersion

Pour les goutteurs intégrés, les coefficients d'uniformité sont très bons. Ceci peut expliquer que ce type de goutteur n'est pas sensible au colmatage physique pour une finesse de filtration en tête de la parcelle bien définie.

L'observation directe sur le terrain du phénomène de colmatage est très difficile pour ces goutteurs par comparaison aux microasperseurs et aux goutteurs en dérivation. Ces derniers ont des coefficients de variations très variables en fonction de la qualité d'eau utilisée. En effet, pour les deux qualités d'eau, ces coefficients chutent jusqu'à environ 60%. Le phénomène aléatoire de dents de scie est très remarquable pour les goutteurs en dérivation autorégulants. Cette instabilité du coefficient d'uniformité pour ce type de distributeur, malgré que la pression nominale de fonctionnement ait été maintenue toujours constante aux erreurs de mesures près, peut provenir de la réponse de la membrane de régulation à l'intérieur du distributeur lui-même. Sa matière de fabrication peut aussi influencer son fonctionnement hydraulique.

Pour les microasperseurs, les coefficients d'uniformité mesurés sont classés médiocres. En effet, la diminution des débits varie entre 30% et 40%, ce qui influe énormément sur l'uniformité des irrigations. Avec les eaux usées traitées, cette diminution est plus importante que celle obtenue avec les eaux de nappe. Elle est due essentiellement à leur sensibilité importante détectée surtout avec l'utilisation des eaux usées traitées.

Ces microasperseurs présentent un tourniquet mobile, muni d'un mouvement de rotation, c'est pourquoi il était très facile d'identifier ceux qui commencent à être bouchés. Mais aucune intervention de décolmatage n'a été effectuée durant l'année 99.

Par contre pour l'année 2000 et 2001, le protocole a prévu le comptage des interventions humaines pour le débouchage de tous les types de distributeurs jugés visuellement colmatés. Cette opération consistait en un nettoyage manuel du distributeur qui voit son débit nettement diminuer. Ainsi, nous avons pu, avec une présence humaine permanente pendant les irrigations, identifier ce qui suit :

Les coefficients d'uniformité ont varié durant tout le cycle de la pomme de terre de :

- 4% à 11% pour les goutteurs intégrés avec une intervention une fois toutes les trois semaines.
- 6% à 12% pour les goutteurs en dérivation non autorégulants avec une intervention humaine toutes les deux semaines,

- 22% à 35% pour les goutteurs en dérivation autorégulants avec quatre interventions de décolmatage par semaine,
- 10% à 27% pour les microasperseurs avec une fréquence de décolmatage manuelle deux fois par semaine.

3.2.2 Effet des eaux usées sur les paramètres agronomiques

Les rendements obtenus avec les différentes techniques d'irrigation et les deux qualités d'eau d'irrigation figurent dans le tableau 34.

Pour les deux qualités d'eau d'irrigation, les goutteurs intégrés donnent les rendements les plus importants. Les microasperseurs engendrent eux les rendements les plus faibles. Ceci s'explique par le fait du contact direct de l'eau chargée sur le feuillage de la pomme de terre et par les faibles coefficients d'uniformité obtenus qui engendrent une faible efficacité de l'irrigation. Concernant les calibres obtenus de la pomme de terre, le tableau 35 reprend les résultats obtenus.

Tableau 34: Rendement de la pomme de terre en tonnes par hectare

	Rendement					
	Eaux usées traitées			Eaux de nappe		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
GI⁽¹⁾	48,57	28,60	20,34	22,88	22,80	22,85
GD AR⁽²⁾	39,94	27,66	15,30	22,70	19,67	21,50
GD NAR⁽³⁾	48,31	29,66	18,13	25,98	28,85	26,00
MA⁽⁴⁾	28,71	19,53	13,05	22,55	22,80	16,30
RA⁽⁵⁾	29,31	23,20	22,40	14,33	27,39	16,70

(1) Goutteur intégré (2) Goutteur en dérivation autorégulant (3) Goutteur en dérivation non autorégulant (4) Microaspersion
(5) Raie améliorée

