

***Sols salés, eaux saumâtres,
des régions arides tropicales
et méditerranéennes :***
principaux faciès, conséquences
pour l'agriculture

INTRODUCTION

En régions arides les précipitations, faibles et occasionnelles, induisent un drainage climatique nettement déficitaire pendant la plus grande partie de l'année. Les écoulements, superficiels (oueds, marigots) ou hypodermiques, y sont le plus souvent temporaires. Ils atteignent des zones de concentration qui sont les lieux privilégiés de manifestations salines dans les eaux et dans les sols.

L'importance de ces phénomènes de salinité dépend des apports hydriques et du bilan évaporatoire imposé par le climat. Le bilan évaporatoire, ou différence entre l'évaporation et les précipitations, varie dans de larges limites depuis des valeurs annuelles supérieures à 3 000 mm jusqu'à des valeurs inférieures à 1 000 mm. Dans les zones subdésertiques extrêmement arides, il est positif tout au long de l'année, avec des épisodes pluvieux dont les effets sont rapidement effacés. Les périodes d'interruption de l'évaporation sont moins importantes dans les régions tropicales sèches, où les pluies tombent en saison chaude, que dans les régions méditerranéennes, où elles tombent en saison froide.

Conséquence de ce bilan évaporatoire le plus souvent positif, les eaux se concentrent et deviennent saumâtres. La salinité des eaux de surface en lame peu épaisse devient telle qu'il peut y avoir précipitation de chlorure de sodium pur par exemple, comme on l'observe dans quelques salines naturelles : bras morts de l'Euphrate à Hatla et à Ghabra en Syrie, lac Retba au Sénégal, sebkhas d'Amador dans le Hoggar, etc. Les eaux des nappes très peu profondes, naturelles, ou engendrées par des irrigations mal contrôlées, se concentrent sous l'effet d'une dynamique essentiellement ascendante par capillarité. Elles salinisent les sols à leur contact. Ces phénomènes conduisent à la formation de paysages naturels typiques par leur végétation spécialisée dite halophile, ou encore par l'absence de végétation. On observe alors souvent, à la surface des sols, des manifestations cristallines caractéristiques des profils salins ascendants (fig. 2) : efflorescences, croûtes salines, pseudosables, et formations poudreuses (tel le *fech-fech* au Sahara). Ces poudres ont pu et peuvent être modelées par les vents en accumulations diverses : voiles et rides éoliens, nebkas, dunes, telles que les grandes dunes gypseuses de Kébili (Tunisie), et même véritables collines appelées *lunettes* comme celles de la sebkha Kelbia, en Tunisie centrale, ou celle de Ben Ziane, en Algérie.

Du fait du climat de ces pays arides et, dans une moindre mesure, des pays semi-arides, une grande partie de l'agriculture est irriguée. Elle utilise des ressources en eau

très diverses : puits, captages, forages, cours d'eau. De très grands fleuves allogènes, nés en zones montagneuses humides (Sénégal, Niger, Nil, Euphrate, Tigre) apportent des volumes d'eaux très importants et de bonne qualité aux zones arides dont les sols n'étaient pas toujours salés au moment de leur mise en culture. Les agriculteurs arabes, exemple le plus connu, ont été pendant très longtemps des maîtres dans la pratique de l'irrigation, depuis le captage et le transport de l'eau jusqu'à sa distribution gravitaire à la parcelle (Moyen Orient, Maghreb). Mais l'accroissement des besoins alimentaires et industriels a conduit un certain nombre de pays à mobiliser des ressources en eau de moins bonne qualité, inexploitées auparavant, sur toutes sortes de sols. Les résultats sont très souvent médiocres, par méconnaissance ou non-respect des règles d'utilisation. Ainsi, des superficies importantes ont dû être abandonnées chaque fois que la maîtrise des conditions techniques a périclité et partout où le drainage naturel était, ou est, devenu insuffisant : la salinisation a conduit à l'abandon des très anciens périmètres irrigués de Mésopotamie. Des parties étendues de périmètres mis en valeur au début des années cinquante en Syrie et en Iraq, sont déjà abandonnées.

Les faciès chimiques des eaux, en particulier de celles utilisées ou utilisables pour l'irrigation sont recensés ci-après. Les grands faciès chimiques des sols des zones tropicales et méditerranéennes affectés par la salinisation sont également examinés, sans aborder le détail des mécanismes géochimiques qui règlent les équilibres minéraux à l'intérieur des solutions au cours de leur évolution dans les sols (formation d'ions complexes, hydroxylés, protonés, de paires d'ions).

