

Approche systémique des risques de salinisation par endoréisation anthropique

A. Mhiri⁽¹⁾, J. Tarhouni⁽¹⁾, M. Hachicha⁽²⁾, F. Lebdi⁽¹⁾

(1) Institut National Agronomique de Tunis - 43, Avenue Charles Nicole Tunis-Mahrajène Tunisie.

(2) Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts - BP n°10 2080 Ariana Tunisie.

RÉSUMÉ

Dans les régions arides et semi-arides méditerranéennes, la raréfaction des ressources en eau de bonne qualité conduit à l'utilisation des eaux saumâtres pour l'irrigation. C'est ainsi que sur le continent l'utilisation des eaux de surface se généralise dans plusieurs pays. Ceci se traduit par une accumulation progressive de quantités non négligeables de sels solubles dans les systèmes hydro-géo-pédologiques des zones basses où se localisent généralement les périmètres irrigués. L'analyse de la situation a été effectuée dans la Vallée de la Mejerda, principal cours d'eau exoréique de la Tunisie. L'établissement du bilan salin actuel à l'échelle de l'ensemble du système a été effectué. Sa comparaison avec celui qui a prévalu avant l'artificialisation du fonctionnement hydrologique de ce bassin a permis de confirmer l'accumulation de grandes quantités de sels sur le continent et l'altération de la qualité des eaux utilisées (de surface et des nappes phréatiques) vers une salinisation progressive des compartiments bas des sous-systèmes analysés. L'adoption de cette approche systémique dans l'étude des processus de salinisation des terres conduit à proposer le concept de l'endoréisation anthropique^a des régions naturellement exoréiques. Les conséquences d'un risque à long terme de salinisation des terres par suite de la rétention des eaux superficielles sur le continent sont examinées.

Mots clés

Salinisation, anthropisation, approche systémique

SUMMARY

SYSTEMIC APPROACH OF THE RISKS OF SALINIZATION BY ANTHROPIC ENDOREÏSATION

In arid and semiarid Mediterranean areas, the use of brackish water is an alternative solution to the rarefaction problem of good quality water resources. In several countries, the retention of surface water by dams causes a progressive accumulation of salts in the hydro - geo - pedological systems and salinisation of plain areas due to irrigation with that water. The natural hydrological system of the main exoreic river in Tunisia, Mejerda, is highly modified by dams construction. On the basis of salt balances at the actual situation and before the artificialisation of the watershed hydrological functioning, the accumulation of salts and a noticeable water quality degradation are confirmed in the Mejerda valley. The situation is more acute for the lower parts of the Mejerda river which are in progressive salinisation due to the continual quality deterioration of the irrigation water. The application of this systemic approach to study the long termeland salinisation processes permit to introduce the "Anthropic endoreïisation " concept for natural exoreic areas ; this concept could be used to study the salinisation risk consequences of the surface water retention.

Key-words

Salinization ; anthropization ; systemic approach.

RESUMEN

ENFOQUE SISTEMICO DE LOS RIESGOS DE SALINIZACION POR ENDREIZACION ANTROPICA

En las regiones áridas y semiáridas mediterráneas, el enrarecimiento de los recursos en agua de buena calidad conduce a la utilización de las aguas salinas para la irrigación. Por ello en el continente el uso de las aguas de superficie se generaliza en varios países. Esto se traduce por una acumulación progresiva de cantidades no omisibles de sales solubles en los sistemas hidro-geo-pedológicos de las zonas bajas donde se localizan generalmente los perímetros irrigados. El análisis de esta situación se efectuó en el valle de la Mejerda, principal arroyo exoreico de Túnez. El establecimiento del balance salino actual fue efectuado a la escala de la totalidad del sistema. Su comparación con lo que existía antes de la artificialización del funcionamiento hidrológico de esta cuenca permitió confirmar la acumulación de grandes cantidades de sales en el continente y la alteración de la calidad de las aguas usadas (de superficie y de mantos freáticos) hacia una salinización progresiva de los compartimientos bajos de los sub-sistemas analizados. La adopción de este enfoque sistémico en los estudios de los procesos de salinización de las tierras conduce a proponer el concepto de "endoreización antrópica" de las regiones naturalmente exoreicas. Se analizó las consecuencias de un riesgo a largo plazo de la salinización de las tierras para la retención de las aguas superficiales sobre el continente.

Palabras claves

Salinización ; centropización ; enfoque sistémico

Les études classiques des risques de dégradation des terres irriguées à l'eau salée sont généralement abordées à travers les processus d'interaction entre la charge saline des eaux et les constituants chimiquement actifs du sol, à savoir les minéraux argileux et l'humus (Cheverry, 1974, Al Droubi, 1976, Szabolcs, 1979). Les conséquences négatives de ces processus sur les propriétés physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques du sol, aux différentes échelles d'organisation du sol (minéral argileux, agrégat, horizon, profil vertical, parcelle de culture et parfois le périmètre irrigué), constituent alors les critères d'évaluation des tendances évolutives de la productivité de ces terres à court et moyen termes. Des sels accumulés dans le sol il en résulte aussi des effets directs sur les plantes (USSL Staff, 1954, CRUESI, 1970).

Plusieurs méthodes d'investigation adaptées aux échelles spatiales d'étude permettant l'analyse, la description, le contrôle et la prévision des processus évolutifs à court terme, dans différentes situations, ont été développées au cours des cinquante dernières années (USSL STAFF, 1954, Servant, 1975, Rieu, 1978, Boivin, 1991). Dans la plupart des cas, on considère que le risque de dégradation par les sels (salinisation et/ou sodisation) est nul ou négligeable, donc acceptable, dès lors qu'il n'y a pas, à l'échelle de l'unité structurale analysée, une accumulation de masse de sels solubles supérieure à un seuil déterminé. En prenant comme hypothèse une constance temporelle de la qualité de l'eau d'irrigation, on doit vérifier aussi qu'une détérioration des propriétés fonctionnelles du sol (perméabilité, densité apparente, aération, porosité, infiltration) ne se produit pas.

Or, l'analyse de l'évolution à long terme de la qualité des ressources hydrauliques dans les régions arides et semi-arides révèle dans de nombreux cas, une tendance à l'accroissement de la salinité de l'eau dans les systèmes hydro-pédologiques. Leur fonctionnement est de plus en plus artificialisé par les travaux d'aménagement du territoire en particulier hydro-agricoles tels que les barrages, lacs collinaires, travaux de conservation des eaux et du sol, transfert régional, recharge artificielle des nappes... qui visent la rétention quasi totale des eaux de surface sur le continent pour leur utilisation et réutilisation en irrigation.