Tableau 35: Calibres de la pomme de terre

Calibres en %								
Irrigation avec des eaux de nappe								
	70	65	60	55	50	45	40	<40 (mm)
GI ⁽¹⁾	5,8	10,4	10,8	19,4	17,3	10,8	7,7	15,8
GD AR ⁽²⁾	4,3	9,6	12,6	12,2	15,6	13,5	9,1	23,1
GD NAR ⁽³⁾	4,0	10,1	12,1	12,8	13,9	11,9	9,0	24,2
MA ⁽⁴⁾	4,6	10,3	12,6	21,7	17,7	11,4	4,6	17,1
RA ⁽⁵⁾	2,6	6,2	15,0	18,6	22,6	13,7	7,2	14,1
Irrigation avec des eaux usées traitées								
	70	65	60	55	50	45	40	<40 (mm)
GI ⁽¹⁾	12,3	6,6	9,7	10,2	11,4	4,0	4,8	41,0
GD AR ⁽²⁾	18,2	17,2	16,6	7,8	10,4	7,3	5,7	16,7
GD NAR ⁽³⁾	17,6	15,5	12,3	6,4	12,2	12,6	6,8	17,6
MA ⁽⁴⁾	10,0	11,4	14,5	7,7	13,2	12,3	4,5	26,4
RA ⁽⁵⁾	19,3	12,4	12,0	14,6	9,2	7,3	7,8	17,4

(1) Goutteur intégré (2) Goutteur en dérivation autorégulant (3) Goutteur en dérivation non autorégulant (4) Microaspersion (5) Raie améliorée

D'après ces résultats, la variation du calibre de la pomme de terre en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation et de la technique d'irrigation est très importante pour les goutteurs intégrés avec l'eau usée où plus de 40% du rendement est d'un calibre inférieur à 40 mm.

Pour les goutteurs en dérivation (autorégulant et non autorégulant), plus de 50% ont un calibre supérieur à 50 mm et ceci pour les deux qualités d'eau d'irrigation utilisées.

Pour la raie améliorée et avec des eaux de nappe, le calibre 60 mm et plus, est très faible par comparaison avec l'eau usée traitée (plus de 40%).

Concernant la microaspersion, l'hétérogénéité des calibres est aussi remarquable. Le pourcentage le plus élevé (plus de 26%) en calibre inférieur à 40 mm est obtenu avec les eaux usées traitées.

Les résultats ont été observés sur une seule variété (SPUNTA), Il conviendrait de les vérifier avec d'autres variétés.

3.2.3 conclusion

Avec l'utilisation de diverses qualités d'eaux d'irrigation (eau de nappe, eau de surface et eau usée traitée), l'étude de l'impact de l'utilisation des eaux marginales sur une culture de pommes de terre micro-irriguée en comparaison avec les eaux de nappe s'est avérée très intéressante. Elle a permis de montrer tout d'abord que les performances des systèmes d'irrigation localisée dépendent essentiellement du système de filtration utilisé. Ensuite, on a pu évaluer la sensibilité de ces systèmes au colmatage physique et en mesurer les conséquences sur la conduite et les rendements de la culture de pommes de terre.

Les essais réalisés ont montré qu'il y a une liaison étroite entre l'uniformité de l'irrigation et les rendements pour cette culture. En outre, les goutteurs intégrés qui, eux, présentent une sensibilité faible au colmatage physique, ont donné les rendements les plus importants avec les deux qualités d'eau étudiées puisque l'uniformité était très bonne. La micro-aspersion et l'utilisation des goutteurs auto-régulants ont donné les plus mauvaises uniformités d'irrigation avec comme conséquence des mauvais rendements et ce, pour les deux qualités d'eau. Ces résultats confirment ceux obtenus au laboratoire.

En ce qui concerne les goutteurs en dérivation non auto-régulants, leur durabilité de fonctionnement ainsi que l'uniformité des irrigations sont jugées acceptables ; ils sont classés après les goutteurs intégrés tout en tenant compte que ce système n'est pratiquement pas utilisé pour les cultures en lignes.

D'après les résultats obtenus, les micro asperseurs et les goutteurs en dérivation auto-régulants sont très sensibles au phénomène de colmatage physique et ceci est dû essentiellement à leur conception. En effet, le mouvement de rotation pour les premiers, assuré par le débit, peut être facilement arrêté par la présence de matière en suspension (même très fines) dans l'orifice de passage. Pour les seconds, la présence d'une membrane circulaire généralement en silicone représente un inconvénient majeur si l'eau utilisée est marginale. En effet, leur matériau et leur finition de fabrication déterminent leur réponse à la variation de pression et la qualité d'eau. On a pu distinguer expérimentalement qu'avec les eaux usées traitées, au laboratoire et au champ, ces distributeurs passent du débit nominal à un débit nul

par simple variation de pression ne dépassant pas 0,5 bar. Quant aux micro-asperseurs, même si leur débit ne s'annule pas, leur mouvement de rotation est interrompu et l'homogénéité spatiale d'irrigation devient faible.

