

Note Technique #84

Comprendre les sols affectés par le sel

Sommaire:

Introduction

Formation des sols affectés par le sel

Gestion des sols

Gestion des plantes

Restauration des sols

Mesure de la salinité du sol

Par Bob Harter (PhD) et Tim Motis (PhD)

Publié en 2016



Image d'un sol salin par Robert Harter

INTRODUCTION

Importance et occurrence de sols affectés par le sel: Les agriculteurs et les jardiniers des régions semi-arides et arides du monde sont confrontés à deux problèmes associés mais distincts, qui restreignent les cultures qu'ils peuvent produire et le rendement de ces cultures. Le problème sous-jacent est le manque de précipitations nécessaires pour la culture des plantes. La seconde est l'accumulation de sels dans la zone racinaire. Les deux sont liés, mais ne se produisent pas nécessairement ensemble.

Comme l'a noté Epstein (1976), notre planète est un endroit très salé. Environ 70% de la surface de la terre est couverte d'océans. Un tiers de la superficie est semi-aride ou aride, dont la moitié est composée de sols hautement salins. Les sols salins des régions arides et semi-arides du monde ont tendance à restreindre les cultures qui peuvent être cultivées. La salinité est caractéristique dans les zones où l'évapotranspiration (l'eau transférée dans l'air à partir des plantes, du sol et d'autres surfaces) dépasse les précipitations. Mais plus d'évapotranspiration que de pluie ne conduit pas toujours à une accumulation excessive de sels dans la zone racinaire de la plante. Inversement, dans certaines situations, les sels sont suffisamment concentrés pour nuire à la croissance des plantes même si les précipitations dépassent l'évapotranspiration. Ce dernier cas peut comprendre les sols récupérés de sédiments marins, les zones d'altération minérale élevée, les zones de déblais minier, et les zones côtières sujettes à l'intrusion d'eau salée ou recevant des embruns salés, des ondes de tempête ou des dégâts causés par un tsunami. Ces sols peuvent être importants localement, mais se produisent rarement sur de grandes surfaces. Nous traiterons dans cet article de sols plus étendus affectés par le sel dans les régions arides et semi-arides du monde. Dans la plupart des cas, les techniques de restauration abordées seront des solutions tout aussi efficaces à la culture de ces sols plus localisés.

Effets indésirables des excès de sels: Les plantes ont besoin d'une certaine quantité de sels solubles, mais les excès de sels dans la zone racinaire réduisent la croissance des plantes en modifiant l'absorption d'eau. Lorsque la teneur en sel de l'eau du sol est supérieure à celle de l'eau à l'intérieur des cellules végétales, les racines des plantes ne peuvent pas absorber l'eau du sol. Elles peuvent même perdre de l'eau au profit du sol. L'excès de sels dans le sol peut également entraîner des toxicités ou des déséquilibres spécifiques aux ions. Dans certains cas, le remède à ces problèmes consiste simplement à améliorer le drainage. Cependant, les problèmes de salinité sont souvent plus complexes et nécessitent une bonne gestion des sols ainsi que l'utilisation de cultures tolérantes au sel.

Les excès de sels posent un défi à multiples facettes. De nombreux facteurs influent sur les contraintes à la production agricole en raison de la salinité. À quelques exceptions près, les sols affectés par le sel contiennent une combinaison de calcium (Ca), de magnésium (Mg), de potassium (K), de sodium (Na), de chlorure (Cl), de sulfate (SO₄), de carbonate (CO₃ ou HCO₃), et parfois de nitrate (NO₃). Le sol peut être alcalin ou neutre, selon le mélange d'ions et leur interaction avec la partie minérale du sol. Une bonne gestion du sol pour la croissance des plantes dépend de la combinaison de ces facteurs ainsi que de la

quantité de sel présente. Idéalement, les propriétés chimiques du sol devraient être analysées avant l'établissement d'un programme de gestion. Pratiquement, cependant, cela est peu probable pour les petites exploitations.

Les propriétés du sol influent sur les problèmes liés aux sels: Heureusement, certaines caractéristiques du sol se retrouvent sur une échelle suffisamment grande pour être nommées et classées, et les sols ayant des caractéristiques similaires nécessitent généralement des pratiques de gestion similaires. Les scientifiques du sol ont développé des systèmes taxonomiques pour classer les sols, mais la taxonomie des sols n'est pas uniforme à l'échelle internationale. Pour cette raison, nous n'utiliserons pas la taxonomie comme base de discussion. Le lecteur doit cependant se familiariser avec le système taxonomique du sol du pays dans lequel il travaille. La taxonomie des sols fait la catégorisation des informations sur les propriétés du sol, tout comme les désignations taxonomiques des plantes donnent des informations sur les matières biologiques. La taxonomie des sols affectés par le sel est basée sur des facteurs tels que le pH, la teneur en sodium et la teneur en sel soluble, en plus de l'humidité du sol. Tous ces facteurs influent sur le type de culture qui peut être cultivé avec succès sur le sol. Connaître le type de sol dans votre région peut donc être une première étape dans la conception d'un programme de gestion.

Indépendamment du système taxonomique utilisé, certains termes communs sont généralement utilisés pour décrire les sols. Certains des termes associés aux sols affectés par le sel (utilisés dans ce document) sont énumérés dans l'annexe pour référence.

UNITÉS COMMUNES UTILISÉES POUR ÉVALUER LA SALINITÉ

Pour mieux comprendre comment se forment les sols affectés par le sel et comment les gérer, il est utile de se familiariser avec les unités de mesure couramment rencontrées dans la littérature. La seule vraie façon de mesurer la salinité du sol est en laboratoire, ce qui est à la fois coûteux et long. Par conséquent, l'électroconductivité (EC) du sol a été largement utilisée pour estimer le niveau de salinité. L'eau pure a une valeur d'EC très faible et l'EC augmente lorsque la concentration de sel dans l'eau du sol augmente. Bien que d'autres facteurs (par exemple des particules de sol chargées) influencent l'EC outre la salinité, l'EC fournit une estimation utile de la quantité de sels solubles dans le sol. La plupart des données de recherche citées dans le reste de ce document sont exprimées en EC.

Deux unités de mesure différentes sont communément utilisées pour exprimer l'EC: le millimhos/cm (mmho/cm) et le deci Siemens/m (dS/m). Ce sont des termes de mesure identiques. Historiquement, il était plus facile de mesurer la résistance des sols que de mesurer l'EC. La résistance est mesurée en ohms et est inversement proportionnelle à la conductivité, donc la conductivité du sol était exprimée en 1 / ohm ou «mhos». À la fin du siècle dernier, les scientifiques du sol s'inquiétaient de l'utilisation de termes variés pour décrire les sols et ils n'étaient pas en accord avec le Système International (SI) d'unités, qui exprimait la conductivité en Siemens par mètre (S/m ou S m-1). Comme 1 mmho/cm est égal à 0,1 S/m, par souci de clarté et de facilité de conversion entre les unités, les pédologues se sont contentés d'exprimer la conductivité du sol comme dS/m qui est le même que l'ancien mmho/cm (1 mmho / cm = 1 dS/m). Plusieurs autres unités, telles que celles utilisées pour décrire les niveaux de sodium, sont expliquées au fur et à mesure qu'elles apparaissent dans le contenu qui suit.

FORMATION DES SOLS AFFECTES PAR LE SEL

Les processus par lesquels les sols affectés par le sel sont formés ont un impact sur leurs propriétés. Ces attributs, à leur tour, déterminent quelles plantes peuvent être cultivées, comment le sol doit être utilisé et géré, et avec quelle facilité il peut être récupéré des effets néfastes des excès de sels. En fonction de leurs propriétés, les sols affectés par le sel sont catégorisés comme salins, sodiques ou

une combinaison des deux. On estime que 23% des terres cultivées dans le monde sont salines et 37% sodiques (Shahid *et al.* et Al-Shankiti 2013). Les caractéristiques et les processus de formation de ces sols sont abordés ci-dessous.

