

Salinisation des sols et gestion des sols salés

5.1. Introduction

Le terme de salinisation définit un processus d'accumulation ou d'enrichissement en sels (du latin *sal*) qui s'exprime dans tous les environnements terrestres, aquatiques et atmosphériques, notamment dans le sol, objet naturel triphasé (solide-aqueux-gazeux) par excellence. La salinisation se produit soit naturellement dans les eaux de surface (rivières, lacs), les eaux souterraines, les environnements secs, les sols et les zones humides, soit artificiellement dans les sols et les eaux au cours des activités anthropiques (irrigation et fertilisation des sols, rejets domestiques et industriels, etc.).

5.2. Les milieux salés naturels

5.2.1. *Les sels, entités dissoutes et particulières*

Les sels se définissent de plusieurs manières selon le contexte choisi. Pour un chimiste, un sel est avant tout le produit de l'action d'un acide fort et d'une base forte (neutralisation) ou d'un acide fort et d'un métal non noble. Pour un géoscientifique, les sels définissent tous les minéraux susceptibles d'être formés par la concentration et la combinaison des ions majeurs (chlorure, sulfate et carbonate pour les anions ; calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations). Des ions mineurs ou traces peuvent être associés (borate, nitrate, phosphate, métaux lourds). Le pédologue des sols salés ne

considérera que les sels plus solubles que le sulfate de calcium hydraté (gypse des sols gypseux) et les carbonates de calcium et/ou magnésium (calcite, dolomite des sols calcaires). Il s'agit notamment de chlorure de sodium (halite), mieux connu des êtres humains sous le vocable « sel de cuisine ». Celui-ci est ingéré quotidiennement pour satisfaire leurs besoins physiologiques au même titre que ceux des autres êtres vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux [FLO 05, PAY 16].

Les sels sont présents dans la nature sous deux états caractéristiques :

- un état cristallisé facilement observable dans les systèmes solides (roches, sols) ;
- un état dissous non perceptible dans les systèmes hydriques (eaux continentales, marines, météoriques, géothermales), magmatiques (laves fluides, visqueuses) et colloïdaux (minéraux argileux, matière organique).

Les sels passent de l'état cristallisé à l'état dissous par dissolution et, inversement, de l'état dissous à l'état cristallisé par précipitation, les deux processus étant intimement liés au cours du cycle planétaire de l'eau.

5.2.2. Des paysages typiques

La salinisation des milieux naturels, ou salinisation dite « primaire », existe sous toutes les latitudes et sous tous les climats [CHE 98, SZA 89]. C'est notamment le cas lorsque des sources de sels sont proches en surface comme en profondeur et où les processus évaporatoires dominent d'une manière permanente ou temporaire.

Les sels ont :

- une origine continentale (dépôts « fossiles » évaporitiques ou diapiriques ; roches magmatiques et/ou volcaniques riches en minéraux altérables, notamment sodiques ; sources géothermales ; eaux de rivières et lacs très minéralisées ; intrusions d'eaux souterraines, artésiennes ou non, dans les dépôts salifères) ;
- une origine océanique ou marine (intrusions souterraines, submersions temporaires par des raz de marée exceptionnels).

Les pourtours des lacs salés, les dépressions endoréiques alternativement humides et sèches (*chotts*, *sebkhas*, *takyrs*, *playas* ou *salars*), les écosystèmes fluvio-marins inondables (mangroves, vasières estuariennes, marais et prairies salés) et les côtes maritimes (lagunes, *sebkhas*) sont autant de sites naturels salinisés (figure 5.1). Des microorganismes spécifiques, dits « halophiles », s'y développent, parfois en conditions extrêmes [ORE 02].

5.2.3. Des mouvements continuels de sels

La dynamique des sels, à l'état cristallisé et/ou dissous, est permanente ou temporaire, diffuse ou massive : locale ou généralisée, lente ou rapide, superficielle ou profonde. Elle est étroitement liée à la mobilité des fluides aqueux, visqueux et gazeux circulant sur et dans les formations superficielles des croûtes continentales et océaniques. Les processus de salinisation (gain de sels) et désalinisation (perte de sels) assurent la redistribution des sels dans les paysages naturels. Ils sont constamment actifs et leurs cinétiques sont variables. La dissolution des minéraux prédomine sous les climats humides (érosion géochimique), tandis que les climats secs favorisent leur précipitation (néoformation géochimique).



Figure 5.1. Milieu continental salé en bordure de l'oued Melah (« salé » en langue arabe) : efflorescences salines et végétation d'halophytes ; région de Metlaoui, Tunisie méridionale (photo : J.-P. Montoroi)

Sous forme dissoute voire particulière (sels peu solubles), les sels sont transportés verticalement et latéralement par les eaux météoriques, les eaux de surface (pluies, rivières, lacs, mers intérieures, océans) et les eaux souterraines (aquifères libres ou confinés ; sources résurgentes, artésiennes ou géothermales). Ils sont aussi transportés à l'état liquide-solide plus ou moins visqueux par les coulées de laves superficielles et souterraines. Les sels cristallisés sont régulièrement transportés au cours de périodes de sécheresse prolongée et par des vents continentaux puissants (sirocco, harmattan, mistral, etc.). Selon l'état d'humidité des formations superficielles, des redistributions locales sont également observées. Depuis les plans d'eau

océaniques, maritimes et lacustres, les embruns éoliens transfèrent les sels dissous et/ou finement cristallisés sur les surfaces terrestres des alentours. C'est particulièrement le cas pour les embruns marins qui peuvent se déposer tout le long des côtes et, parfois, à plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres. Plus épisodiquement, les éruptions volcaniques dites « grises » sont source de sels cristallisés dans les dépôts pyroclastiques projetés et dispersés dans l'atmosphère sur des distances variables.

Par ailleurs, il faut toujours avoir à l'esprit que les ions constitutifs des sels sont partout associés aux phases minérales solides sous forme échangeable, absorbée ou adsorbée. En réagissant physico-chimiquement avec les agents de transport liquide et gazeux, ils se transforment, se recombinaient et participent aux déplacements des particules solides d'origine autochtone (dynamique terrestre) ou allochtone (dynamique extra-terrestre par l'impact de météorites devenus terrestres), de dimensions allant du microscopique (mouvements d'interactions ioniques) au macroscopique (mouvements des plaques tectoniques), et ce, à toutes les échelles de temps et d'espace. Au même titre que pour l'eau, on peut parler de cycle des sels solubles sur la planète Terre (figure 5.2) [CHH 96, WIL 99].

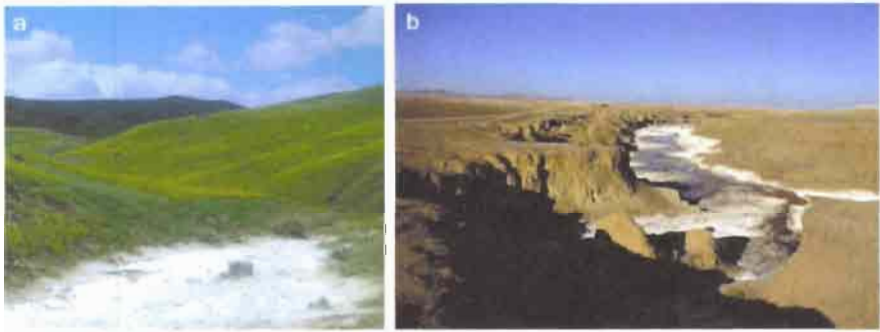


Figure 5.2. Salinisation apparente des paysages (a) de collines, (b) de piedmont par écoulement souterrain et/ou fluvial ; région de la dorsale atlasienne, Tunisie centrale (photo : J.-P. Montoroi)

5.2.4. Services écosystémiques

Les paysages salés naturels rendent aux hommes des services écosystémiques notables : production de sels (saliculture) et d'espèces végétales (haloculture) consommables. L'évaporation naturelle des eaux concentre les éléments minéraux dissous et entraîne la précipitation d'un cortège de sels selon un ordre thermodynamique. Les sels cristallisés à la surface des sols sont régulièrement ramassés par

les populations pour leurs besoins propres et ceux des animaux domestiques [BER 72]. Le processus de formation des sels est artificiellement forcé par l'Homme dans l'exploitation solaire des marais salants, en zones côtières ou estuariennes, et dans l'exploitation ignée de fours appropriés en milieu continental. L'exploitation salicole, solaire ou ignée, se fait soit traditionnellement à l'échelle villageoise, soit industriellement à l'échelle régionale voire nationale (figure 5.3).

Une végétation spécifique, dite halophytique, s'est adaptée aux environnements salés [FLO 08]. Selon le degré de salinité des sols, elle constitue un couvert plus ou moins épars qui peut être brouté par les animaux domestiques (pastoralisme salé) et sauvages. Les halophytes occupent les plaines alluviales deltaïques et endoreïques qui sont temporairement humides. Ces zones humides sont des réserves de biodiversité protégées par des conventions internationales. La production traditionnelle et industrielle d'halophytes se développe pour des applications gastronomiques, médicinales et cosmétiques.