La concentration de l'apport de ces eaux et des sels qu'elles contiennent sur des périmètres irrigués généralement situés dans les compartiments bas des paysages, risque d'aboutir, dans certaines conditions et à long terme, à un résultat similaire à celui qui prévaut dans les niveaux de base des systèmes endoréiques, à savoir la salinisation de l'ensemble du système formé par le sol, l'eau de drainage et les nappes phréatiques sous-jacentes (Sebkha...). Cela correspondrait alors à une "endoréisation anthropique" par rétention des eaux de surface et de drainage et leurs charges salines sur le continent.

En Tunisie, la mobilisation des eaux a atteint dans le Nord

environ 80 % (D.G./R. E, 1990) des ressources hydrauliques de surface (17 barrages avec 1242.106 m³, 60 barrages collinaires avec 45. 106 m³ et 245 lacs collinaires avec 15.10⁶ m³), dont les 4/5 sont affectés à l'irrigation par un système de gestion intégrée (D.G./G.R., 1994). Ceci tient plus compte des quantités disponibles que de leurs qualités, et encore moins des risques relatifs aux sols et aux caractéristiques des nappes à long terme par suite de la rétention des sels dans le système.

Par ailleurs, au niveau des périmètres irrigués, les sels introduits dans le sol finissent par atteindre totalement ou partiellement la nappe phréatique selon que le périmètre est doté ou non d'un réseau de drainage artificiel. En terme de bilan, si le drainage superficiel ou profond n'évacue pas la totalité des sels, il se produit leur accumulation dans le sous-sol et/ou la nappe.

Pour des raisons économiques, le recours à ces nappes phréatiques pour l'irrigation des terres à la périphérie des périmètres aménagés, et parfois même à l'intérieur de ces derniers, ramène les sels en surface. Il provoque leur concentration durant la saison sèche, puis leur enfoncement de nouveau dans le sous-sol avec les eaux pluviales, d'où une dégradation possible de la qualité des aquifères et par voie de conséquence des risques de salinisation des sols (Hachicha et al., 1994). Enfin, souvent, les eaux de drainage d'un périmètre sont évacuées vers un oued dont les eaux sont mobilisées par un barrage pour l'irrigation d'un périmètre à l'aval.

Les prémices des effets de cette endoréisation commencent à se manifester dans certains systèmes hydro-pédologiques au nord de la Tunisie. Dans ce qui suit, nous passerons en revue des cas de salinisation de nappes souterraines ou de sols par accumulation des sels, puis nous tenterons de définir une approche systémique de l'étude des risques de salinisation des systèmes hydro-pédologiques à travers l'analyse de la situation du plus grand de ces systèmes de Tunisie, celui de la Mejerda.

QUELQUES CAS DE SALINISATION DE SOLS ET DE NAPPES

Cas des périmètres irrigués de la plaine du Mornag

Les périmètres de cette plaine s'étendent sur une superficie totale de 8 667 ha, irrigués à partir de trois ressources d'eau :

- La nappe phréatique de surface et secondairement la nappe profonde.
- Le canal de transfert de l'eau de la Mejerda vers le Cap Bon .
- Les eaux usées traitées de la ville de Tunis.

Initialement, seule la première ressource était disponible pour l'irrigation de parcelles dispersées à travers les exploitations. Vers la fin des années 80, un nouveau périmètre à été

Tableau 1 - Quantité moyenne annuelle de sels apportés aux périmètres de Mornag.

Table 1 - Annual average quantity of salt introduced in irrigated area of Mornag.

Ressources d'eau	Superficie (ha)	Volume d'eau d'irrigation (10 ⁶ m ³)	Salinité kg/m ³	Sels (10 ³ tonnes)
Puits de surface et sondages profonds	4 127	20	1,5	30
Eaux de Mejerda	3 500	17	2	35
Eaux usées traitées	1 040	5	2	10
Total	8 667	42		75

créé pour recevoir les eaux de la Mejerda, et au début des années 90, un troisième périmètre a été aménagé pour valoriser la troisième ressource.

Sur la base de 5 000 m³ d'eau d'irrigation par ha et par an, connaissant la salinité moyenne de chaque type d'eau, il est possible d'estimer les quantités de sels apportées par an sur la superficie totale des terres irriguées (tableau 1).

Ainsi la quantité de sels injectés annuellement par l'irrigation dans le sous-sol a presque doublé par rapport à la situation initiale. Par ailleurs, pour soulager la nappe de plus en plus sollicitée pour l'irrigation, il a été procédé depuis 1992 (D.G./R.E., 1993) à sa recharge par l'injection dans un site favorable à l'amont (grès oligocène à Khlédia) d'un volume moyen de 10⁶m³ d'eau de la Mejerda, apportant 1500 tonnes de sels supplémentaires qui s'ajoutent à la quantité précédente.

Nous ne disposons pas de données récentes sur l'évolution de la salinité moyenne de cette nappe phréatique, mais de nombreux agriculteurs affirment avoir constaté une dégradation de la qualité des eaux de leur puits, et certains ne les considèrent plus comme potables. De leur côté, les techniciens qui se sont installés à leur compte sur les terres de l'Etat, ont été autorisés à exploiter la nappe profonde par des sondages de plus de 50 m après avoir constaté l'accumulation des sels à la surface du sol. Cette accumulation résulte de l'utilisation des eaux de la Mejerda et de celles des puits de surface situés à l'aval de la plaine, probablement contaminées par les eaux de drainage de l'amont et ceci après seulement huit ans de la mise en eau de cette plaine avec les eaux importées. Qu'en sera-t-il à long terme si l'hypothèse de la salinisation du système aquifère est confirmée ?

Cas de salinisation d'une nappe phréatique par enfouissement des sels des eaux de drainage lors d'une année pluvieuse

D'après Jemai et al. (1998), les sels des eaux d'irrigation accumulés pendant plusieurs années dans la zone non saturée du sous-sol du périmètre de Korba (Cap Bon) ont été lixivés

en une saison particulièrement pluvieuse (1995-96), ce qui a engendré une salinisation de la nappe phréatique. A titre d'exemple, la conductivité électrique de l'eau de la nappe de Tafelloune est passée de 5,5 avant les pluies à 7,5 dS/m à la fin de la saison pluvieuse. Cet exemple met en évidence le processus du recyclage des sels à travers le profil pédologique, le sous-sol et la nappe phréatique après une concentration à la surface du sol.

