



HAL
open science

Fonctionnement du drainage au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien. Cas de l'oasis de Fatnassa Nord à Kébili, Tunisie

Imed Ben Aïssa, Sami Bouarfa, Fethi Bouksila, Akiça Bahri, Bernard Vincent, Cédric Chaumont

► To cite this version:

Imed Ben Aïssa, Sami Bouarfa, Fethi Bouksila, Akiça Bahri, Bernard Vincent, et al.. Fonctionnement du drainage au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien. Cas de l'oasis de Fatnassa Nord à Kébili, Tunisie. Economies d'eau en Systèmes IRrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, 2006, Marrakech, Maroc. cirad-00271003

HAL Id: cirad-00271003

<https://hal.science/cirad-00271003v1>

Submitted on 8 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fonctionnement du drainage au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien

Cas de l'oasis de Fatnassa Nord à Kébili, Tunisie

Imed Ben Aïssa¹, Sami Bouarfa², Fethi Bouksila¹, Akiça Bahri¹, Bernard Vincent², Cédric Chaumont²

1 INRGREF, Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, BP 10, Ariana 2080, Tunisie

2 Cemagref, UMR G-eau, BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5 France

Résumé — Un dispositif pérenne de suivi de l'irrigation et du drainage a été mis en place par l'INRGREF et le Cemagref dans l'oasis de Fatnassa Nord. Ce dispositif expérimental permet un suivi temporel des volumes et des concentrations en sels des eaux d'irrigation et de drainage au niveau parcellaire et de l'ensemble du périmètre (l'oasis) et ce en vue de décrire et d'évaluer l'efficacité de ces systèmes « récents » dans ce contexte oasien. Ceci nous a amené à caractériser et à quantifier les bilans hydrique et salin au niveau de l'oasis (114 ha) et d'une parcelle (0,8 ha), et de faire le lien avec les modalités de gestion de l'irrigation au sein des exploitations. Dans ce contexte, quelques résultats obtenus entre avril 2003 et septembre 2005 sont présentés dans cette communication. A l'échelle de la parcelle, l'analyse piézométrique met en évidence une très forte dynamique de la nappe superficielle suite aux irrigations, qui témoignent d'une remontée systématique de cette nappe à chaque irrigation et d'une vitesse de tarissement assez liée à la demande climatique. En termes de sels apportés, ces cumuls correspondent respectivement à 48,4 ; 30,4 et 23,3 t/ha de sels. Cela montre l'importance cruciale du drainage et de l'apport d'une fraction de lessivage pour mieux contrôler cette salinité. Les mesures au niveau de la sortie ont montré une variation saisonnière de la fraction drainée et en fonction du volume apporté à chaque tour d'eau. Par ailleurs, on a estimé l'exportation de sels due au pompage au niveau de cette parcelle vers les extensions et qui représente un ordre de grandeur quadruple de celui du drainage, soit de 60 tonnes /ha /an. Cette pratique traduit une gestion hydrosaline complexe entre l'oasis et les extensions et il est nécessaire de mieux estimer le poids de cette gestion dans l'établissement du bilan notamment à l'échelle du périmètre. A l'échelle de l'oasis, les différents termes du bilan hydrosalin (entrée - sortie) révèlent un bilan déficitaire sur toute la période de mesure. Les quantités d'eau et de sels sont estimées en entrée et en sortie du système sur deux années de mesure. Les entrées d'eau et de sels sont mesurées à l'échelle de la parcelle et extrapolées à l'échelle de l'oasis, et sont confirmées par les informations recueillies au niveau des forages. Les sorties par drainage souterrain sont mesurées indépendamment à deux exutoires. En revanche, les sorties de sel par l'écoulement naturel de la nappe vers le Chott n'ont pas été estimées. Au niveau des deux exutoires, 15 t/ha de sels ont été évacués par drainage sur 48 t/ha apportés pour l'année 1 et 5 t/ha ont été évacués sur 30 t/ha apportés pour l'année 2 avec une bonne répétabilité entre les deux exutoires. Le rapport correspondant entre volume de drainage et d'irrigation est de 11 % et 6 % respectivement aux deux années de mesure avec un coefficient de concentration quasi-constant de l'ordre de 2,8. Ces résultats traduisent un déficit respectif de 69 % et 84 % en termes de quantités de sels évacués par drainage. Ceci nous amène à nous interroger sur les performances techniques et économiques d'un tel système de drainage souterrain et sur sa pérennité dans ce milieu vu sa sensibilité au colmatage, constatée sur le terrain, par ensablement et pénétration des racines.

Introduction : problématique et objectifs

Les oasis tunisiennes connaissent une extension en superficie et une mobilisation accrue et progressive des eaux d'irrigation. Actuellement, ces oasis sont alimentées principalement à partir des eaux de deux nappes fossiles : la nappe du « complexe terminal » (CT) située entre 60 et 500 m de profondeur et celle du « complexe intercalaire » (CI) situé à plus de 2000 m de profondeur. Cette dernière est fortement artésienne et géothermale (70°C). Ces eaux ont des salinités qui varient d'environ 2,4 g/l pour les eaux du CI à presque 5 g/l pour celles du CT.

Ces oasis sont généralement disposées en bordure de « chotts », dépressions topographiques salées qui constituent l'exutoire naturel des eaux de drainage. Néanmoins, dans de nombreux cas, les faibles dénivelés entre les oasis et les chotts entraînent des difficultés pour l'évacuation des eaux. En conséquence, une majorité de ces oasis est sujette à des problèmes de remontée de la nappe superficielle et de salinisation du sol, accentués par une gestion inefficace des eaux d'irrigation et du drainage et du sol. La réunion de ces facteurs entrave le bon fonctionnement hydrosalin en accentuant les signes d'hydromorphie et fragilisant d'avantage l'équilibre du système oasien.

Pour améliorer cette situation, un programme de modernisation des systèmes d'irrigation et de drainage oasiens a été entrepris. Ce programme concerne 23 000 ha d'oasis dans le cadre du projet d'Aménagement des périmètres irrigués des oasis du Sud (APIOS). Le remplacement des seguias en terre par d'autres en béton et la mise en place d'un réseau enterré de drainage à la place de l'ancien à ciel ouvert représentent les principales interventions de ce projet.

Pour évaluer l'efficacité de ces systèmes récents dans le contexte oasien, l'INRGREF, en partenariat du Cemagref, accompagne ce projet par un volet recherche qui porte sur la mise en place (avril 2003) d'un dispositif pérenne de suivi de l'irrigation et du drainage dans l'oasis de Fatnassa Nord (Gouvernorat de Kébili), souvent sujette à un problème de remontée de la nappe et ayant bénéficié depuis la fin 2001 des interventions du projet « APIOS ».

Ce dispositif expérimental, investiguant différents niveaux d'échelle, permet un suivi temporel des volumes et des concentrations en sels (conductivité électrique) des eaux d'irrigation et de drainage au niveau parcellaire et de l'ensemble du périmètre (l'oasis) et ce en vue de décrire et d'évaluer l'efficacité de ces systèmes 'récents' dans ce contexte oasien. Ceci nous a amené à caractériser et à quantifier les bilans hydrique et salin au niveau de l'oasis (114 ha) et d'une parcelle (0,8 ha), et de faire le lien avec les modalités de gestion de l'irrigation au sein des exploitations

Les principaux objectifs de ce travail de recherche sont :

- comprendre et analyser les relations entre gestion de l'irrigation, remontée de la nappe et de la salinité dans cette oasis qui a bénéficié du programme d'économie en eau (APIOS) ;
- vérifier si le système de drainage enterré, nouvellement installé, joue correctement son rôle d'évacuation des sels dans ce milieu oasien (fraction de lessivage, désalinisation, bilan hydro-salin, équilibre, etc.) ;
- mettre en relief les interactions qui peuvent exister entre l'oasis (unités desservies par le réseau collectif d'irrigation géré par le GIC) et sa périphérie (parcelles non desservies par le réseau collectif et extensions « illicites ») en termes de gestion de l'eau et leur influence sur le fonctionnement hydrosalin ;
- améliorer la situation actuelle par la mise en évidence des différentes anomalies existantes et par l'implication de l'agriculteur, à travers le GIC, pour une meilleure durabilité du système.