Par ailleurs, l'exploitation minière de dépôts géologiques salifères produit les sels nécessaires non seulement aux besoins alimentaires (nutrition, conservation), mais également aux besoins industriels (procédés chimiques, salage des routes, etc.). Des métaux utiles comme le lithium sont très présents dans les évaporites.



Figure 5.3. Récolte de sel formé (a) en surface de sols salés incultes, tannes nus de Casamance, Sénégal ; (b) dans un marais salant, lagune de Vermelha, Brésil (photos : J.-P. Montoroi)

5.3. Caractérisation et fonctionnement des sols salés

5.3.1. Diagnostic du degré de salinisation

Hormis les manifestations visibles de la salinité à la surface des sols (efflorescences, taches d'infertilité, etc.), il est difficile de faire un diagnostic sur

l'ampleur du phénomène de salinisation sans avoir à passer par une phase analytique préalable [RHO 92]. Mesurer la salinité d'un sol se fait par plusieurs approches, selon l'objectif que l'on s'est fixé (tableau 5.1). Les valeurs de $CE_{1/x}$, CE_{es} ou CE_{ss} sont interprétables en valeurs relatives, les valeurs absolues étant dépendantes du degré de dilution des solutions extraites. Les valeurs de CE_a intègrent un volume de sol qui peut être électriquement conducteur par d'autres facteurs que la salinité (teneur en argile et/ou en eau).

5.3.2. Processus physico-chimiques intrinsèques

5.3.2.1. Salinisation stricto sensu

Le processus de salinisation des sols se produit lorsque la minéralisation de la solution du sol dépasse un certain seuil sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, drainage interne insuffisant, altération de minéraux et accumulation) [BRE 82, FIT 03, MAR 06].

Méthodes de laboratoire	Paramètres mesurés	Phase impliquée	Instruments de mesure
Prélèvements de sol	CE extrait dilué [$CE_{1/x}$]	aqueuse minéralisée	– conductivimètre électrique – analyses chimiques
	CE extrait saturé [CE_{es}]		
Méthodes de terrain	Paramètres mesurés	Phase impliquée	Instruments de mesure
Spatialisante (capteurs mobiles)	CE globale (ou apparente) [CE_a]	– aqueuse minéralisée – solide (argile)	– conductivimètre électromagnétique – tomographie électrique
	CE globale (ou apparente) [CE_a]	– aqueuse minéralisée – solide (argile)	– sonde capacitive (TDR, 5FT) – sonde quadripôle
Stationnelle (capteurs <i>in situ</i>)	CE solution sol [CE_{ss}]	aqueuse minéralisée	– capteur de salinité (ou salinity-sensor) – céramique poreuse

Tableau 5.1. Méthodes de diagnostic de la salinité des sols

5.3.2.2. Salinisation et sulfato-réduction

En milieu côtier tropical ou tempéré, riche en dépôts organiques (mangrove, marais maritime et « polder »), le processus de salinisation est associé à un processus de sulfato-réduction microbienne du fer et du soufre qui dépend des conditions hydrologiques locales : des périodes réductrices (précipitation de sulfures de Fe tels que la pyrite) alternent avec des périodes oxydantes (acidification, libération de sulfates et précipitation de jarosite) [DEN 95, FAL 14, FAN 97, FIT 03, MON 96].

5.3.2.3 Sodisation

Le processus de sodisation se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na^+ . Les agrégats deviennent instables à partir d'un certain seuil et la dégradation des propriétés physiques du sol est potentielle. Les cations présents en solution dans le sol s'échangent sur le complexe organo-minéral. On définit le rapport Na/CEC ou le paramètre ESP (*Exchangeable Sodium Percentage*) pour estimer le degré de saturation du complexe d'échange cationique (CEC). La modification du pourcentage de sodium par une solution caractérise sa sodicité. De nombreux auteurs ont étudié les relations entre les cations en solution et les cations adsorbés sur le complexe en définissant des coefficients de sélectivité selon la nature des minéraux argileux présents. Une relation lie le taux de sodium adsorbé SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) à la composition chimique de la solution du sol exprimée en $\text{mol}_c \cdot \text{L}^{-1}$:

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2)^{0.5}$$

Les paramètres ESP et SAR sont liés par la relation empirique [RIC 54] :

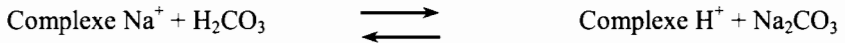
$$\text{ESP} = \text{Na}^+ / \text{CEC} (\%) = 100 / (1 + (1 / (0,0147 \text{ SAR} - 0,0126)))$$

Ces relations sont en fait peu fiables pour déterminer précisément la composition chimique du complexe d'échange. De nouveaux concepts ont été proposés pour le calcul du SAR [RIE 91].

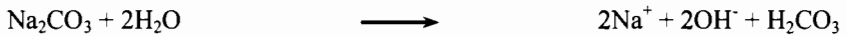
5.3.2.4. Alcalisation

Le processus d'alcalisation intervient lorsqu'un sol à complexe saturé en sodium se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion Na^+ et les protons au moment d'une humectation.

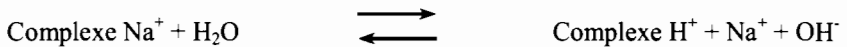
S'il s'agit d'un apport météorique toujours légèrement chargé en CO_2 dissous, la réaction d'échange est :



Comme Na_2CO_3 est facilement soluble, des ions Na^+ et OH^- sont libérés en solution :



S'il s'agit d'une eau douce (irrigation), la réaction peut s'écrire plus simplement :



La sodisation et l'alcalinisation étant étroitement liées, on parle plus globalement de processus d'alcalinisation. Les réactions d'échange Na^+/H^+ provoquent une dégradation des propriétés physiques du sol à cause de la protonisation des minéraux argileux et de l'augmentation du pH. Les argiles protonées deviennent plus fragiles et sont facilement dispersables. La dispersion de l'argile crée un horizon compact à structure prismatique, massive ou colonnaire. La porosité se réduisant, la perméabilité à l'eau et à l'air des sols alcalinisés diminue. Des conditions réductrices peuvent apparaître, favorisant les pertes d'azote par dénitrification. Les valeurs de pH deviennent supérieures à 8,5 et peuvent atteindre 10, la matière organique se solubilise et migre. La désaturation partielle en Na^+ du complexe organo-minéral favorise l'éluviation de l'argile associée à une baisse du pH dans les horizons supérieurs et son lessivage vers les horizons inférieurs. La désaturation complète en Na^+ conduit à une différenciation nette du solum avec, en surface, un horizon blanchi et acidifié (pH entre 4 et 6,5) et, en profondeur, un horizon alcalinisé (pH entre 9 et 10).

Les variations saisonnières du régime hydrique et de l'ambiance physico-chimique d'un sol argileux, salé et sodique sont à l'origine de transformations morphologiques importantes. Des processus physiques, tels que la fracturation, l'éclatement, l'entraînement, l'effondrement ou la dispersion des constituants solides modifient leur assemblage, leur distribution et leur orientation. La réorganisation pédologique peut conduire à la formation d'un réseau fissural et à son développement selon l'histoire hydrique du matériau, notamment les contraintes maximales qu'il subit.

Des expérimentations de laboratoire montrent que les transferts de solution peuvent être très lents du fait de la réorganisation des particules argileuses au cours de la dessiccation. L'édifice cristallin de l'illite se désagrège sous l'effet de la pression de l'air contenu dans la porosité de ce minéral argileux, notamment si la vitesse d'humectation est élevée. Lors de la dessiccation, le matériau illitique tend

vers la compaction. En revanche, la montmorillonite conserve sa cohésion car sa faible conductivité hydraulique évite la surpression de l'air. Une pression de gonflement se développe lentement et un système fissural apparaît au cours de la dessiccation. Une solution saline concentrée augmente la conductivité hydraulique d'une montmorillonite, tandis que son gonflement diminue [TES 92]. Les processus de fissuration et de compaction dépendent essentiellement des caractéristiques minéralogiques des particules argileuses, tandis que le mécanisme de gonflement des argiles peut être favorisé par leur environnement géochimique : on obtient ainsi un gonflement significatif avec une argile saturée en sodium. Lorsque les solutions sont fortement minéralisées, il n'y a pas désagrégation mais plutôt floculation des argiles tant que les processus d'alcalinisation ne se produisent pas.