Pour promouvoir ces techniques, il s'est avéré indispensable d'avoir une station de filtration qui assure une finesse d'au moins de 100 μm . Tous les distributeurs testés présentent des degrés très variables de sensibilité au colmatage physique avec des qualités d'eau bien diverses. La maîtrise de ce phénomène induira en fait une bonne uniformité de l'irrigation et par conséquent une économie d'eau et une optimisation de la production de la culture.

L'intervention humaine, qui consiste à nettoyer manuellement les distributeurs jugés visuellement colmatés, peut être un recours important pour l'amélioration des performances hydrauliques de ces distributeurs et, par conséquent, une amélioration notable du coefficient d'uniformité donc de l'uniformité de l'irrigation.

4 LES BONNES PRATIQUES AGRICOLES

Il s'agit en fait de répondre à la question : quelles sont les bonnes pratiques agricoles de la réutilisation des eaux usées à mettre en œuvre pour protéger la nappe de la pollution nitrique ?

La protection des ressources en eau consiste à appliquer des techniques d'irrigation efficaces, évitant tout apport excessif d'azote, en maximisant leur utilisation et donc en limitant les possibilités de fuite.

4.1 Choix du système d'irrigation

Etant une pratique particulière, l'irrigation avec les eaux usées traitées exige, en plus des paramètres communs d'une irrigation avec des eaux de nappe, la maîtrise d'autres paramètres liés à la qualité physico-chimique et microbiologique des effluents (micro-organismes pathogènes, éléments toxiques, salinité, matières en suspension, etc.). Ainsi, le choix de la méthode d'irrigation adéquate et adaptée permet de réduire les effets indésirables de l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation.

Les techniques d'irrigation représentent à des degrés divers un risque de propagation des agents pathogènes et des polluants vers les ressources en eaux (nappe ou eaux de surface). Ce risque est directement lié aux quantités d'eau nécessaires aux irrigations qui sont elles mêmes dépendantes des systèmes d'irrigation. En ce qui concerne la pollution de la nappe, on peut globalement hiérarchiser les systèmes d'irrigation selon le degré de risque de contamination croissant comme suit :

<i>irrigation gravitaire >>> irrigation par aspersion > irrigation localisée ou micro-irrigation</i>
--

La micro – irrigation, et en particulier la méthode au goutte à goutte, présente toute une série d'avantages :

- efficacité d'irrigation élevée par atténuation des pertes d'eau par infiltration et par colature,
- risque moindre de pollution des eaux souterraines et de surface par les nitrates,

- amélioration des rendements des cultures par optimisation des régimes hydriques, par apports simultanés des éléments nutritifs et par des conditions d'aération optimales,
- très faible contact entre le personnel opérateur et les effluents,
- faible consommation d'énergie,
- faible besoin en main d'œuvre,

Deux éléments importants et interactifs méritent d'être pris en considération pour minimiser les risques de toute contamination du sol, de la nappe et des eaux de surface: *le degré d'épuration et l'efficience d'application de l'eau* au niveau de la parcelle. Pour cela, le bon choix de la méthode d'irrigation et la bonne stratégie de pilotage des apports d'eau s'imposent pour une réutilisation rationnelle. Le tableau 36 relate les inter-relations entre le système d'irrigation et l'efficience du système.

Tableau 36: Système d'irrigation et risque d'impact

Système d'irrigation	Impact et efficience du système
Gravitaire	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur les eaux souterraines • Impact possible sur les eaux de surface lié aux évacuations des excédents • Efficience du système: <ul style="list-style-type: none"> - Bassin 60-80 % - Raie: 50 - 70 % - Planche:40-70 %
Aspersion	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur les eaux superficielles • Efficience du système: 90 %
Souterraine "Sub - irrigation"	<ul style="list-style-type: none"> • Impact possible sur la nappe • Impact possible sur les eaux superficielles lié aux évacuations des excédents
Localisé <ul style="list-style-type: none"> • Goutteurs • Rampes perforés 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficience : 90-100% • Impact possible sur les eaux superficielles mais d'une ampleur inférieure aux autres systèmes d'irrigation

Lorsqu'on parle de gestion rationnelle de l'irrigation on sous entend aussi des notions de valorisation de l'eau ou d'efficience de l'eau. Quel que soit le type de conception du système d'irrigation, l'efficience de l'eau et l'uniformité d'arrosage ne sont jamais égales à 100 % .

Toutefois, un certain nombre de directives permettent de valoriser au maximum le mètre cube d'eau. Parmi ces directives, on propose la liste suivante:

- développer une technique adéquate de mesures de l'humidité du sol ; actuellement, la méthode TDR se prête bien au contrôle instantané et à différents endroits des teneurs en eau du sol,
- installer de régulateurs de pressions et des systèmes de filtration performants,
- dimensionner correctement les canalisations d'irrigation de manière à assurer la quantité demandée par le système,
- assurer une bonne maintenance du système d'irrigation.

