

# La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau :

une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée ?

Cl. Cheverry<sup>(1)</sup> et M. Robert<sup>(2)</sup>

(1) Professeur de Science du Sol à l'ENSA de Rennes

(2) Directeur de Recherches à l'INRA

## RÉSUMÉ

Le thème principal développé dans cet article tourne autour de la durabilité des systèmes irrigués dans les pays au Sud de la Méditerranée en évoquant, de manière concomitante, les problèmes liés à l'eau et ceux liés au sols.

La limitation de la ressource en eau et les prévisions pessimistes sur son évolution, en fonction des évolutions démographiques et anthropiques, constituent certainement le problème le plus important. Il est évident, de plus, que la part de cette ressource consacrée à l'irrigation, va encore décroître en part relative.

L'irrigation s'accompagne, dans un certain nombre de cas, de phénomènes de dégradation des sols par salinisation secondaire. On distingue la salinisation stricto sensu, l'alcalinisation et la sodisation pour lesquels les mécanismes mis en cause et les effets sur la dégradation des sols sont très différents.

Une autre contrainte essentielle à prendre en compte est la dégradation de la qualité de l'eau liée à une utilisation intensive de l'eau et à des activités anthropiques polluantes : l'arsenic en Asie et le fluor aux Etats Unis sont deux exemples particulièrement graves pris en compte.

Pour l'avenir, il sera nécessaire d'avoir une gestion plus rigoureuse de l'eau et des sols au niveau des bassins versants, échelle à laquelle les ressources sont étroitement liées, voire interactives, aussi bien au plan quantitatif et qualitatif

Mots clés

Ressources en eaux et en sols ; salinisation secondaire ; dégradation des sols ; pays du pourtour méditerranéen.

## SUMMARY

THE DEGRADATION OF IRRIGATED SOILS AND WATER RESOURCE : a threat for the future of agriculture and environment in Mediterranean countries.

The main topic developed in this article turns around the durability of irrigated the systems in the countries to the South of the Mediterranean while evoking, in a concomitant way, the problems involved with water and those related to soils.

The limitation of the water resource and the pessimistic predictions on its evolution, according to demography and anthropic activity, constitute certainly the most important problem. It is obvious moreover, that the part of this resource devoted to irrigation, will relatively decrease in the next future.

The irrigation is accompanied, in a certain number of cases, by degradation phenomena due to secondary salinisation of the soils. One distinguishes the salinisation stricto sensu, the alkalization and the sodisation for which degradation mechanisms affect the soils in very different ways.

Another essential constraint to take into account is the deterioration of the quality of water in relation with its intensive use and/or with polluting anthropic activities : arsenic in Asia and the fluorine in the United States are two particularly serious examples taken into account.

For the future, it will be necessary to have a more rigorous management of water and soils, especially at the scale of the catchments where those resources are closely related, in the qualitative and quantitative plan.

Key-words

Water and soil resources ; secondary salinization ; soil degradation ; around Mediterranean Sea countries.

## RESUMEN

LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS IRRIGADOS Y DEL RECURSO HIDRICOS : una amenaza para el porvenir de la agricultura y para el medio ambiente en los países al sur del mediterráneo?

El tema principal de este artículo es la sostenibilidad de los sistemas irrigados en los país al sur de la mediterráneo, tratando al mismo tiempo los problemas ligados al agua y a los suelos.

La limitación del recurso hídrico y las previsiones pesimistas sobre su evolución, en función de las evoluciones demográficas y antrópicas, constituyen el problema más importante. Es evidente, además, que la parte de este recurso usado en irrigación, todavía aumentara relativamente.

La Irrigación se acompaña en un cierto número de casos de fenómenos de degradación de los suelos por salinización secundaria. Se distingue la salinización stricto sensus, la alcalinización y la sodización para las cuales los mecanismos existentes y los efectos sobre la degradación de los suelos son muy diferentes.

Palabras claves

Recursos en aguas y suelos ; salinización secundaria ; degradación de los suelos ; país al sur de la mediterráneo.

La croissance démographique reste forte dans les pays de la région méditerranéenne, (Algérie et Egypte notamment) et du sud Sahara (pays du Sahel). La sécurité alimentaire des populations concernées suppose une augmentation très significative de la production agricole dans les quelques années à venir. L'amélioration de la productivité de chaque hectare déjà cultivé est certes une solution à envisager avec attention. Les progrès de la recherche fondamentale en génétique, en physiologie végétale (par le biais d'une meilleure connaissance des mécanismes d'adaptation des plantes à des conditions de stress hydrique ou salin) trouveront ici un beau domaine d'application. Mais quatre autres défis se révéleront incontournables :

- comment éviter à terme la perte d'usage agricole de terres déjà cultivées, par suite d'une dégradation progressive de leur fertilité ? (Robert et Cheverry, 1996)
- comment créer de nouvelles superficies de terres cultivées et irriguées, alors que les sols les plus faciles à mettre en valeur sont déjà utilisés, et que les eaux d'irrigation de bonne qualité se font rares ? (Verdier, 1995)
- comment gérer l'eau dans ces régions, que ce soit sur le plan quantitatif (la ressource est déjà en grande partie utilisée) ou sur le plan qualitatif (la qualité des eaux se dégrade) ?
- plus généralement, comment améliorer la production sans

compromettre la « qualité » du milieu, dans ses dimensions physiques, biologiques et humaines ? Les préoccupations environnementales deviennent partout un élément clef d'une agriculture qualifiée de « durable » (Robert, 1996).