5.3.3. Concentration et voies d'évolution chimique de l'eau du sol

5.3.3.1. Alcalinité résiduelle

L'alcalinité totale ($\text{Alc}_{\text{totale}}$) d'une solution est mesurée par titration et correspond à la quantité d'ions H^+ nécessaires pour neutraliser les anions accepteurs de protons. En négligeant les anions organiques (R-COO^-), elle est donnée selon la relation générale [ALD 76] :

$$\text{Alc}_{\text{totale}} (\text{mol}_c \cdot \text{L}^{-1}) = (2\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) + (3\text{PO}_4^{3-} + 2\text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{PO}_4^-) + (2\text{S}^{2-} + \text{HS}^-) + (\text{H}_3\text{SiO}_4^- + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}) + \dots + \text{OH}^- - \text{H}^+$$

$$\text{ou } \text{Alc}_{\text{totale}} = \text{Alc}_{\text{carbonates}} + \text{Alc}_{\text{phosphates}} + \text{Alc}_{\text{sulfures}} + \dots + \text{OH}^- - \text{H}^+$$

En prenant en compte la relation de neutralité électrique, on peut aussi la définir comme le bilan des autres espèces ioniques présentes en solution :

$$\text{Alc}_{\text{totale}} (\text{mol}_c \cdot \text{L}^{-1}) = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Mg}^{2+} + 3\text{Al}^{3+} + 2\text{Fe}^{2+} \\ \text{Cl}^- - \text{F}^- - 2\text{SO}_4^{2-} - \text{NO}_3^-$$

L'alcalinité des eaux naturelles est le plus souvent assimilée à la seule alcalinité carbonates ($\text{Alc}_{\text{totale}} \approx \text{Alc}_{\text{carbonates}} \approx 2\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$). Les réactions de dissolution lors de l'altération des minéraux augmentent l'alcalinité des solutions, car elles sont sources de cations. En milieu acide, l'alcalinité est négative. À une température donnée, si on ne considère que le pouvoir tampon de l' $\text{Alc}_{\text{carbonates}}$, l' $\text{Alc}_{\text{totale}}$ d'une solution ne dépend que de la pression partielle en CO_2 (p_{CO_2}) et du pH. L'augmentation de la p_{CO_2} du sol entraîne l'accroissement de l'alcalinité de la solution du sol.

La notion d'alcalinité résiduelle permet de mieux cerner les phénomènes de sodisation qui ne sont pas seulement la résultante d'une augmentation absolue du sodium dans la solution mais surtout celle d'une baisse brutale de la teneur en certains ions par suite de la précipitation de minéraux les contenant. Par exemple, la calcite est un minéral peu soluble qui précipite très rapidement au cours de la concentration des solutions. On définit l'alcalinité résiduelle calcite (ARC) comme étant la différence entre les moles charge de carbonates et celles de calcium, selon la relation :

$$\text{ARC (mol}_c \text{ L}^{-1}) = 2\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- - 2 \text{Ca}^{2+} = \text{Alc. carbonates} - 2 \text{Ca}^{2+}$$

Connaissant la valeur de l'ARC, il est possible de prévoir le sens d'évolution des solutions lors de leur concentration dès que la saturation avec la calcite est atteinte :

- si $\text{ARC} > 0$, la teneur en carbonates continue à croître tandis que la teneur en calcium diminue en participant à la précipitation de la calcite. Concomitamment, le sodium se concentre et sature progressivement le complexe organo-minéral par échange et adsorption ionique (voie alcaline ou carbonatée) ;

- si $\text{ARC} < 0$, l'alcalinité en carbonates décroît et la teneur en calcium augmente à pH neutre empêchant les effets néfastes du sodium (voie saline neutre) ;

- si $\text{ARC} = 0$, les teneurs en carbonates et en calcium restent constantes avant et après précipitation de la calcite jusqu'à épuisement.

On peut étendre le concept d'alcalinité résiduelle à d'autres minéraux susceptibles de précipiter successivement au cours de la concentration des solutions, en soustrayant de l'alcalinité carbonates les moles charge de cations et en ajoutant les moles charge d'anions participant aux précipitations [ALD 76]. L'alcalinité résiduelle généralisée (ARG) est définie par la relation :

$$\text{ARG (mol}_c \text{ L}^{-1}) = \text{Alc. carbonates} - n \text{ cationn}^+ + m \text{ anionm}^-$$

Par exemple, pour le gypse précipitant après la calcite, on définira l'alcalinité résiduelle calcite-gypse (ARCG).

5.3.3.2. Spéciation ionique, adsorption ionique et modèles géochimiques

L'analyse chimique d'une solution électrolytique, exprimée en termes de concentrations totales des éléments dissous, ne distingue pas les formes sous lesquelles se trouvent les espèces aqueuses. Celles-ci sont présentes sous forme d'ions simples ou libres et d'ions complexes (appelés aussi paires d'ions), qui sont

une combinaison, chargée ou neutre, de plusieurs ions simples. Les différentes formes sont en équilibre entre elles dans la solution aqueuse et peuvent dépendre du pH. La distribution des espèces aqueuses s'obtient par un calcul faisant intervenir les réactions d'équilibre entre espèces aqueuses et cristallisées et entre espèces aqueuses elles-mêmes. Les résultats sont exprimés soit en termes de concentration (en mol L⁻¹), soit en termes d'activité, paramètre sans dimension, qui est liée à la concentration par un coefficient d'activité (en L mol⁻¹).

L'activité d'un ion ou d'une espèce aqueuse représente en fait sa concentration efficace ou sa concentration thermodynamique. C'est en termes d'activité ionique que s'expriment les constantes d'équilibre des réactions chimiques [SPO 89]. La valeur des coefficients d'activité de chaque espèce est approchée à l'aide de lois empiriques (Debye-Hückel, Davies, etc.), qui sont établies en fonction de la force ionique de la solution et de paramètres soit dépendants de la température, soit relatifs à la taille des ions hydratés. Des programmes informatiques permettent le calcul de spéciation ionique à l'équilibre (25 °C, 1 atm) et dans des limites bien spécifiques. Les mécanismes d'adsorption ionique sur les surfaces minérales (colloïdes argileux, silice, oxydes) et/ou organiques sont modélisés en prenant en compte un système multicouche d'interactions électrostatiques et la dimension des ions hydratés [CAM 91].

5.3.4. Minéralogie des efflorescences salines

Selon le faciès chimique initial des solutions salées, c'est-à-dire le rapport des ions entre eux, leur concentration emprunte différentes voies de précipitation de sels (acide, saline neutre, alcaline). Les principaux sels que l'on peut rencontrer dans les efflorescences ou croûtes salines sont :

- pour la voie acide : la rozénite (Fe^{II}(SO₄), 4H₂O), l'alunogène (Al₂(SO₄)₃, 17H₂O), la tamarugite (NaAl(SO₄)₂, 6H₂O), la jarosite (KFe^{III}₃(SO₄)₂(OH)₆), la natrojarosite (NaFe^{III}₃(SO₄)₂(OH)₆), l'halotrichite (Fe^{II}Al₂(SO₄)₄, 22H₂O) (figure 5.4) ;

- pour la voie saline neutre : la calcite (CaCO₃), le gypse (CaSO₄, 2H₂O), les sulfates magnésiens (Mg(SO₄), nH₂O), l'halite (NaCl), la sylvite (KCl) ;

- pour la voie alcaline : la calcite ou la calcite magnésienne, la fluorine (CaF₂), la thénardite (Na₂SO₄), la mirabilite (Na₂SO₄, 10H₂O), les silicates magnésiens, le natron (Na₂CO₃, 10H₂O), le trona (Na₃H(CO₃)₂, 2H₂O).

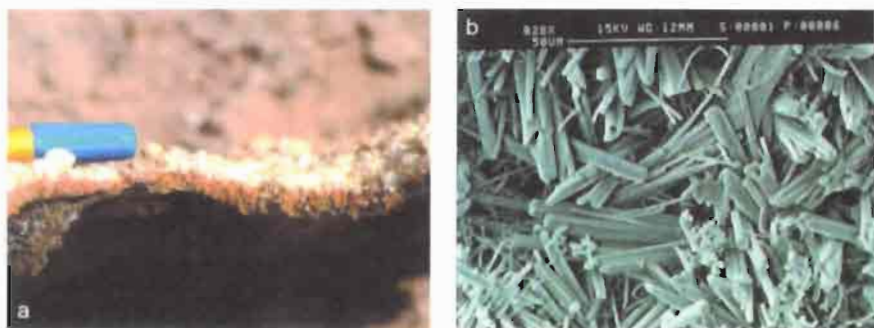


Figure 5.4. Sels observés en surface d'un sol sulfaté acide (a) à l'échelle macroscopique sous forme de croûtes indurées, Bao Bolon, Sénégal ; (b) à l'échelle microscopique, cristaux d'halotrichite, Djiguinoum, Casamance, Sénégal (photos : J.-P. Montoroi).