Cas de la salinisation des sols par transfert des eaux de drainage naturel

Ce cas a été décrit par Hachicha et al. (1993) dans le périmètre de Mornaguia (Basse Vallée de la Mejerda) irrigué depuis 1983, où la salinisation des sols s'est manifestée dans le secteur en pente de Bou Hnach, par suite du transfert des eaux de drainage naturel durant la saison pluvieuse des parcelles amont vers les parcelles situées plus bas. Ce cas illustre bien les risques de salinisation par transfert latéral des sels accumulés dans le sous-sol, à l'échelle d'un périmètre irrigué.

ANALYSE DU SYSTÈME HYDROPÉDOLOGIQUE DE LA MEJERDA

La plupart des études sur les ressources naturelles réalisées en Tunisie, et probablement ailleurs, traitent les divers aspects d'une même problématique locale ou régionale séparément, occultant les interactions possibles entre eux et débouchent ainsi sur des conclusions ou solutions partielles, peu ou pas concordantes. C'est souvent le cas dans les études relatives aux ressources en eau et en sol.

Dans l'interrogation que nous formulons ici sur les risques de salinisation du sol à long terme, il nous a paru nécessaire d'aborder cette question selon une approche systémique telle que formulée par Mhiri et al. (1994, 1995). En effet, le concept d'organisation latérale des sols, matérialisé par la Couverture Pédologique ne semble pas suffire pour évaluer et localiser ces

risques.

Définition du système hydro-pédologique

Ce système est défini par :

- ses composantes, à savoir le sol, le sous-sol et les nappes aquifères sous-jacentes,
- leurs organisations verticale et latérale à l'échelle du bassin versant, leurs fonctionnement et évolution à travers la dynamique et le bilan de l'eau (infiltration, ruissellement, drainage naturel...),
- un bilan de matière global, de l'amont à l'exutoire du bassin versant, et des bilans partiels relatifs d'une part, aux compartiments du système (Compartiment amont, Compartiment de piémont et Compartiment des vallées) et d'autre part, aux composantes d'un compartiment donné.

S'agissant d'un système très perturbé par l'homme, on parle alors d'un système anthropo-hydro-pédologique (Mhiri et al., 1994). L'analyse qui suit porte sur les compartiments bas du système de la Mejerda (figure 1).

Les caractéristiques du système

Le bassin versant de cet oued pérenne unique de Tunisie et exoréique couvre une superficie de 23 700 km² dont une partie seulement, de l'ordre de 16 100 km², s'étend en Tunisie, le reste relevant de l'Algérie. Entre une altitude de 1 712 m où il prend sa source et le niveau de la mer où il termine sa course, il parcourt 465 km, le long desquels il est alimenté par de nombreux affluents drainant six unités hydrologiques (sous-systèmes hydro-pédologiques) contribuant à des degrés divers à la salinisation de ses eaux, selon la nature de leurs formations superficielles (Kallel, 1976, Rodier et al., 1981).

Concernant la couverture pédologique, les nombreuses études réalisées par la Direction des Sols (Belkhoa et al, 1973), l'Institut National Agronomique de Tunisie (Ben Hassine, 1979) et d'autres organismes ont permis d'analyser l'organisation et l'évolution des sols des trois compartiments du bassin versant. Il en ressort une diversité de sols développés pour l'essentiel sur des matériaux calcaires, par endroits chargés en sels solubles (Trias), apparentés aux sols calcimagnésiques, fersiallitiques, isohumiques et vertiques sur les terrains en pente, passant à des sols peu évolués d'apport alluvial de texture fine dans les plaines et vallées. Les formations végétales initiales forestières sont aujourd'hui en voie de dégradation. S'agissant d'une zone relativement pluvieuse (bioclimat semi-aride avec une pluviométrie allant de 350 à 550 mm/an) et de structures géologiques souvent favorables, le sous-sol de ce bassin versant comporte de nombreuses nappes aquifères de qualités chimiques variables, alimentées à partir des compartiments amont, des piémonts ou des lits des oueds. De ce fait, le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique détermine, à travers les composantes de chaque sous-système, la qualité des eaux de ces nappes. Il s'ensuit que

toute perturbation de ce fonctionnement par les divers aménagements hydro-agricoles peut avoir des impacts sur la qualité de ces ressources. En ce qui concerne la salinité de l'eau de surface, elle varie dans le temps et dans l'espace. Les mesures de concentration effectuées dans différents sites ont révélé un gradient croissant du résidu sec de l'amont à l'aval de cet oued. Dans une première approximation, nous retiendrons dans ce qui suit une salinité moyenne de 1,5 g/l pour l'ensemble des vallées. Quant au faciès géochimique de ces eaux, il est chloruré sodique et ne change pas sensiblement le long de l'axe de cet oued (tableau 2).

D'un autre côté, dans le cadre de la gestion intégrée des ressources en eau de surface des diverses régions du pays, ce système reçoit les quantités d'eau excédentaires du système de l'Ichkeul, situé plus au nord, avec un volume moyen annuel de l'ordre de 100.10⁶ m³/an d'une salinité moyenne de 1 g/l, mais exporte à travers le Canal Mejerda-Cap Bon vers d'autres régions de l'ordre de 350.10⁶ m³/an d'une salinité moyenne de 1,5 g/l, et 72.10⁶ m³/an d'une salinité moyenne de 1,5 g/l vers les périmètres de Ras Jebel, Rafrat, Zouaouine. Ces eaux mobilisées assurent l'essentiel des besoins hydriques des activités socio-économiques de nombreuses régions du pays, mais 80 % de ces ressources disponibles sont destinés à l'agriculture. A l'intérieur du système Mejerda, les périmètres irrigués couvrent une superficie totale de l'ordre de 82 355 ha (tableau 3) et nécessitent un volume d'eau de 340 10⁶ m³/an.

ESSAI D'UN BILAN SALIN ANNUEL DU SYSTÈME

Ce bilan peut être établi à deux échelles d'analyse : à l'échelle globale pour mettre en évidence les tendances générales, puis à une échelle détaillée au niveau des sous-systèmes afin de spatialiser les processus, les termes du bilan et localiser les risques.