Méthodologie

Cadre expérimental

Cette activité est menée dans l'oasis de Fatnassa, située à 9 km à l'ouest de la localité de Souk Lahad (Gouvernorat de Kébili). Cette oasis est scindée en deux parties Fatnassa Nord (FI) et Fatnassa sud (FII). La partie nord est limitée au nord-est par Fatnassa village, à l'ouest par Chott El Djerid et au sud par l'oasis Fatnassa II. Cette dernière est limitée à l'ouest par l'oasis de Béchri, au nord par Fatnassa I, au sud et à l'ouest par Chott El Djerid. La superficie totale de l'oasis de Fatnassa est de 220 ha. Notre étude a concerné la partie Fatnassa Nord (FI). Sa superficie totale fait 147 ha avec une superficie irriguée nette officiellement gérée par le GIC de 114 ha uniquement.

Le bioclimat est saharien caractérisé par de fortes amplitudes thermiques journalière et saisonnière, une pluviométrie irrégulière et très faible (inférieure à 90 mm/an). L'évapotranspiration est importante (1 800 à 2 000 mm/an).

Le système de culture est étagé. Le palmier dattier est la culture principale. Les cultures fourragères (principalement luzerne et orge en vert) représentent l'essentiel de la strate herbacée. L'étagage moyen a presque disparu, sauf quelques pieds de grenadier et de figuier éparpillés sur quelques parcelles qui ont pu persister. Par ailleurs, on note, en amont de l'oasis, la présence d'un périmètre de serres (chauffées par les eaux géothermales) qui, malgré sa superficie réduite par rapport à celle de l'oasis, a des répercussions importantes sur le fonctionnement hydrosalin au niveau des parcelles se trouvant de plus en plus à l'aval.

La texture du sol est sableuse à limono-sableuse avec un taux de gypse dépassant 40 %. Des encroûtements gypseux sont aussi rencontrés à une profondeur moyenne de 1 m. L'exutoire naturel de l'oasis est le chott El Djérid, la pente du terrain est faible (3 à 5 ‰). Le niveau de la nappe sub-affleurante varie de 0,7 à 1,8 m,

même en présence d'un réseau de drainage, et cette oasis confronte souvent un problème d'hydromorphie accentué dans sa partie aval.

Les ressources en eau d'irrigation sont constituées d'un forage artésien dans le continental intercalaire (CI14) de salinité moyenne de l'ordre de 2,4 g/l et de deux pompages dans le complexe terminal (CT), à savoir Tawergha et Fatnassa II, de salinité respective de 3,6 et 3,9 g/l. Fatnassa Nord est actuellement desservie en eau d'irrigation par trois antennes conçues pour véhiculer chacune une main d'eau de 24 l/s, acheminée et allouée aux parcelles de l'oasis dans un réseau de séguias bétonnées en tour d'eau. Sur chaque antenne, on trouve une série de bornes d'irrigation dont chacune irrigue un ensemble de parcelles formant un « îlot » d'irrigation. La gestion hydraulique dans l'oasis est assurée par le GIC (Groupement d'intérêt collectif) de l'oasis qui contrôle et planifie le tour d'eau. L'eau est payée à l'heure d'irrigation (à raison de 2 à 3 DT/heure), la recette collectée doit couvrir les différents frais et dépenses du GIC (salaires, énergie, maintenance, etc.).

Dispositif expérimental

L'expérimentation se situe à deux niveaux d'échelle (figures 1 et 2) :

- échelle de l'oasis : faisant intégrer la diversité des pratiques d'irrigation ;
- échelle d'une parcelle : permettant une meilleure compréhension des différents processus.

Méthodes de mesure et d'évaluation

Il s'agit de quantifier les bilans hydrique et salin à ces deux échelles d'espace. Pour cela, on a procédé à un suivi temporel des volumes et de salinité des eaux d'irrigation et de drainage, et à un suivi spatio-temporel du niveau de la nappe subaffleurente et de sa salinité. Les volumes sont évalués par intégration temporelle de mesures du débit dans les drains ou par jaugeage automatique dans les canaux d'irrigation bétonnés. La salinité des eaux est évaluée par mesure de la conductivité électrique. Le dispositif de mesure est constitué d'instruments automatiques et est complété par un suivi manuel.

Suivi des eaux d'irrigation et de drainage

A l'échelle de l'oasis comme à l'échelle de la parcelle, les quantités d'eau d'irrigation et de drainage ainsi que leur qualité sont espérées déterminées. Neuf stations de mesure ont été installées et réparties de la façon suivante :

- trois stations pour la caractérisation et le suivi de l'eau d'irrigation au pas de 10 mn : une station sur le partiteur pour contrôler l'entrée à l'échelle de l'oasis (lame d'eau, CE et distribution) et 2 stations sur les séguias S1 et S2 pour contrôler le tour d'eau et l'entrée à l'échelle de la parcelle (niveau, température) ;
- quatre stations pour la caractérisation et le suivi de l'eau de drainage : 1 station installée sur le regard de drainage pour mesurer, au pas de 10 mn, la lame d'eau drainée et sa CE à la sortie de la parcelle ; 3 stations installées au niveau des trois rejets de l'oasis (R1, R2 et R3) pour le suivi horaire de la lame d'eau drainée et sa CE à la sortie de l'oasis ; une plaque déversoir, au niveau de chaque sortie permet de convertir les mesures limnimétriques des lames d'eau en débits. Le jaugeage des débits est assuré par des empotements manuels ;
- deux stations de suivi piézométrique (PiézoB1 et PiézoB2) installées à la parcelle pour déterminer la relation entre le débit et la charge au-dessus du drain et suivre la dynamique de la nappe en fonction des importations et des exportations hydriques au niveau de la parcelle instrumentée. Le piézomètre B1 est situé à 2 m du puits (pompage de 6 m de profondeur) afin de suivre l'impact des prélèvements qui y sont effectués.

Suivi des eaux de la nappe

La mesure du niveau de la nappe et de sa salinité a été programmée avec une cadence mensuelle sur une batterie de 27 piézomètres manuels installés sur la totalité de l'oasis (figure 1). Ces mesures sont complétées par des observations visuelles sur le terrain. Les résultats de cette partie du travail ne sont pas disponibles et ne vont pas être présentés dans cette communication.

Actions entreprises et résultats obtenus

Mise en situation : fonctionnement de l'irrigation dans l'oasis et ses extensions

Au cours des visites du terrain effectuées, des informations ont été collectées auprès du GIC et des agriculteurs dans l'objectif de caractériser chaque secteur de l'oasis (irrigué sur une même antenne d'irrigation) et de dégager les différences par rapport aux autres secteurs. Cela en vue d'une meilleure appréhension du fonctionnement hydrosalin dans la présente oasis.