5.4. Typologie des sols salés

5.4.1. Caractéristiques pédologiques

Selon l'intensité des processus de salinisation et d'alcalinisation mis en jeu, on définit trois grandes catégories de sols salés : les sols salins *stricto sensu*, les sols salins à sulfato-réduction/oxydation et les sols alcalins [BRE 82, CHE 98, LOY 95, SUM 93]. Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols salins et alcalins sont présentées dans le tableau 5.2.

Caractéristiques	Sol non salin	Sol salin			Sol alcalin	
		calcique-magnésique	sodique	à sulfato-réduction	indifférencié	lessivés et dégradés
CE ^m (dS m ⁻¹)	< 4	> 4	> 4	> 4	indifférent	< 4
Na/CEC (%)	< 15	< 15	> 15	< 15	> 15	> 15
pH du sol	neutre	< 8,5	< 8,5	> 8,5 ou < 4	> 8,5	indifférent à acide
Structure du sol ¹²⁾	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	d.	d.

Efflorescences	-	chlorures de Na, Ca, Mg (salant blanc)	chlorures de Na, sulfates Na, Mg (salant blanc)	sulfates d'Al et de Fe	humates alcalins (salant noir)	-

Tableau 5.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols salins et alcalins.

⁽¹⁾ conductivité électrique de la solution du sol sur extrait saturé ; ⁽²⁾ n.d. : structure non dégradée, d. : structure dégradée

5.4.2. Distribution verticale de la salinité

La distribution verticale de la salinité du sol ($CE_{1/x}$, CE_{es} , CE_a ou CE_{ss} , voir tableau 5.1) définit le profil salin correspondant à une dynamique saline particulière. On en distingue plusieurs types appartenant soit à des environnements distincts, soit au même environnement lorsque les conditions hydrologiques changent saisonnièrement (figure 5.5). La présence d'une nappe salée peu profonde et d'une végétation halophyte très résistante mais peu couvrante induit un processus ascendant de salinisation (salinité maximale en surface), tandis qu'une bonne couverture végétale (pelouse à halophytes) favorisant l'infiltration et le drainage des sels crée un processus descendant de salinisation (salinité maximale en profondeur). Des apports d'eau en surface (pluie ou irrigation) sur un profil salin ascendant produisent une dissolution des sels précipités et une migration des sels dissous en profondeur (désalinisation superficielle et salinité maximale au sein du profil de sol).

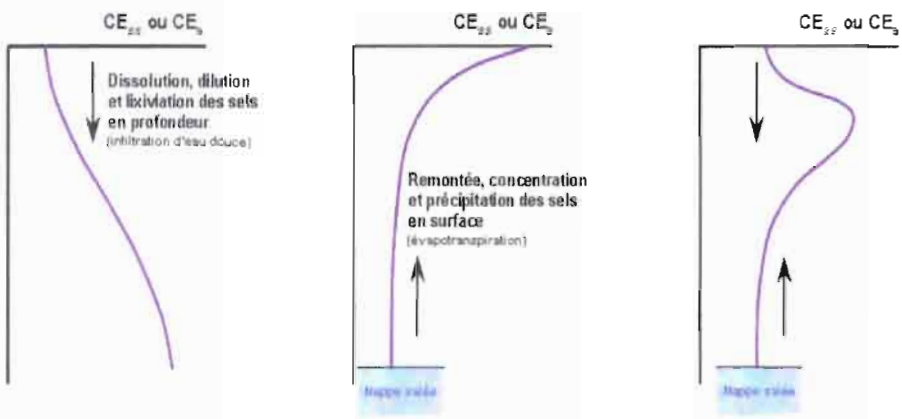


Figure 5.5. Principaux types de distribution verticale de la salinité

5.4.3. Distribution spatiale de la salinité

La distribution spatiale de la salinité du sol est transcrite à partir de documents cartographiques, dont la précision dépend de la méthode de mesure, de l'échantillonnage et du modèle d'interpolation choisis (figure 5.6). Les cartes produites sont des outils importants pour connaître les zones à forte contrainte saline et orienter les actions de remédiation. Cependant, elles offrent l'inconvénient de ne donner qu'une information qualitative et d'intégrer d'autres facteurs influençant la conductivité électrique (CE) (argile, teneur en eau, etc.). Des mesures plus fines, mais plus consommatrices en temps, sont nécessaires pour quantifier les processus.

5.4.4. Classification des sols salés

Le terme générique de « sols salés » prend communément d'autres appellations : sols salins et sodiques, sols salsodiques, sols halomorphes. Plus spécifiquement, les sols salins sont aussi nommés sols affectés par les sels, et, pour les sols alcalins, on parlera de sols à alcali ou de sols sodiques. D'une façon plus normative, les sols salés sont répertoriés dans les classifications pédologiques, nationales et internationales, sous de nombreux vocables. Les principales appellations sont résumées dans le tableau 5.3, en considérant le référentiel pédologique français [BAI 09], le référentiel pédologique mondial [IUS 14] et la classification américaine des sols [SSS 14]. On notera que les valeurs de seuil pour EC (pour *Electric Conductivity*) et ESP-SAR ne sont pas les mêmes dans tous les systèmes de classification, en particulier dans la classification australienne.

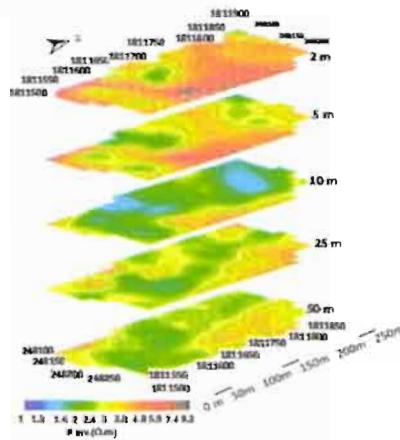


Figure 5.6. Distributions verticale et spatiale de la CE_a par la méthode électromagnétique en domaine temporel (sols salés et formations superficielles de la région de Khon Kaen, nord-est de la Thaïlande), d'après [MON 04]

Processus pédologiques		[US 14]		[BA1 09]		[SSS 14]
		Typologie	Horizon diagnostic	Typologie	Horizon diagnostic	
Salinisation <i>stricto sensu</i>	Complexe calcique-magnésique	Solontchak (Carbonatic)	salic	Salisol carbonaté	salique (Sa)	Aridisol salic
	Riches en sulfures de fer réduit	Solontchak (Chlorodic ou Sulphatic)	salic	Salisol chloruré ou sulfaté	salique	
Salinisation et sulfato-réduction	Complexe ferreux-aluminique	Fluvisol ou Gleysol (Protothionic)	Sulfidic matinal	Thiosol	matériau thionique ou sulfidique (TH)	
	Complexe ferreux-aluminique	Fluvisol ou Gleysol (Hyperthionic ou Orthothionic)	thionic	Sulfatosol salique, rubique ou alunique	sulfaté (U)	
Alcalinisation	Profil indifférencié	Solonetz	natric	Sodisol indifférencié	Sodique (NaA, NaS)	
	Profil lessivé	Haplic Solonetz	natric	Sodisol solonetzique	éluvial non albique (Ena) sodique argilluvial (NaBT)	« Natric Great Groups » de plusieurs « Orders » (Inceptisol, Entisols, Aridisols)
	Profil dégradé	Solonetz (Albic)	natric	Sodisol solodisé	éluvial albique (Ea) sodique argilluvial (NaBT)	

Tableau 5.3. Principales classifications des sols salins et alcalins

5.4.5. Répartition mondiale des sols salés

Les sols salés sont naturellement présents dans plus de 100 pays du monde. Les superficies couvertes varient selon les auteurs, 9,55 millions de km², soit 6,4 % des continents ou 19 fois le territoire français selon [SZA 89], 8,31 millions de km² selon [MAR 05] (figure 5.7).

