

1



Sel pédologique : une menace pour les sols agricoles

La présence de sel dans le sol, due à des facteurs naturels ou à l'activité humaine, est problématique en agriculture car peu de plantes sont capables de résister au stress salin. Il est cependant possible d'y remédier et d'exploiter ces sols, moyennant des techniques appropriées. La question est d'autant plus d'actualité que la part des sols salés dans le monde ne cesse d'augmenter avec le réchauffement climatique et la croissance démographique.

Par beaucoup d'aspects, le sel pédologique, c'est-à-dire présent dans les sols, ressemble au sel géologique présent dans les roches. Tous les deux sont constitués d'un ensemble de minéraux qui passent de l'état cristallisé à l'état ionisé par dissolution et, inversement, de l'état ionisé à l'état cristallisé par précipitation (*photo 1*). Les deux processus sont intimement liés lors du cycle de l'eau.

La composition chimique de l'eau détermine sa minéralisation (concentration ionique totale ou salinité) et son faciès chimique (répartition des ions entre eux). En se concentrant, les sels précipitent selon leur degré de solubilité, du moins soluble au plus soluble. Seul l'état cristallisé ou précipité du sel est visible dans les couches géologiques (*roches évaporitiques ou évaporites, voir page 20*) ou les formations pédologiques (sols à efflorescences salines). Les minéraux constitutifs sont les mêmes, mais ils se présentent sous une forme plus éphémère et diffuse dans les sols pédologiques. Les cinétiques de formation du sel pédologique sont plus courtes et son extension spatiale plus limitée. Les formations pédologiques ne sont pas soumises à des températures ou des pressions élevées pouvant modifier durablement la nature des minéraux. Leur stabilité est en revanche très dépendante des conditions climatiques.

Des observations sur le terrain renseignent directement sur le caractère salin des sols, notamment en période

AUTEUR



Jean-Pierre MONTOROI

Agro-pédologue, chercheur à l'IRD, spécialisé dans l'étude des sols affectés par le sel sous divers latitudes et modes de gestion des sols et des eaux, IRD, UMR « IESS-Paris »

✉ Jean-Pierre.Montoroi@ird.fr

1



Sel pédologique : une menace pour les sols agricoles

La présence de sel dans le sol, due à des facteurs naturels ou à l'activité humaine, est problématique en agriculture car peu de plantes sont capables de résister au stress salin. Il est cependant possible d'y remédier et d'exploiter ces sols, moyennant des techniques appropriées. La question est d'autant plus d'actualité que la part des sols salés dans le monde ne cesse d'augmenter avec le réchauffement climatique et la croissance démographique.

Par beaucoup d'aspects, le sel pédologique, c'est-à-dire présent dans les sols, ressemble au sel géologique présent dans les roches. Tous les deux sont constitués d'un ensemble de minéraux qui passent de l'état cristallisé à l'état ionisé par dissolution et, inversement, de l'état ionisé à l'état cristallisé par précipitation (*photo 1*). Les deux processus sont intimement liés lors du cycle de l'eau.

La composition chimique de l'eau détermine sa minéralisation (concentration ionique totale ou salinité) et son faciès chimique (répartition des ions entre eux). En se concentrant, les sels précipitent selon leur degré de solubilité, du moins soluble au plus soluble. Seul l'état cristallisé ou précipité du sel est visible dans les couches géologiques (*roches évaporitiques ou évaporites, voir page 20*) ou les formations pédologiques (sols à efflorescences salines). Les minéraux constitutifs sont les mêmes, mais ils se présentent sous une forme plus éphémère et diffuse dans les sols pédologiques. Les cinétiques de formation du sel pédologique sont plus courtes et son extension spatiale plus limitée. Les formations pédologiques ne sont pas soumises à des températures ou des pressions élevées pouvant modifier durablement la nature des minéraux. Leur stabilité est en revanche très dépendante des conditions climatiques.

Des observations sur le terrain renseignent directement sur le caractère salin des sols, notamment en période

AUTEUR



Jean-Pierre MONTOROI

Agro-pédologue, chercheur à l'IRD, spécialisé dans l'étude des sols affectés par le sel sous divers latitudes et modes de gestion des sols et des eaux, IRD, UMR « IESS-Paris »

✉ Jean-Pierre.Montoroi@ird.fr

de sécheresse (précipitations faibles et évaporation forte de l'eau). Le sel pédologique se manifeste à la surface des sols de manière plus ou moins nette, sous forme d'efflorescences blanches (*photos 2 et 3*) ou multicolores, de croûtes indurées ou boursoufflées, de cristallisations mêlées d'argiles pulvérulentes, de taches d'infertilité. La morphologie, la couleur et le goût des cristaux donnent des indications sur leur nature chimique, qui pourra être précisée par une analyse minéralogique approfondie (diffractométrie de rayons X). Les minéraux les plus fréquents en conditions d'acidité neutre sont le gypse, les sulfates magnésiens, l'halite et la sylvite. En milieu acide, on identifie la jarosite, la natrojarosite, l'halotrichite, la rozénite, l'alunogène et la tamarugite (Montoroi, 1996), tandis qu'en milieu alcalin, on trouve la calcite, la calcite magnésienne, la thénardite, la mirabilite, le natron et le trona.