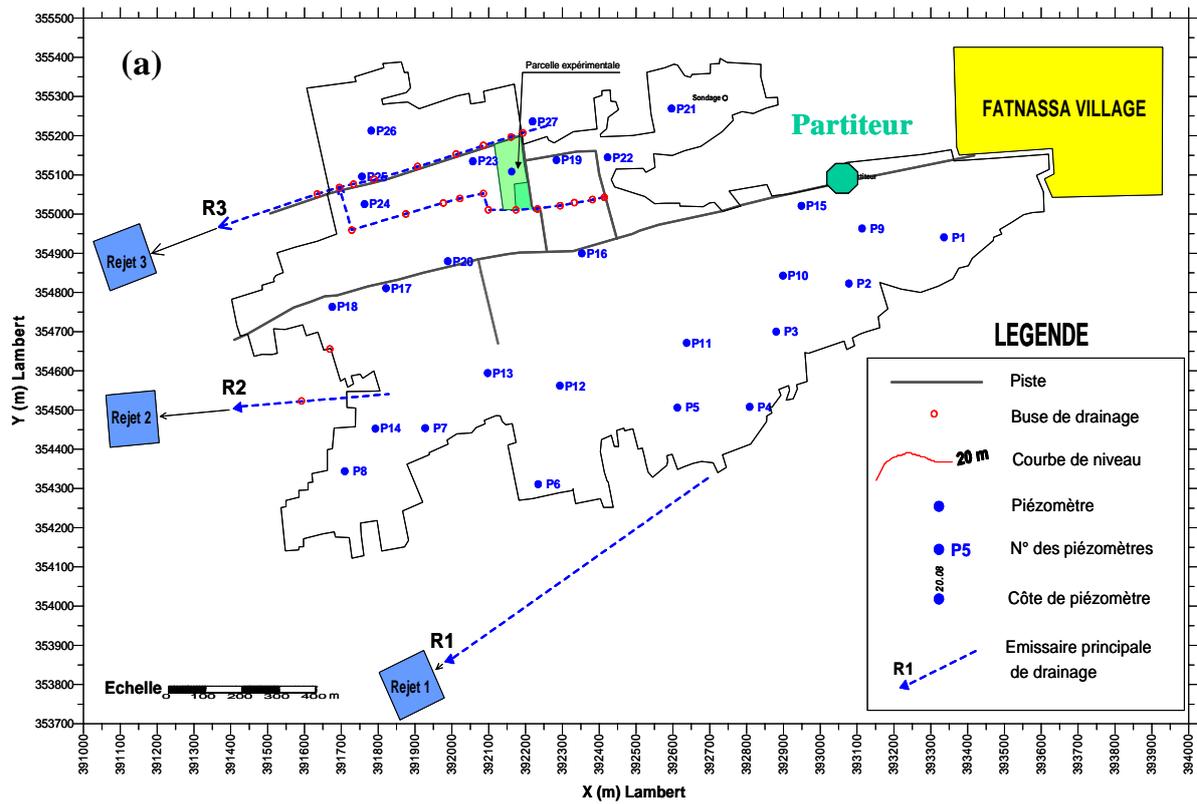


Figure 1. Dispositif expérimental à l'échelle de l'oasis.

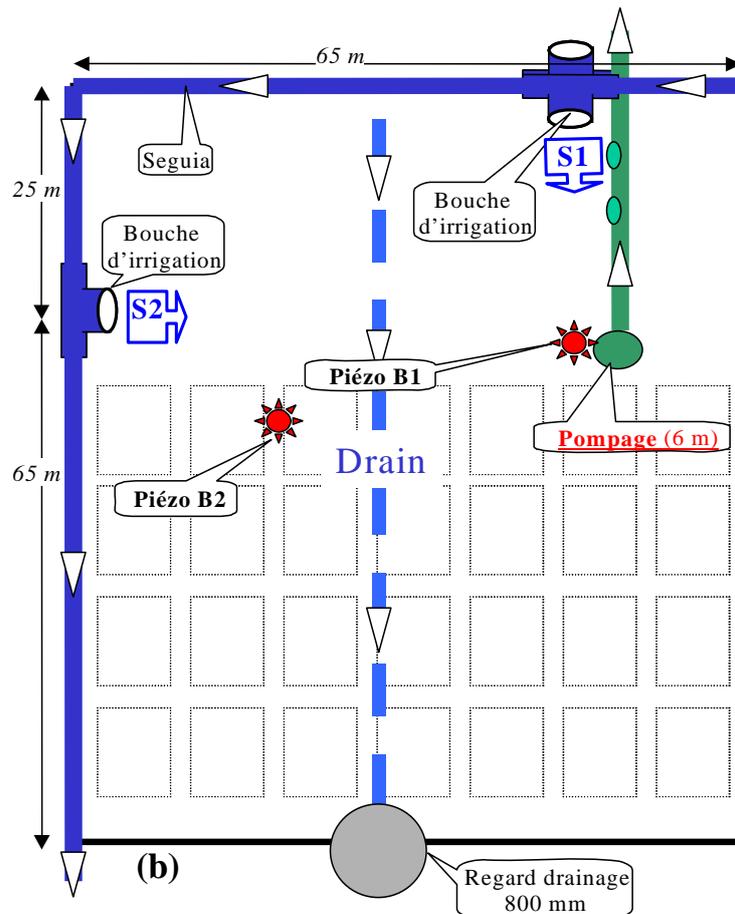


Figure 2. Schéma du dispositif expérimental à l'échelle de la parcelle.

La gestion hydraulique dans l'oasis est assurée par le GIC dont les membres sont élus par et parmi ses agriculteurs. Ce groupement contrôle et planifie le tour d'eau (avec l'assistance du CRDA) et ce sont les aiguadiers (payés par le GIC) qui interviennent au quotidien pour la distribution des différentes mains d'eau aux différentes antennes et bornes pour bien contrôler le tour d'eau. Ce même GIC s'occupe de l'autre partie (Fatnassa Sud) de la grande oasis de Fatnassa.

La partie nord de l'oasis est desservie en eau d'irrigation par trois antennes : A1, A2 et A3, véhiculant chacune une main d'eau de 24 l/s, acheminée et allouée aux parcelles dans un réseau de séguias bétonnées en tour d'eau. Sur chaque antenne, on trouve une série de bornes d'irrigation dont chacune dessert un ensemble de parcelles formant un « îlot » d'irrigation. En réservant une durée d'irrigation de 14 heures/ha (durée adoptée par le GIC), on apporte, théoriquement, une dose d'irrigation de 120 mm/tour d'eau. Toutefois, et dans un objectif de raccourcir le tour d'eau, on a adopté depuis début 2005 une durée de 10 heures/ha soit une dose de 90 mm/tour d'eau. En pratique, ces durées et doses d'irrigation ne sont que partiellement respectées. La caractérisation des secteurs relatifs à chaque antenne est présentée ci-dessus (tableau I). Il faut par ailleurs noter qu'à partir du mois d'avril 2005 on a augmenté la main d'eau (en allouant la totalité du CI14 pour Fatnassa) pour atteindre 28 l/s.

Tableau I. Gestion et distribution de l'eau d'irrigation dans l'oasis de Fatnassa Nord.

Antennes d'irrigation	A 1	A 2	A 3	Oasis
Nombre de parcelles gérées par le GIC	245	111	111	467
Surface moyenne / parcelle (ha)	0,15	0,35	0,32	0,15 à 0,35
Nombre de bornes d'irrigation	11	9	8	28
Main d'eau théorique (l/s) *	24	24	24	72
Tour d'eau planifié (nombre de jours) *	25	27	25	25 à 27
Régularité du tour d'eau	A/régulier	27j à 35j ou +	25j à 30j	25j à 35j ou +
Nombre relatif d'extensions	0	30	25	55

(*) Situation avant avril 2005.

Le secteur relatif à l'antenne n°1 de l'oasis, faisant 36 ha de superficie irriguée, est le plus morcelé avec un nombre très élevé de petites parcelles (à cause de l'héritage). Cette partie médiane de l'oasis comporte les plantations les plus âgées représentant son premier noyau. Sur cette antenne, toutes les parcelles irriguées sont officiellement inscrites sur la liste gérée par le GIC. En effet, il n'existe pas d'extensions et c'est le secteur où on rencontre le moins de problèmes d'irrégularité du tour d'eau. L'absence des extensions est expliquée par le fait que cette partie médiane de l'oasis se trouve limitée d'un côté par la zone urbaine (le village) et des autres côtés par les deux autres secteurs (n°2 et n°3).

Le secteur relatif à l'antenne n°2, d'une superficie irriguée de 39 hectares, est le moins morcelé et représente la partie sud de l'oasis. D'après les exploitants des parcelles de cette antenne, le tour d'eau réel sur ce secteur est toutefois de 30 à 35 jours (et même plus en saison de pointe). Cette irrégularité du tour d'eau est due essentiellement à l'existence d'extensions « illicites » irriguées sur le réseau collectif. En effet, nous avons compté une trentaine d'extensions (parcelles non inscrites dans la liste officielle du GIC) sur cette antenne notamment sur les bornes n°2 (7 extensions) et n°7 (9 extensions). Ce nombre important d'extensions au niveau de ce secteur est expliqué par le fait que la limite sud de l'oasis est bien dégagée et qu'elle semble à l'abri des problèmes de remontée de la nappe et de la salinité.