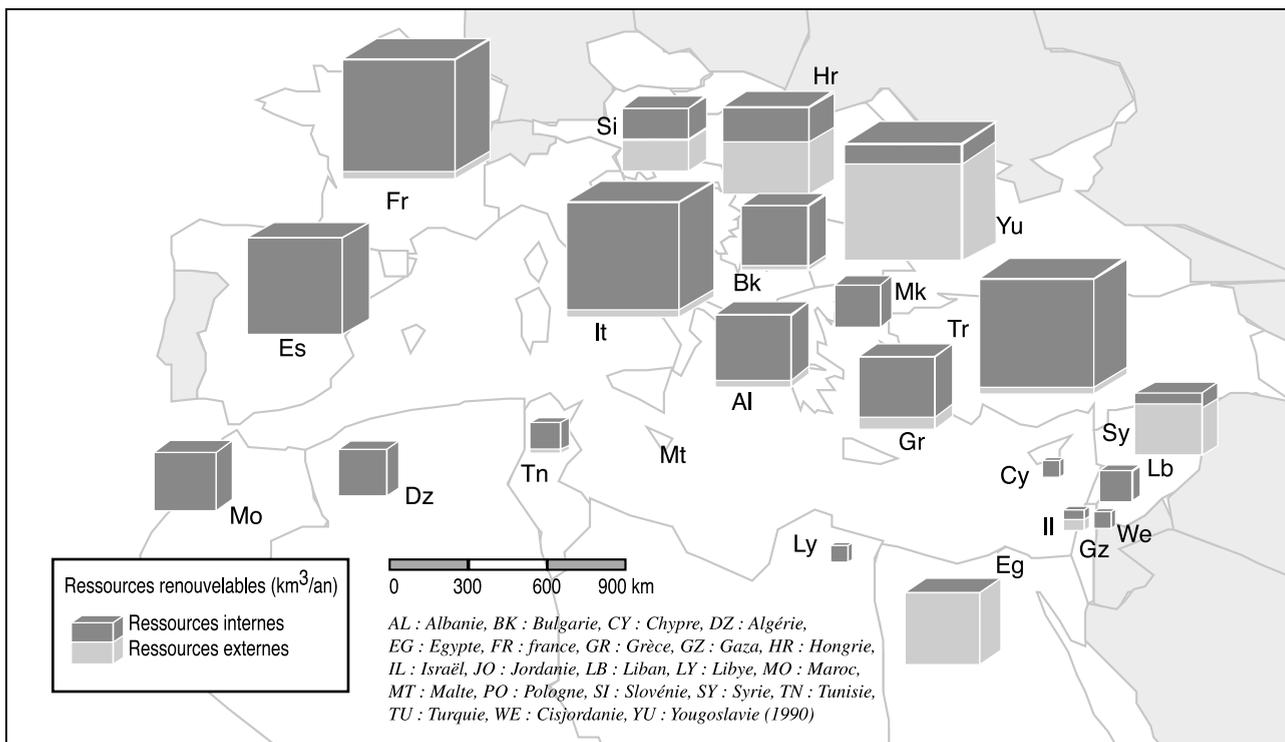
## LA RESSOURCE EN EAU ET LES PREVISIONS SUR SON EVOLUTION

Les figures 1 et 2 sont extraites d'un document récent du plan Bleu (Benblidia et al., 1997) et représentent les ressources en eau dans la région méditerranéenne. Elles illustrent bien le contraste qui peut exister entre le Nord et le Sud de la Méditerranée.

La figure 1 représente les ressources en eaux naturelles renouvelables en km<sup>3</sup>/an, en distinguant les ressources internes (propres au pays), externes (venant d'un autre pays) et le total des deux : on voit déjà assez bien la disproportion qui existe entre le Nord et le Sud de la Méditerranée. En ce qui concerne le Maghreb, les ressources sont pratiquement uniquement internes, ce qui n'est pas le cas de la Syrie ou de l'Egypte. On peut encore exprimer la ressource en fonction du nombre d'habitants (figure 2), ce qui accentue encore le déséquilibre Nord-Sud. A part le Maroc, la Syrie et le Liban

Figure 1 - Ressources en eaux naturelles renouvelables dans les pays méditerranéens (Benblidia et al., 1997)

Figure 1 - Natural resources of renewable water in the Mediterranean countries (Benblidia et al., 1997).



(3000 m<sup>3</sup> par habitant), la plupart des pays du Maghreb et du Moyen Orient ont moins de 1000 m<sup>3</sup>/ha/an (767 pour le Maghreb). Un document de l'observatoire Sahara-Sahel (1995), montre que les ressources sont beaucoup plus abondantes au niveau du Sahel (Sénégal, Mali, Niger, Tchad, Soudan, Ethiopie), avec une ressource totale moyenne par habitant de 5 655 m<sup>3</sup>.