En conditions humides, les sels sont présents à l'état d'ions et il est beaucoup plus difficile de déterminer le caractère salin des sols sans faire des analyses au laboratoire. La salinité d'un échantillon de sol donné correspond à la mesure de la salinité de l'eau du sol lorsque celui-ci est saturé en eau. Comme pour tous les types d'eau, la salinité de l'eau du sol est mesurée par la conductivité électrique, exprimée en décisiemens par mètre (dS m^{-1}) à 25°C , ou par la concentration totale en sels dissous, exprimée en grammes par litre (g l^{-1}).

En mesurant la salinité du sol au cours du temps, on parle de salinisation lorsque sa valeur augmente (par

réduction du volume d'eau ou apport de sels dissous à humidité constante). Inversement, il y a désalinisation quand la salinité diminue (par augmentation du volume d'eau ou perte de sels dissous à humidité constante). Le processus de salinisation peut concerner des sols non salés ou déjà salés. Dans le premier cas, le sol devient salé à partir de 4 dS m^{-1} ou $2,5 \text{ g l}^{-1}$ (Bresler *et al.*, 1982). Les alternances cycliques humectation-dessiccation font varier la salinité du sol au cours du temps et, par conséquent, les cycles de salinisation-désalinisation.

Par ailleurs, les minéraux argileux ont la propriété de fixer les ions chargés positivement (cations) contenus dans l'eau du sol. Plus l'eau du sol est salée, plus il y a de cations fixés et inversement. La teneur en ion sodium (Na^+) fixé, mesurée au laboratoire, détermine la sodicité du sol. La sodisation se produit lorsque la teneur en ions Na^+ augmente ; il y a désodisation quand la teneur baisse.

Un sol devient sodique à partir d'un certain seuil (Bresler *et al.*, 1982). Lorsqu'un sol sodique est en contact avec de l'eau douce (par humectation), les ions Na^+ fixés sur les minéraux argileux s'échangent avec les protons (H^+) de l'eau, libérant des ions hydroxyde (HO^-) dans l'eau du sol. Le pH du sol augmente et devient très alcalin avec des valeurs atteignant 10 à 11. Ce processus est appelé alcalisation. Sodisation et alcalisation sont associés dans un processus plus global que l'on appelle alcalinisation. Les réactions d'échange Na^+/H^+ provoquent une dégradation des propriétés physiques du sol en raison de la dispersion



◀ PHOTO 1
Récolte de sel solaire par évaporation des eaux de surface d'une dépression côtière aménagée en marais salant (lagune de Vermelha, Brésil).

© MONTOROI, IRD



▼ PHOTO 2
Efflorescences salines observées à la surface d'un sol argileux irrigué par submersion d'eau salée (mélange d'eau du Nil, d'eau de station d'épuration et d'eau de drainage de sols salés) pour la production de maraîchage (delta du Nil, Kafr-el-Sheikh, Égypte).

© MONTOROI, IRD



▼ PHOTO 3
Efflorescences salines observées à la surface d'un sol sableux (près de Ban Daeng, Khon Kaen, Thaïlande).

© MONTOROI, IRD



des minéraux argileux. Un horizon compact à structure prismatique (en colonnes) se forme, caractérisant un sol très alcalinisé. La perméabilité à l'eau du sol diminue, ce qui accentue sa dégradation physico-chimique.