L'absence d'une source d'eau supplémentaire (telle que les eaux de chauffage ou de drainage de serres géothermales) proche de cette partie de l'oasis aggrave davantage le retard du tour d'eau. Ainsi, pour irriguer ces extensions, les agriculteurs n'ont pas d'autres possibilités que de « prélever » l'eau sur le réseau collectif d'irrigation aux dépens des parcelles officiellement inscrites sur la liste du GIC. Cette situation problématique ne sera pas résolue (au moins à court terme) puisque le GIC, lui-même, en difficulté de liquidité monétaire, accepte que ces exploitants payent l'eau utilisée pour irriguer les extensions ; ainsi, au lieu de limiter les prélèvements, on est en train de légaliser et d'encourager de telles pratiques qui vont aggraver la situation de la rareté de l'eau dans l'oasis. A ce titre, on peut citer l'exemple de la parcelle n°9 sur la borne n°7 qui, au lieu de recevoir l'eau d'irrigation pendant 9,3 heures, se voit allouer l'eau durant 17 heures pour irriguer la parcelle et l'extension à côté. Il paye le GIC sur cette base.

Le secteur relatif à l'antenne n°3, d'une superficie irriguée de 36 ha, est moins morcelé que le n°1 et représente la partie nord de l'oasis. Le tour d'eau réel sur ce secteur est aussi variable de 25 à 30 jours. Cette variabilité a été confirmée par nos enregistrements automatiques effectués au niveau d'une parcelle de ce secteur. Le retard et l'irrégularité du tour d'eau signalés sur cette antenne sont essentiellement dus (d'après le GIC et les exploitants de ce secteur) au fait que les superficies réelles des parcelles irriguées sont supérieures à celles inscrites. Ainsi, un exploitant pour bien irriguer sa parcelle a tendance à garder l'eau plus longtemps que programmé avant de laisser la main à son voisin situé à l'aval.

Du côté de ce secteur de l'oasis (bordure nord), on a signalé l'existence d'au moins une trentaine d'extensions avoisinantes. Les exploitants de ce type de parcelle profitent de la présence d'une eau « gratuite » provenant du périmètre géothermal situé en amont. Cette eau est généralement chaude, pour faire baisser sa température on a pris l'habitude de la mélanger en tête de la parcelle (l'extension) avec de l'eau froide, mais de qualité inférieure provenant :

- soit d'un pompage au niveau de la nappe superficielle ;
- soit d'un pompage direct sur réseau de drainage (au niveau des regards sur le collecteur de l'eau de drainage le plus proche, en utilisant des groupes motopompes portatifs, après bouchage à l'aval).

Un autre fait alarmant est que certains agriculteurs ont recours au bouchage du collecteur de drainage en aval pour faire monter le niveau de l'eau dans le regard en vue de faciliter le pompage. Ce bouchage se répercute sur le niveau de la nappe accentuant ainsi le risque d'hydromorphie dans la partie basse de l'oasis.

Cette partie de l'oasis comporte des plantations anciennes et d'autres plus jeunes de palmier dattier avec des cultures sous-jacentes (fourragères et maraîchères). C'est la partie où l'on rencontre le plus de problèmes relatifs à la remontée de la nappe touchant notamment la partie aval proche de l'exutoire.

Ces informations de mise en situation seront complétées et affinées davantage à travers des enquêtes en traitant, outre les aspects socio-économiques dans l'oasis, les différentes pratiques hydro-agricoles en essayant de souligner les hétérogénéités parcellaires, de gestion de l'eau et de salinité pour pouvoir les intégrer par la suite dans le bilan. En effet, une complexité de la gestion de l'eau dans l'oasis est notamment mise en évidence par le recours au pompage dans la nappe phréatique sub-affleurante. Cette pratique permet l'irrigation de parcelles situées en dehors du système collectif d'irrigation (extensions) et a pour conséquence la mobilisation d'une quantité significative de sels.

Relations entre la gestion de l'eau et le bilan hydrosalin aux deux échelles de mesure

A l'échelle de la parcelle

L'irrigation et son Impact sur la dynamique de la nappe au niveau de la parcelle

Deux mesures de la profondeur de la nappe superficielle sont réalisées en continu sur la parcelle au pas de temps de dix minutes. Les résultats présentés ci-dessous représentent sept irrigations (ou tour d'eau) successives qui ont été réalisées avec une fréquence variant de 23 à 30 jours reflétant l'irrégularité du tour d'eau.

En réponse à chaque apport hydrique, on enregistre une remontée rapide de la nappe superficielle (figure 3). Cette recharge de la nappe par l'eau d'irrigation est suivie d'un tarissement progressif sous l'effet conjugué du drainage et de l'évapotranspiration. Sur cette figure on remarque que le niveau atteint par la nappe, suite aux irrigations, n'est pas constant et il est à son minimum en plein été. La nappe est affleurante suite à la première irrigation mi-avril et ne remonte qu'à 50 cm de profondeur à l'irrigation de mi-août. Ce résultat s'explique, en partie, par la variation de l'évapotranspiration au cours de la saison et son effet conséquent sur la cinétique de tarissement de la nappe.

Les opérations de pompage réalisées par l'agriculteur, soit pour irriguer sa parcelle, soit pour fournir de l'eau à une parcelle située à la périphérie de l'oasis (extension) sont très aisément repérables sur le piézomètre B1, situé à 2 m du pompage (figure 4). A proximité du puits, la nappe réagit instantanément au pompage pour s'abaisser sous la cote de la sonde de mesure (située à une profondeur de 1,85 m). A l'arrêt de pompage, elle remonte, soit à son niveau initial, soit à une cote inférieure si le pompage est prolongé.

Le drainage à la parcelle

Les débits de drainage enregistrés présentent une évolution cohérente avec les occurrences d'irrigation et la dynamique de la nappe. On observe un pic de débit concomitant avec les apports d'eau (figure 3). Des perturbations de débit sont également observées en liaison avec la mise en route du pompage (figure 4).

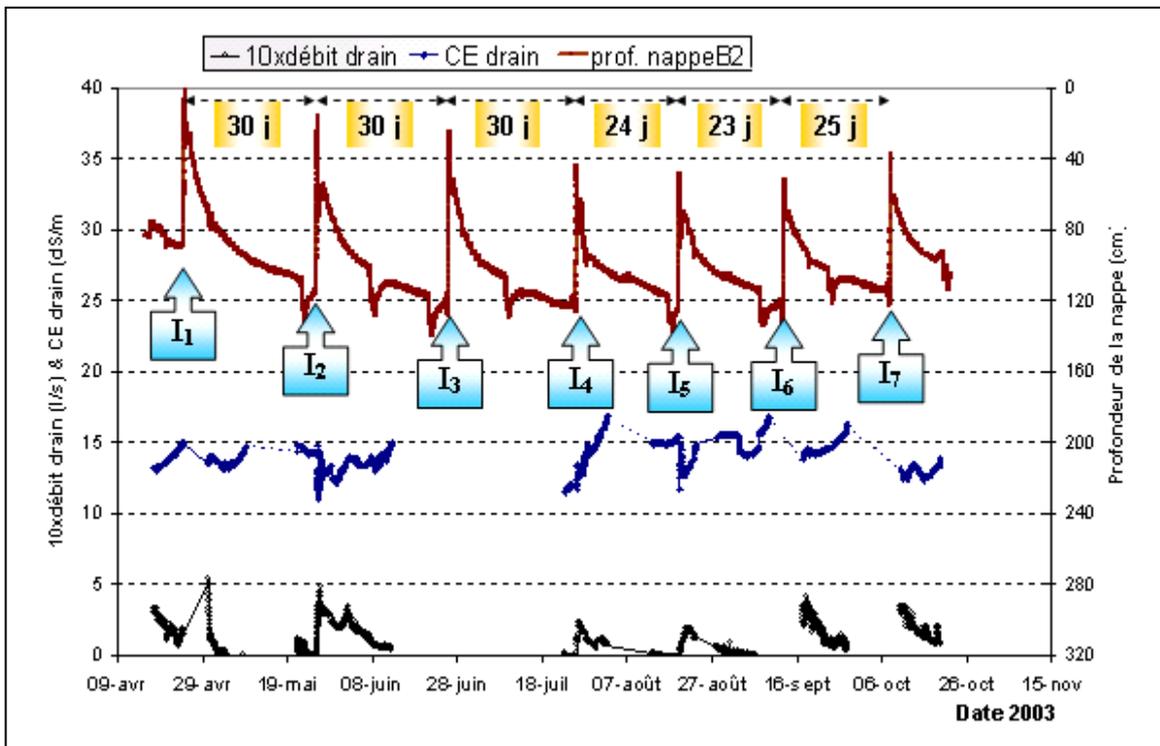


Figure 3. Dynamique de la nappe superficielle, de la salinité (CE) et du débit de l'eau de drainage en fonction des apports par irrigation au niveau de la parcelle.