4.2 Pratiques pour minimiser la lixiviation des nitrates

Les teneurs en azote et ses formes dans les eaux usées épurées varient en fonction de l'origine des eaux usées brutes et du système d'épuration. Ainsi par exemple, dans les effluents de lagunage, l'azote se trouve essentiellement sous formes organique et ammoniacale. Par contre, dans les effluents du système Infiltration - Percolation, l'azote est essentiellement sous forme nitrique. Notons toutefois que l'ammonium se nitrifie rapidement une fois que les eaux, issues du lagunage, sont appliquées au sol. Ainsi, dans certaines situations, le risque de pollution des eaux souterraines peut être élevé. Pour minimiser ce risque, il est important d'adopter certaines recommandations pratiques.

- Il faut établir avec précision le bilan de l'eau dans le système sol - plante en quantifiant les entrées (pluies et hauteur d'eau d'irrigation) et les sorties (utilisation par la culture et l'évaporation).
- Analyser les teneurs en nutriments et particulièrement en azote dans les eaux épurées utilisées pour l'irrigation. Ceci permettra de quantifier les quantités d'azote apportées par les doses d'irrigation appliquées.
- Tenir compte du niveau de rendement escompté afin d'évaluer les exportations.

- A partir de l'analyse du sol, tenir compte du reliquat d'azote minéral disponible dans le sol.
- La dose d'irrigation est un facteur important qui conditionne la lixiviation des nitrates. Ainsi, dans les sols de texture sableuse, il convient de minimiser les doses et d'augmenter la fréquence. A ce niveau, il convient de considérer l'importance d'optimiser la dose d'azote et la hauteur d'eau d'irrigation sur la base des besoins en eau et en azote de la culture pour les différents stades phénologiques.
- Dans le cas où les eaux sont chargées, il faut choisir les cultures les plus consommatrices d'azote et/ou assurer une couverture maximale des sols par les cultures.
- Mélanger des eaux riches en azote et des eaux moins concentrées ou alterner les irrigations avec ces deux catégories d'eau.
- En cas d'utilisation d'amendements organiques, éviter l'utilisation du fumier frais. Il est plutôt recommandé d'utiliser un compost stabilisé et de comptabiliser la fourniture d'éléments nutritifs par le compost.

La connaissance et la détermination de la forme de l'azote minéral véhiculé par les eaux usées épurées sont d'importance capitale. En effet, selon la filière de traitement adoptée, les eaux peuvent contenir l'ammonium (cas de lagunage) ou les nitrates (cas de l'infiltration - percolation). Dans le premier cas, il est peut être recommandé d'utiliser des inhibiteurs de la nitrification mais ce n'est envisageable que pour des cultures à haute valeur ajoutée étant donné le prix de ces produits. Dans le second cas, deux possibilités sont offertes: mettre en place un système de dénitrification au niveau de la station d'épuration ou mélanger les eaux usées épurées avec une proportion d'eau de nappe ou de surface pour diminuer la teneur en nitrates.

Ainsi, il est fortement recommandé d'établir un bilan de masse d'azote dans le but de protéger la nappe contre la contamination par les nitrates. L'objectif consiste à garder la concentration nitrique des eaux à un niveau inférieur à 50 mg/l ou de garantir un taux d'accroissement annuel nul dans le cas où la concentration nitrique actuelle dépasse 50 mg/l.

5 CONCLUSION GENERALE

En climat semi-aride méditerranéen, l'intérêt de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation est évident. Cette utilisation doit être rendue optimale et pour qu'il en soit ainsi, les conditions suivantes doivent être remplies :

- il faut adapter les systèmes d'irrigation à la qualité de l'eau employée,
- il faut optimiser l'apport d'eau et ajuster la fertilisation aux besoins des cultures ,
- il faut avoir la possibilité d'irriguer un nombre de cultures suffisant (élargir la gamme des cultures).

C'est dans cette optique que l'étude a été menée.

Le volet, comparaison des systèmes d'irrigation, mené sur une culture de pommes de terre (culture sur laquelle l'eau usée ne peut normalement pas être utilisée) a permis de montrer que l'uniformité de l'irrigation et les rendements cultureux étaient étroitement liés ; par conséquent, tout système sensible au colmatage (les micro-asperseurs, les goutteurs en dérivation auto-régulants) ne convenait que si un dispositif de filtration adéquat était installé. Ce n'est qu'à cette condition qu'une irrigation localisée ou par micro-aspersion qui présente par ailleurs une efficacité bien supérieure à l'irrigation à la raie peut être utilisée.