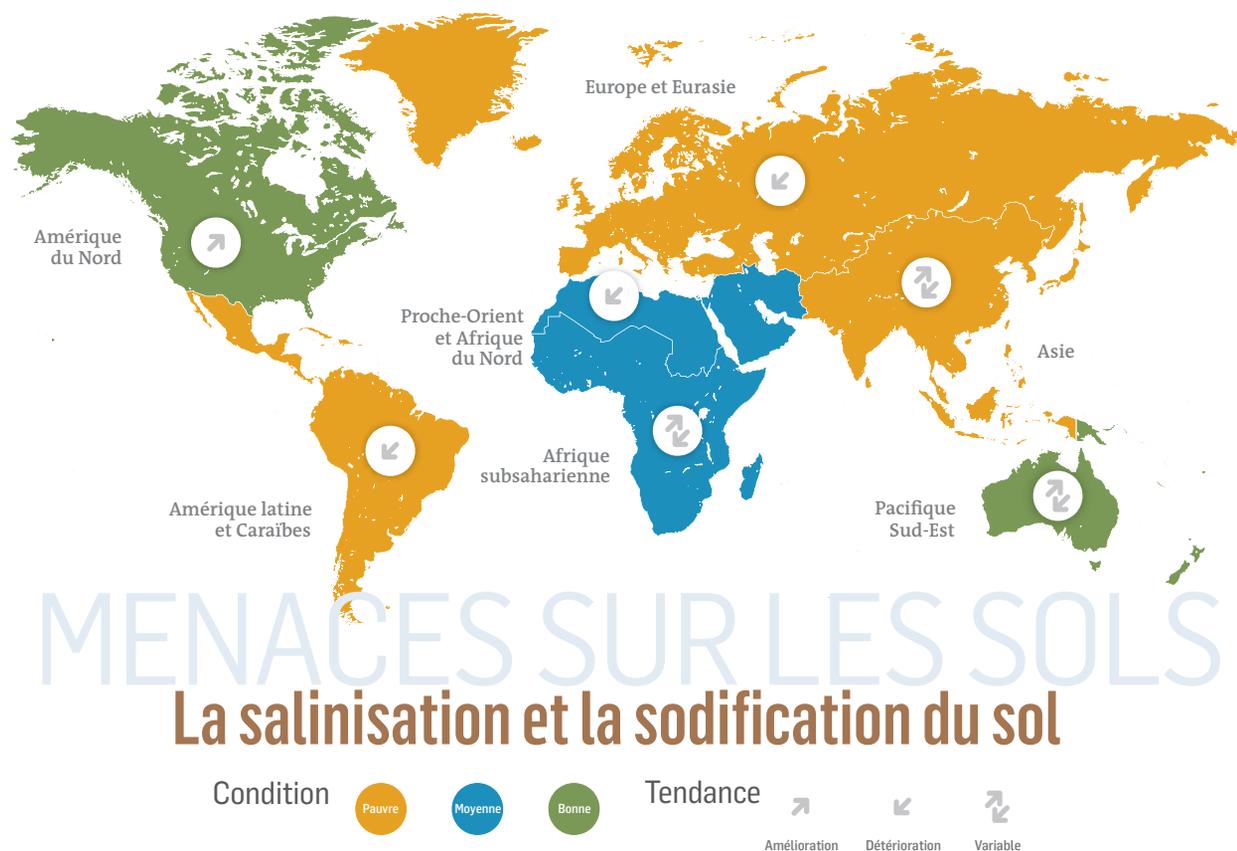
Dans le sol, la salinisation peut prendre plusieurs aspects selon les conditions environnementales locales ou les conditions climatiques saisonnières. Elle peut être ascendante par dessiccation du sol et remontée capillaire d'une nappe salée peu profonde. La salinité augmente graduellement jusqu'à la surface où des sels peuvent éventuellement précipiter. Une salinisation descendante a lieu lorsque les sels sont entraînés en profondeur par infiltration d'eau météorique et drainage de l'eau du sol. La salinité diminue en surface et augmente avec la profondeur. En réalité, le phénomène de salinisation est beaucoup plus complexe, car les salinisations ascendante et descendante se superposent selon les alternances humectation-dessiccation du sol. La variabilité climatique est un moteur essentiel de la salinisation ou de la désalinisation du sol. La répartition spatiale de la salinité est matérialisée dans

des documents cartographiques qui montrent les zones à forte contrainte saline. Le suivi de la salinité au cours du temps permet d'estimer les dynamiques de salinisation ou de désalinisation du sol (voir figure 1).

La salinité d'un sol peut aussi se mesurer d'une manière plus globale, en considérant l'eau et tous les autres constituants du sol (particules solides, minérales et organiques). Des instruments de mesure, empruntés à la géophysique de subsurface, enregistrent des valeurs de conductivité électrique qui correspondent à des volumes de sol. Il est également possible de restituer des cartes, mais leur interprétation sera d'autant plus difficile qu'il faudra tenir compte de l'hétérogénéité des sols étudiés.