Bilan général du système

Appliqué à ce système, considéré à ce niveau d'analyse comme une boîte noire, (figure 2) l'équation de conservation de masse permet d'établir les bilans globaux d'eau et des sels et d'en déduire, entre autres, les quantités de sels évacués ou accumulés.

$$\text{Bilan d'eau : } \Sigma_s VE - \Sigma_s VS = [\Delta V]_s \quad (1)$$

$$\text{Bilan des sels : } \Sigma_s ME - \Sigma_s MS = [\Delta M]_s \quad (2)$$

où :

- $\Sigma_s VE$ et $\Sigma_s ME$ représentent respectivement le volume total d'eau et la masse totale de sels entrant dans le système à partir de son bassin versant et importés d'autres systèmes.

- $\Sigma_s VS$ et $\Sigma_s MS$ correspondent au volume total d'eau et à la

Figure 1 - Système de la Mejerda et bilan des sels.
 Figure 1 - Mejerda system and salt balance

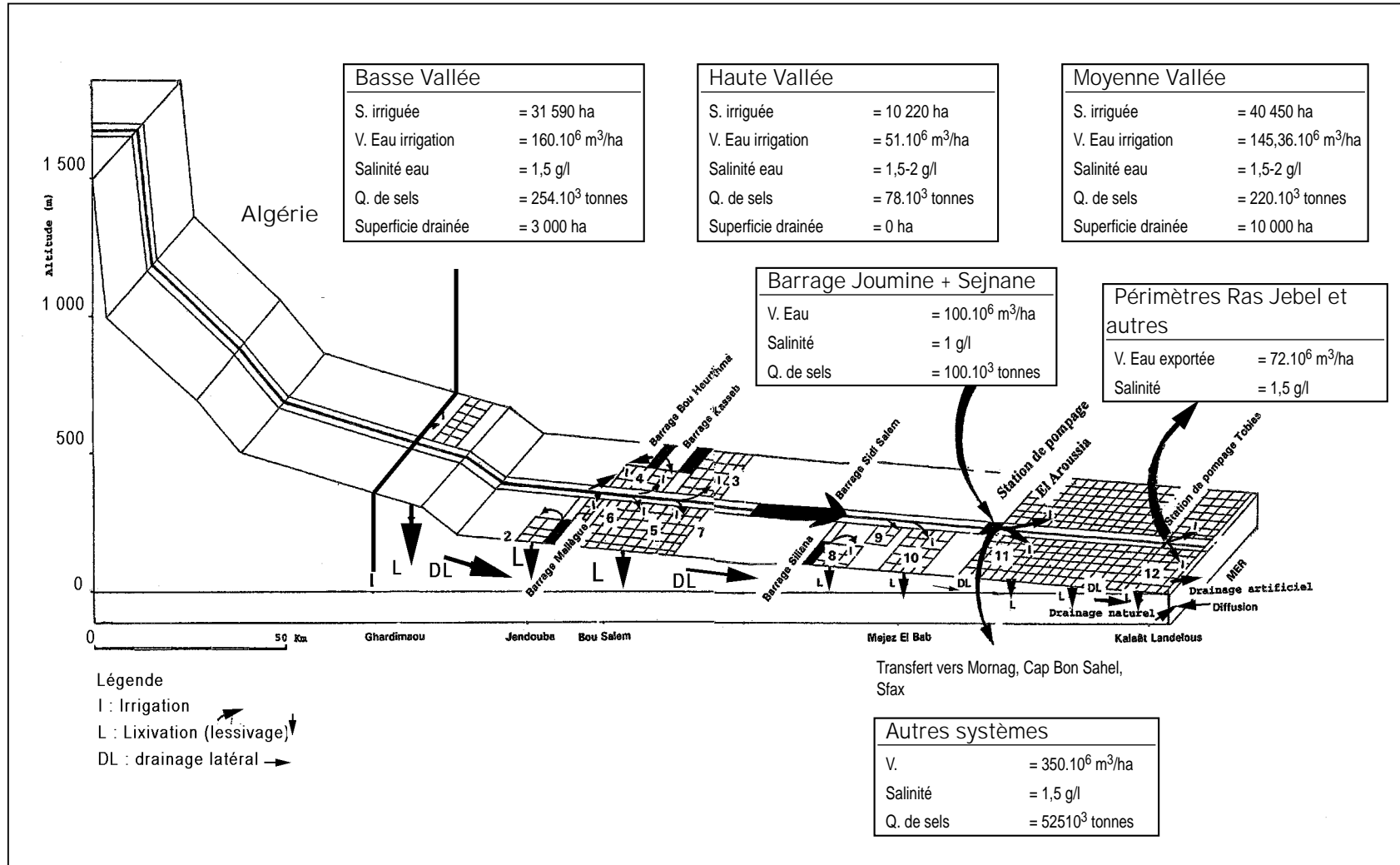


Tableau 2 - Composition chimique moyenne de l'eau de la Mejerda à Mejez El Bab. (mai 1994)

Table 2 - Average chemical composition of Mejerda water at Mejez El Bab (5/1994)

pH	CE * mS/m	RS * g/l	SAR*	me/l							
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
8	2,5	1,8	4,3	0	3	11	13,3	19	6	12,4	0,2

*CE : Conductivité Électrique ; RS : Résidu Sec ; SAR : Sodium-Adsorption-Ratio

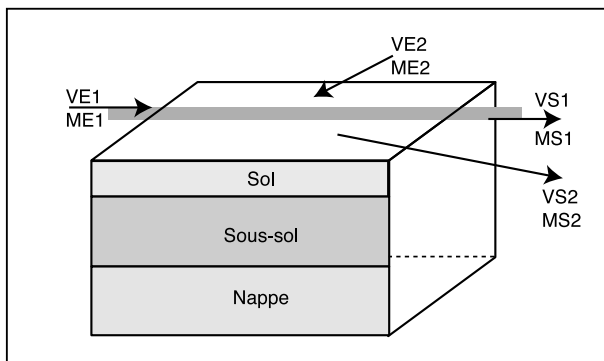
Tableau 3 - Périmètres irrigués dans le système de la Mejerda (D.G./E.G.T.H., 1993)

Table 3 - irrigated areas in the system of Mejerda (D. G/E.G.T.H)

Compartiment	Superficie ha	Besoins en eau 10 ⁶ m ³	Salinité moyenne g/l	Superficie drainée ha
Haute Vallée	31 590	169,20	1,5	3 000
Moyenne Vallée (y compris Siliana)	10 220	51,10	2	0
Basse Vallée (y compris 3 000 ha à l'eau usée traitée)	40 545	145,36	2	10 000
Total	82 355	366,66	-	1 300

Figure 2 - Bilan général du système hydropédologique de Mejerda

Figure 2 - Global balance of the hydropedological system of Mejerda



masse totale des sels sortant à l'exutoire du système ou exportés vers un autre système.