PRINCIPAUX FACIÈS SALÉS DANS LES EAUX

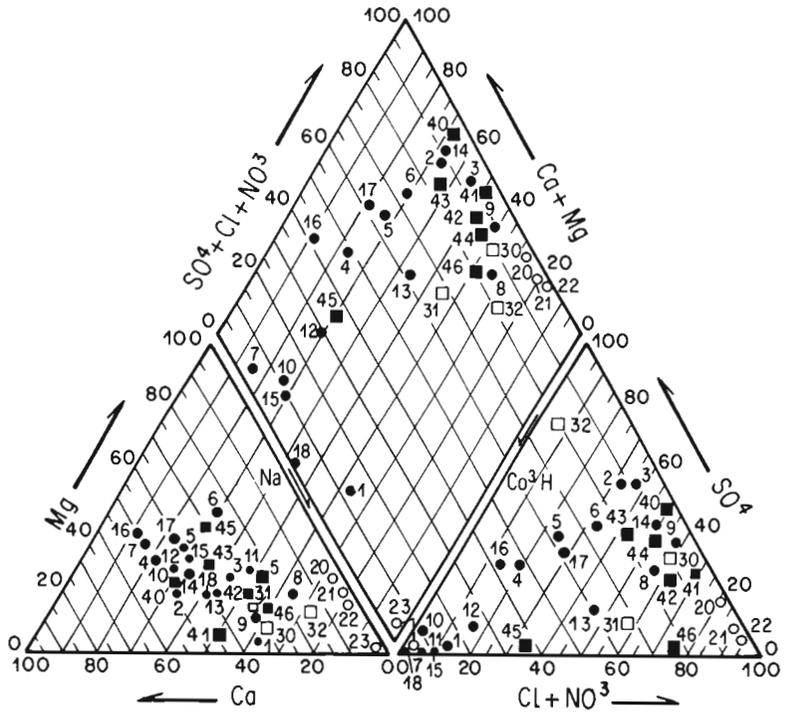
Les faciès des eaux dépendent de leur origine et des transformations subies par concentration, par précipitations, par échanges avec les argiles et, éventuellement, par dissolutions. 2 grandes catégories d'eaux sont distinguées : eaux de surface, et eaux de nappes. Les observations retenues ici sont regroupées sur le diagramme de Piper (fig. 1).

Eaux de surface

Les grands fleuves africains qui traversent les zones arides tropicales et méditerranéennes proviennent de régions de montagnes humides parfois très éloignées ; si la plupart rejoignent la mer, quelques-uns font exceptions, comme le Chari et le Logone qui alimentent le lac Tchad dont l'eau sert à l'irrigation de plusieurs polders ; de même, mais à un degré moindre, certains oueds méditerranéens.

Les eaux des fleuves issus du vieux socle africain - Gambie, Niger, Nil, Sénégal - et celles du lac Tchad sont toutes très peu minéralisées. La conductivité y est inférieure à $0,2 \text{ dS.m}^{-1}$ *, sauf pour les eaux du Sénégal où elle atteint $0,4 \text{ dS.m}^{-1}$. Leur concentration saline demeure stable d'amont en aval, ce qui indique qu'elles sont peu utilisées et, en particulier, qu'elles ne reçoivent pas, ou peu, d'eaux de drainage. Ces eaux sont essentiellement bicarbonatées calciques et, à un moindre degré, magnésiennes. Le sodium y est peu abondant sauf saisonnièrement, en période d'étiage, comme pour le Niger à Niamey. Chlorures et sulfates n'y sont présents quelquefois qu'à l'état de traces.

* L'unité internationale de conductivité électrolytique est le Siemens par mètre (S.m^{-1}) (ISO 1979). Pour les mesures de conductivité dans les eaux et les extraits de sols un sous-multiple est utilisé, le dS.m^{-1} ou le mS.cm^{-1} , qui est exactement équivalent au mmho.cm^{-1} employé précédemment.



● EAUX DE SURFACE	CE (ds/m)	□ EAUX DE NAPPES PEU PROFONDES	CE (ds/m)
1-- AWASH (Éthiopie)	0,3	30- Drainage Oasis AL HASSA	5,3
2,3- CHELIF (Algérie)	1,1 ; 2,3	31- Vallée du Nil (Égypte)	0,9
4, 5, 6- EUPHRATE (Syrie, Iraq)	0,5 ; 0,7 ; 2,3	32- Polder de Bol Guini	2,8
7- GAMBIE (Sénégal)	0,04		
8- JOURDAIN (Jordanie)	3,2	■ EAUX DE NAPPES PROFONDES	
9- MEDJERDA (Tunisie)	2,1	40- Nappe Albienne (O. RHIR ; Algérie)	2,2
10- NIGER	0,05	41- Nappe du SAQ (Arabie)	2,1
11, 12- NIL (Soudan, Égypte)	0,3 ; 0,4	42- Source de AL HASSA (Arabie)	2,2
13- OUM-ER-RBIA (Maroc)	0,9	43- Nappe de la JEFFARA (Libye)	2,4
14- SEBOU (Maroc)	1,0	44- Nappe de SIRTE (Libye)	4,2
15- SÉNÉGAL (Sénégal)	0,4	45- Nappe de l'Éocène (Sénégal)	1,3
16, 17- TIGRE (Iraq)	0,5 ; 0,9	46- Nappe du Maestrichien (Sénégal)	4,6
18- LAC TCHAD (Tchad)	0,15		
○ EAUX DE SURFACES CONCENTRÉES			
20- Drainage fleuve Sénégal Tellel	22		
21- Sine Saloum-Finela	84		
22- Koubalan (Marigot)	130		
23- Polder de Carré (Tchad)	41		

FIGURE 1 - Diagramme de Piper.