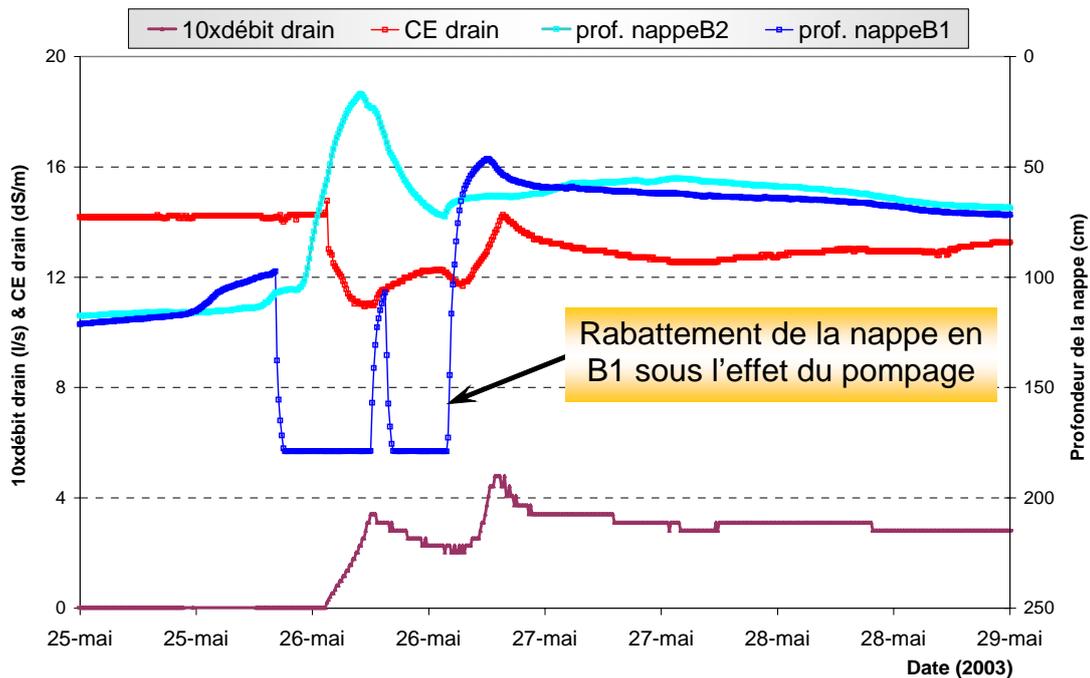


Figure 4. Dynamique de la nappe, de la salinité (CE) et du débit de l'eau de drainage en fonction des importations et des exportations hydriques au niveau de la parcelle.

La mesure de la conductivité électrique (CE) à la sortie du drain présente également des allures cohérentes. Les variations au cours de la saison et en fonction de l'apport hydrique mettent en évidence les effets de dilution de l'eau de drainage par l'eau d'irrigation nettement plus douce. Le coefficient moyen de passage de la conductivité électrique vers la teneur en sels dissous dans l'eau (résidu sec) exprimé en g/l a été établi. Une étroite corrélation est obtenue ($R^2=0,99$) avec un coefficient de 0,72. Ce dernier sera utilisé dans la suite pour traduire les conductivités électriques en taux de sels dissous exprimés en g/l.

D'après ces résultats, on constate que le drain enterré à 1,2 m de profondeur présente un fonctionnement repérable par la variation immédiate de son débit en fonction des importations et des exportations hydriques réalisées sur la parcelle. La question est cependant de déterminer si, à l'échelle de l'année, en intégrant la variation saisonnière, le drainage souterrain évacue bien la quantité des sels apportée par irrigation. Cet objectif, en raison des nombreuses données débit métriques manquantes dues à des pannes matérielles au niveau de la station Drain, n'a été que partiellement atteint à l'échelle de la parcelle. Seuls quelques irrigations bénéficient de suffisamment d'informations cohérentes pour y parvenir dont celles qui sont présentées ci-après.

Estimation du bilan hydrique et salin à la parcelle

Les bilans hydriques et salins (entrée-sortie) sont estimés pour deux irrigations (A et B) à deux doses différentes. En revanche, les quantités d'eau d'irrigation et de sels importées correspondantes ont pu être estimées sur l'ensemble de la période de suivi (tableau II).

Tableau II. Quantités d'eau et de sels apportées par irrigation au niveau de la parcelle.

	Nombre de tours d'eau	Volume d'irrigation (m ³)	Sels apportés (tonne)
(18/04/03 - 17/04/04)	12	12480	38,7
(18/04/04 - 17/04/05)	7	7840	26,7
(18/04/05 - 04/09/05)	5	6000	17,4
Total	24	26320	82,7

Le tableau III synthétise les termes du bilan pour ces deux tours d'eau. Les doses d'irrigation apportées sont d'environ 156 mm et 110 mm respectivement pour A et B. Les quantités de sels apportées par ces eaux sont respectivement de 4,7 t/ha et 3,5 t/ha. Suite à ces irrigations, le réseau de drainage a permis d'évacuer une lame d'eau respective de 32 mm et 12 mm et une quantité de sels respective d'environ 3,1 t/ha et 1,3 t/ha (figure 5).

Tableau III. Bilan hydrosalin à l'échelle de la parcelle pour deux irrigations A et B.

	Bilan irrigation A (25/5/03 au 12/6/03)		Bilan irrigation B (19/8/03 au 5/9/03)	
	m ³ d'eau/ha	t de sels/ha	m ³ d'eau/ha	t de sels/ha
Entrée : irrigation	1565	4,7	1096	3,5
Sortie : drainage	323	3,1	120	1,3
Balance (irrigation - drainage)	1242	1,1	976	2,2
Fraction drainée et proportion de sels évacués	21 %	66 %	11 %	37 %

La fraction drainée (ou de lessivage) déduite de ces résultats est de respectivement 21 % et de 11 % pour les deux épisodes A et B. Pour un sol léger analogue aux conditions de notre parcelle, la fraction de lessivage minimale généralement recommandée est de 15 %. La variabilité temporelle de la fraction de lessivage ne permet pas de raisonner à l'échelle du tour d'eau et met en évidence la nécessité de raisonner la question du lessivage à l'échelle annuelle.

Le bilan de sels (entrée - sortie) estimé est positif pour les deux périodes considérées. Si 66 % des sels sont évacués lors de l'Irrigation A, cette proportion tombe à seulement 37 % pour l'épisode estival (Irrigation B).

En effet, malgré les problèmes d'acquisition de mesure, la figure 3 illustre la régularité du comportement des différentes variables suivies et les résultats obtenus semblent, du moins qualitativement, extrapolables.

Influence du pompage à la parcelle

Les conclusions de la section précédente sont à pondérer par l'importance considérable que semblent constituer les pompages sur le régime hydrique et salin de cette parcelle. Les démarrages et les arrêts des pompages ont pu être comptabilisés avec une bonne précision grâce à la mesure piézométrique (figure 5).

Sur le tableau IV sont présentés la durée et le volume de pompage et le sel correspondant.