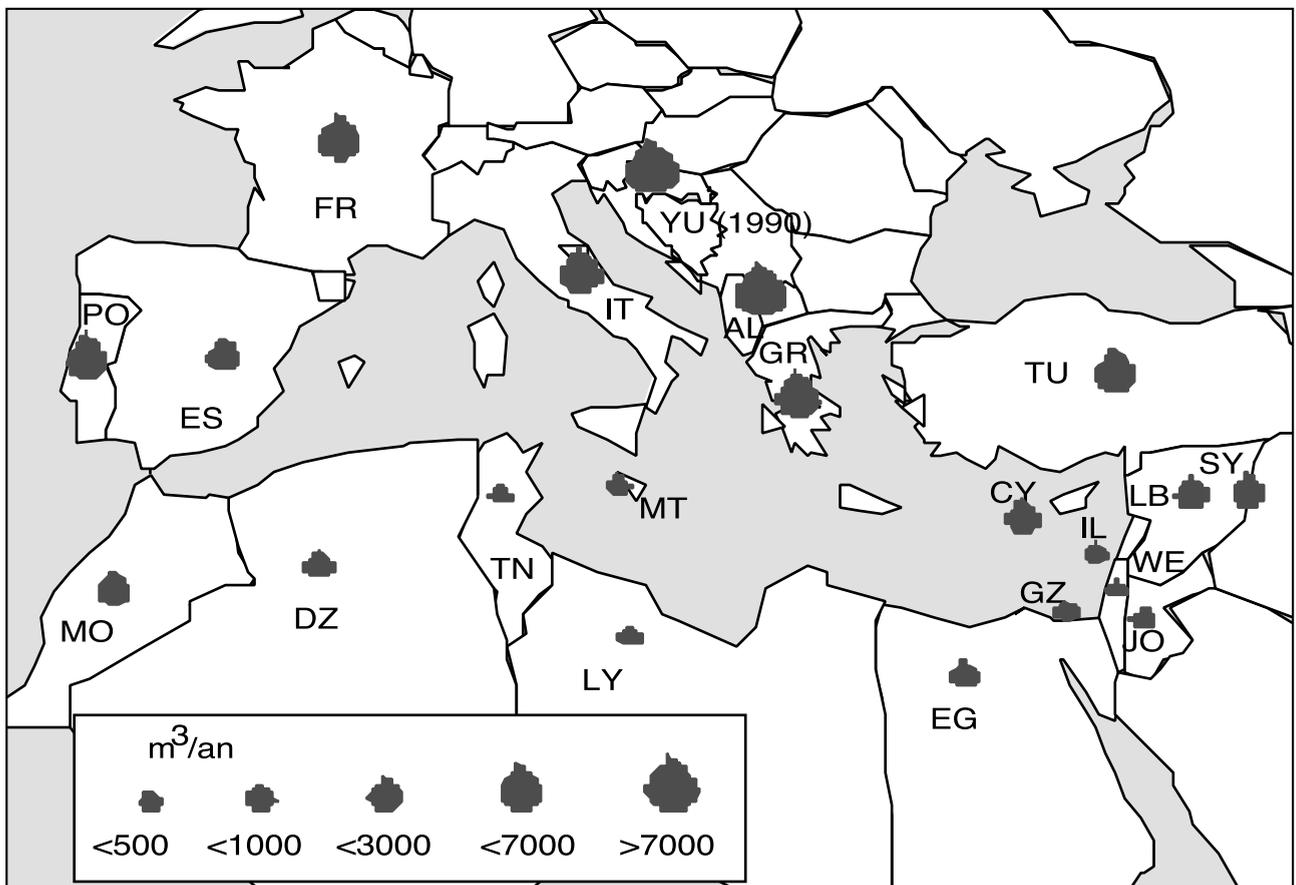
Pour l'Algérie et la Tunisie, il existe deux nappes sahariennes, l'une libre et superficielle, l'autre profonde et captive, mais l'utilisation de cette ressource, non renouvelable, pose un certain nombre de problèmes : eau du complexe terminal très salée, eau du continental intercalaire, très chaude (50°C) (Daoud et Halitim, 1994). Exprimée enfin par secteur, la part consacrée à l'agriculture va de 60 % pour l'Algérie à près de 80 à 90 % pour le Maroc, la Tunisie, la Lybie, l'Egypte, la Syrie. Le même rapport du plan Bleu montre que la ressource devrait diminuer encore, en moyenne de moitié pour ces différents pays en 2050, ceci alors que la demande, déjà en liaison avec

l'accroissement prévu de population (2,2 % par an), va augmenter et plus particulièrement dans les secteurs autres que l'agriculture (phénomène de glissement d'usages).

Une telle projection, déjà pessimiste, ne prend pas en compte l'effet possible d'un changement climatique (DUNGLAS, 1993). A ce sujet (tableau 1), les scénarios les plus plausibles prévoient tous pour 2050, une augmentation générale de la température (+ 3°C), un accroissement de la pluviométrie au Nord (1 mm/jour) et une diminution au Sud (1 mm/jour) (Le Houérou, 1995). Ceci conduira à une augmentation notable de l'évaporation potentielle (200 mm/an en moyenne). On peut donc estimer qu'il existera en dehors des autres conséquences sur la désertification, une limite forte au niveau de la ressource en eau qui se traduira par des décroissances pour la ressource en eau par habitant (figure 3) et par conséquent de la part réservée à l'irrigation (figure 4) (Benbudia et al., 1997). L'irrigation est actuellement la plus grosse consommatrice d'eau (75 %). Mais le développement des villes, l'industrialisation, introduiront une compétition très vive, qui

Figure 2 - Ressources en eau naturelles par habitant (1995) dans les pays méditerranéens (moyenne nationale) (Benblidia et al., 1997)

Figure 2 - Natural water resources per capita (1995) in the Mediterranean (Benblidia et al., 1997)



se traduira très probablement par une réduction de la part de l'eau affectée à l'irrigation, qui devra ne plus dépasser des valeurs de l'ordre de 60 % (Shiklomanov, 1990).