- $[\Delta V]_s$ et $[\Delta M]_s$ sont respectivement les variations du volume d'eau et de la masse de sels dans le système.

Bilan salin global avant les aménagements hydrauliques

Ce bilan est en fait difficile à faire compte tenu de l'irrégula-

rité qui caractérisait les écoulements vers la mer. La dernière grande crue de Mars 1973 a transporté en quelques jours selon Claude et al., (1976) 943.10⁶ m³ d'eau, 127 10⁶ tonnes de sédiments et 949 10³ tonnes de sels, valeurs ayant les mêmes ordres de grandeur que les quantités moyennes annuelles. Nous retenons ici un débit annuel moyen de l'ordre de 1024.10⁶ m³ à Mejez El Bab (à 60 km de la mer), soit un débit moyen de l'ordre de 32 m³/s (Kallel, 1976). Si l'on considère une fourchette de salinité moyenne de 1,5 à 2 g/l, le système évacuait entre 1530.10³ et 2048.10³ tonnes de sels totaux par an. Le transfert de ces sels du continent vers la mer débarrasserait ce dernier des chlorures et du sodium, mais enrichirait la chaîne alimentaire marine en nutriments de base (N.P. K...).

Bilan salin global après l'artificialisation du fonctionnement hydrique du système (aménagement hydro-agricole).

La rétention des eaux de ruissellement sur le continent a pratiquement annulé les crues et les inondations des vallées. Après l'achèvement des premiers barrages (Mellègue sur la rive droite de Mejerda, Beni Mtir sur sa rive gauche) le volume moyen annuel est tombé à 900.10⁶m³, ce qui correspond à un débit moyen annuel de 29 m³/s. Actuellement, la mobilisation annuelle de 858.10⁶ m³ par les barrages engendre la rétention d'une quantité de sels solubles (ME1) estimée à 1287.10³

tonnes sur la base d'une salinité moyenne de l'eau de 1,5 g/l.

Les autres termes du bilan à prendre en compte à l'échelle de cette estimation sont :

- Les sels importés d'autres systèmes avec les eaux : ME2.
- Les sels exportés avec les eaux à travers le Canal Mejerda - Cap Bon, Sahel et Sfax (MS21).
- Les sels exportés vers Ras Jebel et autres périmètres (MS22).
- Les sels évacués vers la mer par les 14 % des eaux de surface non encore mobilisés (MS11).
- Les sels des eaux de drainage artificiel rejetés dans la Mejerda puis vers la mer (MS12) (les sels de l'eau de drainage naturel ne sont pas comptabilisés car ils sont retenus dans le système).
- Les sels évacués vers la mer par la nappe phréatique au niveau de la Basse Vallée (MDn).

Ainsi, la quantité des sels retenue dans le système serait :

$$[\Delta M]_s = ME1 + ME2 - MS11 - MS12 - MS21 - MS22 - MDn.$$

MDn est actuellement difficile à estimer faute de données, et en première approximation, nous considérons que ce terme n'a pas évolué d'une façon sensible par rapport à ce qu'il était avant la rétention des eaux. Il serait donc négligeable.

ME1 = 1 325.10³ tonnes (y compris 37,5 10³ tonnes introduites par les eaux usées)

ME2 = 100.10³ tonnes

MS11 = 180.10³ tonnes

MS12 = 30.10³ tonnes

MS21 = 525.10³ tonnes

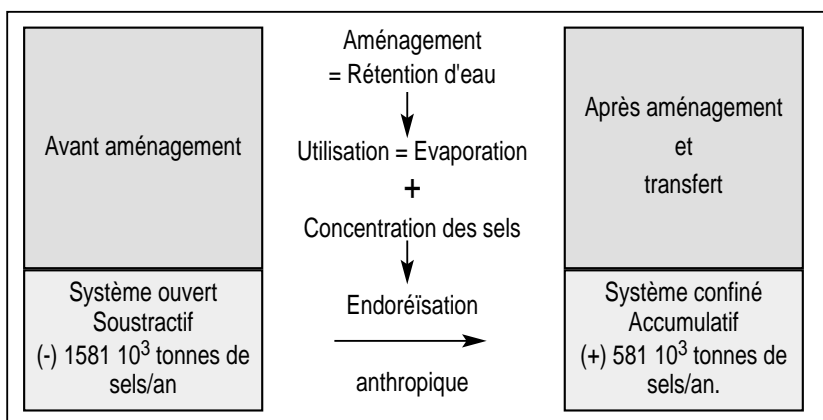
MS22 = 108.10³ tonnes

Ceci donne : $[\Delta M]_s = + 581. 103$ tonnes

Par conséquent, en comparant les bilans salins du système avant et après artificialisation de son fonctionnement hydraulique, on obtient une rétention annuelle de sels de 581.10³ tonnes si

l'on prend en compte toute l'eau utilisée dans le système. Cette masse considérable de sels retenue sur le continent y est recyclée à travers plusieurs modes d'utilisation : eaux domestiques, recharge naturelle des aquifères sous les barrages... et l'irrigation. Si l'on considère seulement cette dernière, le volume total d'eau utilisé mentionné précédemment (366.10⁶m³/an) apporterait aux 82 355 ha (tableau 3), 549. 10³ tonnes de sels, dont une partie (MS12) est évacuée par drainage. Donc, c'est au niveau des périmètres irrigués, les plus grands consommateurs de l'eau mobilisée, que se posent les plus grands risques de salinisation du système.

Figure 3 - Schéma de l'itinéraire de l'évolution du système
Figure 3 - Diagram of the way system evolution



Ce bilan global approximatif traduit un changement notable dans le fonctionnement du système. D'un système ouvert soustractif, on passe progressivement à un système confiné accumulatif (figure 3).