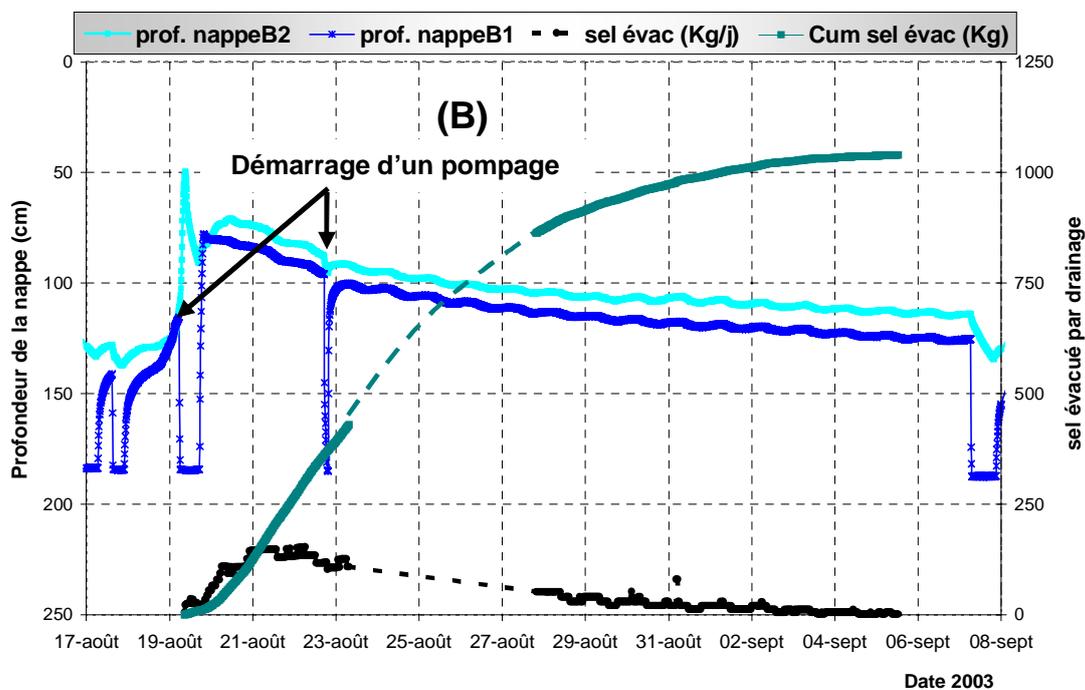
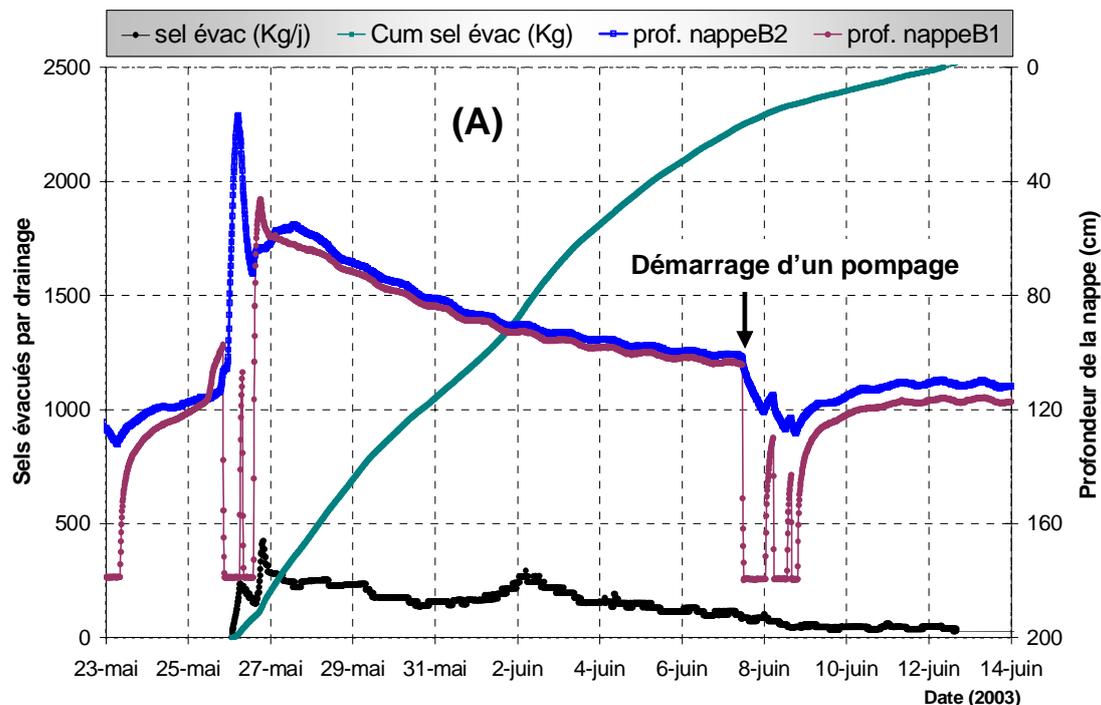


Figure 5. Evolution temporelle de la profondeur de la nappe (cm) et de la quantité des sels évacués par drainage (kg) au niveau de la parcelle suite à deux irrigations (A et B).

Tableau IV. Evaluation du pompage à la parcelle.

	Durée de pompage (heures)	Volume de pompage (m ³)	Quantité de sel (tonnes)
(18/04/03 - 17/04/04)	532	9573	78
(18/04/04 - 17/04/05)	629	11322	93
(18/04/05 - 04/09/05)	106	1917	16
Total	1267	22812	187

Durant la période de mesure du 18/4/03 au 04/09/05, le temps de pompage effectif est évalué à 1267 heures. Nous avons effectué une estimation du débit de la pompe à 5 l/s (vérifié par empotement). Ce débit, multiplié par le temps de pompage, équivaudrait à un volume pompé de 22 812 m³, soit environ 2 850 mm pompés à

l'échelle de cette parcelle sur l'ensemble de la période. Hormis le volume drainé, ce volume pompé est presque équivalent aux irrigations apportées, évaluées à un volume de 26 320 m³, soit environ 3 290 mm. Sur ce volume très important de pompage, nous ne connaissons pas avec certitude la proportion réinjectée sur cette même parcelle et celle déviée vers l'extension. Toutefois, on est certain que cette dernière représente au moins 80 % des volumes pompés sur toute la période correspondant à une moyenne de 60 t/ha/an de sels exportés.

Par ailleurs, le positionnement du puits en bordure de la parcelle est également à prendre en compte. La nappe captée par ce puits est donc prélevée pour partie dans les parcelles voisines. Cette nappe est rechargée par des irrigations non comptabilisées dans le bilan.

L'influence des pompages se répercute sur l'ensemble des variables mesurées, notamment sur la dynamique de la nappe (profondeur et tarissement). L'effet des pompages sur les autres variables mesurées : conductivité électrique et débit de drainage en aval de la parcelle, est également perceptible (figure 3 et 4). Toutefois, du fait que la parcelle n'est pas hydrologiquement indépendante et en l'absence de données relatives à l'évolution du stock d'eau et sels dans le sol, il est difficile de déterminer le poids de ce pompage sur le bilan d'eau et des sels à l'échelle de la parcelle.

A l'échelle de l'oasis

Avec l'installation de la station de mesure (Qualemac98) sur le partiteur en amont de l'oasis, il a été espéré de connaître avec précision la qualité et le volume d'eau d'irrigation distribué pour chaque secteur. Toutefois, la détérioration de la sonde pression (mesurant le niveau de la lame d'eau déversée) par la chaleur excessive (dépassant 60°C) et le vandalisme fréquent des câbles et capteurs contrôlant le passage de l'eau vers les antennes, nous ont empêché d'avoir la totalité des résultats escomptés et seule la conductivité électrique de l'eau (accompagnée de la température) a été valable sur une période de dix mois. Le suivi temporel des eaux d'irrigation dans le partiteur a montré que la conductivité électrique instantanée de l'eau varie de 3,5 à 5 mS/cm (à 25°C) selon les proportions du mélange (de trois sources) à l'instant de mesure.