Le volet utilisation de l'azote s'avère aussi crucial tant qu'économiquement qu'environnementalement. Les cultures irriguées à l'aide d'eau usée doivent être exigeantes en azote car le contenu des eaux quoi que variable, est souvent élevé.

Dans l'étude, certaines cultures ont été choisies pour cette capacité à prélever l'azote (sorgho, aubergine, maïs), d'autres plutôt à cause de leur place dans la rotation (orge à destination de fourrage vert).

Les expérimentations menées se sont heurtées à une difficulté inattendue, l'eau de nappe servant de référence s'avérant être très chargée en azote nitrique. Le protocole expérimental initial, prévoyant la complémentation à divers niveaux de fumure N minéral des deux types d'eau, a donc dû être adapté. La comparaison a dès lors surtout concerné la forme chimique de l'azote apporté (nitrique pour l'eau de nappe, ammoniacale pour l'eau usée, nitrique et ammoniacale pour l'engrais).

L'efficacité agronomique et l'utilisation de l'azote mises ainsi en jeu sont surtout liées à l'espèce cultivée. Au total, une efficacité moyenne d'utilisation ($N_{\text{exporté}}/N_{\text{apporté}}$)

d'environ 30% est observée, ce qui peut paraître faible, mais liée d'une part aux excédents de N et d'autre part à une efficacité de l'eau pas toujours optimale.

Des expérimentations complémentaires avec l'isotope lourd ^{15}N ont pu pallier au manque d'informations (dû à la richesse en N des eaux témoins) relatives au sort réel de l'azote des eaux usées.

Les mécanismes d'absorption, de stockage et de relibération de l'azote diffèrent de ceux de l'engrais minéral (surtout en raison d'un timing d'apport très différent puisque ici l'azote est fractionné à chaque irrigation). Cependant, les interactions entre les différentes sources de N (sol, engrais, eau usée) font qu'au total on peut considérer que l'azote de l'eau usée est aussi efficace que celui de l'engrais. La seule restriction concernerait les sols très pauvres en N ou les cultures à absorption rapide d'azote en début du cycle ; dans ce cas, une fumure starter pourrait être préconisée.

Sur base de cette étude, des recommandations ont été faites en matière de systèmes d'irrigation et d'efficacités de l'eau et de l'azote. Il faut minimiser l'apport au stricts besoins des plantes, c'est de cette manière qu'on évite tout stockage trop important de N dans le sol et qu'on réduit les possibilités de fuite notamment par lessivage. Dans certains cas, il faut éventuellement diluer des eaux trop chargées en azote. C'est sur ces bases agronomiques qu'ont été élaborées les fiches culturales.

Enfin, rappelons que les eaux usées traitées présentent également des teneurs K assez importantes. En fonction des quantités d'eau d'irrigation apportées aux différentes cultures, la fumure potassique minérale doit être adaptée en conséquence.

6 ANNEXE

Fiches culturales

- SORGHO FOURRAGER
- POMME DE TERRE
- MAÏS
- AUBERGINE
- ORGE

SORGHO FOURRAGER

Sorghum vulgare et sorghum vulgare var. Sudanense

Sol

Le sorgho s'adapte à tout type de sol (léger sableux à lourd). Sa croissance est toutefois meilleure en sols lourds.

Le pH optimum pour sa culture se situe entre 6 et 7 mais selon les variétés, on peut le cultiver dès pH 4.5 et jusque 8.

Les apports organiques sont recommandés, surtout en sols sableux.

Semis

Un labour profond (20 – 25 cm) n'est pas toujours indispensable, mais les façons plus superficielles doivent permettre d'enfouir les engrais organiques ou minéraux.

La période de semis s'étend d'avril à fin mai, il faut souligner qu'une température minimale du sol de 12°C est requise. La densité de semis se situe entre 25 et 30 kg/ha de graines distribuées en lignes espacées de 30 à 40 cm. Un démariage éventuel après la levée permet de constituer une population optimale d'environ 35 à 40 pieds par m².

Saison de croissance

La première coupe intervient en tout début de floraison environ 50 à 60 jours après la levée. Le rythme de repousse (3 à 4 coupes possibles, mais le plus souvent 2) va dépendre de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs aussi bien que de la température. En Tunisie, la 1^{ère} coupe a lieu généralement en tout début juillet, la 2^{ème} en septembre, la 3^{ème} est plus aléatoire.