Les sols salins contiennent suffisamment de sels pour avoir un impact négatif sur la croissance et le rendement de la plupart des plantes cultivées. Le degré de salinité auquel les rendements diminuent varie en fonction de la culture. Dans les sols hautement salins, seules les plantes adaptées au sel peuvent survivre et croître. Des minéraux tels que le calcium et le magnésium sont présents en quantités suffisantes pour empêcher le sodium de nuire aux propriétés du sol, comme expliqué plus loin dans cette section. Ainsi, malgré la présence de sels en excès et leurs effets contraignants sur les cultures, un sol salin a encore une structure bien définie et est bien drainé.

Les sols salins se trouvent le plus souvent dans des zones sèches et basses où le drainage est restreint, comme c'est le cas le long du système fluvial



du Nil dans certaines parties du nord du Soudan et de l'Égypte. Dans les zones humides, les précipitations dépassent l'évaporation. Les rivières et les cours d'eau coulent continuellement, remplissant les étangs ou les lacs, puis s'écoulant par un cours d'eau. Dans les régions arides, toutefois, l'évaporation dépasse les précipitations. Au lieu de remplir et de quitter une zone de bassin, l'eau s'accumule puis s'évapore, laissant derrière elle des quantités infimes de minéraux recueillies dans le paysage autour du bassin. Au fil du temps, ces minéraux s'accumulent jusqu'à ce que même les plantes halophiles (tolérantes aux sels) ne puissent pas survivre et qu'un «salar» se soit formé.

Des sols salins peuvent aussi se former dans des endroits, tels que dans les zones de faible altitude du système de la rivière Berg en Afrique du Sud (Flugel, 1991), où les eaux souterraines salées atteignent la surface du sol. Cela se produit dans les zones de suintement salin et d'intrusion d'eau salée. Ces sols sont généralement d'une étendue limitée et la situation peut être inversée (mais pas facilement). Dans le cas des suintements salins, l'inversion nécessite un programme de gestion des terres qui abaisse les niveaux d'eau souterraine en conjonction avec une irrigation ou des précipitations suffisantes pour évacuer les sels du sol.

L'intrusion saline se produit le plus souvent lorsqu'une couche d'eau souterraine fraîche est épuisée par des taux de pompage dépassant les taux de recharge d'eau douce. Cela affecte les aquifères côtiers dans des pays africains exposés à la sécheresse tels que l'Egypte, le Mozambique et le Nigeria (Steyl et Dennis 2010). Des mesures telles que l'utilisation accrue de l'irrigation au goutte-à-goutte peuvent être envisagées pour conserver l'eau et ainsi réduire les taux de pompage. Des taux de pompage réduits peuvent permettre à l'eau douce de se réaccumuler, réduisant la surface de l'eau salée, mais la contamination des sédiments par l'eau salée demeurera. Dans les zones côtières, la migration vers l'intérieur des eaux salées peut être minimisée par la restauration des barrières naturelles (par exemple les dunes de sable et les mangroves) ou l'établissement de digues (PNUD 2011). L'élimination subséquente des sels résiduels du sol se produit à mesure que l'eau douce lessive des sels sous les racines des cultures. Le paillage et les terrasses aident à retenir l'eau de pluie sur le sol pour évacuer les sels excédentaires et recharger les aquifères d'eau douce.

La salinisation du sol peut également se produire lorsque la terre a été irriguée avec de l'eau riche en sels, sans contrôle adéquat de l'utilisation de l'eau. On estime que 20% des terres irriguées (62 millions d'hectares) sont affectées par le sel (Ghassemi *et al.*, 1995, Metternicht et Zinck, 2003). Les zones où les terres irriguées ont été affectées négativement par la salinisation comprennent les bassins indo-gangétique (Inde) et de l'Indus (Pakistan). Heureusement, les sols salins peuvent souvent être remis en état en cultivant des halophytes (plantes tolérantes au sel) et en irriguant avec de l'eau à faible teneur en sel.

Les sols sodiques: Près de la moitié des sols affectés par le sel dans le monde sont sodiques. L'Amérique du Sud (l'Argentine, le Paraguay et le Brésil), l'Asie du Sud (l'Inde et le Bangladesh) et l'Afrique (le Tchad, le Nigéria, la Somalie, le Soudan, la Tanzanie et l'Afrique australe) sont les zones de sols sodiques (Huang et al., 2011). Comme leur nom l'indique, ces sols contiennent une grande quantité de sodium. Les sols sodiques résultent d'une combinaison de processus, qui sont mieux compris sur la base de la distinction que l'on peut faire entre les sels libres et les sels lières sont un mélange d'ions positifs (cations) et négatifs (anions) qui se déplacent librement dans l'eau du sol, également connue sous le nom de solution du sol. En revanche, les cations qui sont faiblement liés ou adsorbés aux surfaces négativement chargées des particules du sol ne bougent pas librement dans la solution du sol. Cependant, les cations adsorbés sur les particules du sol peuvent être remplacés ou échangés les uns contre les autres. Le degré avec lequel cela se produit dépend en grande partie de la charge des cations impliqués et des concentrations de cations dans la solution du sol.

La première étape dans la formation du sol sodique se produit lorsque le sel s'accumule dans le solum (profil du sol). Ces sels sont le produit d'un matériau parental riche en sodium, d'une remontée d'eau souterraine salée peu profonde par capillarité ou d'une évaporation d'eau salée pendant les périodes sèches. L'eau se déplace ensuite périodiquement à travers le solum, éliminant les sels libres en les lessivant à travers le profil du sol. Le sol devient sodique lorsque plus de 15% des cations échangeables sont des ions sodium; ce pourcentage est appelé PSE (pourcentage de sodium échangeable) d'un sol. Un sol sodique est également décrit par un taux d'adsorption de sodium (TAS) supérieur à 13 (le TAS décrit la concentration en ions sodium par rapport à celle du calcium et du magnésium).

Les sols sodiques souffrent d'une mauvaise structure du sol. Les grands ions sodium perturbent la capacité des particules du sol à rester ensemble. En même temps, parce que les sels libres ont été lessivés, les cations qui aident les particules du sol à s'agglomérer (se coller ensemble) sont en nombre insuffisant. Lorsque les particules d'argile s'éloignent suffisamment l'une de l'autre, elles se séparent ou se dispersent, en particulier lorsque l'humidité reçue par l'irrigation ou les précipitations est faible en sels (Murphy, 2006). L'élimination du sel, par le mouvement de l'eau à travers le sol, conduit à la dispersion des argiles lorsque le sel soluble total du sol diminue à moins d'environ 0,1 à 0,15 pour cent. Enfin, le carbonate de sodium (Na₂CO₃), généralement présent dans les sols arides, réagit avec l'eau pour former des ions hydroxyde (OH·), ce qui augmente le pH du sol (Abrol *et al.*, 1988). Le résultat final est le développement d'un sous-sol de plus en plus imperméable (Bui *et al.*, 1998; Indorante, 2006). Ainsi, les plantes sont plus affectées par une mauvaise aération du sol et par une teneur insuffisante en calcium et en magnésium que par une teneur élevée en sodium.

Les sols sodiques peuvent être productifs s'ils sont bien gérés, mais ils font partie des sols arides les plus difficiles à valoriser à des fins agricoles. La surface a tendance à former une croûte dure lorsqu'elle est sèche. Cela limite l'infiltration de l'eau et empêche l'émergence des semis. Le scellement de surfaces rend ces sols vulnérables à l'érosion, ce qui entraîne une perte de productivité et une contamination

des cours d'eau. De plus, les argiles dispersées ont tendance à se déplacer vers le bas dans le profil et forment un sous-sol dense et imperméable, ce qui provoque l'engorgement de la surface et limite la croissance des racines vers le solum (Murphy, 2006). La susceptibilité à l'érosion signifie que la couche imperméable dense devient souvent exposée. Les argiles dispersées dans le sous-sol sont encore plus sensibles à l'érosion, de sorte que l'érosion des nappes et des ravines est commune dans ces sols. Pour cette raison, les sols sodiques sont souvent mieux adaptés aux pâturages utilisant des herbes indigènes (Bui *et al.* 1998).

Les sols salins-sodiques ont les caractéristiques des deux types de sol ci-dessus. Ils ont à la fois un TAS élevé et des accumulations de sels en excès.