Une autre conséquence des changements climatiques prévue, est une élévation du niveau de la mer qui serait comprise entre 0,2 et 0,6 m en 2050, ce qui signifie une inondation de certaines zones littorales ou de deltas (Camargue, Nil...), une intrusion d'eau de mer dans les estuaires des fleuves et dans les nappes littorales.

Zabolcs (1994) prévoit déjà une extension des sols salés en Europe, en relation avec cette extension des eaux salées marines.

Il restera donc à jouer au maximum sur l'économie d'eau.

On sait, en effet, que les pertes peuvent atteindre plus de 50 % actuellement. L'utilisation de la micro-irrigation ne sera, cependant pas, sans poser des problèmes vis-à-vis de l'élimination des sels dans les sols.

## LES PHENOMENES DE DEGRADATION DES SOLS : LA SALINISATION SECONDAIRE

Le phénomène de salinisation secondaire des périmètres irrigués constitue une menace particulièrement grave. Dans 10 pays de la Méditerranée, le pourcentage des terres irriguées

Tableau 1 - Conséquences du réchauffement dans le Bassin Méditerranéen

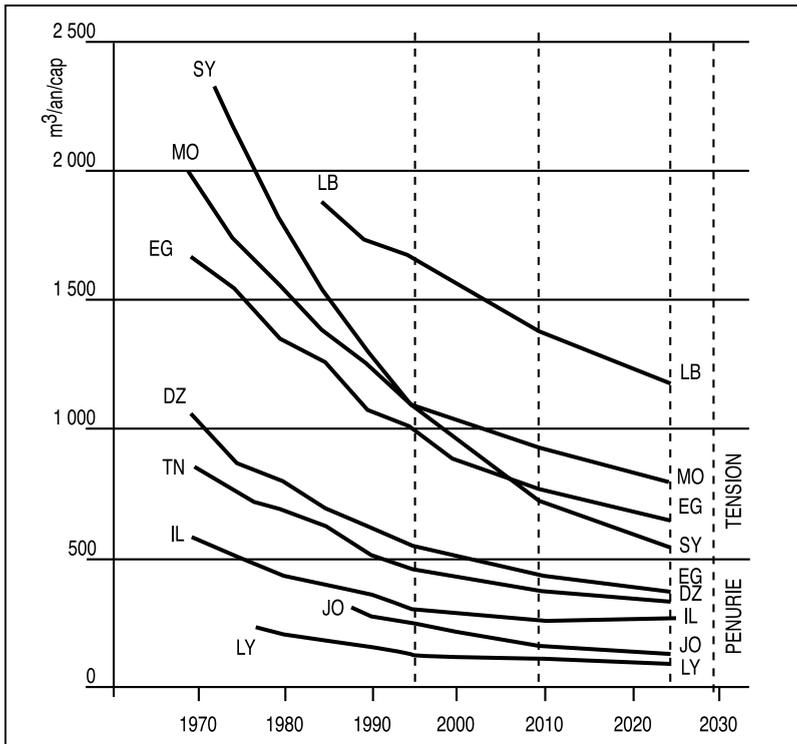
Table 1 - Consequences of the reheating in the Mediterranean Basin.

		Aujourd'hui	Vers 2 050
Température			Accroissement = 3 °C
Précipitations			Nord : accroissement = 1 mm / jour Sud : baisse = 1 mm / jour
Evapotranspiration potentielle			Augmentation = 200 mm / an
Augmentation du niveau de la mer			0,2 à 0,6 m
NORD du Bassin			
Augmentation de la production agricole			20 à 30 %
Céréales en zone aride	oui		non
Limites citrus et olivier	40° latitude nord		46° latitude nord
Forêt maquis			accroissement de 1,5 % an
parcours			déclin
Erosion et sédimentation	faible		faible
SUD du Bassin			
Population		290 Mhab	+ 2,2 % an = 850 Mhab + 3,5 % / an = 1 950 Mhab
Céréales		4 récoltes / 5 ans	3 récoltes / 5 ans
Cultures			jusqu'à 100 mm
Forêts maquis		régression 2 % / an	Disparition
Parcours		dégradés	très dégradés
Alimentation animale			concentrée
Progression des déserts			600 000 km <sup>2</sup>
Erosion		forte : 5 à 10 T / ha / an	très forte : 25 à 50 T / ha / an
sédimentation - mer		forte (5) = 0.5 Mds T / an	très forte (25) = 2.5 Mds T / an

Source (Le Houerou, 1995)

Figure 3 - Chute des ressources en eau par habitant dans quelques pays méditerranéens