Besoins en eau

Le besoin global en eau de fin avril à septembre se situe entre 700 et 800 mm, se répartissant de la manière suivante :

Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
20	110	350	250	70	800

Besoins en éléments nutritifs

Un objectif réaliste du rendement en culture irriguée devrait être de 20 T matière sèche par ha. En Tunisie, cette production n'est pas toujours atteinte et on va se baser sur les besoins en N – P₂O₅ K₂O suivants :

N : 80 kg au semis + 60 kg après la 1^{ère} coupe = 140 kg N ha⁻¹

P₂O₅ : 90 kg ha⁻¹ appliqué au semis.

K₂O : entre 60 et 120 kg ha⁻¹

Apports d'éléments nutritifs par les eaux usées

La concentration en éléments nutritifs de l'eau usée est évidemment variable suivant son origine, la période de l'année et les conditions propres à l'exploitation de la station.

Pour établir cette fiche, on a pris l'exemple de l'eau disponible sur la station INRGREF de Nabeul qui présentait les caractéristiques suivantes :

N : 38.3 mg/l essentiellement ammoniacal

P₂O₅ : 7.8 mg/l

K₂O : 64.7 mg/l

100 mm d'eau apportent : 38.3 kg N
 7.8 kg P₂O₅
 64.7 kg K₂O

Irrigation de surface ; efficience d'irrigation : 70%.

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
mm	20	110	350	250	70	800
kg ha ⁻¹ N	5	30	94	67	19	215
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	1	6	19	14	4	44
kg ha ⁻¹ K ₂ O	9	50	159	113	32	363

Globalement, l'apport excède les besoins pour N et K₂O surtout. Il convient donc d'irriguer avec un mélange d'eau usée et d'eau de nappe peu ou pas chargée en N (la qualité de l'eau de nappe est également variable, en outre elle peut toujours constituer un apport important

d'azote et de K_2O). En diluant (2/3 eau usée + 1/3 eau de nappe) on devrait se situer aux valeurs minimales suivantes :

	Apport par 2/3 eau usée + 1/3 eau de nappe					
mois	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
kg ha ⁻¹ N	4	19	61	44	12	140
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	1	4	13	9	3	29
kg ha ⁻¹ K ₂ O	6	33	106	76	21	242

Dans ce cas, on préconise au semis : 30 kg N

60 – 70 kg P₂O₅

La fumure N au semis est nécessaire parce qu'en mai on n'apporte pratiquement pas de N par l'eau d'irrigation.

Une autre façon de procéder pour éviter le mélange eau usée – eau claire, c'est d'arrêter les irrigations avec les eaux usées après la première irrigation du mois d'août et de continuer les irrigations avec de l'eau de nappe. Dans ce cas, on se situerait aux valeurs minimales suivantes :

	Fumure de fond	Apport eau usée					
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
kg ha ⁻¹ N	20	5	30	94	21	0	170
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	60	1	6	19	5	0	31
kg ha ⁻¹ K ₂ O		9	50	159	30	0	248

Dans ce cas aussi, on préconise au semis : 20-30 kg N et 60-70 kg P₂O₅ .

POMME DE TERRE

Solanum tuberosum L.

Sol

La pomme de terre préfère les terres légères à sous-sol profond. Le pH optimum pour sa culture se situe entre 5.5 et 6.5 ; toutefois, la culture peut très bien être menée en sol à pH proche de 7 pour autant que le chaulage ne soit pas récent. Le sol doit être meuble.

Plantation

L'époque de plantation se situe en février, parfois plus tôt. La densité optimale pour un écartement entre rangs minimum de 50 cm doit se situer aux environs de 45000 plants pour un plant de 40 à 80 g et de 30000 plants pour un plant de plus gros calibre.

Il faut planter à 8-10 cm de profondeur et butter ultérieurement afin de ramener de la terre bien travaillée autour des plants.

Saison de croissance

Selon les variétés et l'époque de récolte escomptée, la plantation est effectuée de mi-janvier à mi-mars, la récolte survenant 90 à 120 jours plus tard.

Eau

Le système racinaire étant assez superficiel, il est important de maintenir le sol suffisamment humide, surtout si la température est élevée. En moyenne le besoin total en eau se situe à environ 500 mm se répartissant de la manière suivante :

Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Total
0	30	145	180	145	500

Besoins en éléments nutritifs

Compte tenu de la production escomptée d'environ 30 T/ha de tubercules frais, les besoins sont de 120 kg N, 80 kg P₂O₅ et 250 kg K₂O par ha. Il est recommandé d'apporter une partie de l'azote et de la fumure de fond avant plantation.

Apports d'éléments par les eaux usées utilisées comme seule source d'irrigation

Exemple d'une eau à 38.3 mg/l N, 7.8 mg/l P₂O₅ et 64.7 mg/l K₂O.