Les eaux des fleuves issus des zones montagneuses méditerranéennes, Atlas au Maghreb, Plateau arménien en Turquie, sont sensiblement plus minéralisées. À leur entrée en Iraq et en Syrie, le Tigre et l'Euphrate, par exemple, ont déjà une conductivité de l'ordre de 0,5 dS.m⁻¹. Des prélèvements sont opérés tout au long de ces fleuves pour l'irrigation de périmètres importants. Les eaux de drainage - naturel et artificiel quelquefois - retournent aux cours d'eaux dont elles augmentent la minéralisation. L'eau de l'Euphrate n'est pratiquement plus consommable à Nassiriyah, près de l'antique cité d'Ur. Assez bien équilibrées dans la partie amont, les eaux deviennent de plus en plus riches en chlorures et en sodium. Les bicarbonates précipitent rapidement dans les canaux sous forme de carbonate de calcium. Du gypse précipite également, en faible quantité. Le SAR* de ces eaux augmente, mais leur pH reste neutre.

Les eaux des oueds issus des reliefs du Maghreb sont assez minéralisées à leur arrivée dans les périmètres irrigués, surtout lorsqu'elles ont drainé des bassins versants sédimentaires riches en roches calco-magnésiennes, gypseuses, ou localement salées comme l'oued Zéroud, en Tunisie, dont les eaux peuvent titrer 4 à 5 g.l⁻¹. Les bicarbonates sont peu abondants, le sodium est souvent le cation dominant. Les variations saisonnières de concentration, liées aux débits, sont importantes. L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation est quelquefois aléatoire, principalement en absence de travaux de stockage.

Les eaux de surface peuvent se concentrer très fortement dans quelques situations particulières :

- par contamination avec l'eau de mer ou avec des sédiments marins ou lagunaires sursalés, comme dans le delta du fleuve Sénégal ;
- par évaporation lorsque l'alimentation directe est interrompue, comme dans les bras morts de l'Euphrate.

Les faciès sont alors fortement chlorurés-sodiques et les conductivités très élevées. Ces eaux sont impropres à tout usage en dehors d'un aménagement en salines pour la production de chlorure de sodium.

La concentration des eaux du lac Tchad conduit à un faciès très différent, où carbonate et bicarbonate de sodium constituent la quasi-totalité des sels (polder de Carré, au nord-est du lac).

Eaux de nappes

La richesse en sels des eaux des nappes phréatiques des vallées des grands fleuves est toujours supérieure à celles des fleuves eux-mêmes ; elle augmente souvent avec la distance au lit mineur. Le faciès des eaux reste peu différent lorsqu'elles sont chloruro-sulfatées ; il change considérablement lorsqu'elles sont bicarbonatées, même si la concentration saline évolue peu. Dans la vallée du Nil, les eaux de la nappe sont devenues chlorurées sodiques après précipitation de carbonate de calcium et de magnésium. Lorsque le niveau de cette nappe s'élève, le risque de salinisation des sols s'accroît fortement. Dans les polders du lac Tchad, la nappe phréatique, utilisée pour l'irrigation, est alimentée par infiltration à travers les sédiments dont certains sont riches en sulfures. Oxydés en sulfates, ces sulfures modifient complètement le faciès de l'eau venue du lac.

Beaucoup d'eaux de nappes profondes prospectées pour la création de périmètres irrigués se sont révélées trop salées pour être utilisables. Celles qui sont exploitées sont

* SAR = Sodium Adsorption Ratio = $\text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}$, en mé.l⁻¹.

souvent plus chargées en sels que les eaux de surface (*cf. supra*) ; cependant, elles constituent le plus souvent l'unique ressource en eau dans les zones où elles sont accessibles. Les grandes nappes du Sud-Algérien, de Libye, d'Arabie, sont chloruro-sulfatées, sodico-calciques. Leur composition varie quelquefois vers le pôle chloruré en cas de surexploitation ou de contamination marine (partie ouest de la nappe du Maestrichien sénégal-mauritanienne). Ce danger s'ajoute au risque qui pèse sur elles du fait de l'incertitude de leur alimentation.

PRINCIPAUX FACIÈS SALÉS DANS LES SOLS

Selon l'origine et la nature chimique des sels, différents faciès salins apparaissent dans les sols. Ils sont caractérisés soit par la présence de sels plus ou moins solubles (sulfates mixtes dérivés de sulfures, chlorures et sulfates neutres, carbonates ou bicarbonates), soit par la présence de cations (sodium, magnésium) énergiquement fixés sur le complexe d'échange des sols. Alors que les manifestations de ces derniers sont peu visibles dans les paysages, leurs effets sur les sols se révèlent au moins aussi nocifs et plus durables que ceux des sels solubles.

Sols sulfurés et sulfatés acides

Les formations sulfurées de mangroves, caractéristiques de régions nettement plus humides, peuvent néanmoins s'étendre sous les climats arides très contrastés, même dans des situations très sèches. Les eaux superficielles sont alors caractérisées par de très fortes salinités, supérieures à celle de l'eau de mer. C'est le cas, par exemple, sur la côte sénégal-mauritanienne à l'embouchure du fleuve Sénégal, dans le Siné Saloum et même en Casamance au Sénégal, très localement en Somalie, et dans le Nordeste brésilien. Sous ces climats, la mangrove - à l'état de relique - est fragile et protégée de l'action destructrice de la mer par des situations estuariennes ou lagunaires. Elle est souvent remplacée dans ces milieux par des surfaces sans végétation, sursalées, où les sulfures originels ont évolué, par oxydation, en sulfates mixtes caractéristiques de ces zones sulfatées acides.