RESTAURATION DU SOL

Sols salins: Comme indiqué ci-dessus, les sols salins sont théoriquement les plus faciles à restaurer. Rendre ces sols propices à la croissance des plantes nécessite simplement l'élimination des excès de sels. Malheureusement, dans la plupart des cas, ce processus n'est pratiquement pas simple. L'élimination du sel nécessite l'utilisation d'eau, et les réserves d'eau dans ces zones contiennent généralement des sels prélevés dans les sols du bassin versant. Ainsi, à moins de disposer d'un approvisionnement en eau de haute qualité, des précautions particulières doivent être prises pour assurer l'élimination du sel, plutôt qu'une accumulation supplémentaire de sel. En général, l'objectif de la restauration est d'enlever suffisamment de sels de la zone des racines des plantes pour qu'au moins les plantes halophiles puissent survivre et produire.

Les sols salins peuvent être restaurés grâce à une combinaison d'irrigation et de drainage. La teneur en sel d'un sol peut généralement être réduite si le drainage souterrain est possible. Dans certains cas, les eaux souterraines sont suffisamment profondes et le sol souterrain est suffisamment perméable pour simplement arroser le sol avec assez d'eau afin d'évacuer les sels de la zone racinaire.

Si le drainage souterrain n'est pas possible, un certain type de drainage souterrain artificiel sera nécessaire. Ce dernier est généralement une option coûteuse. Sur une petite échelle, des plates-bandes surélevées peuvent être construites avec des matériaux poreux sous-jacents pour le drainage. Sur une plus grande échelle, il peut être possible de couper des drains de surface suffisamment profonds pour croiser une nappe phréatique peu profonde et ainsi enlever les excès de sels.

Dans tous les cas, un approvisionnement abondant en eau est nécessaire. Le tableau 1 fournit des estimations des quantités nécessaires. A titre d'exemple, supposons que nous voulons réduire la conductivité électrique (EC) d'un sol de 8 à 4 millimhos / cm. Ceci représente une réduction de 50 pour cent des sels, nécessitant l'application de 15 centimètres d'eau à faible teneur en sels. Cette quantité de "15 cm" se réfère à la profondeur de l'eau nécessaire. Comme l'illustre l'encadré 1 ci-dessous, le volume d'eau réel nécessaire dépend de la zone de terre sur laquelle l'eau est

Tableau 1: Estimation de l'application d'eau nécessaire pour lessiver les sels. (Cardin *et. al.* 2007)

Pourcentage de réduction de sel	Quantité d'eau requise	
50%	15 cm	
80%	30 cm	
90%	60 cm	

appliquée. L'encadré 1 ci-dessous montre comment calculer la quantité d'eau nécessaire pour éliminer 50% des sels d'une parcelle de terrain d'un mètre sur un mètre.

À plus grande échelle, 1,5 million de litres d'eau seraient nécessaires pour un même degré de restauration d'un hectare (150 litres par mètre carré x 10 000 mètres carrés par hectare). Il faut reconnaître que, lorsque la teneur en sel de l'eau augmente, le volume d'eau requis augmente en conséquence. Évidemment, alors, l'objectif devrait être de simplement éliminer suffisamment de sels pour permettre aux plantes cultivées de croître et de produire une récolte. Pour savoir si une application d'eau a éliminé suffisamment de sels pour faire pousser cette culture, il est nécessaire de pouvoir mesurer la salinité du sol (comme expliqué plus loin dans ce document). La lixiviation pour restaurer les sols est plus faisable sur les sols qui drainent bien, par rapport aux sols argileux qui limitent l'infiltration de l'eau.

Sols sodiques: La restauration des sols sodiques est un processus plus difficile. Dans ces sols, les sels en excès ont déjà été éliminés et le sol a développé un TAS élevé. Le sodium a remplacé la plupart ou la totalité de plusieurs éléments nutritifs (tels que le calcium et le magnésium) nécessaires à la croissance des plantes. Le sol atteindra généralement une nature alcaline avec un pH égal ou supérieur à 9,0, et le sous-sol deviendra dense et imperméable.

Si le sol n'est pas complètement imperméable et qu'il est possible de percoler au moins une petite quantité d'eau, il est généralement possible de restaurer ces sols. Le processus doit inclure le remplacement du sodium par le calcium. Le calcium sert d'élément nutritif nécessaire aux plantes et provoque l'agrégation des particules du sol, l'ouverture du sol et l'augmentation de la perméabilité. Habituellement, le gypse (sulfate de calcium déshydraté, CaSO₄ · 2H₂O) est utilisé comme source de calcium. Le sodium dans le sol est remplacé par le calcium et lessivé sous forme de sulfate de sodium (Na₂SO₄). Le sulfate réduit également l'alcalinité du sol. La quantité de gypse requise dépend de la quantité de sodium dans le sol (voir l'encadré 2 pour un exemple de calciul). N'ajoutez pas une source de calcium comme le gypse à un sol salin qui n'est pas sodique, car le calcium supplémentaire ne fera qu'aggraver la condition de salinité.

Encadré 1. Comment calculer le volume d'eau nécessaire pour éliminer 50% des sels d'une parcelle de terrain d'un mètre sur un mètre.

Comme 1 millilitre est égal à 1 centimètre cube, il est plus facile de travailler en termes de centimètres.

Nous savons déjà qu'il faut 15 cm d'eau pour éliminer 50% des sels dans le sol.

Etant donné que 1 mètre équivaut à 100 cm, on peut faire les calculs suivants:

Superficie = 100 cm (largeur) X 100 cm (longueur) = 10 000 cm²

Volume: 10 000 cm² (surface) X 15 cm (profondeur) = 150 000 cm³

C'est la même chose que 150 000 ml. Comme il y a 1000 ml dans un litre, divisez 150 000 ml par 1000 pour obtenir 150 litres.

Ainsi, il faut 150 litres pour appliquer 15 cm d'eau sur 1 mètre carré de terrain.

En raison de leur faible perméabilité, la rénovation des sols sodiques est un processus lent. Il peut parfois accéléré en incorporant de la matière organique et en détachant autrement la zone racinaire. Cependant, le sous-sol reste lentement perméable, il faut donc veiller à ne pas engorger la zone racinaire. Qureshi et Barrett-Lennard (1998) ont indiqué que le fumier de ferme est particulièrement bénéfique car il améliore la structure physique du sol tout en fournissant des nutriments aux plantes. Ils ont également constaté que les boues de filtration des raffineries de sucre sont une autre excellente source de

Encadré 2. Un exemple de calcul pour déterminer les besoins en gypse d'un sol sodique.

(Adapté d'une fiche technique de vulgarisation de la Colorado State University par Davis et al. 2007).

Un rapport d'analyse de laboratoire montre que votre sol contient les éléments suivants:

- Capacité d'échange de cations (CEC) = 18 centimoles de charge par kilogramme (cmolc / kg) de sol (ou 18 milliéquivalents / 100 grammes).
- Taux d'adsorption de sodium (TAS) = 26

Supposons que le TAS est le même que le pourcentage de sodium échangeable (PSE), ce qui signifie que le PES initial est de 26%. Supposons également que, pour modifier les 30 premiers cm d'un hectare (ha) de sol, il faut 3,81 tonnes métriques de gypse pur pour remplacer chaque cmolc de sodium échangeable présent par kg de sol.

De quelle quantité de gypse auriez-vous besoin pour appliquer les 30 premiers centimètres (12 po) de sol afin de réduire le PSE de 26% à 10%? Calculez la réponse comme suit:

- Déterminez combien de sodium échangeable doit être remplacé par du calcium.
- PSE initial PSE souhaité = PSE à remplacer par du calcium
- •26% 10% = 16% de sodium échangeable à remplacer par du calcium
- Déterminez maintenant combien de cmolc de sodium par kg de sol doivent être remplacés. Nous savons déjà que 1
 kg de notre sol a 18 cmol de CEC, et que nous voulons remplacer 16% de sodium échangeable par du calcium.
- 16% X 18 cmolc / kg de sol = 2,88 cmol de sodium par kg de sol à remplacer par du calcium
- Ensuite, calculez combien de tonnes de gypse pur il faut pour restaurer une profondeur de sol sodique de 30 cm sur 1 ha, basé sur la nécessité de remplacer 2,88 cmol de sodium par kg de sol par du calcium:
- •3,81 tonnes de gypse/cmolc de sodium/kg de sol X 2,88 cmol de sodium/kg de sol à remplacer = 10,9 tonnes/ha de gypse pur
- Enfin, ajustez la pureté du gypse. Si votre gypse est pur à 60%, vous devrez appliquer: 10,9 tonnes métriques de gypse pur / 0,6 = **18,2 tonnes métriques/ha de gypse pur à 60%**

NOTE: Selon Hanson (1993), environ 1 acre-pied d'eau dissout 1 tonne de gypse; cela équivaut à 1.359.957 litres d'eau nécessaires pour dissoudre 1 tonne métrique de gypse.

matière organique pour améliorer la condition physique du sol. Les boues de filtration contiennent du soufre, ce qui aide à acidifier le sol.