Depuis l'installation des stations d'enregistrement (mi-avril 2003), le suivi temporel de l'eau de drainage, au niveau des Rejets (R1, R2 et R3), a montré que la conductivité électrique varie en moyenne de 9 à 15 mS/cm soit un résidu sec de 7,2 à 12 g/l. Pour les premiers 12 mois de mesure, la salinité moyenne était de l'ordre de 9 g/l avec une bonne cohérence entre les deux rejets R1 et R2 (Figure 6). Cette valeur moyenne était presque constante sur les trois années de mesure (figure 7).

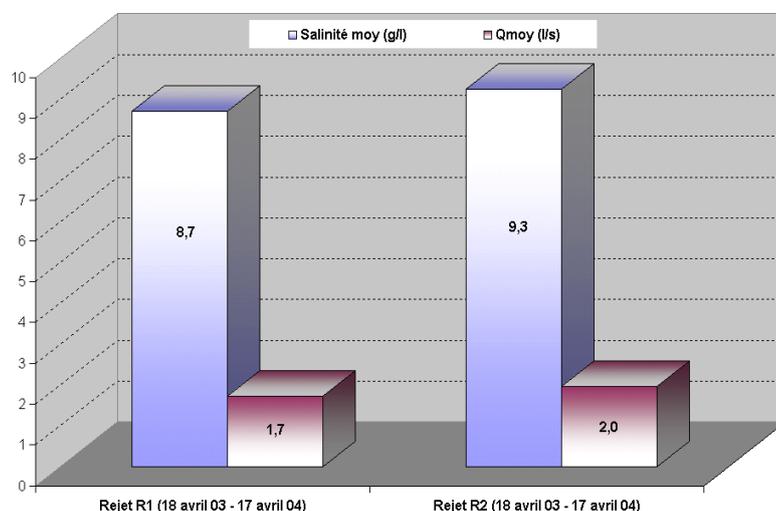


Figure 6. Salinité et débit moyens de l'eau de drainage à l'échelle de l'oasis mesurés au niveau des rejets R1 et R2 sur une période de 12 mois.

Quant au débit de drainage, il varie en moyenne de 0,5 à 2,5 l/s pour R1 et R2 avec une moyenne de 2 l/s pour la première année (figure 6). Si la salinité moyenne a gardé une valeur quasi-constante, il n'en est pas du même pour le débit moyen à l'exutoire qui était réduit à son tiers (0,6 l/s) pour la deuxième année de mesure (figure 7). Cela est expliqué en raison des pannes fréquentes au niveau de la ressource (C114) et de la conduite amenant l'eau du refroidisseur au partiteur qui ont engendré une diminution importante des apports durant cette année de mesure comparativement à la première et à la dernière (tableau II).

Au niveau du rejet R3, les eaux de drainage proviennent aussi (en grande partie) des eaux de serres déversées directement dans le réseau de drainage et il n'était pas possible de mesurer correctement ce débit à cause de l'inondation du déversoir à ce niveau. De ce fait, les mesures au niveau de ce rejet ne sont pas considérées

pour le calcul du bilan à l'échelle de l'oasis. Seules les mesures collectées pour R1 et R2 comptent pour ce calcul. Nous avons estimé une surface drainée pour chacun des rejets à savoir 32 ha, 45 ha et 37 ha respectivement pour R1, R2 et R3.

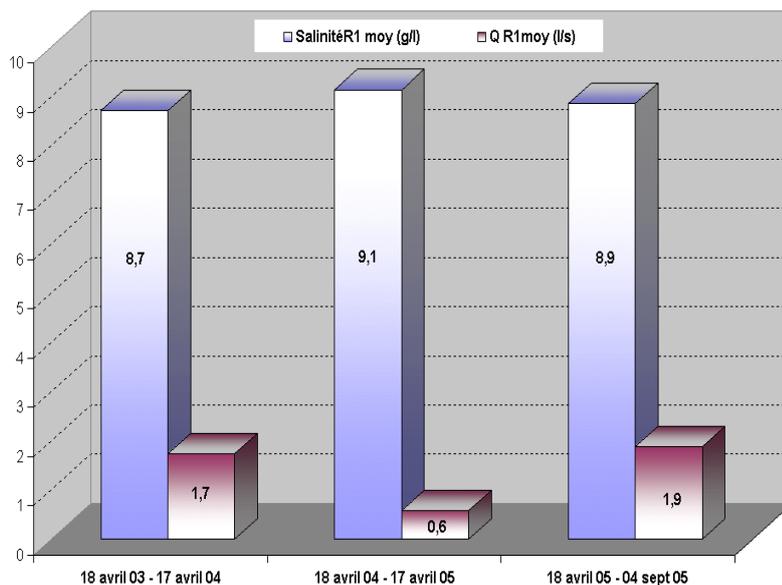


Figure 7. Salinité et débit moyens de l'eau de drainage à l'échelle de l'oasis mesurés au niveau du rejet R1 sur les 30 mois.

Les différents termes du bilan hydrosalin (entrée - sortie) révèlent un bilan positif (déficience du système) sur toute la période de mesure. Les quantités d'eau et de sels sont estimées en entrée et en sortie du système sur 30 mois de mesure. Les entrées d'eau et de sels sont mesurées à l'échelle de la parcelle et extrapolées à l'échelle de l'oasis, et sont confirmées par les informations recueillies au niveau des forages. Les sorties par drainage souterrain sont mesurées indépendamment aux deux exutoires. En revanche, les sorties de sel par écoulement naturel de la nappe vers le Chott n'ont pas été estimées.

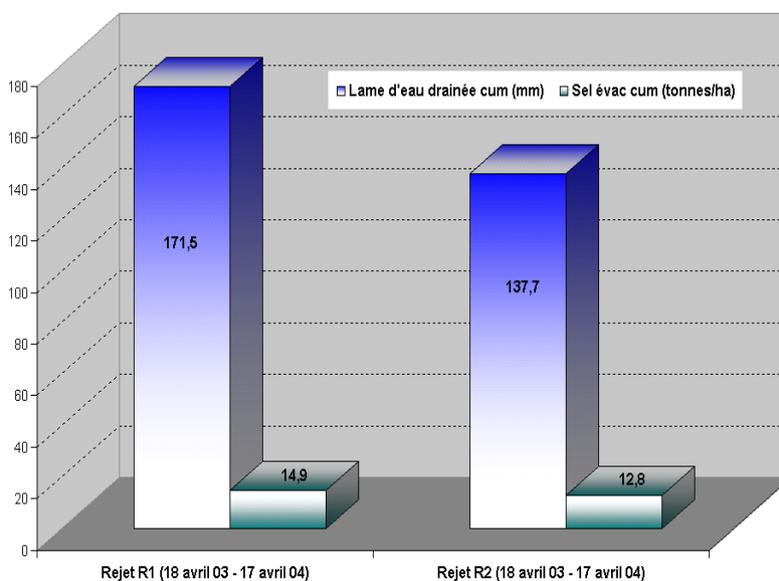


Figure 8. Lame d'eau drainée (mm) et quantité correspondante en sels (t/ha) calculées à l'échelle de l'oasis au niveau des rejets R1 et R2 sur une période de 12 mois.

Au niveau de l'exutoire R1, 15 t/ha de sels ont été évacués par drainage sur 48 t/ha apportés pour l'Année1, 5 t/ha ont été évacués sur 33 t/ha apportés pour l'Année2 et 6 t/ha sur 22 t/ha pour le reste de la période de mesure (avril - sept 2005) avec une bonne cohérence entre les deux exutoires R1 et R2 (figure 8 et 9 ; tableau V et VI).