Au niveau du macro-système anthro-hydropédologique de la Mejerda, le confinement se réalise dans les compartiments bas des paysages, et en particulier dans les périmètres irrigués qui constituent une surface évaporatoire des eaux utilisées. Ceci aboutit en fin de compte à la concentration des sels dans le profil pédologique au cours des saisons sèches, puis à leur enfouissement plus ou moins rapide dans le sous-sol et les aquifères durant les saisons pluvieuses conformément aux résultats de Jemai et al. (1998).

Eléments de bilans partiels du système

Le bilan détaillé de ce système est encore moins aisé à établir actuellement vu l'indisponibilité des données relatives à de nombreux termes d'entrée et de sortie des eaux et des sels dans chacune des vallées qui composent le système, particulièrement concernant les activités extra-agricoles. Nous nous limiterons ici à une ébauche de bilans partiels relatifs aux périmètres irrigués seulement (figure 4).

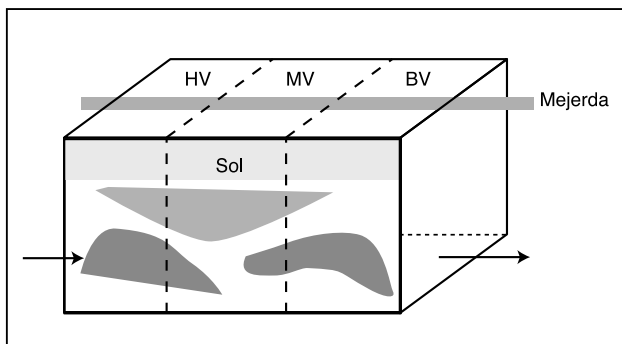
La Haute Vallée

La superficie totale des périmètres irrigués y est de 31 590 ha dont seulement 3 000 sont drainés. Les besoins totaux en eau d'irrigation s'élèvent à 169,2 10⁶m³/an (tableau 3) et la salinité moyenne de l'eau d'irrigation est de 1,5 g/l. La masse de sels apportés par les eaux d'irrigation est d'environ 254 10³ tonnes.

Une partie de ces sels est évacuée par les eaux de drainage :

Figure 4 - Schéma d'un bilan détaillé (spatialisation latérale au niveau du sous-système et verticale au niveau du sol, du sous-sol et des systèmes aquifères; HV : Haute Vallée, MV : Moyenne Vallée, BV : Basse Vallée).

Figure 4 - Diagram of detailed balance (Lateral and vertical spacialisation : HV= High valley, MV= Middle Valley, MBV= Low Valley)



- Au cours de la saison d'irrigation, la fraction lessivante estimée à 10 % des doses d'irrigation et ayant une concentration trois fois supérieure à celle de l'eau d'irrigation (soit 4,5 g/l), permet de soustraire des 3 000 ha drainés une masse de sels de $7,2 \cdot 10^3$ tonnes, qui sont rejetés dans la Mejerda.

- Au cours de la saison pluvieuse, le lessivage naturel des sols de tout le périmètre irrigué est en mesure de soustraire une masse moyenne de sels de l'ordre de $71,1 \cdot 10^3$ tonnes, en considérant une lame d'eau d'infiltration efficace vers la nappe de 50 mm avec une salinité 3 fois supérieure à celle de l'eau d'irrigation.

En supposant que toutes les eaux de drainages naturel et artificiel rejoignent le lit de la Mejerda, les périmètres irrigués largueront, au total, de l'ordre de $80 \cdot 10^3$ tonnes de sels. Cependant, en fin de course, cette quantité rejoint les eaux du barrage de Sidi Salem destinées à divers usages à l'aval du

système.

Ainsi, le bilan salin annuel de ces périmètres se solderait par l'accumulation de $254 \cdot 10^3 - 80 \cdot 10^3 = +174 \cdot 10^3$ tonnes de sels, ce qui est équivalent environ à 2/3 des sels introduits (tableau 4).

La Moyenne Vallée

L'ensemble des périmètres, y compris ceux de Siliana, couvrent 10 220 ha et consomment $51 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ d'eau d'une salinité moyenne de 1,5 g/l (tableau 3), ce qui engendre l'accumulation d'une masse de sels de $78 \cdot 10^3$ tonnes. En l'absence de drainage artificiel, et en admettant que le lessivage naturel soit efficace, il pourrait soustraire avec une infiltration efficace de 50 mm/an et une salinité de l'eau de drainage de 3 fois celle de l'eau d'irrigation, $23 \cdot 10^3$ tonnes de sels. Ainsi le bilan se solderait par :

$$78 \cdot 10^3 - 23 \cdot 10^3 = +55 \cdot 10^3 \text{ tonnes de sels (tableau 4).}$$

La Basse Vallée

Avec 40 545 ha irrigués, les besoins en eaux d'irrigation sont estimés à $146,36 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (tableau 3). Avec une eau de 1,5 g/l, les irrigations apporteraient $220 \cdot 10^3$ tonnes de sels : les surfaces drainées artificiellement couvrent au maximum 10 000 ha. Sur la base des mêmes hypothèses retenues pour les autres périmètres, le drainage artificiel évacuerait $16 \cdot 10^3$ tonnes de sel, et le lessivage naturel évacuerait $91 \cdot 10^3$ tonnes de sel. Dans ces conditions, le bilan se solderait par :

$$220 \cdot 10^3 - (16 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3) = +113 \cdot 10^3 \text{ tonnes de sels (tableau 4).}$$

DISCUSSION

En dépit des simplifications et approximations minimisant les entrées des sels et maximisant leurs évacuations avec les eaux de drainage, les résultats obtenus rendent plausible l'hypothèse de l'accumulation des sels dans le système :

- Le bilan global met en évidence la tendance lourde du

Tableau 4 - Récapitulation des bilans salins dans les trois vallées (en 10^3 tonnes de sels)

Table 4 - Recapitulation of salt balance in the three valleys (in 10^3 ton of salt)

Désignation	ME*	MS*		Solde
		drainage artificiel	drainage naturel	
Haute Vallée	254	7	71	+ 176
Moyenne Vallée	780	0	23	+ 55
Basse Vallée	220	16	91	+ 113
Totaux	552	23	185	+ 344

* ME = Masse de sels Entrant

MS=Masse de sels Sortant

confinement global du système.

- Les bilans partiels relatifs aux vallées confirment cette tendance au niveau des périmètres irrigués.