GESTION DES SOLS

Idéalement, un programme de gestion devrait mener à la remise en état du sol tel que décrit ci-dessus. Dans la pratique, cela pourrait ne pas être économiquement réalisable, ou il peut être impossible d'obtenir les intrants nécessaires. Heureusement, diverses techniques ont été mises au point pour éliminer les sels des alentours des racines, ce qui permet de produire des cultures sur des sols salés. Certaines idées sont partagées ci-dessous; Le livre de Qureshi et Barrett-Lennard (1998) est recommandé pour une discussion plus détaillée sur la gestion des sols salins et sodiques.

Culture en plates-bandes surélevées: Les plates-bandes surélevées peuvent aider à minimiser les effets de la salinité du sol. Bien que laborieux à construire et pas vraiment réalisables pour la production à grande échelle, elles peuvent être une solution idéale pour une petite cuisine ou un jardin maraîcher. La terre pour la plate-bande peut être choisie à partir de n'importe quelle source; utilisez de la terre à faible teneur en sel disponible et mélangez bien avec du fumier animal ou d'autres matières organiques. Si les sols de la zone sont salins, assurez-vous d'isoler la plate-bande du sol sous-jacent d'une manière ou d'une autre afin de rompre la continuité capillaire, afin que les sels ne migrent pas du sol sous-jacent vers la plate-bande. Une division pourrait être faite en plaçant une couche de gravier grossier ou des branches d'arbres et de la broussaille entre la terre de la plate-bande et la terre sous-jacente. La plate-bande devrait être sur-arrosée

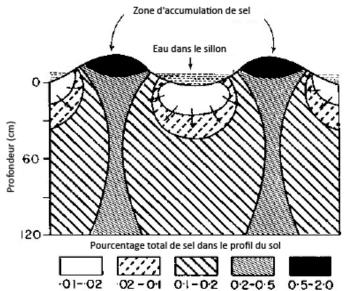


Figure 1: Direction de l'écoulement du sel et accumulation de sel dans l'irrigation du sillon. (Abrol et al. 1988)

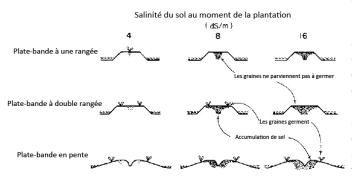


Figure 2: La structure de l'accumulation de sel dépend de la forme de la plate-bande et de la méthode d'irrigation. (Bernstein et al. 1955)

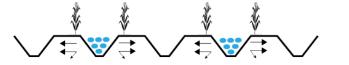


Figure 3: Illustration de «l'irrigation permanente par sillon», une approche de la plate-bande surélevée pour minimiser l'exposition des racines à une salinité élevée. Les flèches indiquent la direction du mouvement du sel en réponse à l'irrigation de tous les autres sillons. Les sillons irrigués sont indiqués par des points bleus, les sillons non pointillés sont ceux qui restent secs. (Adapté de Devkota *et al.*, 2015)

périodiquement, pour lessiver toute accumulation de sels contenus dans l'eau d'irrigation. Cela ne devrait être fait que pendant une période de jachère car, une fois que la capillarité est perturbée, le sol doit être saturé avant que l'eau ne pénètre dans les pores plus ouverts de la matière sous-jacente. Devkota *et al.* (2015) ont souligné que le paillis de surface sur les plates-bandes surélevées réduit l'évaporation, réduisant ainsi le dépôt de sel sur le dessus des plates-bandes surélevées.

Contrôle du sel dans la zone racinaire: Les plantes peuvent être stratégiquement placées pour minimiser les concentrations de sel près des racines. Une méthode possible est illustrée à la figure 1. Lorsqu'on utilise l'irrigation par submersion sur des sols non salins, il est courant de planter la culture au sommet d'une crête, qui reste non saturée pendant que l'eau se déplace dans un sillon. Cependant, ceci est inversé lorsqu'on irrigue un sol salin par submersion. La capillarité fait que l'eau se déplace du sillon à la crête, où elle s'évapore ensuite et dépose les sels qu'elle transporte. De cette manière, la teneur en sel du sol dans le sillon est réduite, c'est donc là que la culture est plantée. Semer les graines dans cette zone de faible concentration en sel favorise la germination des graines, qui est généralement très sensible à la teneur du sol en sel.

L'inconvénient de cette méthode est que, pendant et immédiatement après l'irrigation, le sol dans le sillon sera saturé d'eau. Alors que certaines plantes peuvent supporter de courtes périodes de saturation, d'autres ne le peuvent pas. Les graines et les jeunes plantes peuvent être particulièrement sensibles à l'engorgement. Pour résoudre ce problème, la méthode d'irrigation par sillon peut être modifiée en semant les graines en rangées simples/doubles sur le bord de la crête ou sur les côtés de crête inclinés. La conception exacte dépendra de la sensibilité des semis et de la teneur en sel du sol. La figure 2 présente trois modèles qui peuvent être utilisés dans des zones de teneur en sel croissante. Comme illustré, les graines ne germeront que lorsqu'elles seront semées de manière à éviter l'accumulation excessive de sel autour d'elles.

Devkota et al. (2015) ont testé une stratégie d'irrigation des sillons alternatifs pour «pousser» les sels du côté irrigué d'un sillon (où se trouvent les plantes) jusqu'au côté sec et non ensemencé de chaque plate-bande (Figure 3). Dans cette approche, tous les autres sillons sont normalement gardés secs (aucune irrigation n'est appliquée); cependant, les sillons « secs » peuvent être irrigués peu fréquemment, lorsqu'il devient nécessaire de lixivier les sels qui se sont accumulés sur les côtés secs des plates-bandes.

Raclage de la surface: Dans les sols salins, les sels s'accumulent habituellement à la surface pendant les périodes de forte évaporation. Si l'accumulation est suffisante pour former des croûtes de sel, la teneur en sel du sol peut être réduite en retirant simplement la croûte. Cette méthode a cependant quelques inconvénients. En retirant la croûte, certains éléments nutritifs des plantes seront également éliminés, de sorte qu'un retrait régulier sans reconstitution des éléments nutritifs diminue la fertilité du sol. L'élimination de la matière de la croûte peut aussi constituer un problème, car les sels contamineront la zone sur laquelle ils sont placés et peuvent augmenter la salinité des eaux souterraines sous-jacentes et des sources d'eau de surface avoisinantes.

GESTION DES PLANTES

La section précédente a fourni des renseignements sur les façons de réduire suffisamment la teneur en sel du sol pour faire pousser les cultures souhaitées. Une autre approche consiste à semer des cultures qui peuvent pousser et produire avec succès dans des sols à forte teneur en sel. Chaque espèce et variété végétale pousse mieux dans une gamme d'humidité du sol, de fertilité, de lumière du soleil, de matières potentiellement toxiques et de salinité. Comprendre ces paramètres et les exigences pour une culture donnée est important pour la gestion du sol et le choix de la culture.

Halophytes: Quelques espèces végétales (appelées halophytes) poussent mieux dans des conditions salines. Certains ont suggéré que les halophytes ayant une valeur économique pourraient même être utilisés pour inverser le processus de salinisation et restaurer le sol lorsque les techniques de gestion ne sont pas réalisables (Diatta et al. 2000).

Le quinoa

Rao et Shahid (2007) ont noté que le quinoa (Chenopodium quinoa Willd.), par exemple, peut germer dans un mélange de 1/3 d'eau de mer et 2/3 d'eau douce. Ils ont également signalé qu'il peut être cultivé dans du sable dans des conditions extrêmement sèches, avec aussi peu que 200 mm de pluie. Originaire des montagnes des Andes en Bolivie, au Chili et au Pérou, le quinoa est l'une des rares

cultures cultivées dans les couches de sel du sud de la Bolivie et du nord du Chili. La graine du quinoa est un aliment très nutritif, avec une teneur en protéines et une qualité qui dépassent souvent celles des grains de céréales mieux connus.