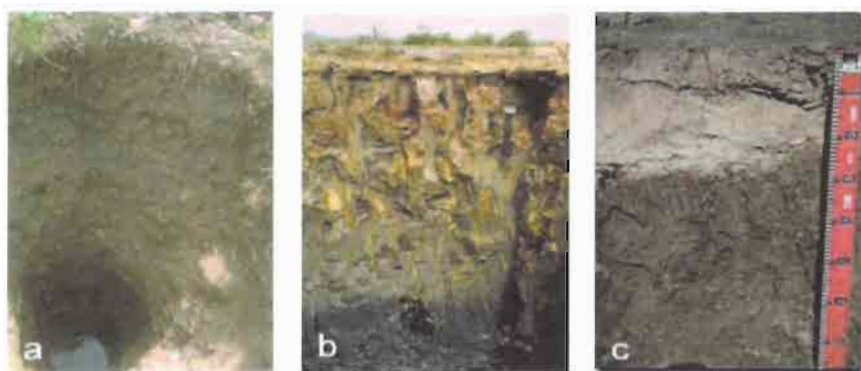


Figure 5.7. Principaux types de sols salés [IUS 14] : (a) solontchak (sol salin stricto sensu) ; (b) gleysol hyperthionic (sol salin à sulfato-réduction) ; (c) solonetz (sol alcalin) (photos : J.-P. Montoroi, M. Imhoff)

5.5. Salinisation secondaire des sols

5.5.1. Apports anthropiques de sels dans les sols

La salinisation dite « secondaire » des sols se produit par les activités humaines qui concentrent ou transfèrent des masses d'eau plus ou moins minéralisée (eau souterraine, eau de surface, eau de mer) et des particules solides et gazeuses. Les apports anthropiques de sels dans les sols sont spécifiques aux milieux irrigués [SER 78], salés et non salés, par le pompage des eaux douces et/ou salées, souterraines (forages) et/ou superficielles (barrages, rivières). Ils se généralisent à tous les types de sols, irrigués et non irrigués, salés et non salés, par les pollutions indirectes (domestiques, urbaines, industrielles) et par les apports agricoles (fertilisations minérales et/ou organiques). Les processus de salinisation secondaire sont cycliques, dans le temps et/ou l'espace, en milieu urbain et/ou agricole (figure 5.8). La transformation industrielle des minerais, la décomposition des produits industriels contenant des sels, l'altération biogéochimique des édifices et infrastructures urbains, le salage des routes, etc., sont d'autres sources anthropiques de sels enrichissant localement les sols. La déforestation par brûlis, l'érosion

(éolienne, chimique, hydrique), le réchauffement climatique sont autant de phénomènes naturels que de forçages liés à des activités humaines [GHA 95].

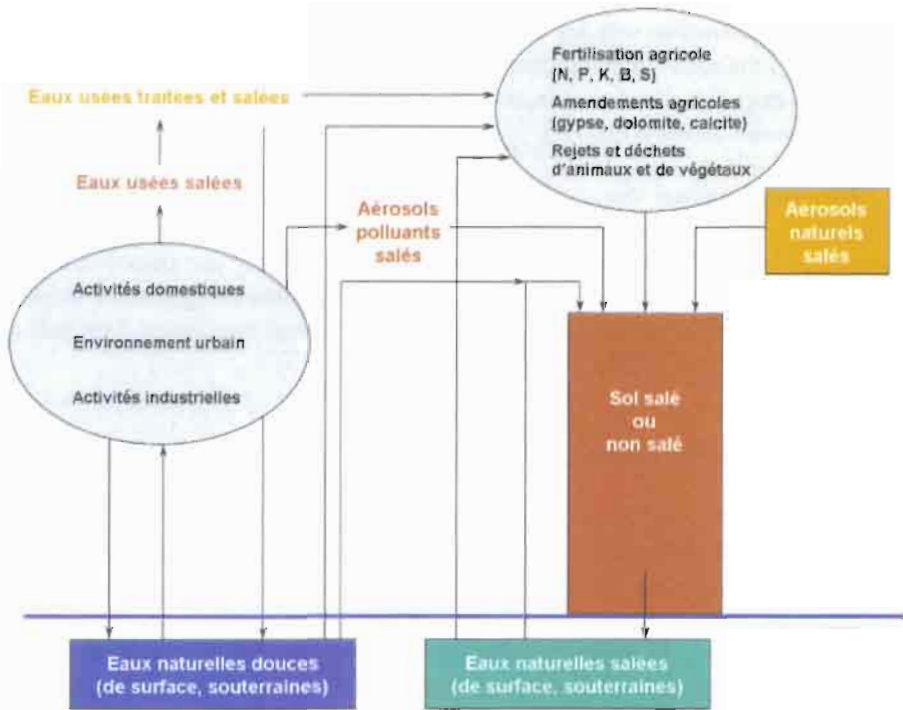


Figure 5.8. Cycles urbain et agricole de salinisation secondaire (d'après [VEN 04] modifié)

5.5.2. Salinisation des systèmes irrigués

Le développement intensif de l'agriculture irriguée dans les régions arides et semi-arides induit une extension concomitante des terres salées liée à la pauvre qualité chimique de l'eau d'irrigation et à une mauvaise conduite de l'irrigation [BAR 95, DOS 80, GON 92, HAC 98, HAL 85, HAM 01, MAR 96]. Les sols irrigués se dégradent chimiquement, physiquement et biologiquement à court terme et, bien souvent, sont abandonnés par les agriculteurs faute de conditions favorables pour les réhabiliter. Les sols salés occupent au moins 20 % des terres irriguées. À un degré moindre, des effets similaires peuvent être observés localement sous des climats plus tempérés.

Naturellement, les eaux pluviales ont un pouvoir dissolvant sur les minéraux du sol, notamment les minéraux très solubles présents dans les sols salés. Leur abondance et la bonne capacité d'infiltration du sol permettent la lixiviation des sels solubles en profondeur vers les eaux souterraines et leur transfert vers les parties basses des formations pédologiques. C'est également le cas avec une eau douce utilisée en irrigation. En revanche, si l'eau d'irrigation est déjà salée, les risques de salinisation sont élevés [GRU 07].

[RIC 54] propose deux critères d'appréciation de la qualité des eaux d'irrigation : la conductivité électrique, définissant le taux de minéralisation de l'eau, et le SAR estimant son pouvoir alcalinisant. Il en résulte une classification des eaux d'irrigation et des risques encourus pour leur utilisation en agriculture irriguée. Des directives plus récentes ont été présentées pour évaluer rapidement l'aptitude de l'eau à l'irrigation [AYE 85].

5.5.3. Contrôle des sels en irrigation

Le principe de base pour qu'une plante puisse croître dans un sol salé est de maintenir une salinité satisfaisante dans la zone racinaire en éliminant les sels par lixiviation en profondeur. Le bilan hydrique du volume de sol considéré doit être négatif. Les entrées d'eau doivent être inférieures aux sorties et permettre le drainage interne de la solution salée du sol. Dans un sol non salé, les doses d'irrigation sont calculées de manière à compenser l'évapotranspiration réelle de la plante et de préserver une bonne humidité du sol [VAL 87]. Dans un sol salé, que l'on veut dessaler sur une certaine profondeur, on devra ajouter une quantité d'eau supplémentaire pour la lixiviation des sels. La dose ou fraction de lixiviation efficace est de 15 % pour un sol à texture grossière et de 10 % pour un sol à texture fine et à faible perméabilité (drainage interne limité). Pendant la période de croissance de la plante, les fractions de lixiviation à chaque irrigation peuvent être augmentées [MAR 09].

Si une nappe phréatique, salée ou non, est présente dans le sol, il s'agira de gérer le flux de lixiviation afin de la maintenir en profondeur et d'éviter la remontée de sels au niveau de la zone racinaire [BOI 02, SHA 84]. L'irrigation d'un sol non salé avec une eau de mauvaise qualité favorisera la salinisation et, inversement, la désalinisation d'un sol salé sera induite par une irrigation avec une eau de bonne qualité. Si la salinité du sol est élevée, l'irrigation avec une eau de mauvaise qualité est faisable dans des limites raisonnables [BEL 99, DUA 13].

5.5.4. Utilisation des eaux non conventionnelles

Sur le plan environnemental, les eaux salées de drainage, produites par un périmètre irrigué, sont recyclables, dans la mesure où leur salinité est acceptable par rapport à celle des sols à irriguer. Les eaux usées traitées et salées, qui sont produites par le cycle urbain de salinisation secondaire (voir figure 5.8), sont également utilisables pour irriguer des sols dont la salinité est plus élevée. On parle d'agriculture « salée » dont les techniques nécessitent un diagnostic préalable des processus de salinisation. L'utilisation des eaux non conventionnelles, salines et/ou sodiques, limitera la pression sur les ressources en eau conventionnelles, douces et faiblement renouvelables, et suivra une stratégie cyclique. L'irrigation d'une culture sensible aux sels par une eau de bonne qualité alternera avec l'irrigation d'une culture moins sensible aux sels par une eau salée. La stratégie, qui consiste à mélanger les deux types d'eau, est également une solution viable. Elle dépendra des volumes considérés pour le projet d'irrigation (figure 5.9).