Irrigation gravitaire ; efficacité 70%.

	Mars	Avril	Mai	Juin	Total
kg ha ⁻¹ N	8	39	48	39	134
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	2	8	10	8	27
kg ha ⁻¹ K ₂ O	14	66	82	66	227

Les besoins sont largement dépassés en N et surtout en K₂O.

Compte tenu également des aspects sanitaires, on peut prévoir l'arrêt des irrigations avec l'eau usée et son remplacement par une eau de nappe mi-mai ; dans ce cas les apports minima seraient les suivants :

	Fumure de fond	Apport eau usée			
		Mars	Avril	15 mai	Total
kg ha ⁻¹ N	25	8	39	48	120
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	60	2	8	10	80
kg ha ⁻¹ K ₂ O	105	14	66	82	267

Une fumure starter pourrait dans ce cas être ajoutée : 25 kg N, 60 kg P₂O₅ et 105 kg K₂O par ha. En cas d'apport organique préalable (fumier), cette fumure starter n'est pas nécessaire.

MAÏS

Zea mays L.

Sol

Le maïs convient à tous les types de sol, toutefois il préfère les sols profonds riches en matières organiques à pH à tendance acide (≈ 6).

Semis

Après labour et façons superficielles normales, avec un écartement entre rangs de 70 et 90 cm.

Le poids de semence à utiliser peut varier fortement (15 à 30 kg à l'ha), le nombre de plantes recherchées à l'hectare variant entre 50000 et 80000 plantes. Souvent en irrigation, on souhaite obtenir 70000 plantes.

Saison de croissance

La récolte intervient généralement en août, il est important, en maïs fourrager, de ne pas dépasser le stade pâteux du grain. Généralement, ce stade est atteint en 100 jours.

Besoins en eau

Le maïs a des besoins en eau élevé : 880 mm en moyenne se répartissant de la manière suivante :

Mai	Juin	Juillet	Août	Total
125	300	340	115	880

Besoins en éléments nutritifs

Les besoins sont les suivants :

N : 130 kg/ha

P₂O₅ : 120 kg/ha

K₂O : 80 kg/ha

Apport d'éléments nutritifs par l'eau usée

Exemple d'eau usée 38.3 mg/l N, 7.8 mg/l P₂O₅ et 64.7 mg/l K₂O.

Irrigation gravitaire ; efficacité d'irrigation 70%.

	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
kg ha ⁻¹ N	34	81	91	31	236
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	7	16	19	6	48
kg ha ⁻¹ K ₂ O	57	136	154	52	399

Les besoins sont évidemment dépassés en N et K₂O. Il est donc proposé d'appliquer une fumure starter en P₂O₅ (± 100 kg) au semis et d'arrêter l'irrigation avec eau usée dès la première décennie de juillet. On aura donc les apports minima suivants :

	Fumure de fond	Apport eau usée			Total
		Mai	Juin	Juillet	
kg ha ⁻¹ N	100	34	81	20	135
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅		5	11	4	120
kg ha ⁻¹ K ₂ O		38	92	25	155

Les irrigations suivantes interviennent avec de l'eau de nappe dont les teneurs en N et K₂O sont faibles (une analyse des teneurs est souhaitable).

Irrigation par aspersion

Exemple d'eau usée 38.3 mg/l N, 7.8 mg/l P₂O₅ et 64.7 mg/l K₂O.

Irrigation par aspersion ; efficacité d'irrigation 95%.

Les besoins sont dépassés en N et K₂O. Il est donc proposé d'appliquer une fumure starter en P₂O₅ (± 100 kg/ha) au semis et d'arrêter les irrigations avec les eaux usées dès la fin du mois de juin. L'eau de nappe sera utilisée dès le mois de juillet. On aura donc les apports minima suivants :

	Fumure de fond	Apport eau usée		Total
		Mai	Juin	
kg ha ⁻¹ N	100	46	109	155
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅		6	15	121
kg ha ⁻¹ K ₂ O		51	123	174

AUBERGINE

Sol

L'aubergine peut croître dans tout type de sol, les sols profonds étant à privilégier.

Semis

L'aubergine ne doit pas être semée avant que la température n'atteigne 18,5 à 21°C. La densité varie de 7.000 à 13.000 plants/ha en fonction de la variété. Une variété de grosseur moyenne est plantée à 10.000 plants/ha. L'espacement est de 1,4 à 1,6 m entre lignes et 0,6 à 0,8 m entre plants.

Saison de croissance

La saison de croissance est le début de l'été et la récolte a lieu à la fin de l'été. Lorsque la température descend sous le 18°C, la formation des fruits est arrêtée.