Grâce aux observations de terrain et aux caractéristiques physico-chimiques des sols salés, on peut en distinguer plusieurs types : les sols salins *stricto sensu*, les sols salins à sulfato-réduction/oxydation, les sols sodiques et les sols alcalins. Les cartes pédologiques les mentionnent sous des vocables proches selon les classifications nationales et internationales utilisées. La répartition

FIGURE 1 / Évolution mondiale de la dégradation des sols par salinisation et sodification © FAO, 2016





◀ PHOTO 4 / Dépression endoréique (sebkha continentale) bordant une oasis et présentant des sols de salinité décroissante depuis la sebkha (au premier plan, efflorescences et croûtes salines) vers les plantes halophytes puis les palmiers dattiers (région d'El Guettar, Tunisie méridionale).

© MONTOROI, IRD

▼ PHOTO 5 / Salinisation naturelle apparente (efflorescences salines, boursofflement de surface) et végétation d'halophytes en bordure d'une dépression côtière salée (lagune de Vermelha, Brésil).

© MONTOROI, IRD

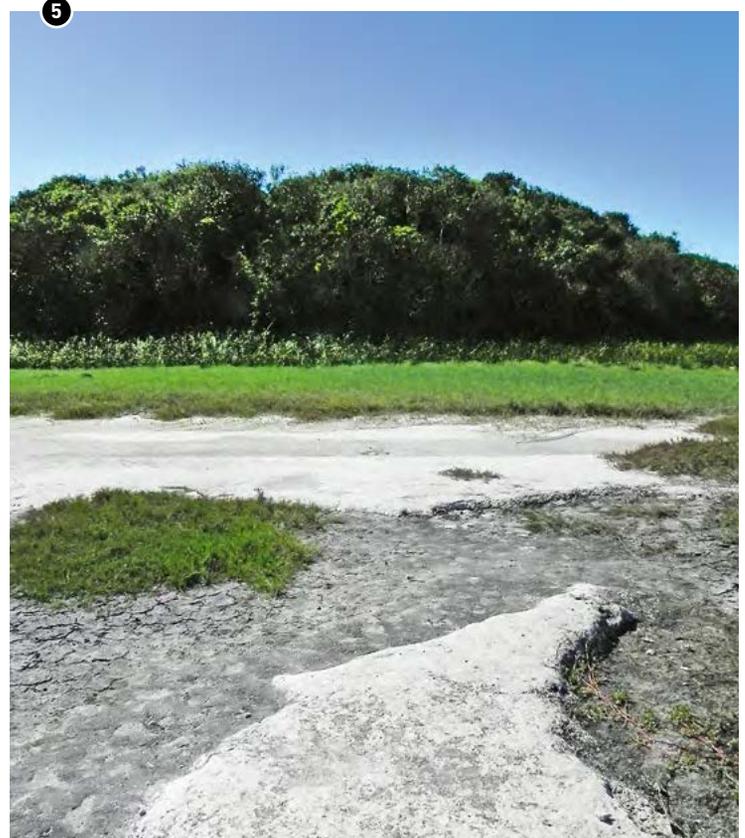
géographique des sols salés correspond aux régions arides et semi-arides, ainsi qu'aux régions littorales. Ils affectent une centaine de pays et couvrent environ 9,55 millions de kilomètres carrés, soit 6,4 % des continents émergés ou 17,5 fois la France, avec une répartition pour moitié entre les sols salins et les sols sodiques-alcalins (Szabolcs, 1989).

L'origine de la salinisation des sols

› Un mode naturel ou salinisation primaire

La salinisation primaire concerne tous les facteurs naturels qui produisent des sels dissous (altération et dissolution des minéraux contenus dans les sols et les roches, fusion magmatique et rejets volcaniques, décomposition des êtres vivants). Des agents naturels les transportent (pluies, rivières, eaux souterraines, eaux de mer, eaux géothermales, vents) et les accumulent dans l'eau des sols (nappe salée peu profonde, dépôts éoliens d'embruns et d'aérosols).

Les sols salés naturels forment une grande diversité de paysages, dont certains présentent une salinité parfois bien supérieure à celle de l'eau de mer (42 dS m⁻¹ ou 35 g l⁻¹). Les principaux écosystèmes salés sont constitués par les dépressions endoréiques continentales ou côtières (sebkhas, chotts, salars, playas...) ainsi que par les franges côtières ou deltaïques sous l'influence des eaux



► LE SEL DES SOLS, UNE PRÉOCCUPATION ANCIENNE ET ACTUELLE AU PROCHE-ORIENT

Deux grandes régions du Proche-Orient, la Mésopotamie et l'Égypte, ont été le berceau de nombreuses civilisations dont la prospérité reposait sur la fertilité des sols et la production agricole. Leur déclin est lié à des causes non seulement politiques et sociales, mais aussi environnementales, comme la salinisation des sols.