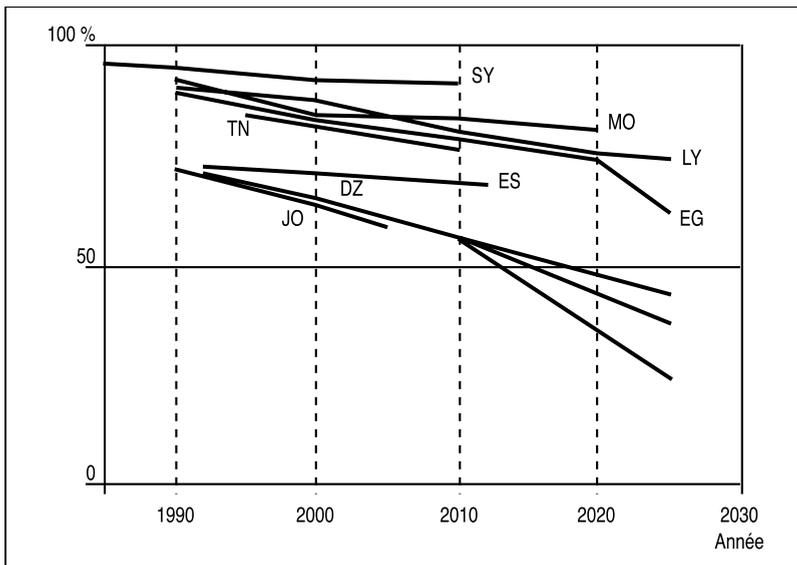
Figure 3 - Decreasing of water resources per habitant in a few mediteranean



DZ : Algérie, EG : Égypte, GR : Grèce, GZ : Gaza, IL : Israël, JO : Jordanie, LB : Liban, LY : Libye, MO : Maroc, SY : Syrie, TN : Tunisie

Figure 4 - Production des parts de l'irrigation dans les demandes en eau (d'après plans directeurs) dans plusieurs pays méditerranéens

Figure 4 - Forward estimation of the part of the water resource devoted to irrigation in several mediteranean countries



atteintes à des degrés divers par la salinisation est en effet significatif : ce pourcentage varie d'un minimum de 7 % (Grèce) à un maximum de 30-40 % (Égypte). L'Algérie, l'Espagne, la Jordanie, Israël, le Maroc, se situent dans le gros peloton des 10-15 %, la Syrie et la Tunisie plutôt dans la fourchette haute (Hamdy et al. 1995).

La ressource en eau de surface de cette région est par ailleurs très limitée et déjà fortement mobilisée. Plusieurs pays méditerranéens puisent par ailleurs dans des nappes profondes, fossiles, très partiellement renouvelées (Algérie, Tunisie, Libye.). Le recours pour irriguer à des eaux déjà assez fortement minéralisées (3-4 g de sel par litre en Tunisie), ou à des eaux usées (pratique déjà largement initiée en Égypte, Israël) est déjà couramment mis en œuvre et devra encore fortement se développer. Des progrès sur les techniques d'irrigation elles-mêmes, sur la manière dont les irriguants les mettent en œuvre sont certes envisageables. Mais suffiront-ils ?

Au Sud du Sahara, le phénomène concerne en particulier les sols irrigués de la vallée du Fleuve Sénégal (Sénégal, Mauritanie), dont l'extension a été forte au moment de la construction des grands barrages sur le fleuve. Des cas de dégradation sont connus depuis trente ans dans les périmètres de l'ancien « Office du Niger » au Mali ; ils pourraient se multiplier sur les terrasses de ce même fleuve, en amont de Niamey, au Niger.

Il est donc utile de revenir sur les risques liés à ce phénomène de salinisation, de préciser leur nature et de faire le point sur les moyens dont on dispose pour les réduire. Classiquement, on évoque une première série de trois risques majeurs :

- le premier est la salinisation sensu stricto, c'est à dire l'accumulation de sels solubles dans la zone racinaire. Cette accumulation est fréquemment liée à un phénomène de remontée capillaire à partir d'une nappe phréatique salée et peu profonde. Cela perturbe l'alimentation en eau de la plante, par suite de la modification du potentiel osmotique de la phase liquide du sol. C'est le phénomène le plus fréquent autour de la Méditerranée. Ce risque est grave,

mais des possibilités de restauration des sols, par une désalinisation réussie, existent. La maîtrise du plan d'eau est un élément clef de toute solution. Une bonne maîtrise du « couple » irrigation/drainage, et une bonne valorisation du pouvoir de lixiviation des pluies orageuses, notamment par un travail du sol adapté, en constituent des outils. Une étude récente (Hachicha, 1998) vient d'en donner des exemples en Tunisie, qu'il s'agisse de « sols de lunettes » ou d'un grand périmètre irrigué. De même, des expérimentations récentes de réhabilitation, ont été réalisées en Syrie dans la vallée de l'Euphrate en associant un lessivage intense des sels et un contrôle du niveau de la nappe ;

- le second risque est celui d'alcalinisation des sols, qui se produit lorsqu'apparaissent dans le sol des sels tels le carbonate de sodium. Le pH du sol peut alors atteindre des valeurs très élevées, et la matière organique commence à se solubiliser (« salant noir »). Ce phénomène, qui caractérise notamment une origine continentale des sels, est relativement peu fréquent dans la région méditerranéenne, parce que « l'alcalinité résiduelle calcite » des eaux d'irrigation est le plus souvent négative (Valles et al., 1989). Il est en revanche préoccupant dans les périmètres du Mali, des observations (Bertrand, 1993) révélant déjà la présence locale de tâches de salant noir. La composition chimique des eaux des grands fleuves du sud du Sahara, le Niger en particulier, lui confère un caractère quasi-inéluctable à long terme, si des précautions particulières ne sont pas prises. La vallée du Fleuve Sénégal paraît moins menacée dans l'immédiat. Le phénomène d'alcalinisation avait déjà été décrit en détail voici trente ans dans les polders du Lac Tchad (Cheverry, 1974).