La salicorne

Un autre halophyte remarquable est un arbuste vivace à croissance lente communément appelé salicorne (Batis maritima L.; Figure 4). La salicorne, qu'on trouve principalement le long des côtes tropicales et subtropicales des Amériques, pousse bien dans les marais salés ou saumâtres (mélange de sel et d'eau douce) et les lagunes autour des rives (Fiche d'information de CABI). Bien que considérée comme une mauvaise herbe envahissante à Hawaii, on la cultive pour restaurer les zones côtières salées où peu d'autres plantes poussent. La salicorne couvre et protège le sol exposé contre l'érosion, servant de culture pionnière qui aide à rétablir les mangroves détruites par les tempêtes. Les graines comestibles sont une riche source de protéines et d'huile saines (Marcon 2003).

Les herbes salées

Les herbes salées (espèces de Distichlis telles que spicata) pourraient également être utilisées pour la restauration des sols, car elles ont tendance à accumuler les sels à la surface des feuilles. La découverte d'un concept de «photohalosynthèse» (Biel et Yensen 2006), impliquant le stockage d'énergie sans chlorophylle, pourrait inciter les phytogénéticiens à développer des Figure 4: Plantes de salicorne (Batis lignées présentant une efficacité accrue en matière d'accumulation de sel. L'utilisation de telles maritima). Photo par Forest et Kim Starr, herbes pourrait rendre un sol marginalement productif en un sol aéré et fertile. Distichlis spicata https://commons.wikimedia.org/wiki/ est également utilisé comme fourrage pour le bétail (Lymbery et al. 2013).



United States Geological Survey. Source:

Les grandes cultures: Les plantes cultivées diffèrent beaucoup dans leurs capacités à survivre et à donner des rendements satisfaisants lorsqu'elles sont cultivées dans des sols salins. Il est important d'avoir des informations sur la tolérance relative des cultures à un environnement de sol salin lors de la planification des périodes de culture pour des rendements optimaux. Parfois, les agriculteurs doivent s'accommoder avec les problèmes de salinité; par exemple, l'eau saline peut être leur seule source d'eau pour l'irrigation. Dans d'autres situations où une eau de bonne qualité est disponible pour la restauration des sols salins, il peut être économiquement avantageux de faire pousser des cultures simultanément avec les efforts de restauration des sols (Abrol et al. 1988).

Le riz

Le riz (Oryza sativa) est la culture céréalière la plus cultivée partout où l'eau est disponible. Alors que le riz est modérément sensible à la forte teneur en sel, le fait de le cultiver avec une faible couche d'eau sur le terrain dilue le sel du sol et tout drainage à travers le sol élimine les sels de la zone racinaire. Ainsi, le riz survivra et produira dans des sols affectés par le sel, où d'autres plantes également sensibles ne pourront pas.

Le riz est particulièrement bien adapté à l'utilisation sur les sols sodiques et est souvent utilisé pour la restauration des sols (Abrol *et al.*, 1988). La très faible perméabilité de ces sols est un avantage lors de la culture du riz, car la réduction de la perte d'eau aide à maintenir l'eau dans le champ. Alors que le mouvement descendant de l'eau à travers le profil du sol est minimisé, une percolation profonde continue à se produire, ce qui réduit le TAS en éliminant le sodium échangeable (non lié au sol) du sol de surface. En outre, dans des conditions inondées, le pH du sol tend à décliner de la plage alcaline à presque neutre (pH 7,0). Cela a été attribué, au moins en partie, à une augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) du sol générée par la respiration des racines et de la vie microbienne. Le mouvement du CO₂ du sol vers l'air est limité par la couche d'eau sur le sol, de sorte qu'il s'accumule dans le sol, aidant à réduire le pH.

La riziculture est également bénéfique pour la restauration des sols salins. La restauration nécessite que les sels solubles du profil soient lessivés et drainés, mais une eau de bonne qualité est souvent rare dans les régions arides. La lixiviation seule pendant des périodes prolongées n'est ni faisable ni justifiable, de sorte que le riz – qui est modérément tolérant au sel – peut facilement être cultivé pour tirer profit d'une culture tout en restaurant le sol. Même sur les sols à faible taux d'infiltration, une quantité suffisante d'eau (100 à 200 mm en une seule saison) se déplace dans le sol jusqu'aux sels de lixiviation.

Lorsque l'intrusion de sel constitue un problème, comme les zones côtières touchées par les ouragans, même le riz est difficile à cultiver. Des scientifiques de l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI, www.irri.org) ont mis au point et commercialisé des variétés de riz tolérantes au sel qui pourraient être disponibles dans certains pays.

Le sorgho

Le sorgho à grains (*Sorghum* spp.) tolère modérément les sels et produira bien sur les sites secs. C'est l'une des plus importantes cultures céréalières au monde, en particulier en Afrique. Il sera probablement familier aux agriculteurs de subsistance dans les régions tropicales sujettes à la sécheresse. Le genre contient plusieurs espèces de sorgho à grains, adaptées aux climats et aux goûts dans diverses régions arides des tropiques.

Le millet

Le millet est un nom donné à une variété de plantes, les plus communes étant *Pennisetum glaucum* (millet perlé), *Setaria italica* (petit mil), *Panicum miliaceum* (millet commun) et *Eleusine coracana* (coracan). Tous sont modérément tolérants aux sels et produiront bien dans les zones arides.

Le blé

Le blé (*Triticum* spp.) est également tolérant aux sels, mais nécessite un peu plus d'eau pour la production. Les zones semi-arides sont peut-être plus adaptées à cette culture céréalière. Le blé durham (*T. durham*) est probablement le plus tolérant au sel du groupe.

L'orge

L'orge (*Hordeum vulgare*) tolère assez bien les fortes concentrations de sel et n'a pas besoin d'une grande quantité d'eau. Comme il pousse mieux sous des conditions fraîches, il n'est pas idéal pour les zones tropicales, sauf à haute altitude.

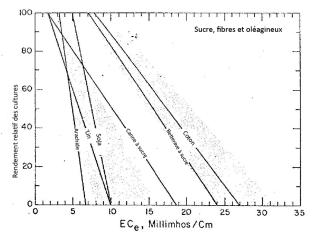


Figure 5: Tolérance à la salinité de diverses cultures céréalières. (Maas et Hoffman 1976)

Bien que l'on puisse envisager de cultiver n'importe laquelle de ces céréales sur des sols affectés par le sel, la tolérance aux conditions salines ou sodiques n'est pas une propriété fixe. Cela varie en fonction de l'état de croissance d'une plante, ainsi que des conditions climatiques. La tolérance peut également varier au sein d'une même espèce. Tout aussi important, la courbe des relations de réponse (dans ce cas, la diminution du rendement à mesure que la salinité augmente) diffère selon les plantes. Dans quelques cas, comme l'arachide et le soja sensibles au sel (figure 5), la diminution du rendement avec une salinité croissante est très rapide. Inversement, avec l'augmentation de la salinité, la productivité de la canne à sucre diminue moins rapidement que celle du soja, même si le rendement commence à diminuer à un niveau de salinité plus faible pour la canne à sucre que pour le soja.

Les tableaux 2 et 3 montrent le niveau de salinité du sol auquel le stress sur diverses plantes commence à entraîner une diminution du rendement. Ils indiquent également la vitesse à laquelle le rendement d'une culture diminue avec de nouvelles augmentations de la salinité. Comme on peut le voir, la relation varie considérablement avec les différentes cultures. Bien que plusieurs grandes cultures soient tolérantes ou modérément tolérantes à la salinité du sol, il n'en est pas de même pour les légumes. Très peu de plantes normalement cultivées dans un potager sont même modérément tolérantes à des niveaux élevés de salinité. Comme indiqué précédemment, cependant, la culture de légumes est bien adaptée à l'utilisation de plates-bandes surélevées, dont les sols sont plus facilement améliorables par l'incorporation de matières organiques de même que l'élimination des sels par lessivage.