En Mésopotamie, la plaine alluviale située entre les fleuves Tigre et Euphrate fournit des denrées agricoles en abondance récoltées sur des sols profonds et fertiles. Le déboisement et le surpâturage en amont des bassins-versants ont accentué l'érosion des sols, le dépôt de sables et de limons dans les réseaux d'irrigation, ainsi que la remontée de la nappe phréatique. Les inondations récurrentes précèdent une période estivale à forte évaporation qui concentre les sels

et salinise les sols irrigués mal drainés. En conséquence, les terres en aval sont abandonnées et les populations migrent vers l'amont, aggravant ainsi le phénomène.

En revanche, en Égypte, la vallée du Nil a longtemps échappé à la salinisation grâce aux apports annuels en limons riches en nutriments qui ne colmatent pas les chenaux d'irrigation et précèdent une période hivernale à faible évaporation et faible concentration en sels. Le barrage d'Assouan, inauguré en 1973, a réduit la quantité de dépôts limoneux fertiles, ceux-ci étant compensés par des apports d'engrais chimiques et organiques polluants. Le maintien d'une nappe phréatique à un niveau élevé toute l'année et des irrigations intensives (plusieurs récoltes annuelles) ont alors provoqué le même scénario de salinisation secondaire qu'auparavant en Mésopotamie. La sédimentation au sein du delta du Nil a diminué, favorisant les intrusions marines souterraines et la contamination des sols par des sels sodiques. —



Production de fèves dans le delta du Nil, à Kafr-el-Sheikh (Égypte). L'irrigation est réalisée par submersion d'eau salée (mélange d'eau du Nil, d'eau de station d'épuration et d'eau de drainage de sols salés). Au premier plan, le fossé d'évacuation des eaux de drainage collectées par un drain perpendiculaire, enterré et rempli de branches pour l'écoulement efficace vers la nappe phréatique. © MONTOROI, IRD



PHOTO 6
Récolte de sel solaire
par évaporation des
eaux de surface d'une
dépression côtière
aménagée en marais
salant (lagune de
Vermelha, Brésil).

© MONTOROI, IRD



7



marines. Les premiers caractérisent les climats à très forte évaporation de l'eau du sol (aride, semi-aride, sahélien, méditerranéen). Les seconds existent sous tous les types de climat, du tropical au tempéré, voire polaire, pendant des périodes sèches prolongées. En lisière de ces écosystèmes, une végétation particulièrement adaptée aux milieux salés (plantes halophytes du type salicorne) s'y développe (photos 4 et 5) en relation avec un pastoralisme extensif (animaux de pré salé ou d'herbu). En zone tropicale et côtière, les forêts de mangrove sont ennoyées par les eaux marines et abritent des plantes halophytes arborées, les palétuviers. La salinité du sol augmente progressivement des zones non salées vers les zones d'accumulation maximale de sels (au cœur de la dépression, en contact direct avec la mer). Des salines ou marais salants peuvent y être implantées pour produire du sel solaire (par évaporation) ou ignigène (par chauffage) (photo 6).

modifications d'écosystèmes (déforestation, construction de barrages) qui font remonter les nappes phréatiques salées vers la surface des sols, les pratiques intensives (fertilisation minérale, fertigation, irrigation) qui intensifient la production de biomasse, l'utilisation d'eau d'irrigation d'origines et de salinités diverses (eaux usées agricole, industrielle et domestique) (photo 7). Par ailleurs, en région froide ou montagneuse, les sels de déneigement ou de déverglaçage sont d'autres causes de salinisation secondaire. La salinisation secondaire est à l'origine d'environ 20% des sols salés.



PHOTO 7
Salinisation secondaire d'un sol sableux après une déforestation ancienne. Apparition d'efflorescences salines et de taches (brunes) d'infertilité, à la surface de sols cultivés en riz (près de Ban Daeng, Khon Kaen, Thaïlande).

© MONTROI, IRD

> Un mode artificialisé par l'homme ou salinisation secondaire

Par ses activités variées, l'homme apporte des sels supplémentaires qui perturbent l'équilibre naturel des sols. L'influence anthropique renforce la salinisation naturelle des sols ou bien salinise des sols non encore affectés (Ghassemi *et al.*, 1995). On peut citer certaines

Parmi les activités humaines qui conduisent à une salinisation, l'irrigation des sols agricoles tient une place prépondérante. Dans les régions arides et semi-arides, elle est vitale pour compenser les déficits hydriques dus aux apports pluviométriques insuffisants. C'est aussi un impératif pour faire face à la demande croissante en produits agricoles de la part de populations toujours plus nombreuses. Les sols irrigués risquent de se saliniser secondairement à cause d'un apport continu de sels dissous par l'eau d'irrigation. Si le sol est déjà salé, les sels apportés s'ajouteront à ceux déjà stockés dans le sol et la salinité globale augmentera. Pour éviter cela, les sels devront être entraînés par le drainage de l'eau en profondeur. L'objectif principal est de réduire la salinité du sol pour favoriser la