Les stocks de sels accumulés dans chaque vallée du système Mejerda paraissent élevés ; mais que représentent-ils par rapport aux volumes d'eau des systèmes aquifères susceptibles de les recevoir ? Et quels en sont leurs effets sur la salinité des ressources à long terme ? Les réponses à ces questions ne peuvent être apportées sans une approche dynamique des transferts et des interactions qui pourront avoir lieu dans le système.

Actuellement, il n'y a pas de manifestations d'accumulation de sels généralisée à l'ensemble d'un périmètre ou à l'une de ces composantes. Néanmoins, des cas de salinisation ponctuelle du profil pédologique ou de nappe plus ou moins importantes ont été observés dans différents périmètres (Souk Es Sebti et Brahmi à la Haute Vallée et Mornaguia à la Basse Vallée). Peut-on alors les considérer comme des indicateurs d'un début de vérification de l'hypothèse posée au départ et comme une confirmation des tendances de confinement du système ? Rien ne permet de l'affirmer, mais la question du devenir des stocks de sels et leur évolution dans les composantes du système reste posée.

Ces stocks sont globalement proportionnels aux surfaces des périmètres irrigués des trois vallées. Cependant, il ressort que les périmètres de la Basse Vallée, bien que plus vastes que ceux de la Haute Vallée, retiennent moins de sels que cette dernière, ce qui ne correspondrait pas à la réalité. Cette anomalie est due au fait que les doses d'irrigation pratiquées dans la Basse Vallée (3600 m³/ha en moyenne, D.G./E.G.T.H., 1993) sont moins élevées que celles de la Haute vallée, ce qui se traduit par des apports de sels à l'hectare plus faibles.

Par ailleurs, la différence de stocks de sels des bilans global et partiels ($581.10^3 - 344.10^3 = 237.10^3$ tonnes de sels) donne une idée sur l'importance des sels recyclés dans le système par les activités extra-agricoles et souligne la nécessité de prêter une attention particulière à la gestion des rejets dans le système des diverses eaux usées (tableau 4).

Malgré l'exportation nette hors du système Mejerda, c'est à dire plus du tiers des ressources d'eau mobilisées et les sels qui les accompagnent, les bilans obtenus confortent le concept d'endoréisation anthropique avec toutes ses conséquences à long terme. Mais si le système pris ici comme exemple est soulagé par l'exportation d'une partie de ses sels, cela ne fait que repousser le même problème à l'échelle des régions importatrices d'eau (Mornag, Korba) et même au niveau du bilan salin à l'échelle du pays après rétention de toutes les eaux mobilisables.

Ces résultats préliminaires et approximatifs n'ont de sens que pour justifier de futures investigations relatives à la gestion de la qualité des ressources en eau et aux divers aspects des risques de salinisation des systèmes hydrogéologiques dans

les régions arides et semi-arides, dont en particulier :

- l'évacuation des sels des eaux de drainage en dehors du système ;
- l'efficacité des drainages naturel et artificiel dans les diverses situations ;
- les effets plausibles des divers modes d'irrigation sur le fonctionnement des sous-systèmes ;
- les risques liés à la qualité des eaux de recharge ;
- et les méthodes d'étude et de suivi de la salinité du profil hydrogéologique et des aquifères

L'étude de ces différents points ne peut être appréhendée sans une caractérisation adéquate du système et des différentes interactions entre ses composantes. A cette fin, des suivis qualitatifs et quantitatifs à long terme devraient être effectués au niveau du sol, de la nappe et des systèmes d'évacuation des eaux (oueds et réseaux de drainage). Ces suivis pourraient concerner la concentration en sel ou la conductivité électrique, les niveaux piézométriques, les débits d'eau d'irrigation, les débits de drainage, ...etc. Les résultats de ces suivis pourraient servir au calage d'un modèle couplé d'écoulement et de transport en milieux poreux qui serait appliqué, dans une deuxième phase, à analyser des scénarios d'amélioration du système.

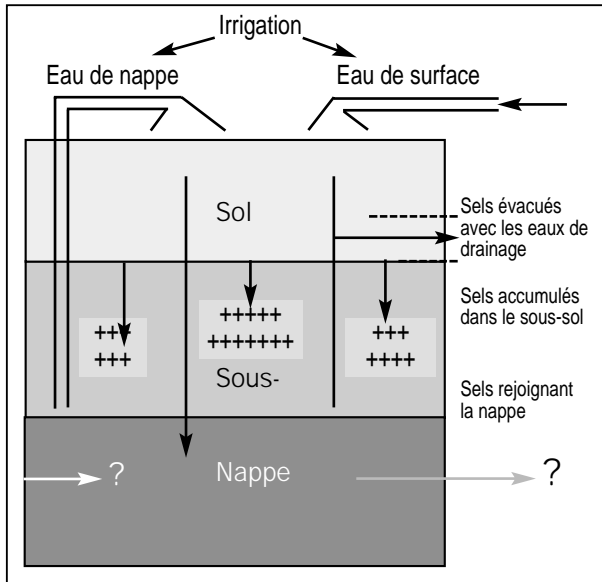
En inscrivant le développement futur de l'irrigation dans les logiques économique et environnementale, on comprend les exigences des planificateurs relatives à l'économie d'eau moyennant, entre autres, des techniques de l'irrigation localisée et l'augmentation du prix de vente de l'eau. Compte tenu de la tendance de confinement général du système mise en évidence sous des hypothèses très favorables au lessivage des sels en partie par l'eau d'irrigation ou de pluie, on ne peut s'empêcher de s'interroger sur l'impact d'une telle "économie" dans les systèmes arides où toute réduction des doses d'irrigation accroît le risque de salinisation.

Enfin, si on admet l'hypothèse de l'absence de fuite latérale des eaux et de sels hors des systèmes aquifères, on peut schématiser le processus d'accumulation des sels selon la figure 5.