La séquence d'évolution géochimique qui conduit des sulfures à ces sulfates a été étudiée dans différents sites du Sénégal et il a été montré qu'elle résultait de l'exacerbation de la sécheresse des dernières années au Sahel. Dans les conditions humides et chaudes des côtes équatoriales ou tropicales humides, les sédiments pyriteux de la mangrove, potentiellement sulfatés acides, sont maintenus en conditions anaérobies ; ils sont proches de la neutralité et ils restent modérément salés. Localement, ou temporairement lorsque les nappes s'abaissent, le sulfure de fer est oxydé par voie microbienne et il se forme de la jarosite et de la goéthite. En conditions normalement drainantes, l'acidité produite est évacuée jusqu'à la mer et neutralisée. Mais lorsque des conditions d'aridité se manifestent, la lixiviation des éléments solubles se trouve empêchée ; les sulfates sont maintenus dans la solution du sol et le pH s'abaisse fortement en provoquant une attaque des argiles (acidolyse). Soumis alors aux conditions évaporatoires intenses du climat chaud à longue saison sèche, ces sulfates se concentrent à la surface des sols. Des sels particuliers - sulfates mixtes de fer, d'aluminium et de magnésium - peu connus en milieu naturel, y précipitent de façon parfois spectaculaire et étendue sous forme d'encroûtements blancs ou jaunâtres, pulvérulents : alunite, tamarugite, halotrichite, rozenite, pickéringite, hexahydrite, bloedite, coquimbite, ont été identifiés au Sénégal. En saison suffisamment humide et en système ouvert, ces sels sont entraî-

nés et neutralisés par les bicarbonates marins ; en système moins drainant plus fermé, ils se maintiennent dans les solutions du sol et dans les eaux superficielles et sont redistribués dans les sols et les paysages à la saison sèche suivante.

Si la mangrove *stricto sensu* peut être considérée comme représentative des milieux chauds et humides, l'apparition et l'extension, à ses dépens, des terres extrêmes de son évolution - les sols sulfatés acides à sulfates mixtes - sont des indicateurs de l'aridification. Parfaitement visible actuellement sur la côte ouest-africaine sur une séquence latitudinale qui va de la Guinée humide jusqu'en Mauritanie aride, l'extension relative des différents termes de cette dégradation rapide est en relation avec la diminution récente des précipitations et des écoulements.

Sols Chloruro-sulfatés

Un faciès de salinité largement représenté dans les régions arides est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfates.

L'origine de ces sels est variable :

- elle est bien souvent liée à des invasions marines anciennes ou actuelles plus ou moins loin à l'intérieur des terres (vallée du fleuve Sénégal, certaines îles de la République du Cap-Vert, plaine d'Utique et Chott Djérid en Tunisie) ;

- elle peut être due à une contamination souterraine de nappes alluviales en raison d'une inversion de gradient de pression hydrostatique ;

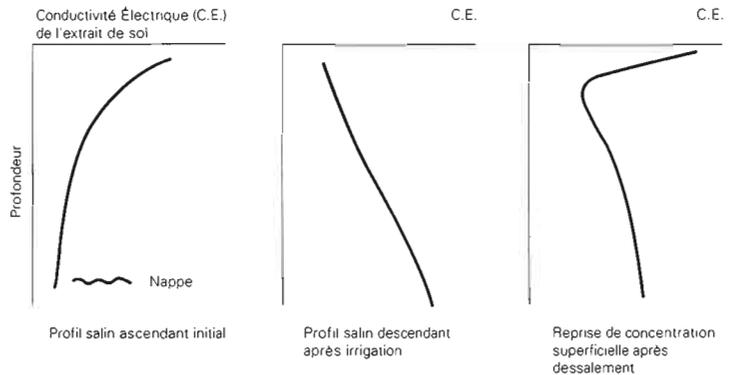
- elle peut être due, également, à des embruns ou au volcanisme ;

- elle peut aussi être secondaire, induite par l'homme sous l'effet d'eaux d'irrigation même peu chargées en chlorures. Ces eaux peuvent être prélevées dans des fleuves (vallée de l'Euphrate en Mésopotamie, Rio Grande au Mexique), ou provenir de nappes profondes contaminées comme en Algérie, en Tunisie, en Libye et en Arabie Saoudite.