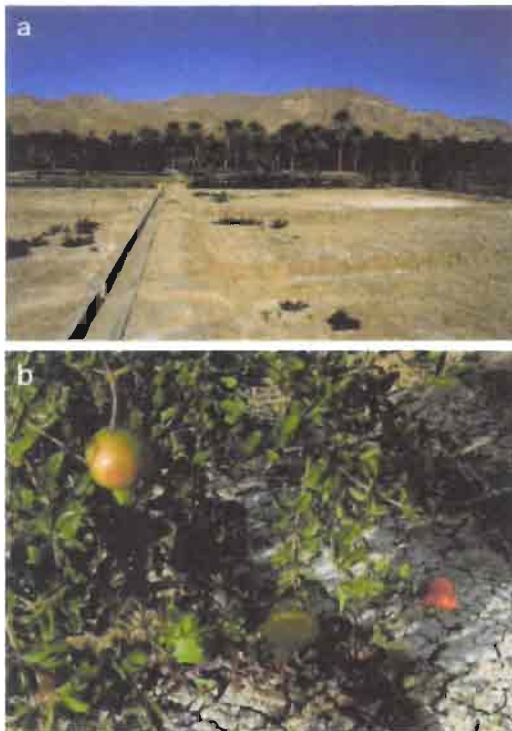


Figure 5.9. Gestion de l'eau dans les périmètres irrigués : (a) irrigation par submersion de surface, oasis d'El Guettar, Tunisie méridionale ; (b) irrigation par goutte à goutte, région de Kairouan, Tunisie centrale (photos : J.-P. Montoroi)

5.6. Mise en valeur agricole des sols salés

5.6.1. Contexte historique

Les problèmes de salinisation des terres agricoles remontent aux origines de l'agriculture pluviale et irriguée. Les crues des fleuves capricieux ont été les premières formes d'irrigation naturelle mises à profit par les agriculteurs lors des décrues. Par ailleurs, les avancées du savoir technique des agriculteurs a permis de mieux en mieux contrôler les éléments naturels par des aménagements hydrauliques de plus en plus sophistiqués. Les apports en eau à la parcelle ont été gérés selon le calendrier cultural et l'organisation étatique des sociétés. L'impossibilité de maîtriser la salinisation des sols a menacé de nombreuses civilisations dans les temps anciens et modernes, certaines ayant perdu leur prospérité après plusieurs siècles d'existence. C'est le cas des sociétés hydrauliques de Mésopotamie qui ont parfois disparu en y associant d'autres facteurs tels qu'une organisation sociale déficiente, un pouvoir central décadent, des catastrophes naturelles [JOB 92].

5.6.2. Effets de l'eau salée du sol pour les plantes

Dans les milieux salés, les espèces végétales ont beaucoup de mal à se développer car la disponibilité en eau est plus faible. En absolu, la pression osmotique d'une solution électrolytique (eau minéralisée ou salée) correspond à la dépression que doit exercer la plante pour la prélever. Elle est proportionnelle à la salinité de la solution du sol selon la relation empirique : $\psi \text{ (atm)} = -0,36 \text{ CE (dS m}^{-1}\text{)}$. Par exemple, toutes les plantes au contact de l'eau de mer ($\text{CE} = 42 \text{ dS m}^{-1}$) sont irrémédiablement flétries ($\psi \approx 16 \text{ atm}$). En réalité, le potentiel de l'eau dans un sol salé est plus élevé, en valeur absolue, car le potentiel osmotique de l'eau salée s'ajoute au potentiel matriciel du sol. Dans un sol salé, le flétrissement des plantes intervient à une teneur en eau supérieure à celle d'un sol non salé (figure 5.10).

Pour résister aux effets osmotiques de la solution du sol, les végétaux présentent des adaptations spécifiques ou combinées :

- d'ordre physiologique : production de composés spécifiques (proline) limitant le stress salin [LOK 12] ;
- d'ordre morphologique : précipitation de cristaux de sels au niveau des stomates foliaires, concentration de sels dans des cellules spécialisées de l'épiderme foliaire (glandes à sels), concentration de sels dans les vacuoles cellulaires provoquant la turgescence des plantes (plantes succulentes gorgées d'eau salée) [JAV 89].

Des déséquilibres nutritionnels, liés à l'excès de sodium (Na^+) par rapport au calcium (Ca^{2+}) et au magnésium (Mg^{2+}), apparaissent au cours de la croissance des plantes. La toxicité de l'ion Cl^- affecte également beaucoup de plantes lorsque la concentration dépasse 5 à 10 $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ (nécrose des feuilles par chlorose).

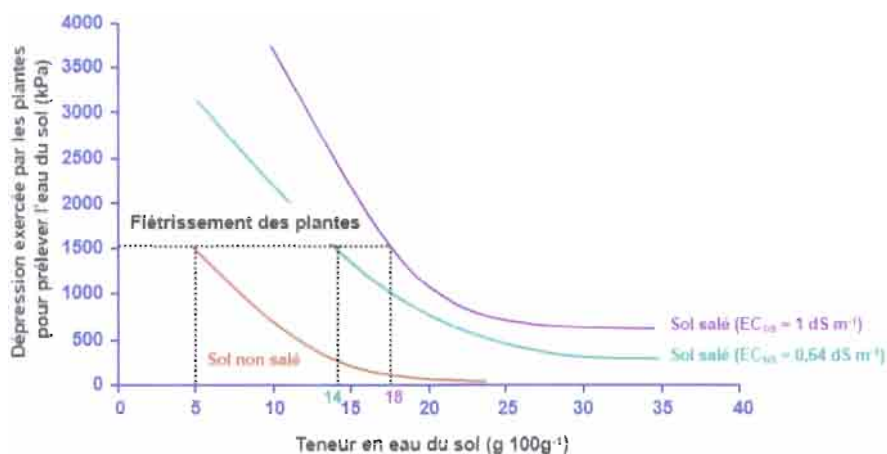


Figure 5.10. Effet de la salinité du sol sur la disponibilité en eau pour les plantes (d'après [REN 06])

5.6.3. Solutions agronomiques

Selon l'intensité des processus de salinisation et d'alcalinisation, diverses techniques agronomiques sont applicables pour remédier les sols salés, à des échelles de temps et d'espace variables. Les techniques nécessitent des moyens humains et financiers dépendant des organisations sociales impliquées. Depuis longtemps, elles ont été appliquées de façon empirique. Les technologies modernes (instrumentation, modélisation) permettent un meilleur diagnostic en amont des projets d'irrigation et une rationalisation des ressources lors de leur mise en œuvre.

La gestion des sols salins demande avant tout l'élimination des sels en excès dans le sol, notamment les sels sodiques. Dans le meilleur des cas, il s'agira de mobiliser les sels solubles dans le sol (processus de lixiviation) et de drainer l'eau salée du sol en profondeur ou latéralement dans un réseau de drainage interne au sol. Par ailleurs, le drainage de la nappe souterraine salée permet la suppression totale ou partielle de la source initiale de sels. Si le drainage naturel est insuffisant, un système de drainage artificiel doit être installé (figure 5.11).

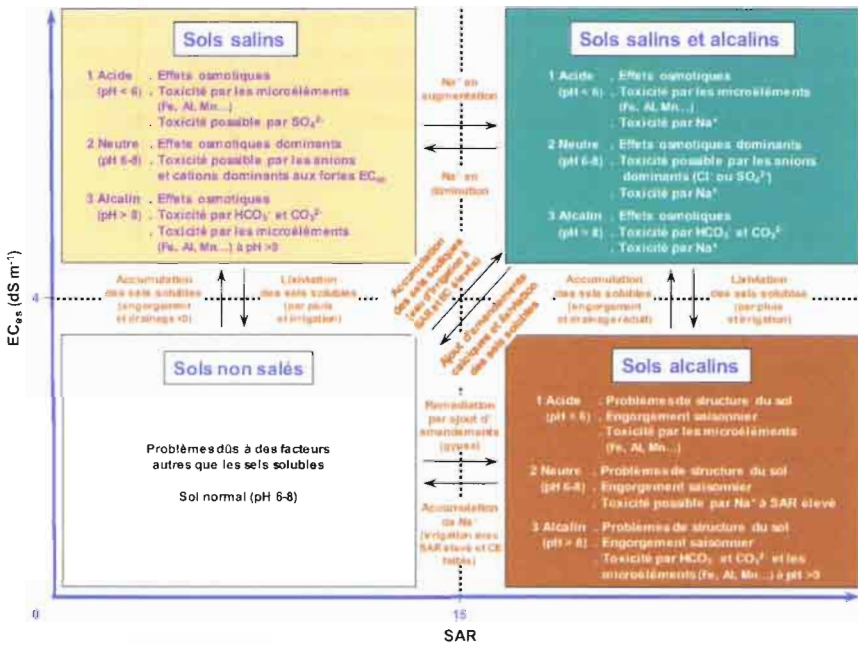


Figure 5.11. Mode de gestion des sols salins et sodiques

Toutes les pratiques culturales visant à améliorer la structure du sol (meilleure porosité) et favoriser l'infiltration de l'eau (meilleure perméabilité) ont un impact positif sur la lixiviation des sels et le drainage interne. Elles sont d'autant plus efficaces que l'eau de pluie ou d'irrigation est abondante et de bonne qualité chimique. Cependant, des apports excessifs en eau et un drainage déficient font remonter la nappe salée, d'autant plus vite qu'elle est peu profonde. Des apports déficitaires en eau limitent la lixiviation des sels et augmentent la dégradation saline du sol, d'autant plus exprimée que le climat est aride et que l'eau apportée est salée. Les principales techniques lixiviantes comprennent le ratissage des sels en surface, le labour de défoncement, la mise en ados, le billonnage, l'apport de matière organique, le mulch (figure 5.12). Les amendements gypseux ou calcaires enrichissent en Ca^{2+} échangeable les argiles sodiques, sensibles à la dispersion, et favorisent la structure du sol par floculation et agrégation. La phytoremédiation des sols salés est efficace, peu onéreuse et, d'un point de vue environnemental, acceptable [QAD 01]. Dans les sols alcalins, les racines remédiantes dissolvent lentement la calcite du sol, fournissent du calcium (Ca^{2+}) pour remplacer le sodium (Na^+) des sites d'échange cationique. Bien que plus lente par rapport aux amendements minéraux, la phytoremédiation favorise l'agrégation du sol, les propriétés hydrauliques du sol et séquestre du carbone. Les plantes halophytiques sont également utilisées pour la remédiation des sols salés [MAN 11].