« **Le risque de salinisation secondaire, connu depuis que l'homme irrigue les sols, est toujours d'une extrême acuité.** »

croissance des plantes (Chhabra 1996). L'équilibre salin d'un sol est d'autant plus précaire que l'irrigation est mal conduite (photo 8). Le risque de salinisation secondaire, connu depuis que l'homme irrigue les sols, est toujours d'une extrême acuité (voir encadré 1). À l'échelle mondiale, les surfaces irriguées n'ont cessé d'augmenter au cours des dernières décennies, entraînant un accroissement des superficies de sols salés. Environ 25 % des sols irrigués sont salinisés à des degrés divers.

Le sel pédologique n'empêche pas l'installation d'une végétation et l'agriculture peut s'y développer, voire s'intensifier avec l'usage généralisé d'une irrigation bien gérée. Les plantes cultivées sont plus ou moins sensibles à la salinité des sols et à ses variations dans le temps. Certaines résistent à de fortes salinités et se rencontrent plus fréquemment dans les régions arides et semi-arides (palmier dattier). D'autres sont particulièrement sensibles et ne peuvent être cultivées qu'en conditions irriguées. Si la salinité de l'eau du sol est inférieure à 2 dS m^{-1} , il n'y a aucune incidence sur la viabilité des plantes cultivées. En revanche, une valeur supérieure à 15 dS m^{-1} est fatale.

Le sel a un effet direct sur les plantes en limitant l'absorption de l'eau par les racines. L'eau salée exerce une pression osmotique qui s'ajoute au potentiel matriciel du sol et est proportionnelle à la salinité du sol. À partir d'un certain seuil de salinité, variable selon les plantes, le stress salin est tel que la plante ne peut plus s'alimenter en eau et

dépérit. Sans apport en eau, la salinité d'un sol augmente par concentration des sels dissous : le stress salin vient alors renforcer le stress hydrique des plantes. Des adaptations morphologiques (organes excréteurs de sels) et physiologiques (synthèse de protéines spécifiques) permettent à certaines plantes de moduler leur sensibilité aux sols salés (photo 9). Par ailleurs, l'excès

d'ions sodium provoque des déséquilibres nutritionnels pendant la croissance des plantes.

Il est pourtant possible de contrôler la salinité des terres agricoles. Le savoir-faire dans ce domaine est ancestral. Il faut pour cela limiter les apports en sels à la parcelle, soit par une eau d'irrigation non salée, soit par une eau d'irrigation dont la salinité est bien inférieure à la salinité du sol irrigué (agriculture dite salée). L'effet sera de dissoudre les sels présents dans le sol, de « diluer » l'eau salée et d'entraîner l'eau en profondeur par drainage. Dans les sols salés ayant une bonne porosité, l'infiltration de l'eau, sa circulation et son évacuation en dehors de la zone d'influence des racines des plantes cultivées (rhizosphère) seront favorisées.

Les méthodes de gestion préconisées seront celles qui amélioreront l'infiltration de l'eau (billonnage, labour, techniques d'irrigation, amendements organiques, gypseux ou calcaires, phytoremédiation) et le drainage des sols (drains enterrés, fossés à ciel ouvert), qui associeront les eaux pluviales douces aux eaux irriguées plus salées



▼ PHOTO 8
Salinisation secondaire d'un sol argileux par irrigation au goutte-à-goutte dans une plantation de grenadiers (région de Kairouan, Tunisie centrale).

© MONTOROI, IRD

▼ PHOTO 9
Excrétion de sel par les stomates des feuilles de palétuvier (*Avicennia africana*) en domaine fluvio-marin (vallée de Koubalan, Casamance, Sénégal).