Tableau 2: Tolérance au sel de grandes cultures et de légumes divers (Maas et Grattan 1999).

		<u> </u>	,
	Seuil maximal de salinité du sol sans perte de rendement	Salinité maximale de l'eau pouvant être utilisée sans réduction de rendement * (dS / m)	Courbe (% de réduction du rendement par unité dS / m d'augmentation)
	Grand	es cultures tolérantes au sel	
Coton	7.7	5.1	5.2
Blé	6.0	4.0	7.1
Orge	8.0	5.3	5.0
Betterave à sucre	7.0	4.7	5.9
Canola (B. napus)	11.0	7.3	13
Canola (B. campestris)	9.7	6.5	14
	Légu	mes modérément tolérants	
Artichaut	6.1	4.1	11.5
Asperge	4.1	2.7	2.0
Betterave rouge	4.0	2.7	9.0
Courgette	4.9	3.3	10.5
Pourpier	6.3	4.2	9.6
	Légu	mes modérément sensibles	
Ail	3.9	2.6	14.3
Pois	3.4	2.3	10.6

^{*} suppose une fraction de lixiviation de 15 à 20%; adapté de Maas et Hoffman (1977) et Maas (1984b) [extrait de: Ayers et Westcot. 1994. <u>La qualité de l'eau pour l'Agriculture</u>, l'irrigation et le drainage Document 29, rév. 1, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome].

Légume	Seuil maximum de salinité du sol sans perte en rendement (dS/m)	Diminution du rendement à des salinités du sol supérieures au seuil (% par dS/m)	
Cultures sensibles			
Haricot	1.0	19	
Carotte	1.0	14	
Fraisier	1.0	33	
Oignon	1.2	16	
Modérément sensibles			
Navet	0.9	9	
Radis	1.2	13	
Laitue	1.3	13	
Poivron	1.5	14	
Patate douce	1.5	11	
Fève	1.6	10	
Maïs	1.7	12	
Pomme de terre	1.7	12	
Choux	1.8	10	
Céleri	1.8	6	
Epinard	2.0	8	
Concombre	2.5	13	
Tomate	2.5	5 10	
Brocoli	2.8	9	
Courge, coquille Saint-Jacques	urge, coquille Saint-Jacques 3.2 16		

Fourrages: La plupart des agriculteurs de subsistance ont au moins quelques animaux, pour lesquels des plantes fourragères devront être cultivées. Comme on l'a déjà noté, les millets et le genre *Sorgho* tolèrent les sols à haute teneur en sel et plusieurs espèces conviennent bien comme fourrages. Le criblage de 42 variétés de millet perlé et de 49 variétés de sorgho a montré une grande variabilité de la résistance aux effets d'une forte salinité (15 dS / m EC). Il y avait une différence d'environ 200% au poids à sec entre les variétés de millet perlé les moins sensibles et les plus sensibles, et une différence d'environ 700% entre les variétés de sorgho les moins sensibles et les plus sensibles (ICRISAT 2002).

Comme noté par Abrol *et al.* (1988), les graminées sont généralement plus tolérantes aux conditions sodiques que la plupart des grandes cultures. L'herbe de Karnal (*Diplachne fusca*), l'herbe de Rhodes (*Chloris gayana*) et l'herbe de para (*Brachiaria mutica*) sont très tolérantes aux sols sodiques. L'herbe de Karnal pousse et donne de très bons rendements dans un sol très sodique (ESP de 80 à 90), même si aucun amendement n'est appliqué. L'herbe de Rhodes produit également très bien. En outre, l'herbe de Karnal et l'herbe de para sont très tolérantes aux conditions d'eau stagnante, qui sont typiques des sols sodiques pendant la saison des pluies et après l'irrigation.

Lorsque les graminées sont cultivées sur des sols sodiques, il y a une diminution continue de la sodicité du sol avec le temps et une amélioration des propriétés physiques du sol en raison de l'action biologique des racines. Ainsi, en plus de fournir du fourrage dont on a grand besoin, la culture d'herbes tolérantes améliore les sols en augmentant l'absorption de l'eau de pluie, en réduisant le ruissellement et en réduisant la perte de sol due

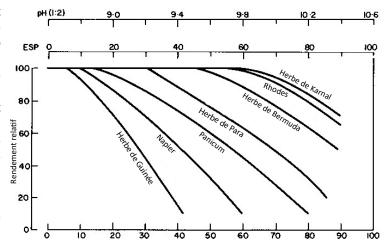


Figure 6: Tolérance relative de quelques herbes au sodium échangeable (ESP). (Abrol *et al.* 1988)

à l'érosion. La figure 6 représente la tolérance relative au sodium échangeable de quelques herbes sélectionnées.

LA MESURE DE LA SALINITÉ DU SOL

Options de l'appareil:

Trois types de compteurs potentiels sont énumérés ci-dessous et illustrés à la figure 7:

- Un analyseur de table de recherche en laboratoire équipé d'une électrode de mesure de l'électroconductivité.
- Un appareil portatif de mesure de l'EC.
- Un multimètre ohmmètre/voltmètre portatif bon marché.









Figure 7: Appareils de mesure de la salinité. On voit ici des conductimètres électriques de laboratoire (à gauche) et à main (au milieu), ainsi que des multimètres ohmmètre/voltmètre (à droite). Source: Tim Motis

Les analyseurs de laboratoire et les compteurs portatifs d'EC affichent souvent à la fois l'EC et des unités de matières dissoutes totales (MDT, le mot «matières» fait référence aux minéraux dissouts), les MDT étant indiqués en parties par million (ppm ou mg/L). Les deux unités sont des indicateurs de la quantité de sels. Dans la plupart des conditions (pour une EC comprise entre 0,1 et 5,0 dS/m), la formule pour convertir les MDT en EC est la suivante:

MDT (en ppm ou mg/L) = EC (en dS/m) X 640 Donc, 1 dS/m = 640 ppm (ou mg/L)

En termes de coût, un analyseur de table de recherche en laboratoire pour la mesure de l'EC est l'option la plus chère (plus de 400 USD). Les multimètres portatifs d'EC/MDT et les multimètres ohmmètre/voltmètre peuvent être achetés au prix de 25 USD ou même moins. Bien que moins précis que les compteurs d'EC/MDT, les multimètres ohmmètre/voltmètre sont probablement les plus facilement disponibles dans les zones où vivent la plupart des petits agriculteurs.

Collecte d'échantillons de sol: Comme les semis sont les plus sensibles aux dégâts causés par le sel, essayez de prélever le sol à partir de la profondeur à laquelle la semence sera mise en terre. N'incluez pas de croûte de sel de surface qui pourrait être présente. Dans la plupart des sols «salés», l'échantillon sera meuble, mais écrasez tous les agrégats ou les mottes d'argile.

Placez la terre dans un récipient propre, sec, non métallique (par exemple en plastique, en verre ou en céramique). Ajoutez de l'eau sans sel jusqu'à ce que vous puissiez voir l'eau qui brille sur la surface, mais pas au-dessus de la surface. L'eau distillée est la meilleure, mais l'eau de pluie est acceptable. Il peut être nécessaire d'ajouter un peu plus d'eau après que le sol a absorbé l'humidité initiale. Vous avez créé une condition de sol saturée. Après une courte période d'équilibration – les sels solubles ne tardent pas à se dissoudre, donc 10 minutes devraient suffire – mesurez la conductivité du sol.

Certains compteurs portatifs d'EC (par exemple Field Scout) sont conçus pour prendre des mesures directement dans un sol saturé d'eau (Scoggins et lersel 2006), mais ils sont assez chers. Les multimètres ohmmètre/voltmètre sont beaucoup moins chers, et les pointes de touche peuvent être insérées directement dans le sol. Quel que soit le compteur, assurez-vous de prendre des mesures dans un sol saturé ou presque saturé, car la conductivité électrique dans un sol non saturé peut refléter davantage l'humidité du sol que les sels solubles. Ceci parce que le sol humide conduit l'électricité mieux que le sol sec. Lorsque vous mesurez la salinité directement dans le champ ou le jardin, versez de l'eau sans sel sur le sol, puis insérez la sonde dans le sol humidifié.