Ce processus de dégradation est assez difficile à combattre, car la restauration de ce type de sols implique l'apport de produits fortement acides, seuls susceptibles de neutraliser le milieu et d'augmenter la solubilité du carbonate de calcium. Or les pays du sud du Sahara ne disposeraient pas, si l'extension de cette forme de dégradation s'accroissait, de ces sources acides (acide sulfurique, pyrite...), du moins dans des conditions économiques acceptables ;

- le troisième risque est celui de la sodisation (Summer, 1993), lié à la fixation de sodium sur le complexe adsorbant des argiles. On observe alors fréquemment, surtout lorsque la concentration en électrolytes des eaux du sol est faible, une dégradation des propriétés physiques du sol, conséquence de mécanismes de gonflement ou de dispersion (Daoud, Robert, 1992). Ce phénomène est relativement peu représenté autour de la Méditerranée, par suite de la présence de gypse dans de nombreux sols et plus généralement de l'origine marine des sels. On doit cependant noter dans certains deltas, en particulier celui du Nil, l'existence de sols irrigués présentant une certaine tendance à la sodisation, ce qui implique pour assurer leur durabilité l'apport de sources de calcium assez aisément solubilisable (gypse). La sodisation est en revanche fréquente

au Sud du Sahara, qu'elle soit héritée (Barbiero, 1994) ou secondaire à l'irrigation. Il existe certes des quantités non négligeables de calcaire dans beaucoup de ces sols, mais le pH élevé diminue la solubilité, déjà faible à un pH neutre, de ce matériau.

## LA DÉGRADATION DE LA QUALITÉ DES EAUX DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUES : CONSÉQUENCES ÉCOLOGIQUES ET SANITAIRES

Chacun de ces risques précédemment évoqués a déjà fait l'objet depuis cinquante ans, dans la région méditerranéenne et au sud du Sahara, de nombreux travaux d'observation, d'expérimentation (travaux du Cruesi en Tunisie, de l'Institut de Bari en Italie, de l'ORSTOM et du CIRAD au Sénégal, Mali, Niger, Tchad, etc), de modélisation (Rieu, Laudelout, Dufey et al.). Beaucoup de solutions ont été testées. Des recherches sont encore en cours. Nous citerons ici, en se limitant au monde francophone, celles qui portent sur l'organisation et le comportement physico-chimique des argiles (Tessier, Robert, Badraoui), sur le comportement hydraulique de ces sols (Halitim, Hallaire, Daoud) sur le comportement de la matière organique, de l'azote et des fertilisants (Soudi, Dellal), sur la variabilité spatiale et temporelle des accumulations de sels (Job, Hachicha, Boivin, Barbiéro), sur la modélisation (Rieu, Marlet), sur l'utilisation d'eaux usées (Bahril), et enfin sur la mise au point de nouveaux outils de repérage (GPS), de mesure de la conductivité, de caractérisation des états de surface, etc. Il n'est cependant pas dans l'objectif de cet article de dresser un bilan exhaustif des études et des essais d'aménagement récents sur le pourtour méditerranéen. On insistera en revanche sur la nécessité de prendre en compte de nouveaux risques et sur l'intérêt de traiter le problème d'une manière plus large. Les nouveaux risques à envisager sont ceux ayant trait à des éléments chimiques mineurs « accompagnant » la salinisation. leurs conséquences sont écologiques et sanitaires. On en citera deux ici : le sélénium d'abord, l'arsenic ensuite.

Le problème du sélénium a été mis en évidence aux Etats-Unis (Miyamoto S. et al., 1994), dans la vallée San Joachim. Le stockage d'eaux de drainage très salées dans le réservoir de Kesterson, s'est traduit par une concentration de cet élément de transition. Or le sélénium est assez soluble et il passe aisément dans la chaîne alimentaire : plantes, micro-organismes, invertébrés. Des cas de déformation par mutagenèse et de mortalité des poissons et des oiseaux qui consomment ces eaux ont été signalés. Ces atteintes écologiques ont fortement sensibilisé les populations de cette région. Elles ont réagi et ont conduit les responsables de la gestion de l'eau à prendre

des mesures pour réduire ces dégâts.

Le problème de l'arsenic s'est lui récemment posé en Asie, au Bengale et au Bangladesh. Ce cas actuel, certainement le plus grave jamais constaté, concerne la mise en solution de l'arsenic présent dans les sédiments quaternaires (certainement sous forme d'arsenopyrite) par des modifications des conditions d'oxydoréduction. La modification de ces conditions est liée au développement de l'irrigation avec pompage de l'eau en profondeur (20 à 150 m) pour la production plus intensive du riz (« révolution verte »). L'arsenic soluble est présent dans les eaux utilisées comme eau potable ou pour l'irrigation à des concentrations qui dépassent la concentration admissible (0,05 ppm) pour atteindre en moyenne plusieurs ppm. Les surfaces concernées peuvent être considérables : 3,5 millions d'hectares pour le Bengale de l'ouest, 4 millions d'hectares pour le Bangladesh, les populations vivant dans ces périmètres dépassent 50 millions d'habitants. Les symptômes qui apparaissent, sont typiques d'un « empoisonnement lent » avec des manifestations cutanées (lésions, noircissement, gangrène, cancer de la peau), mais aussi atteinte d'autres organes (foie, poumons).