© MONTOROI, IRD

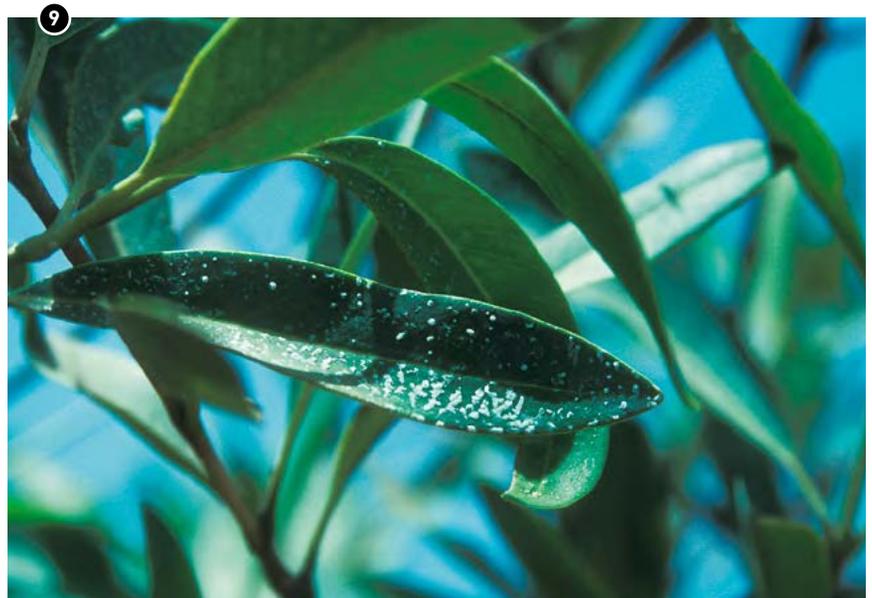
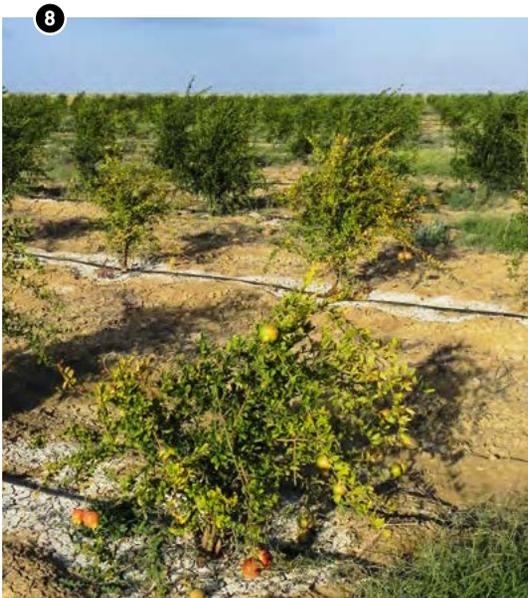


PHOTO 10
Semis manuel de maïs
dans un périmètre irrigué
villageois (Nord Sinai, El-
Salam, Égypte). Localement
apparaissent des taches
blanches d'efflorescences
salines à la surface du sol.
© MONTOROI, IRD



ou bien qui diversifieront l'origine des eaux d'irrigation, de la surface (barrage) au souterrain (aquifère) (photo 10). Cultiver des plantes peu sensibles aux conditions salines par adaptation naturelle ou génétique, protéger les zones côtières contre l'inondation (submersion, érosion) et l'intrusion souterraine d'eau de mer sont d'autres voies possibles, parfois complémentaires (Grundy *et al.*, 2007 ; Flowers et Colmer, 2008). La gestion des sols salés irrigués sera d'autant plus efficace et durable que des approches intégrées et des démarches participatives seront mises en œuvre (Marlet, 2005) (voir encadré 2). ●