Le vaste complexe alluvial sénégal-mauritanien de la basse vallée du fleuve Sénégal a été, et demeure encore, influencé par les sels marins très loin en amont de l'embouchure. En effet, grâce à un ancien golfe aujourd'hui comblé, les eaux océaniques ont pénétré profondément le continent au Quaternaire récent sur près de 300 km. Les sels abandonnés ont contaminé les sédiments fluvio-marins déposés après le retrait de la mer. En outre, jusqu'en 1985, le lit mineur du fleuve restait encore affecté en période d'étiage par une remontée saline océanique sur plus de 250 km. Depuis, cette intrusion peut être considérée comme maîtrisée avec la fermeture du barrage antisel de Diama construit près de l'embouchure. Mais la salure ancienne, dite « fossile », piégée dans les sols et les nappes de la basse vallée, dans le delta essentiellement, demeure importante et certaines nappes alluviales atteignant 2 à 3 fois la salinité de l'eau de mer. Celle-ci est de nature chloruro-sulfatée sodique et magnésienne. Neutre à l'origine, elle a été influencée par l'acidité potentielle de la mangrove initiale et les pH y sont souvent relativement bas (3 à 5). Peu, ou pas, mise en mouvement par les trop faibles précipitations atmosphériques, cette salinité est essentiellement soumise à un fort gradient vertical ascendant. Les sels concentrés à la surface des sols apparaissent sous des formes diverses, efflorescences, croûtes ou formations poudreuses de teintes très changeantes en raison de la forte hygroscopicité de certains d'entre eux (MgCl₂, CaCl₂). La concentration en sels de ces salants humides peut être très élevée, (jusqu'à 67 dS.m⁻¹ de conductivité mesurée sur extrait 1/5 dans le delta).

Un vaste complexe hydroagricole de 400 000 ha est prévu sur cet ensemble alluvial. Le problème posé aujourd'hui est celui de la conduite des différentes spéculations agricoles envisagées - essentiellement riz, canne à sucre et cultures maraîchères -, tout en maîtrisant cette forte salinité. Il est autant plus ardu que le choix d'aménagement retenu exclut tout drainage agricole souterrain et que la pente pratiquement nulle empêche tout drainage naturel. Néanmoins, il a été démontré, par expérimentation au champ, qu'un dessalement était possible sous irrigation permanente (riziculture), grâce à la forte mobilité de ces sels chlorurés entraînés jusqu'aux sables sous-jacents dans les nappes alluviales. Les sols présentent alors un profil salin descendant (fig. 2). Il a été montré également que le système, s'il évoluait bien après abaissement de ces nappes par pompage, pouvait s'orienter à moyen terme vers une salure de type sulfaté beaucoup moins toxique, après élimination préférentielle des chlorures.

FIGURE 2 - Allure de quelques profils salins verticaux caractéristiques des sols des zones tropicales sèches (vallée du fleuve Sénégal).



En basse vallée de l'Euphrate, en Syrie, une salinisation de même nature s'est manifestée sous l'influence de la mise en valeur partout où les conditions naturelles de drainage ont été insuffisantes. Elle concerne essentiellement les alluvions holocènes (peut-être du Rharbien) situées à quelque distance du fleuve. Environ 120 000 ha ont été mis en culture par irrigation depuis les années quarante jusqu'aux années soixante pour une production intensive de coton et de céréales. La nappe s'est enrichie en sels et s'est rapprochée de la surface. Conséquence de l'évaporation, des sels solubles se sont accumulés en grandes quantités dans la couche exploitée par les racines. Limités au début à quelques zones déprimées, ces phénomènes se sont progressivement étendus à des superficies importantes. Les rendements des cultures ont diminué, avec apparition de taches stériles. Le besoin en terres cultivables est aujourd'hui tel dans la vallée que les agriculteurs continuent les cultures jusqu'à la limite extrême de tolérance des plantes aux sels (jusqu'à des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée de 20 à 25 dS.m^{-1} pour le blé et le coton), avec des rendements pratiquement nuls. La culture irriguée n'est pratiquée de façon satisfaisante que sur les parties assez proches du fleuve et sur quelques îlots qui bénéficient d'un drainage suffisant. La salinisation se poursuit sur les zones abandonnées où la nappe reste haute, (la conductivité de l'extrait saturé atteint 60 dS.m^{-1} dans la couche supérieure du sol et dépasse 150 dS.m^{-1} dans les croûtes superficielles). Ce processus s'est réalisé en quelques décennies seulement et, dans les cas les plus défavorables, quelques années ont suffi à rendre des sols inaptes à la culture. Toujours neutre, la salinité est de nature chlorurée sodique et calcique dominante avec localement présence de sulfates de sodium et de magnésium.

Dans les zones abandonnées, le gradient vertical de salinité est ascendant ; il est nul ou descendant en zones cultivées. Les endroits où la salinité chlorurée calcique et magnésienne domine, se présentent sous un aspect très reconnaissable, brun et humide en surface, parfois collant même en saison sèche. En hiver, après une période de dessiccation rapide qui succède à un épisode pluvieux, le sol se couvre d'efflorescences blanches, poudreuses. Dans la mesure où un drainage artificiel est possible, la récupération de ces sols, nécessaire pour les besoins de l'agriculture du pays, implique l'élimination de l'excès de sels par lessivage et la mise en pratique d'une irrigation rationnelle. Ces actions sont essentielles pour la conservation du support de la production agricole du pays, où la ressource en eau est abondante.