Figure 5.12. Sol argileux salé : (a) non aménagé, compact et fissuré ; (b) aménagé en billons pour améliorer la lixiviation des eaux pluviales, Basse-Casamance, Sénégal (photos : J.-P. Montoroi)

Les plantes cultivées sont classées en fonction de leur niveau de tolérance aux sels. Par rapport au rendement optimal d'une culture donnée, on détermine la perte de rendement croissante avec la salinité du sol et on compare les cultures entre elles au seuil de 50 % de perte [AYE 85, ROZ 08]. Les effets de la salinité sur les plantes sont négligeables pour des valeurs de CE inférieures à 2 dS m^{-1} et léthales pour des valeurs de CE supérieures à 15 dS m^{-1} . La valeur du seuil, au-delà duquel des effets néfastes se produisent pour la croissance des plantes, dépend non seulement du type de plante mais également du type de sol et de son état hydrique. En fonction des contraintes salines locales, les plantes les plus halotolérantes seront préférentiellement choisies pour mettre en valeur agricole les sols salés. Par ailleurs, la culture industrielle des halophytes (haloculture), en pleine expansion dans certains pays, offre des revenus complémentaires.

5.6.4. Solutions macro-économiques

La gestion des sols salés demande un approvisionnement en eau suffisant pour contrôler la salinité des sols. Les ressources en eau douce des régions arides et semi-arides existent, mais elles sont soit non ou peu renouvelables (aquifères profonds), soit variables, abondantes et peu contrôlables (crues catastrophiques). Selon les formations pédologiques et géologiques traversées, les eaux acquièrent des faciès chimiques variés, souvent impropres à l'agriculture [GRU 07].

Des ouvrages de stockage des eaux de ruissellement permettent leur utilisation pour l'irrigation de périmètres irrigués, en amont ou en aval, sur des surfaces très variées. Selon le bassin versant concerné, les ouvrages peuvent aller des grands barrages hydrauliques aux petits lacs collinaires. Les techniques de désalinisation de l'eau de mer sont une autre voie permettant de compléter les ressources en eau douce, moyennant des coûts d'exploitation encore prohibitifs.

5.6.5. Solutions sociales et politiques

De nombreuses régions du monde font face naturellement à des approvisionnements limités en eau douce. Dans les systèmes irrigués, des quantités considérables d'eau sont perdues par évaporation en surface du sol pendant le transport et l'irrigation, par perte pendant le stockage et le transport jusqu'à la parcelle, par ruissellement et par drainage non maîtrisés. On estime ces pertes à environ 30 %. Il s'ensuit des coûts supplémentaires pour l'exploitation des périmètres irrigués. Selon la taille de ces périmètres, l'organisation sociale des tours d'eau est aussi un élément important à prendre en compte, une organisation homogène et régulière assurant la pérennité du système [BEN 15]. L'intervention efficace du secteur public ou privé dans le domaine des infrastructures hydrauliques est également le garant d'une production agricole rentable.

5.7. Conclusions

Les milieux salés naturels présentent une grande variété de paysages variant entre une salinisation diffuse et une salinisation extrême. Les sols salés s'y développent en relation avec une biodiversité remarquable qui offre des ressources disponibles aux populations locales. Le processus de salinisation secondaire ou anthropique change la composition des eaux naturelles (lacs, rivières, nappes souterraines) ; dégrade la qualité de l'eau demandée pour satisfaire les besoins domestiques, agricoles et industriels ; contribue à la perte de biodiversité et de fertilité des sols ; modifie les conditions climatiques locales ; crée des problèmes sanitaires ; réduit drastiquement les activités agricoles et piscicoles.

La production agricole est directement affectée par la dégradation physico-chimique des eaux et des sols, surtout dans les régions sèches, arides et semi-arides. La remédiation des sols salés est réalisable moyennant des investissements financiers conséquents, ce qui pénalise principalement les pays aux revenus limités. La bonne conduite des techniques d'irrigation et de drainage des sols salés est un gage de réussite mais la mauvaise qualité chimique des eaux d'irrigation constitue un frein au développement durable des périmètres irrigués. Le regroupement local des agriculteurs dans des structures collectives favorise la diffusion des savoirs techniques et l'accès aux organismes de crédit.

Des travaux de recherche scientifique sont toujours nécessaires pour approfondir les connaissances non seulement sur la caractérisation et le fonctionnement physico-chimique des sols salés, mais aussi sur l'adaptation et la tolérance des végétaux et animaux au stress salin. La contribution fonctionnelle de la biodiversité des

microorganismes dans les processus de dégradation des matières organiques et les réactions biogéochimiques des sols salés reste très peu documentée.

QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Les croûtes et efflorescences salines sont-elles biologiques ? Selon quels degré, nature et processus ?
2. Quel est l'impact des activités urbaines, industrielles et agricoles sur les processus de salinisation, notamment en termes de pollutions métalliques et organiques ?
3. Quelle est la contribution des aérosols salés (naturels et/ou polluants) dans le fonctionnement hydrosalin et biologique des sols ?
4. Quelle est la contribution de l'érosion chimique (dissolution des minéraux, désorption ionique des colloïdes, minéralisation de la solution du sol, etc.) dans les transferts de matière par érosion et les processus de salinisation ?

RECOMMANDATIONS

1. Dans un contexte environnemental favorisant les processus de salinisation, combiner les techniques entretenant la structure agrégée du sol, limitant l'évapotranspiration du sol et favorisant l'infiltration de l'eau pour une meilleure lixiviation des sels dans les sols.
2. Dans la mesure où l'eau est accessible et disponible, renforcer et développer les moyens améliorant la qualité chimique des eaux d'irrigation (mélange saisonnier) et la gestion sociale de l'eau (collectivités rurales).
3. En agriculture salée, contrôler la teneur en sels minéraux des denrées alimentaires en relation avec les besoins physiologiques des êtres vivants.
4. Développer les services écosystémiques des milieux salés naturels comme complément de ressources pour les populations locales, notamment par la production d'halophytes (haloculture) et la production de sels (saliculture).

5.8. Bibliographie

- [ALD 76] AL-DROUBI A., Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad, Mémoire, université Louis Pasteur, Strasbourg, 1976.
- [AYE 85] AYERS R.S., WESTCOT, D.W., Water quality of agriculture, Irrigation and Drainage, n° 29, rapport, FAO, Rome, 1985.

- [BAI 09] BAIZE D., GIRARD M.C., *Référentiel pédologique 2008*, Éditions Quæ, Versailles, 2009.
- [BAR 95] BARBIERO L., *Les Sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger. Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation*, ORSTOM, Paris, 1995.
- [BEL 99] BELTRAN J.M., « Irrigation with saline water : benefits and environmental impact », *Agricultural Water Management*, n° 40, p. 183-194, 1999.
- [BEN 15] BEN MUSTAPHA A., FAYSSSE N., MARLET S., *et al.*, « Une action collective analysée par ses acteurs : une association d'irrigants en Tunisie », *Natures Sciences Sociétés*, n° 23, p. 356-366, 2015.
- [BER 72] BERNUS E., BERNUS S., *Du sel et des dattes. Introduction à l'étude de la communauté d'In Gall et de Tegidda-n-tesemt*, CNRSH, Niamey, 1972.
- [BOI 02] BOIVIN P., FAVRE F., HAMMECKER C., *et al.*, « Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol : analysis of a long-time monitoring data », *Geoderma*, n° 110, p. 87-107, 2002.
- [BRE 82] BRESLER E., MCNEAL B.L., CARTER D.L., *Saline and sodic soils. Principles, dynamics, modeling*, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [CAM 91] CAMBIER P., « Modélisation des phénomènes d'adsorption des solutés sur les surfaces minérales. Synthèse bibliographique », *Science du sol*, vol. 29, n° 3, p. 245-264, 1991.
- [CHE 98] CHEVERRY C., BOURRIÉ G., « La salinisation des sols », dans P. STENGEL, S. GELIN (DIR.), *Sol : Interface fragile*, INRA Éditions, Paris, 1998.
- [CHH 96] CHHABRA R., *Soil salinity and water quality*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1996.
- [DEN 95] DENT D.L., PONS L.J., « A world perspective on acid sulfate soils », *Geoderma*, n° 67, p. 263-276, 1995.
- [DOS 80] DOSSO M., *Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie*, Thèse, INP, Toulouse, 1980.
- [DUA 13] DUAN R., FEDLER C.B., « Salt management for sustainable degraded water land application under changing climatic conditions », *Environmental Science & Technology*, n° 47, p. 10 113-10 114, 2013.
- [FAL 14] FALL L.A., MONTOROI J.P., STAHR K., « Coastal acid sulfate soils in the Saloum River basin, Senegal », *Soil Research*, vol. 52, n° 7, p. 671-684, 2014.
- [FAN 97] FANNING D.S., BURCH S.N., « Acid sulfate soils and some associated environmental problems », *Advances in GeoEcology*, n° 30, p. 145-158, 1997.