Prise de relevés de salinité avec un ohmmètre/voltmètre

Étant donné le faible coût et la disponibilité des multimètres ohmmètre/voltmètre, nous (Tim Motis et Bob Harter) avons testé pour voir si un multimètre ordinaire mesurait bien la salinité. Nous avons trouvé qu'il arrive à bien déterminer si la salinité d'un sol est faible ou élevée. Dans notre expérience, les compteurs analogiques sont plus faciles à utiliser que les compteurs numériques. Les paramètres des ohms sur les compteurs analogiques se prêtent bien à la conversion des ohms en EC, et les compteurs numériques ne réussissaient pas parfois à enregistrer une donnée avec les câbles placés dans un sol liquide ou humide. Choisissez un compteur analogique avec un réglage "X10" ohm et l'écran le plus large possible. Les compteurs plus petits avec des écrans étroits peuvent également fonctionner, mais les chiffres sont étroitement espacés et plus difficiles à lire.

Une fois que vous avez un compteur et que vous avez préparé un échantillon de terre (comme décrit dans la section), prenez un relevé comme suit:

Étape 1: Préparez le compteur pour utilisation.

- Assurez-vous que la pile à l'intérieur du compteur est neuve, car la précision est réduite avec des piles épuisées. Certains compteurs ont plus d'une pile.
- \circ Avec le compteur éteint ou non utilisé, assurez-vous que l'aiguille repose sur la marque de l'infini (∞) sur le côté gauche de l'échelle (Figure 8). Si ce n'est pas le cas, utilisez un tournevis plat pour tourner doucement la vis du point zéro et déplacer le pointeur sur la marque de l'infini. Ce réglage ne devrait pas être fait très souvent
- Assurez-vous que les câbles de la sonde sont propres (pas de corrosion sur les bouts) et branchez-les au compteur. Pour ce faire, insérez le câble rouge dans la prise positive sur le compteur, et le câble noir dans la prise négative (parfois étiquetée comme COM(Figure 9).



Figure 8: Aiguille reposant sur l'infini avec le compteur inutilisé ou en position d'arrêt. La vis du point zéro, comme indiqué par la flèche, peut être tournée pour ajuster la position de l'aiguille. *Source: Tim Motis*



Figure 9: Câbles de sonde branchés au compteur réglé à X10 ohms. Source: Tim Motis

Étape 2: Réglez le multimètre sur la résistance, comme le montre le symbole pour les ohms, Ω. Tournez le cadran du compteur pour sélectionner "X10" ohms (Figure 9).

Étape 3: Mettez le compteur à zéro en mettant en contact les bouts des câbles rouge et noir (Figure 10). Avec les bouts des câbles en contact, tournez le bouton de réglage du point zéro jusqu'à ce que l'aiguille s'arrête sur zéro, sur le côté droit de l'échelle.

SINUS YAZOUTHON COMPANY OF A CONTROL OF TOWN OF THE PROPERTY O

Figure 10: Aiguille réglée sur zéro (droite) en tournant le bouton de réglage du point zéro (voir flèche) tout en touchant les bouts des câbles rouge et noir l'un contre l'autre. Source: Tim Motis

Étape 4: Prenez des relevés en plaçant les pointes de touche à environ 1 cm de distance dans l'échantillon de terre saturé (Figure 11). La distance exacte entre les pointes n'est pas critique, étant donné que dans un sol saturé l'EC ne varie que de façon minimale avec de l'espace entre les sondes. Remarquez le numéro sur l'échelle des ohms (généralement située au haut de l'écran) indiqué par l'aiguille (Figure 12).



Figure 12: Échelle du compteur d'un multimètre ohmmètre/voltmètre. L'échelle des ohms (Ω) est en haut. Source: Tim Motis

Avec le compteur réglé à X10, le nombre d'ohms indiqué sur l'échelle du compteur doit être multiplié par 10. Par exemple, si à X10 l'aiguille se pointe sur 100 sur l'échelle des ohms, le nombre réel d'ohms est de 100 X 10 ou 1000.

Etape 5: Convertissez la résistance mesurée (ohms) en conductance en calculant d'abord l'inverse des ohms. En continuant l'exemple ci-dessus,

l'inverse de 1000 ohms est 1/1000. Ainsi, 1000 ohms est équivalent à 0,001 mhos. Puisque les câbles sont séparés de 1 cm, supposons que la mesure est en fait mhos/cm. Multipliez mhos/cm par 1000 pour convertir en dS/m. Une mesure de 0,001 mhos est alors équivalente à 0,001 X 1000 ou 1 dS/m. Voir le Tableau 4 pour une liste des incréments d'ohms sur un multimètre, avec une résistance (ohms) déjà convertie en unités de conductivité (mhos, µS ou dS).



Figure 11: Prise de relevé avec un multimètre ohmmètre/voltmètre. Source: Tim Motis

Que signifient les relevés de résistance avec un ohmmètre?

Le tableau 4 montre une gamme de valeurs de résistance affichées sur plusieurs ohmmètres/voltmètres. Pour chaque valeur de résistance indiquée, les valeurs de conductivité correspondantes sont indiquées. Notez que, plus la résistance est élevée, plus la conductivité est faible. Cela signifie que, sur un ohmmètre/voltmètre réglé sur X10 ohms, la salinité est probablement très minime si l'aiguille se met sur une valeur de résistance de 1k (1000 ohms) ou plus (vers la gauche, approchant l'infini). Si l'aiguille se met sur une valeur d'ohms de 50 ou moins, la salinité pourrait être limitante pour la plupart des légumes décrits dans le tableau 3 comme étant modérément sensible.

Tableau 4. Unités de résistance (ohms) sur un ohmmètre/voltmètre analogique converties en unités mhos (inverse d'ohms) et en unités d'électroconductivité (EC) (micro Siemens / cm [µS / cm] et déci Siemens / m [dS/m]) communément utilisées pour indiquer la salinité de l'eau d'irrigation ou du sol. Notez que 1 dS/m est le même que 1 millimho/cm.

	Conductivité			Résistance	
Tolérance des légumes*	EC (dS/m)	EC (µS/cm)	Mhos/cm	Ohms réels au réglage X10 (Ω X 10)	Ohms affichés sur l'échelle du compteur (Ω)
Plage de salinité du sol à laquelle des cultures sensibles comme les haricots vont croître sans perte de rendement	0.03	33.3	0.0000333	30000	3k (3000)
	0.05	50.0	0.0000500	20000	2k (2000)
	0.10	100.0	0.0001000	10000	1k (1000)
	0.20	200.0	0.0002000	5000	500
alir nsi	0.25	250.0	0.0002500	4000	400
nité du ibles co ans pe	0.33	333.3	0.0003333	3000	300
	0.40	400.0	0.0004000	2500	250
sol mn rte	0.50	500.0	0.0005000	2000	200
à la ne l de r	0.56	555.6	0.0005556	1800	180
que es r	0.63	625.0	0.0006250	1600	160
inité du sol à laquelle des sibles comme les haricots sans perte de rendement	0.71	714.3	0.0007143	1400	140
	0.83	833.3	0.0008333	1200	120
	1.00	1000.0	0.0010000	1000	100
Plage de salinité du sol à laquelle des cultures modérément sensibles comme la tomate vont croître sans perte de rendement	1.11	1111.1	0.0011111	900	90
	1.25	1250.0	0.0012500	800	80
age de salinité ol à laquelle de cures modérém ensibles comm la tomate vont itre sans perte rendement	1.43	1428.6	0.0014286	700	70
e sa Ique moo les l les l les l les l les l les l les l les l	1.67	1666.7	0.0016667	600	60
llinii elle dére con con per per	2.00	2000.0	0.0020000	500	50
Plage de salinité d sol à laquelle des altures modéréme sensibles comme la tomate vont roître sans perte c rendement	2.50	2500.0	0.0025000	400	40
de de	3.33	3333.3	0.0033333	300	30
	5.00	5000.0	0.0050000	200	20
**	10.00	10000.0	0.0100000	100	10
	20.00	20000.0	0.0200000	50	5

Voir Tableau 3.

Quelle est la précision d'un multimètre ohmmètre/voltmètre?