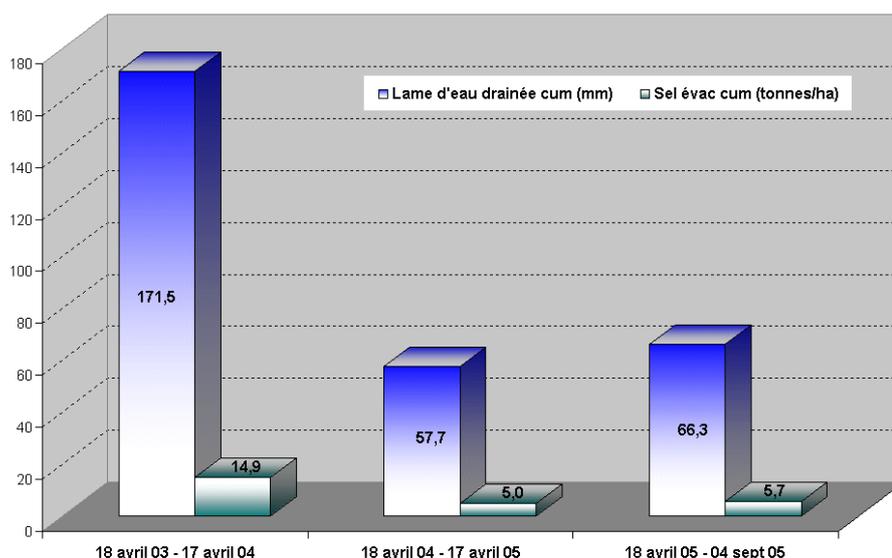


Figure 9. Lame d'eau drainée (mm) et quantité correspondante en sels (t/ha) calculées à l'échelle de l'oasis au niveau du rejet R1 sur les 30 mois de mesure.

Tableau V. Bilan hydrosalin à l'échelle de l'oasis calculé sur 12 mois au niveau des rejets R1 et R2

		Bilan rejet1 (~32 ha) (18 avril 03 - 17 avril 04)		Bilan rejet2 (~45 ha) (18 avril 03 - 17 avril 04)	
		lame d'eau cum (mm)	Cum Sels (t/ha)	lame d'eau cum (mm)	Cum Sels (t/ha)
Entrée :	irrigation (12 tours d'eau)	1 560	48,4	1560	48,4
Sortie :	drainage (à l'exutoire)	171	14,9	138	12,8
Bilan (entrée [irrigation] - [drainage] - sortie)		1389	33,5	1422	35,6
Fraction drainée	[drainage] / [irrigation]	11 %	30,8 %	8,8 %	26,5 %

Le rapport correspondant entre volume de drainage et d'irrigation est de 11 %, 6 % et 9 % respectivement aux trois années de mesure avec un coefficient de concentration quasi-constant de l'ordre de 2,8. Ces résultats traduisent un déficit respectif de 69 %, 85 % 74 % en termes de quantités de sels évacués par drainage. Ceci nous amène à nous interroger sur les performances techniques et économiques d'un tel système de drainage souterrain et sur sa pérennité dans ce milieu vu sa sensibilité au colmatage, constatée sur le terrain, par ensablement et pénétration des racines.

Tableau VI. Bilan hydrosalin à l'échelle de l'oasis calculé sur 2 ans au niveau du rejet R1.

		Bilan rejet 1 (~32 ha) (18 avril 03 - 17 avril 04)		Bilan rejet 1 (~32 ha) (18 avril 04 - 17 avril 05)	
		Lame d'eau cum (mm) (12 tours d'eau)	Cum sels (t/ha)	Lame d'eau cum (mm) (7 tours d'eau)	Cum sels (t/ha)
Entrée :	irrigation (Σ tours d'eau)	1560	48,4	980	33,3
Sortie :	drainage (à l'exutoire)	171	14,9	58	5
Bilan (entrée - sortie)		1389	33,5	922	28,3
Fraction drainée	[drainage] / [irrigation]	11 %	30,8 %	5,9 %	15 %

Constatations et conclusions

Au terme de cette partie du travail, on peut mettre en évidence essentiellement les faits suivants.

- A l'échelle de la parcelle, l'analyse piézométrique met en évidence une très forte dynamique de la nappe superficielle suite aux irrigations, qui témoignent d'une remontée systématique de cette nappe à chaque irrigation et d'une vitesse de tarissement assez liée à la demande climatique.
- En termes d'irrigation, on a pu distinguer 24 apports d'eau (correspondant aux tours d'eau) sur toute la période de mesure (30 mois) répartis irrégulièrement dans le temps à savoir : 12 apports pour les 12 premiers mois (année 1), 7 apports uniquement pour la deuxième année et 5 apports pour les derniers 6 mois de mesure (avril - sept 2005). Les doses des apports ont varié de 100 à 160 mm /tour d'eau, avec des cumuls de 1 560 mm, 980 mm et 750 mm correspondant respectivement aux trois périodes de mesure indiquées ci-dessus. A ce niveau il faut signaler que des tels apports hydriques annuels, notamment celui durant l'année 2, sont faibles, comparativement à ceux cités dans la littérature de l'ordre de 1 800 mm et plus, pour vaincre une demande climatique de l'ordre de 2 000 mm.
- En termes de sels apportés, ces cumuls correspondent respectivement à 48, 33 et 22 t/ha de sels. Cela montre l'importance cruciale d'un système de drainage et de l'apport d'une fraction de lessivage adéquate pour mieux contrôler cette salinité. Les mesures au niveau de la sortie du drain à la parcelle ont montré une variation saisonnière de la fraction drainée et en fonction du volume apporté à chaque tour d'eau.
- Par ailleurs, on a estimé l'exportation de sels, due au pompage pratiqué au niveau de cette parcelle, vers les extensions et qui représente un ordre de grandeur quadruple à celui du drainage (estimé à l'échelle de l'oasis), soit une moyenne de 60 t/ha /an. Cette pratique traduit une gestion hydrosaline complexe entre l'oasis et les extensions et il est nécessaire de mieux estimer le poids de cette pratique dans l'établissement du bilan notamment à l'échelle du périmètre.
- A l'échelle de l'oasis, les différents termes du bilan hydrosalin (entrée - sortie) révèlent un bilan positif sur toute la période de mesure. Les entrées d'eau et de sels sont mesurées à l'échelle de la parcelle et extrapolées à l'échelle de l'oasis, et sont confirmées par les informations recueillies au niveau des forages. Les sorties par drainage souterrain sont mesurées indépendamment à R1 et R2. En revanche, les sorties de sel par écoulement naturel de la nappe vers le Chott n'ont pas été estimées.
- Au niveau des deux exutoires, 15 t/ha de sels ont été évacués par drainage sur 48 t/ha apportés pour la première année, 5 t/ha ont été évacués sur 33 t/ha apportés au cours de la deuxième année et 6 t/ha rejetés sur 22 t/ha apportés courant le reste de la période de mesure (avril - sept 2005) avec une bonne cohérence entre les deux exutoires R1 et R2.
- Le rapport correspondant entre volumes de drainage et d'irrigation est de 11 %, 6 % et 9 % respectivement aux trois périodes de mesure avec un coefficient de concentration quasi-constant de l'ordre de 2,8. Ces résultats traduisent un déficit respectif de 69 %, 85 % 74 % en termes de quantités de sels évacués par drainage. Ceci veut dire qu'en moyenne le système de drainage dans cette oasis, a permis d'évacuer, sous les conditions hydriques susmentionnées, que 25 % des quantités de sels contenues dans l'eau d'irrigation. Cela nous conduit à nous interroger sur les performances techniques et économiques d'un tel système de drainage souterrain et sur sa pérennité dans ce milieu vu sa sensibilité au colmatage, constatée sur le terrain, par ensablement et pénétration des racines.
- Par conséquent, vu cette déficience du système, s'agit-il, même transitoirement, d'une phase tendancielle d'augmentation de la salinité du sol et de la nappe superficielle au niveau de cette oasis (bien que les résultats disponibles sur ce point ne semblent pas confirmer cet état) ? Par ailleurs, quelle est la part de l'écoulement naturel de la nappe superficielle vers le chott dans l'évacuation des sels ? Y a-t-il aussi une transformation d'une partie de ces sels de leur état soluble vers un autre insoluble (gypses par exemple) formant ainsi une autre forme de salinisation indécélable par une simple mesure de la conductivité électrique ?

Ainsi, plusieurs questions qui se posent et qui font appel à d'autres disciplines scientifiques d'y intervenir pour pouvoir comprendre et expliquer l'évolution aqua-géochimique dans un tel contexte.