- [FIT 03] FITZPATRICK R.W., MERRY R.H., COX J.W., *et al.*, Assessment of physico-chemical changes in dryland saline soils when drained or disturbed for developing management options, rapport technique, vol. 2, n° 3, CSIRO, 2003.
- [FLO 05] FLOWERS T.J., FLOWERS S.A., « Why does salinity pose such a difficult problem for plant breeders ? », *Agriculture Water Management*, n° 78, p 15-24, 2005.
- [FLO 08] FLOWERS T.J., COLMER T.D., « Salinity tolerance in halophytes », *New Phytologist*, n° 179, p. 945-963, 2008.
- [GHA 95] GHASSEMI I., JAKEMAN A.J., NIX H.A., *Salinisation of land and water resources. Human causes, extent, management and case studies*, Cabi, Wallingford, 1995.
- [GON 92] GONZALES-BARRIOS J.L., Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine. Exemple dans la « Comarca Lagunera », Thèse, université de Montpellier II, 1992.
- [GRU 07] GRUNDY M., SILBURN D., CHAMBERLAIN T., « A risk framework for preventing salinity », *Environmental Hazards*, n° 7, p. 97-105, 2007.
- [HAC 98] HACHICHA M., Mise en valeur des sols salés. Organisation, fonctionnement et évolution de sols salés du nord de la Tunisie, Thèse, École nationale supérieure agronomique de Rennes, 1998.
- [HAL 85] HALITIM A., 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, université de Rennes, 1985.
- [HAM 01] HAMDIAISSA B., Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (cuvette d'Ouargla). Approche micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale, Thèse, Institut national agronomique de Paris-Grignon, 2001.
- [IUS 14] IUSS WORKING GROUP WRB, World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports, n° 106, FAO, Rome, 2014.
- [JAV 89] JAVOR B., *Hypersaline environments : microbiology and biogeochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [JOB 92] JOB J.O., « Les premiers aménagements hydroagricoles en Mésopotamie et les problèmes de sels », dans *Didactiques*, ORSTOM, Paris, 1992.
- [LOK 12] LOKHANDE V.H., SUPRASANNA P., « Prospects of halophytes in understanding and managing abiotic stress tolerance », dans P. AHMAD, M.N.V. PRASAD (DIR.), *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change*, Springer, New York, 2012.

- [LOY 95] LOYER J.Y., *Solums salsodiques. Salisols et sodisols*, dans *Référentiel pédologique*, AFES-INRA Éditions, Paris, 1995.
- [MAN 11] MANOUSAKI E., KALOGERAKIS N., « Halophytes, an emerging trend in phytoremediation », *International Journal of Phytoremediation*, n° 13, p. 959-969, 2011.
- [MAR 06] MARLET S., JOB J.O., « Processus et gestion de la salinité des sols », dans J.R. TIERCELIN, A.VIDAL (DIR.), *Traité d'irrigation*, Lavoisier, Paris, 2006.
- [MAR 09] MARLET S., BOUKSILA F., BAHRI A., « Water and salt balance at irrigation scheme scale : a comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis », *Agricultural Water Management*, n° 96, p. 1311-1322, 2009.
- [MAR 96] MARLET S., Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger. Modélisation des mécanismes physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation, Thèse, École nationale supérieure agronomique de Montpellier, 1996.
- [MAR 05] MARTINEZ-BELTRAN J., MANZUR C.L., « Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem », *Proceedings of the international salinity forum*, Riverside, États-Unis, 25 au 27 avril 2005.
- [MON 04] MONTOROI J.P., BOUZID N., GRÜNBERGER O., *et al.*, « Geophysical characterization of saline patches in Northeastern Thailand », dans S. RIEB, P. WONGPORNCHAI, S. CHANTRAPRASERT (DIR.), *Proceedings of the International conference on Applied Geophysics*, université de Chiang Mai, Thaïlande, 26 au 27 novembre 2004.
- [MON 96] MONTOROI J.P., *Gestion durable des sols de l'écosystème de mangrove en Casamance (Sénégal). Dynamique de l'eau et des sels en période de sécheresse*, ORSTOM, Paris, 1996.
- [ORE 02] OREN A., *Halophilic microorganisms and their environments*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [PAY 16] PAYEN S., BASSET-MENS C., NÚÑEZ M., *et al.*, « Salinisation impacts in life cycle assessment : a review of challenges and options towards their consistent integration », *International Journal of Life Cycle Assessment*, n° 21, p. 577-594, 2016.
- [QAD 01] QADIR M., SCHUBERT S., GHAFOR A., *et al.*, « Amelioration strategies for sodic soils : a review », *Land Degradation Development*, n° 12, p. 357-386, 2001.
- [REN 06] RENGASAMY P., « World salinization with emphasis on Australia », *Journal of Experimental Botany*, vol. 57, n° 5, p. 1017-1023, 2006.
- [RHO 92] RHOADES J.D., « Instrumental field methods of salinity appraisal », dans G.C. TOPP, W.D. REYNOLDS, R.E. GREEN (DIR.), *Advances in measurement of soil physical properties : bringing theory into practice*, Soil Science Society Edition, Madison, WI, 1992.

- |RIC 54| RICHARDS L.A., *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Agricultural Handbook 60, Washington DC, 1954.
- |RIE 91| RIEU M., TOUMA J., GUEYI H.R., « Sodium-calcium exchange on Brazilian soils : modeling the variations of selectivity coefficients », *Soil Science Society of America Journal*, n° 55, p. 1294-1300, 1991.
- |ROZ 08| ROZEMA J., FLOWERS T.J., « Crops for a salinized world », *Science*, n° 322, p. 1478-1480, 2008.
- |SER 78| SERVANT J.M., « La salinité dans le sol et les eaux : caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage », *Bulletin du BRGM*, Section III, n° 2, p. 123-142, 1978.
- |SHA 84| SHAINBERG I., SHALHEVET J., *Soil salinity under irrigation. Processes and management*, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- |SPO 89| SPOSITO G., *The chemistry of soils*, Oxford University Press, Oxford, 1989.
- |SSS 14| SOIL SURVEY STAFF, *Keys to soil taxonomy*, 12th edition, USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 2014.
- |SUM 93| SUMNER M.E., « Sodic soils : new perspectives », *Australian Journal of Soil Research*, n° 31, p. 683-750, 1993.
- |SZA 89| SZABOLCS I., *Salt-affected soils*, CRC Press, Boca Raton, FA, 1989.
- |TES 92| TESSIER D., LAJUDIE A., PETIT J.C., « Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties », *Applied Geochemistry*, n° 1, p. 151-161, 1992.
- |VAL 87| VALLES V., Étude et modélisation des transferts d'eau et de sel dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation, Mémoire, université Louis Pasteur, Strasbourg, 1987.
- |VEN 04| VENGOSH A., « Salinization and saline environments », dans H.D. HOLLAND, K.K. TUREKIAN (DIR.), *Treatise on geochemistry*, Elsevier Science, Amsterdam, 2003.
- |WIL 99| WILLIAMS W.D., « Salinisation : a major threat to water resources in the arid and semi-arid regions of the world », *Lakes Reservation Research Management*, n° 4, p. 85-91, 1999.

Montoroi Jean-Pierre (2018)

Salinisation des sols et gestion des sols salés

In : Valentin Christian (ed.). *Les sols au coeur de la zone critique 5 : dégradation et réhabilitation*. Londres : ISTE, p. 112-139. (Système Terre - Environnement : Série Les Sols ; 5)

ISBN 978-1-78405-383-3