Sols sulfatés

Dans les régions méditerranéennes, d'énormes quantités de gypse se sont accumulées dans les matériaux sédimentaires, à partir du Trias et jusqu'au Mio-Pliocène. Au cours du Quaternaire, la dissolution de ces roches a mobilisé d'importantes quantités de ce gypse qui s'est concentré dans les nappes profondes et dans les sédiments plus superficiels. En conditions très arides, sous climat saharien ou subsaharien, ce sulfate de calcium n'est pas éliminé par les eaux pluviales et il s'établit un cycle de dissolution-précipitation avec reprise éolienne. D'immenses régions subdésertiques sont affectées par des manifestations sulfatées diverses qui vont des amas gypseux, roses des sables, dunes et voiles éoliens gypseux, jusqu'aux encroûtements et croûtes indurées, continus, parfois très étendus. Ces accumulations sont souvent liées à l'évaporation d'une nappe salée dont les eaux sont saturées en sulfate de calcium (de 2 à 7 g.l⁻¹ selon la teneur en NaCl). Lorsque son produit de solubilité est dépassé, le gypse précipite à la surface des sols, au niveau des sources, des résurgences diverses ou des zones d'artésianisme comme dans tout le Sud tunisien. En Arabie Saoudite, des croûtes gypseuses tuffacées sont rencontrées à la surface du sol, sur des superficies assez importantes à proximité d'oasis (Al Hassa, Al Jawf). Dans les zones actuellement irriguées avec des eaux sulfato-chlorurées, la précipitation de gypse se produit peu profondément dans les sols au niveau de la frange capillaire de la nappe phréatique. Elle forme des croûtes, ou *terch*, fréquentes dans les sols d'oasis de la Tunisie présaharienne ou du Souf algérien. Elles sont parfois si indurées qu'elles constituent un obstacle à l'enracinement du palmier-dattier.

Sols carbonatés et bicarbonatés

Au nord-est du lac Tchad, plusieurs bras, isolés par des barrages, ont été transformés en polders dans les années cinquante à soixante. La poldérisation est obtenue par évaporation. Le niveau de l'eau s'abaisse de plus de 3 m en concentrant les eaux emprisonnées mais aussi une partie des eaux infiltrées qui proviennent de plans d'eau libre des bras non barrés du lac. Des sols complètement nouveaux se sont formés sur les matériaux des fonds ainsi exondés, localement riches en matière organique et en sulfures. Dans les parties basses des polders, où les eaux piégées initialement se sont concentrées, des sols très alcalins, véritables salants noirs à carbonates de sodium, se sont formés à la partie supérieure des matériaux encore très humides, avec maintien des sulfures, dégradation de la structure et imperméabilisation quasi totale. À la périphérie, les sols, bien structurés, sont peu ou pas salés, neutres, avec une nappe assez profonde, utilisée pour l'irrigation des cultures.

La difficulté au départ était d'obtenir une bonne étanchéité des barrages pour garantir une sécurité suffisante aux polders. Un assèchement rapide était souhaitable pour limiter les effets de la concentration des eaux et le développement des sols carbonatés dans les zones les plus basses. Cet assèchement était sous la dépendance du bilan évaporatoire local et des infiltrations à travers les sables. Commencée à la fin des années soixante et poursuivie depuis, la période de sécheresse a abaissé le niveau du lac de plus de 2 m au milieu des années soixante-dix. La culture a pu continuer néanmoins, car les eaux infiltrées à la périphérie des polders étaient peu, ou pas, chargées en sels du fait de la régulation saline du lac. Les informations font malheureusement défaut pour connaître le comportement des sols et des cultures depuis que les eaux libres du lac ont sensiblement régressé au cours des dernières années. Seules les eaux de nappe, infiltrées à travers les sables, peuvent contribuer à maintenir les cultures. Il est vraisemblable que seule une salinité neutre continue de se développer dans ces polders sous ces conditions.

Sols alcalisés

Des manifestations de salure, autres que ces excès de sels solubles, affectent aussi certains sols des régions arides. Elles sont dues au sodium qui se fixe sur les argiles, lorsqu'il est abondant dans le milieu naturel par rapport au calcium, et aboutit à une sodisation ou alcalinisation des sols. En saison humide, sous l'influence des eaux douces, ce sodium, dont les effets nocifs peuvent se conjuguer à ceux du magnésium, subit une hydrolyse qui provoque la défloculation des argiles, avec augmentation sensible du pH (de l'ordre de 9). Les terres affectées, très dispersées, boueuses, à consistance dite crémeuse, deviennent vite asphyxiantes, peu perméables à l'eau et à l'air, et ingrates à cultiver. En saison sèche, prises en masse, elles atteignent des compacités élevées avec une très faible porosité interne.

Le sodium responsable de cette dégradation peut avoir une origine pétrographique, car certaines roches libèrent par altération des quantités relativement importantes de cet élément. C'est le cas dans le moyen bassin du fleuve Sénégal, aux environs de Bakel, où les schistes sériciteux de la Falémé, qui affleurent de part et d'autre de la frontière sénégal-malienne, sont responsables de la sodisation des sols de piémont. C'est aussi le cas à l'extrême nord du Burkina Faso, dans l'Oudalan, et au Niger, au nord de Niamey dans la région de Tillabéry, sur les deux rives du fleuve Niger, où des affleurements de granites calco-alcalins et alcalins produisent les mêmes phénomènes. Des paysages très particuliers se façonnent avec des terres à morphologie souvent plane, nues ou occupées par une maigre végétation arbustive adaptée, de type *Balanites aegyptiaca*, ou *Acacia seyal* et *A. senegal*. Les vastes surfaces de piémont, érodées en nappe et imperméables, ainsi formées, sont des zones d'accélération du ruissellement responsables du ravinement des sols situés plus en aval.