Besoins en eau

L'aubergine demande une grande quantité d'eau et des arrosages fréquents. Pour la Tunisie, les besoins en eaux moyens sont de 960 mm d'eau répartis de la façon suivante :

Mai	Juin	Juillet	Août	Total
70	150	370	280	960

Besoins en éléments nutritifs

Pour une production escomptée de 30 à 45 T/ha (plein champ), les besoins sont :

N : 160 kg/ha

P₂O₅ 200 kg/ha

K₂O 200 kg/ha

Apport d'éléments nutritifs par l'eau usée

Exemple d'eau usée 38.3 mg N, 7.8 mg P₂O₅ et 64.7 mg K₂O/l.

Irrigation gravitaire ; efficacité d'irrigation 70%.

	Apport eau usée					
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
kg ha ⁻¹ N	19	40	99	75	43	258
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	4	8	20	15	9	52
kg ha ⁻¹ K ₂ O	32	68	168	127	73	435

Les besoins sont largement dépassés en N et K₂O et insuffisant en P₂O₅. On doit dès lors prévoir le remplacement de l'eau usée par l'eau de nappe à partir de la fin juillet afin de limiter les apports en éléments fertilisants. Dans ce cas les apports minima seraient ceux repris au tableau ci-après. Il est alors recommandé d'apporter une partie du P₂O₅ et K₂O (180 kg/ha et 10 kg/ha) en fumure de fond avant plantation.

	Fumure de fond	Apport eau usée			Total
		Mai	Juin	Juillet	
kg ha ⁻¹ N	0	19	40	99	158
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	180	4	5	13	202
kg ha ⁻¹ K ₂ O	10	32	45	112	199

ORGE

Sol

L'orge, céréale d'hiver par excellence en Afrique du Nord, préfère les sols calcaires et argilo-limoneux.

Semis

Le semis s'exécute aux doses de 120 et 150 kg/ha et à une profondeur n'excédant pas 5 cm. Les semis précoces fournissent le maximum de matière sèche. En culture sèche, les semis suivent les premières précipitations automnales importantes tandis qu'en culture irriguée on sèmera plus tôt (dès septembre). Les semis peuvent être poursuivis jusqu'en janvier.

Saison de croissance

La récolte intervient entre mars et la fin avril en fonction de la date de semis.

Besoins en eau

Les besoins en eau de l'orge sont faibles. Par exemple, pour un semis en octobre, les besoins sont de 225 mm répartis de la façon suivante :

Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Total
10	30	85	60	45	5	225

Besoins en éléments nutritifs

Les besoins sont les suivants :

N : 60 kg/ha

P₂O₅: 70 kg/ha

K₂O: 50 kg/ha

Apport d'éléments nutritifs par les eaux usées utilisées comme source d'irrigation







Exemple d'eau usée 38.3 mg/l N, 7.8 mg/l P₂O₅ et 64.7 mg/l K₂O.

Irrigation gravitaire ; efficacité d'irrigation 70%.

	Apport par les eaux usées						
	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Total
kg ha ⁻¹ N	3	8	23	16	12	1	60
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	1	2	5	3	2	0	12
kg ha ⁻¹ K ₂ O	5	14	39	27	20	2	102

Les besoins en N sont correctement comblés par les eaux usées et dépassés pour le K₂O. Par contre, l'apport en P₂O₅ par les eaux usées est insuffisant et doit être comblé par une fumure de fond en P₂O₅ (\pm 60 kg) au semis. Dans le cas de l'orge, toutes les irrigations peuvent être réalisées avec l'eau usée.

	
<p>Mise en place des cases lysimétriques</p>	<p>Culture de sorgho sur cases lysimétriques</p>
	
<p>Installation du système d'irrigation gravitaire, essai alimentation azotée</p>	<p>Sorgho en irrigation gravitaire, essai alimentation azotée</p>
	
<p>Aubergine en irrigation gravitaire, essai alimentation azotée</p>	<p>Maïs en irrigation gravitaire, essai alimentation azotée</p>

	
<p>Pommes de terre en irrigation à la raie, essai systèmes d'irrigation</p>	<p>Pommes de terre en irrigation localisée, essai systèmes d'irrigation</p>
	
<p>Pommes de terre en irrigation par micro-jet, essai systèmes d'irrigation</p>	<p>Pommes de terre en irrigation par micro-jet, essai systèmes d'irrigation</p>
	
<p>Suivi tensiométrique et mesure de la teneur en humidité par la méthode TDR, essai systèmes d'irrigation</p>	<p>Suivi tensiométrique sur cases lysimétriques</p>