Cette approche reste à moduler en fonction de l'hydrologie et l'hydrogéologie de chaque système hydrogéologique en particulier dans les régions endoréiques. L'analyse du système de la Mejerda a mis en relief les risques de salinisation dans les différents compartiments (Haute, Moyenne et Basse Vallée). Ce qui se traduit par une dispersion des risques tout le long du système. Pour les zones endoréiques, comme le kairouanais, où les périmètres irrigués se localisent en bordure des niveaux de base (Sebkha Kelbia et Sebkha Sidi El Hani) dans la plaine alluviale du Kairouan (Bahri, 1982), les risques de salinisation se concentrent dans ces périmètres (Hachicha et al., 1996) dont les eaux de drainage naturel rejoignent les niveaux de base, en passant au cours de leur transfert par les

Figure 5 - Schéma de salinisation du système par accumulation des sels non évacués

Figure 5 - Diagram of system salinisation by accumulation of not exported salt.



nappes. De ce fait, la concentration de ces nappes au cours du temps, pourrait s'avérer plus faible compte tenu des fuites des nappes exploitées et des sels qui les accompagnent vers les Sebkhias situées en aval.

CONCLUSION

L'accroissement de la demande en eau des divers secteurs socio-économiques dans les régions arides pose de nombreux problèmes de gestion de la qualité de cette ressource rare. Si dans les régions tempérées, la pollution des sols et des nappes par les nitrates constitue l'un des principaux risques de dégradation des ressources naturelles, engendré par les activités agricoles, dans les régions semi-arides et arides, le risque d'accumulation des sels dans les systèmes anthropo-hydro-pédologiques s'accroît avec l'extension et l'intensification de l'irrigation. Les études classiques de la salinisation aux échelles ponctuelles ou locales ne peuvent pas déboucher sur des solutions de gestion durable des systèmes aux échelles régionale, nationale et transnationale. Les résultats de l'analyse du cas considéré dans cette étude confortent le concept d'endoréisation anthropique par confinement de ce système. En conséquence, l'approche systémique apparaît à travers le cas de la Mejerda comme étant susceptible d'appréhender le problème de la salinité dans ses dimensions naturelles. Il reste cependant à formaliser cette approche, à la doter de méthodes appropriées d'investigation et à évaluer sa pertinence.

Néanmoins, on peut d'ores et déjà réduire ces risques par l'isolement des eaux de drainage artificiellement reversées dans le système, et ceci, par leur évacuation vers des niveaux de base intérieurs (Sebkha) et vers le niveau de la mer. La recherche de solutions appropriées d'évacuation des eaux de drainage en dehors du système demande encore des études.

BIBLIOGRAPHIE

- Al Droubi A., 1976 - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Docteur Ingénieur et Mémoire Sci. Go. U.L.P. Strasbourg n°46, 177 pages.
- Bahri A., 1982 - Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Docteur Ingénieur. INP de Toulouse, 156 p.
- Ben Hassine H., 1979 - Etude pédologique de la vallée de l'Oued Siliana : Zones de Gaâfour et El Aroussa. Mémoire de fin d'Études de l'Institut National Agronomique de Tunisie, Ministère de l'Agriculture.
- Belkhouja K, Bortoli L., Cointepas J.L., Dimanche P., Fournet A., Jacquet J. C. et A. Mori, 1973 - Sols de Tunisie, Bulletin de la direction des sols, n°5. Ministère de l'Agriculture.
- Boivin P., 1991 - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Coll. Études et Thèses. Édition ORSTOM, 226 pages.
- Chevry Cl., 1974 - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sols en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse Sci. Strasbourg, ORSTOM, 275 pages.
- Claude J., Francillon G. et J.Y. Loyer, 1976 - Les alluvions déposées par l'oued Mejerda lors des crues exceptionnelles de Mars 1973, 162 p. D.R.E.S-ORSTOM-Ministère de l'Agriculture de Tunisie.
- CRUESI, 1970 - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962-1969. Rapport technique. Projet PNUD/UNESCO, 243 pages.
- D.G./E.G.T.H., 1993 - Economie d'eau 2000, rapport final, Banque de Données. Volume : Besoin en eau.
- D.G./R.E., 1990 - Stratégie pour le développement des ressources en eau de la Tunisie au cours de la décennie 1991-2000, 30 pages.
- D.G./R.E., 1993 - Recharge artificielle des nappes de Tunisie. Publication de la direction générale des ressources en eau.
- D.G./G.R., 1994 - La gestion de l'eau en Tunisie. Rapport de synthèse. Séminaire sur la gestion de l'eau dans les pays maghrébins. IDE-Banque Mondiale, Marrakech, 21-25/3/1994, 24 pages.
- Hachicha M., Djelidi B., Soussi A. et Brari N., 1993 - La salinisation des sols dans le périmètre irrigué de la Mornaguia. ES 276, 15 p. Direction des sols-Ministère de l'Agriculture de Tunisie.
- Hachicha M., Job J.O. et Mimet A., 1994 - Les sols salés et la salinisation des sols en Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols "Sols de Tunisie" n°15, pp. 270-341.
- Hachicha M., Jelassi K., Khelif Y. et Hajjaj S., 1996 - Organisation des sols et risque de salinisation dans le périmètre d'El Houareb (Plaine de Merguellil - Kairouanais). Direction des Sols/CRDA Kairouan, ES n°294, 23 pages.
- Kallel R., 1976 - Les principaux cours d'eau de Tunisie. Ressources en eau de la Tunisie n°3, Direction Générale des Ressources en Eau, Ministère de l'Agriculture.
- Mhiri A., Ben Saïd M., Kaabia M. et Bachta M.S., 1994 - Pour une approche

holistique de la restauration des terres soumises à l'érosion hydrique dans le Nord-Ouest de la Tunisie. 16 p, in l'Homme peut-il refaire ce qu'il a défait? Pontanier, Mhiri A., Aronçon J., Akrimi N. et E. Le Floc'h ed., Colloque et Congrès, Université Francophones, J.L. John Libbey Eurotext.

Mhiri A., Bachta M.S., Chenoufi A., Ben Saïd M., 1995 - Contribution to formalization of a Holistic Approach in water erosion control in the north-western parts of Tunisia, in Holistic Approach to sustainable development Proceedings of Bologna Workshop, 1995-E.E.C- Reale et al. editors, Department of Soil Science and plant nutrition. University of

Florence, Italy.

Rieu M., 1978 - Eléments d'un modèle mathématique de prédiction de la salure dans les sols irrigués. Application aux polders du Tchad. Thèse Doc. Spéc., Univ. Paul Sabatier de Toulouse, 134 pages.

Servant J., 1975 - Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse Doc. Es Sciences Naturelles, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc - Montpellier. Tome 1 (texte et tableaux), 194 pages.

Rodier A., Colombani J., Claude J. et Kallel R., 1981 - Le Bassin de la