Dans d'autres cas l'alcalinisation peut résulter d'une fixation progressive du sodium sur le complexe échangeable des sols à partir d'une nappe temporaire actuelle ou ancienne à fort coefficient d'adsorption du sodium par rapport au calcium. Ceci se produit en zones alluviales basses comme dans l'est du Tchad, dans la région d'Abéché, où des sols alcalisés, formés à partir de sédiments fluvio-lacustres affleurant, occupent de larges espaces pavés d'éléments grossiers, incultes, peu ou pas salés, mais à fort rapport Na/Ca échangeables. Les alluvions du Chari et du Logone portent des sols analogues, en position intermédiaire entre les sols sains des levées de berges et les sols salés et hydromorphes des dépressions.

En Tunisie centrale, au Sénégal, au Mali, au Niger, etc., une alcalisation secondaire induite par l'irrigation se manifeste également dans les sols :

- soit directement, par utilisation d'une eau d'irrigation alcalisante, souvent issue de forages (eaux de la plaine de Kairouan et nappes du Maestrichien sénégalomauritanienne) ;

- soit indirectement, par remontée de la nappe phréatique elle-même de médiocre qualité (delta du fleuve Sénégal et moyen Niger).

Les manifestations de cette alcalinité sodique sont diverses selon le climat : effet physique sur la structure, la dispersion des agrégats et sur la perméabilité, et/ou effet chimique avec augmentation du pH et apparition de salants noirs en surface par dispersion de la matière organique (Kouroumari, périmètre de l'Office du Niger, Mali).

En Israël, AMIEL *et al.* (1986) signalent une alcalisation par adsorption de sodium et de magnésium dans les couches profondes du sol, après des apports de longue durée d'amendements gypseux en surface. On observe une dégradation des propriétés physiques ainsi qu'une baisse du rendement des cultures irriguées.

Sous climats arides, le sodium, peu mobilisé naturellement dans les sols, sature plus ou moins le complexe adsorbant des différents horizons des profils ; au contraire, sous des climats plus humides, il est partiellement entraîné en profondeur et différencie d'autres termes de cette évolution alcalisante que sont les sols très particuliers appelés *solonetz* et *solods*. C'est donc le stade « à alcalis » seulement, au cours duquel le sodium ne migre pas, qui caractérise les sols des régions les plus sèches, tropicales sahéliennes et méditerranéennes arides.

CONCLUSION, CONSÉQUENCES POUR L'AGRICULTURE

Lorsqu'elles atteignent les zones d'évaporation, les eaux des zones arides acquièrent des faciès de salinité marqués par leur composition chimique initiale et par des contaminations ou par des pertes en sels qui ont précipité à mesure de leur concentration.

Les sols, salinisés au contact de ces eaux diversement concentrées, ont des faciès chimiques analogues, avec les mêmes pôles sulfatés, chlorurés, carbonatés, sodiques, magnésiens, calciques. Le sodium fixé sur le complexe adsorbant a une action alcalisante particulièrement nocive sur l'ambiance chimique des sols et, en l'absence de sels solubles, sur leurs propriétés physiques.

La pratique de l'irrigation reproduit ces phénomènes et les étend à des sols qui ne seraient pas concernés naturellement. En conséquence, la qualité des eaux d'irrigation doit être appréciée en tenant compte de la nature des sols et de l'aridité du climat.

En climats arides, les besoins des cultures nécessitent des quantités d'eaux très importantes, dont l'apport en sels est le plus souvent loin d'être négligeable. En fin de saison culturale, il en résulte presque toujours des augmentations de salinité dans les sols. Dans les pays méditerranéens et tropicaux, les pluies supérieures à 500 à 600 mm représentent une possibilité de lessivage naturel des sols, très intéressante même sous saison pluvieuse chaude. Cette possibilité existe encore avec des précipitations de l'ordre de 300 à 350 mm par an pour des sols de texture moyenne à légère. Elle n'existe plus au-dessous, c'est-à-dire dans la plupart des pays en zone subdésertique : Sahel, sud du Maghreb et Moyen-Orient. Cette situation explique la très grande importance des phénomènes de salinité dans ces régions dont l'agriculture, plus que toute autre, est en danger.

Sans entrer dans les aspects techniques de l'agriculture irriguée en zones arides, il n'est pas inutile d'en rappeler les principaux impératifs. Les propriétés physiques des sols et leur conservation constituent la base principale de ce système de production.

L'alcalisation des sols est donc tout particulièrement redoutée (*cf. supra*). S'il est possible de l'identifier et d'éviter alors l'installation de périmètres irrigués, il est difficile de l'empêcher et d'y remédier lorsqu'elle se développe sous l'influence d'une eau d'irrigation et réduit les qualités d'infiltration et de percolation des sols.

La salinité de l'eau d'irrigation détermine une *salinité limite* dans le sol, en fonction du système d'irrigation, du bilan évaporatoire et des propriétés hydrodynamiques des sols. Cette salinité limite conditionne le choix des cultures et conduit à écarter les moins tolérantes, car leur croissance et leurs rendements seraient très mauvais, sinon nuls.