Les solutions sont actuellement très difficiles à mettre en oeuvre puisque cela met en jeu d'abord les circuits d'eau potable mais peut-être aussi l'irrigation et la culture du riz (Ahmed et al., 1997 ; Chakraborti et al., 1997).

La plupart des « catastrophes » épidémiologiques ou écologiques connues (Itaï Itaï pour Cd...) sont d'ailleurs liées à des exemples de pollution anthropique. Ceci rejoint les observations faites par Frazer et al. (1995) sur la pollution des sédiments des grands cours d'eau. On doit également noter, toujours en relation avec les risques liés aux éléments traces, que certaines analyses de sols de rizières d'Asie montrent des teneurs très élevées en Cd, Hg, Cu, Zn. Ceci peut s'expliquer par l'accumulation, durant de longues durées, des éléments provenant des eaux d'irrigation (fond géochimique ou pollution) : en effet dans de nombreux pays les rejets d'eaux usées ne sont pas contrôlés ou traités. (exemple, le chrome rejeté par l'artisanat du cuir au Maroc...)

L'énoncé de ces phénomènes montre bien quel est le réel défi à relever dans l'avenir : les problèmes de salinisation ne pourront plus désormais être traités uniquement en référence à la production agricole, et en ne s'intéressant qu'aux seuls rendements des plantes cultivées, rendements qui s'avèrent effectivement plus ou moins réduits par les phénomènes de salinisation secondaire. En fait, tous les éléments chimiques concernés, toutes les facettes du problème : chimiques et physiques, mais également biologiques, sanitaires et humaines, devront être prises en considération. Le problème des germes pathogènes qui seront de plus en plus souvent véhiculés par les eaux d'irrigation, en particulier si on utilise les eaux usées, devrait par exemple recevoir une attention particulière. Sans oublier bien entendu les problèmes inéluctablement liés à l'intensification des systèmes de culture dans les périmètres

irrigués, ceux des pesticides par exemple. On peut se référer à ce sujet au lac d'Aral où c'est l'aval des zones irriguées qui est le plus concerné.

## CONCLUSION

Le phénomène de salinisation devrait être désormais traité à des échelles spatiales et en fonction de « cibles humaines » beaucoup plus larges. En Méditerranée comme au sud du Sahara, ces problèmes ont été trop longtemps restreints aux objectifs d'agriculteurs, qui raisonnaient l'irrigation à l'échelle de la parcelle, en vue d'une production agricole. La « durabilité » à cette échelle conduisait inéluctablement à des solutions, parfois très sophistiquées, de type « contrôle du bilan des sels par la mise en oeuvre de fractions de lessivage optimales ». Certes, ces approches gardent tout leur intérêt.

Mais divers volets du problème ont été un peu négligés. Les relations entre le sol et le sous-sol (entre 2 et 20 m de profondeur) ont été par exemple insuffisamment étudiées, probablement parce que les outils des pédologues et des géophysiciens, des hydrogéologues n'ont pas été suffisamment utilisés de concert.

Plus généralement, des travaux récents (cf. ceux de Mhiril et al. en Tunisie, 1996) montrent bien que les approches doivent être également plus globales, raisonnant à l'échelle de bassins versants, d'entités géographiques référées à des intérêts culturels, économiques spécifiques. Les publics visés dépassent de loin les seuls agriculteurs irrigués : tous les utilisateurs indirectement concernés par cette pratique de l'irrigation doivent être pris en compte. Les aquifères, elles-mêmes menacées par ces problèmes de salinisation devront notamment faire l'objet d'une attention particulière, car leurs utilisateurs sont extrêmement divers.

Les prévisions très pessimistes concernant la limitation générale de la ressource quantitative en eau dans les régions méditerranéennes et arides vont entraîner, obligatoirement, des modifications dans les méthodes d'irrigation (micro-irrigation). La désalinisation de l'eau de mer, qui apparaît pour l'instant une pratique mineure, deviendra certainement une nécessité.

Enfin les zones irriguées et l'aval de celles-ci, vont être de plus en plus concernées par des problèmes environnementaux relatifs à la qualité chimique et biologique de l'eau.