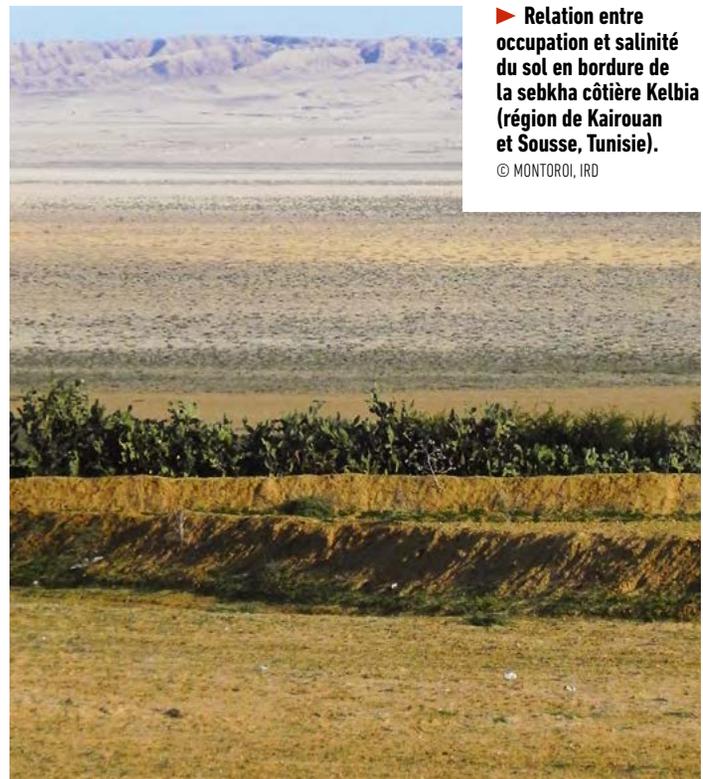
ABSTRACT

The soil salt indicates, in a simplified way, the salty state of a soil. From a more dynamic point of view, it also evokes the processes leading a soil to reach a salty state or to amplify this state. In this case, we will speak rather of "soil salinization" but the two terms can be considered in an equivalent way. This article presents the theme according to two complementary approaches. A first part aims at describing soil salt from field observations and laboratory analyzes. In crystallized form, the salt precipitates on the surface (saline efflorescence) or in the pores of the soil. In dissolved form, the salinity is measured either specifically by the salinity of the soil water, or globally by considering the other constituents of the soil. The two forms alternate according to the state of the soil moisture and can coexist. The processes of salinization (enrichment in dissolved salts) and sodization (enrichment in sodium ions) are defined in general and explained in the soil. The main types of saline soil and their global extent are briefly discussed. A second part is devoted to the origin of soil salinization and how man adapts to it in agriculture. Schematically, we distinguish a natural salinization, called primary, which accompanies or not an artificial salinization, called secondary. Irrigation of agricultural soils with more or less salty water leads to secondary salinization when poorly managed. Soil salt has negative impacts on living organisms (plants, animals) that must adapt or disappear. Cultivated plants have variable salt sensitivity thresholds. The agricultural development of salty soils is possible by means of appropriate management methods, often costly.

ENCADRÉ 2

► LA SALINISATION DES LITTORAUX : UN PHÉNOMÈNE GRANDISSANT

Le littoral constitue un domaine de transition entre les continents émergés et les océans. Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit le long des côtes. Ce seront les trois quarts à l'horizon 2035. Les processus de salinisation secondaire sont d'autant plus exacerbés qu'une gestion du littoral n'est pas convenablement planifiée et que le développement de l'irrigation est mal contrôlé. Les espaces littoraux sont aussi sensibles aux élévations soudaines du niveau marin (submersion marine épisodique) ou de long terme (submersion due au réchauffement climatique) et aux intrusions souterraines d'eaux salées (eaux océaniques). Les sebkhas côtières sont des milieux naturels très salés en leur centre et anthropisés en bordure. En suivant le gradient de salinité depuis la bordure vers le centre, une végétation de plus en plus halotolérante s'installe et l'agriculture ne devient possible que par irrigation. Les sols avoisinant les sebkhas subissent une salinisation primaire et secondaire qui risque de s'amplifier irréversiblement à plus ou moins long terme. —



► Relation entre occupation et salinité du sol en bordure de la sebkha côtière Kelbia (région de Kairouan et Sousse, Tunisie).

© MONTOROÏ, IRD

BIBLIOGRAPHIE

E. Bresler, B.L. McNeal, D.L. Carter (1982) - *Saline and sodic soils. Principles, dynamics, modeling*, Berlin, Springer-Verlag. R. Chhabra (1996) - *Soil salinity and water quality*, Rotterdam, A.A. Balkema. T.J. Flowers, T.D. Colmer (2008) - *Salinity tolerance in halophytes*, *New Phytologist*, n° 179, p 945. I. Ghassemi, A.J. Jakeman, H.A. Nix (1995) - *Salinisation of land and water resources. Human causes, extent, management and case studies*, Wallingford Oxon, Cabi. M. Grundy, D. Silburn, T. Chamberlain (2007) - *A risk framework for preventing salinity*, *Environ. Hazards*, n° 7, p. 97. S. Marlet (2005) - *Évolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées*. In : A. Hammani, M. Kuper, A. Debbarh (Eds), Actes du séminaire « Modernisation de l'agriculture irriguée », IAV Hassan II, Rabat, Maroc. J.P. Montoroï (1996) - *Gestion durable des sols de l'écosystème de mangrove en Casamance (Sénégal)*, *Dynamique de l'eau et des sels en période de sécheresse*, Études et Thèses, Orstom, Paris. I. Szabolcs (1989) - *Salt-affected soils*, Boca Raton Florida, CRC Press.

GÉOLOGIE

LES ÉVAPORITES
AU COURS DES TEMPS
GÉOLOGIQUES

Eaux Souterraines

SALINISATION DES EAUX
SOUTERRAINES : UN RISQUE MAJEUR
POUR LES POPULATIONS

AGRICULTURE

SEL PÉDOLOGIQUE :
UNE MENACE POUR LES SOLS
AGRICILES

JUN 2018 / 12 €

géosciences

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE

N°22

LE SEL

« AUX CONFINIS DE LA TERRE ET DE L'EAU »



Géosciences pour une Terre durable

brgm