Le choix du système d'irrigation joue également un grand rôle. Le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation par aspersion ou à l'irrigation localisée permet de réduire les apports d'eau de 15 à 25 %, ce qui influence le mouvement des sels dans le sol. Cette réduction est considérable aussi bien lorsque la ressource est limitée, que lorsque les équipements sont onéreux.

Un drainage artificiel est nécessaire partout où la nappe ne peut pas évacuer seule les eaux de percolation qui y parviennent dans les conditions d'un périmètre irrigué. De plus cette nappe doit être contenue au-dessous d'une *profondeur critique* susceptible de réduire les remontées salines dans la zone des racines. Sous climat aride, il est possible de mettre en culture des sols très riches en sels solubles par un lessivage intensif préalable ou, lorsque l'aridité n'est pas excessive, par un lessivage progressif. L'aptitude des sols à être lessivés dépend davantage de leurs propriétés physiques que de leur salinité initiale.

En conclusion, l'agriculture irriguée est possible et durable en zones arides, même avec des eaux de qualité médiocre, sous réserve que les projets soient correctement étudiés et mis en œuvre avec des moyens techniques suffisants. Un contrôle permanent doit être exercé sur les moyens de production et une formation complète doit être assurée aux agriculteurs.

G. BOUTEYRE* et J.-Y. LOYER : *pédologues*,
ORSTOM, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1
*G. Bouteyre a été en service détaché jusqu'en 1987 au Gersar
(Groupement d'études et de réalisation des sociétés d'aménagement régional)

BIBLIOGRAPHIE

- AMIEL (A.J.), NAMERI (M.) et MAGARITZ (M.), 1986. - Influence of intensive cultivation and irrigation on exchangeable cations and soils properties : A case study in Jordan Valley, *Israel-Soil Science*, vol. 142, N° 4 : 223-228.
- AUBERT (G.), 1977. - Map of salty soils of Africa, in 1976 International salinity Conference. Lubbock, Texas, USA : 598-604.
- BELKHODJA (K.), 1970. - Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan. Thèse doct. ing., Toulouse. *Bull. Division des Sols* n° 4 DRES Tunis.
- BOULAINÉ (J.), 1954. - La Sebkhia Ben Ziâne et sa lunette ou bourrelet, exemple morphologique formé par la dégradation éolienne des sols salés. *Rev. Geomorph. Dyn.* 5^e année n° 3 : 102-123.
- CHEVERRY (C.), 1974. - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse, Strasbourg, 275 p. *multigr.*
- DUTIL (P.), 1971. - Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse, Strasbourg, 346 p. *multigr.*

- FLORET (Ch.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement. *Trav. et Doc. ORSTOM* n° 150, Paris, 544 p.
- GERSAR, 1983. - Géochimie des eaux d'irrigation en pays arabes. Ministère des Relations extérieures Paris - ACSAD (The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands), Damas. Avec la collaboration du Centre de Sédimentation et de Géochimie de la Surface-CNRS-Strasbourg, 177 p.
- GERSAR, SCET, 1976. - Development of the Lower Euphrates Valley. General Preliminary Projet. Volume A. Present situation and basic improvement data, 194 p. + cartes au 1/50 000 + annexes.
- GERSAR, 1987. - Development of the Lower Euphrates Valley. Irrigation and drainage. Projet Zone 1. Detailed Soil Survey R2A. Text R2B Land Reclamation. General Organisation for Land Development. Ministry of Irrigation. Syrian Arab Republic, 145 p. + 55 p. + cartes au 1/5 000 + Annexes.
- GERSAR, 1987. - Étude des possibilités d'utilisation de l'eau salée pour l'irrigation en vue de la création de fermes pilotes dans les pays arabes - ACTIM (Agence pour la Coopération technique industrielle et économique) Paris - ACSAD (The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands) Damas. 101 p.
- LE BRUSQ (J.-Y.), LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et CARN (M.), 1987. - Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Sc. du sol* 1987, n° 3, Plaisir, France : 173-184.
- LOYER (J.-Y.), 1989. - Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine sahélien. In «Le Risque en Agriculture», à travers champs : 531-539, ORSTOM, Paris.
- LOYER (J.-Y.), 1989. - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 137 p.
- LOYER (J.-Y.), MOUGENOT (B.) et ZANTE (P.), 1986. - Changements récents induits par l'intervention humaine sur les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal. Symposium International INQUA - Dakar, Avril 1986 Ed. ORSTOM, Paris : 273-277.
- LOYER (J.-Y.), BOIVIN (P.), LE BRUSQ (J.-Y.) et ZANTE (P.), 1986. - Les sols du domaine fluvio-marin de Casamance : Évolution récente et réévaluation des contraintes majeures par leur mise en valeur. 3^e Symposium international «Sols sulfatés acides», Dakar 6-11 Jv. 1986, *ILRI* pub. 44 : 16-23.
- ROCHE (M. A.), 1973. - Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse Univ., Paris VI, ORSTOM, Paris, 318 p. *multigr.*
- SIRCOULON (J.), 1987. - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du xx^e siècle. *Proceedings of the Vancouver Symposium IAHS Publ.* n° 168 : 13-25.
- SOGREAH. - Un exemple d'évolution des sols après une trentaine d'années d'irrigation. (Office du Niger, Mali). 4^e Conférence régionale afro-asiatique de la CIID., Lagos, Nigéria vol. II, n° 08 : 103-108.