Il est essentiel de ne pas attendre le développement des problèmes pour instaurer un nouveau type d'irrigation durable, qui semble particulièrement indispensable à la sécurité alimentaire et environnementale des zones Sud de la Méditerranée.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed M, Brand Stetter A, Wenzl W.W., Blum W.E.H., 1997 - The arsenic calamity in Bangladesh. 4th Int. Conf. On the Biogeochemistry of trace elements, June 23-26 Berkeley California.
- Bahri A., 1995 - Environmental impacts of marginal waters and sewage sludge use in Tunisia. report n° 1013, Lund, Sweden (thesis, comprising 10 articles).
- Barbiero L., 1994 - Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger. Origine de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse ENSA-Rennes, 209 p.
- Benbidiam. et al., 1997 - Plan Bleu pour la Méditerranée : l'eau en région méditerranéenne Sofia Antipolis 91 p
- Bertrand R., Keita B. et N'Diaye K., 1993 - La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'office du Niger). Cahiers Agriculture. 2. : 318-329.
- Chakraborti D., Mandal B.K., Dhar R.K., Biswas B., Samanta G., Saha K.C., 1997 - Groundwater Arsenic calamity in west Bengal, India, and Bangladesh. 4th Int. Conf. On the biogeochemistry of trace elements, June 23-26 Berkeley California, 769-770 (abstract).
- Chevry Y C. 1974 - Contribution à l'étude pédologique des polders du Lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse Doctorat d'Etat es Sciences, Université de Strasbourg, 257 p.
- Chevry C. et Robert M., 1993 - Salure des sols Maghrébins. Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Rapport final du projet CEE TS2-0108 F, 41 p.
- Daoud Y. 1993 - Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse Doctorat Etat, Alger. 232 p.
- Daoud Y. et Halitim A., 1994 - Irrigation et salinisation au sahara algérien. Sécheresse, 5, 3, 151-160
- Daoud Y. et Robert M., 1992 - Influence of particle size and clay organization on hydraulic conductivity and moisture retention of clay from saline soils. Applied Clay Science, n°6, pp. 281-293.
- Dellal A., 1994 - Réactivité physico-chimique, fonctionnement physiologique et microbiologique en conditions salines. Thèse ENSA Rennes, 198 p.
- Dunglas J., 1993 - Effet de serre et activités humaines. Sécheresse, 4, 211-20.
- Fraser AS., Meybeck M. et Onglet ED., 1995 - Water quality of world river basins (Global environment monitoring system). Nairobi, Kenya : Unep Environment Library n° 14, 1995; 40p.
- Hachicha M., 1998 (à paraître) - Mise en valeur des sols salés. Organisation, fonctionnement et évolution des sols salés du nord de la Tunisie. Thèse ENSA-Rennes, 230 pages.
- Halitim A., 1985 - Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doctorat d'Etat es sciences, Université de Rennes, 379 p.
- Hamb Y., Lasram et Lacirignola, 1995 - C.R. Acad. Agric. France, 2, pp.
- Job J.O, 1992 - Les sols salés de l'oasis El Guettar (sud tunisien). Thèse Université Montpellier II, 147 pages.
- Le Houérou, 1995 - Végétation and Land use in the Mediterranean basin by the year 2050 : a prospective study. in climatic change in the Mediterranean. Volume 1. Unep.
- Marlet S., 1996 - Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger (Niger). Modélisation des processus physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation. Thèse ENSA-Montpellier, 267 pages.
- Meybeck M., 1996 - River water quality global ranges, time and space variabilities, proposal for same redefinitions. Stuttgart, Allemagne : Versh internat Verein Limnol.
- Mhiri A., Tarhouni J., Hachicha M. et Lebdi F., 1996 - Etude des risques de salinisation des sols à long terme par endoréisation anthropique- Pour une approche systémique. Actes du séminaire du 20° anniversaire de l'IRA de medenine, jerba, 4 et 5/12/1996, 15 pages.
- Mivamoto S. et Mueller W., 1994 - Irrigation with saline water : certain environmental implications. 15th World Soil Science Congress, Acapulco, July 1994. volume 3a, pp. 256-277.
- Ortega E.M. et GarciaG.E., 1994 - La formacion geochemiqua de los suelos sodicos y sus propiedades. 15th World Soil Science Congress, Acapulco, July 1994. volume 3a, pp. 278-292
- OSS-UNESCO, 1995 - Ressources en eau des pays de l'OSS, évaluation, utilisation et gestion. Carte et notice 80 p. Observatoire du Sahara et du Sahel, Paris.
- Rieu M., 1983 - Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. Doc. ORSTOM, Paris, 161 p.
- Robert M. et Chevry C., 1996 - Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. Cahiers Agricultures 5, 243-248.
- Robert M., 1992 - Le sol, une ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. Cahiers Agricultures 1992; 1 : 20-34.
- Shiklomanov I.A., 1990 - Les ressources mondiales en eau. Nature et Ressources, 26 : 34-43.
- Soudi B., 1989 - Etude de la dynamique de l'azote dans les sols marocains : caractérisation et pouvoir minéralisateur. Thèse I.A.V. Rabat, 140 pages.
- Summer M.E., 1993 - Sodic soils : new perspectives. Austr. J. Soil Res. : 683-750.
- Szabolcs I., 1994 - Prospects of soil salinity for the 21st. Century. Acapulco Mexique : Trans. 15th Wold Congress of Soil Science; vol. 1 : 123-41.
- Valles V, N'Diave M.K., Bernadac A. et Tardy Y., 1989 - . Geochemistry of water in the Kouroumari region, Mali. Al, Si, and Mg in waters concentrated by evaporation. : development of a model. Arid soil research and rehabilitation, 3, 21-39.
- Verdier J. , 1995 - Avenir de l'irrigation dans le monde et place de l'école française d'irrigation. CR Acad. Agric. Fr. ; 81 : 63-82.