Pour tester la précision de notre multimètre ohmmètre/voltmètre, nous avons ajouté du chlorure de sodium (sel de mise en conserve et de décapage de Morton) à de l'eau désionisée pour préparer des solutions avec des concentrations de sel connues. Nous avons ensuite mesuré la salinité de ces solutions avec un compteur d'EC de laboratoire (Hanna Instruments [HI3512-01]) et un multimètre (Sunwa YX-360TRE-B). Les résultats sont présentés à la figure 13. Il convient de noter qu'à mesure que la concentration de salinité connue augmentait, la précision du multimètre diminuait. Un multimètre a tendance à sous-estimer la salinité à des concentrations de sel plus élevées en raison de l'influence du courant continu (utilisé par le multimètre) sur les ions en solution. En revanche, le compteur d'EC utilise un courant alternatif. Néanmoins, jusqu'à environ 2 dS/m, les relevés avec le multimètre utilisé dans l'expérience se comparaient assez bien à ceux pris avec un compteur d'EC de laboratoire. Les résultats ont montré qu'un multimètre peut être utile pour déterminer si la salinité d'un sol est faible ou élevée pour la plupart des légumes.

^{**}Les cultures modérément tolérantes telles que les courges peuvent tolérer jusqu'à 4,7 dS/m sans perte de rendement. Peu de légumes toléreraient une salinité du sol supérieure à 5 dS/m sans au moins une certaine perte de rendement. L'eau de mer a une salinité de plus de 40 dS/m.

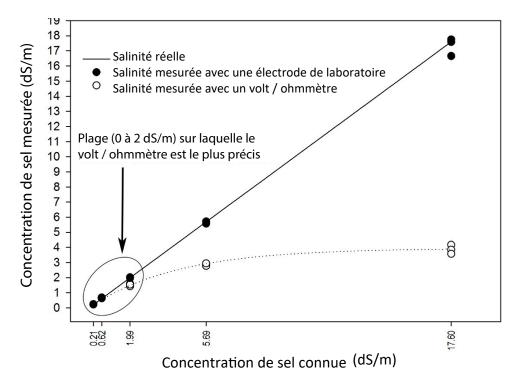


Figure 13: Précision des mesures de salinité, avec augmentation des concentrations de sel connues, en utilisant un multimètre ohnmètre / voltmètre analogique par rapport à un compteur de CE de laboratoire. Les concentrations de sel mesurées et connues sont exprimées en tant que conductivité électrique [CE] en déci Siemens/mètre [dS/m]). La conductivité électrique (CE) de chacune des cinq solutions de chlorure de sodium (avec des concentrations de sel connues) a été mesurée cinq fois avec chaque compteur. Pour mesurer l'EC avec l'ohnmètre/voltmètre, un multimètre analogique a été réglé sur X10 ohms, avec la valeur de résistance (ohms) résultante multipliée par 10, puis convertie en dS/m.

Prise d'un relevé avec des compteurs d'EC

Si vous avez besoin d'une précision et d'une justesse accrues, utilisez un compteur d'EC ou envoyez un échantillon de terre à un laboratoire. Tout compteur d'EC viendra avec des instructions sur la façon de prendre un relevé. Tous ces compteurs ne sont pas conçus pour prendre des mesures dans une pâte de sol, car les particules du sol pourraient endommager le capteur ou l'électrode. Si le capteur d'un compteur d'EC n'est pas destiné à être inséré dans le sol, vous pouvez plutôt prendre un relevé dans l'eau qui a été filtrée à travers un échantillon de terre comme suit:

Étape 1: Pesez 20 g de terre séchée à l'air et placez-la dans un récipient propre, non métallique.

Étape 2: Ajoutez 20 millilitres (ml) d'eau distillée ou déminéralisée au sol, ce qui donne une solution composée d'une partie de terre et d'une partie d'eau. Certains protocoles exigent une solution composée d'une partie de terre et de 2 parties d'eau, auquel cas vous ajouteriez 40 ml d'eau.

Étape 3: Mélangez la terre avec l'eau. Cela peut être fait en couvrant le couvercle du récipient et en secouant le contenu.

Étape 4: Versez l'eau à travers un morceau de papier filtre (par exemple un papier filtre à café). L'eau qui traverse doit être la plupart du temps claire.

Étape 5: Placez la sonde du capteur dans l'eau filtrée et notez la mesure.

Étape 6: Consultez les guides, tels que le tableau 5 montré plus haut, pour évaluer la salinité indiquée par votre relevé. Il peut être nécessaire de convertir mg/L (ppm) ou μS/cm en dS/m, selon les unités indiquées dans le tableau que vous utilisez pour interpréter les résultats.

CONCLUSION

L'excès de sels dans le sol limite la croissance des cultures en interférant avec l'absorption d'eau. Ce problème est plus fréquent dans les régions arides, mais existe également dans les zones côtières touchées par l'intrusion de sel. La compréhension des causes sous-jacentes des conditions salines et sodiques, comme expliquées dans cette note technique, aide les agriculteurs à choisir des pratiques

qui leur permettent de continuer à produire des cultures vivrières sur des sols affectés par le sel. Les pratiques qui peuvent être mises en œuvre le plus facilement par les agriculteurs, même s'ils n'ont pas accès à de l'eau sans sel, comprennent 1) produire des cultures tolérantes au sel et 2) semer les graines dans des sillons ou des plates-bandes surélevées pour éviter l'accumulation de sel autour des graines et de la zone d'enracinement des plantes résultantes.

Si vous pensez que votre sol pourrait être salé mais que vous n'en êtes pas sûr, suivez quelques étapes simples pour collecter un échantillon de terre qui peut être utilisé pour évaluer la salinité. Les dispositifs de mesure de la salinité varient en précision et en coût. Un multimètre ohmmètre/voltmètre peu coûteux et couramment disponible peut donner une idée approximative pour savoir si la salinité dans un sol donné est faible ou élevée pour des cultures plus sensibles comme les légumes.

Les sections annexes et références ci-dessous sont utiles pour une étude plus approfondie. Une grande partie de la littérature référencée dans la section bibliographie de ce document peut être consultée sur Internet.

ANNEXE I

GLOSSAIRE DES TERMES UTILES

Électroconductivité (EC): Conductivité de l'électricité à travers l'eau ou un extrait de terre. Dans les sols affectés par le sel, l'EC est normalement mesurée dans un extrait de saturation (échantillon de terre saturé d'eau).

Évapotranspiration: La somme de la perte directe d'eau à partir des surfaces du sol (par évaporation) et des plantes (par transpiration).

Pourcentage de sodium échangeable: Le pourcentage de cations échangeables constitués de sodium échangeable.

Sol halomorphe: (Non utilisé dans le système américain de taxonomie du sol.) Sous-ordre de l'ordre intrazonal du sol constitué de sols salins et sodiques formés dans des conditions de drainage imparfait dans les régions arides et comprenant les groupes de sol que sont le Solonchak (ou Salin), le Solonetz et le Soloth.

Halophile: Littéralement, qui aime le sel. Ce terme, lié aux sols, est normalement utilisé pour décrire les plantes qui poussent dans des endroits trop riches en sodium pour que toute plante non-halophile puisse survivre. Typiquement, les plantes halophiles exsudent ou isolent le sodium dans la plante. Cela leur donne un goût typiquement salé.

Pression osmotique: Les sels auront tendance à se répandre d'une zone de forte concentration à une zone de faible concentration jusqu'à ce que les deux soient égalisés. Cependant, lorsqu'une membrane semi-perméable, telle qu'une paroi cellulaire, est insérée entre des zones à concentration de sels élevée et faible, le processus s'inverse. Puisque les sels ne peuvent pas se déplacer à travers la membrane, l'eau va se répandre de la zone de faible concentration à la zone de forte concentration. La pression osmotique contrôle la quantité de mouvement à travers la membrane.

Boues de filtration: Déchets solides provenant des raffineries de sucre. Elles contiennent 1,2% de N, 2,1-2,4% de P_2O_5 , 2,0% de K_2O , 238-288 ppm de Zn et 112-132 ppm de Cu.

Sol affecté par le sel: Sol qui a accumulé suffisamment de sels et/ou de sodium échangeable pour nuire à la croissance de la plupart des plantes cultivées.

Sol salin: Sol contenant suffisamment de sel soluble pour nuire à la croissance de la plupart des plantes cultivées. L'EC d'un extrait de saturation du sol est de 4 dS/m ou plus, le pH est compris entre 7,5 et 8,5 et le TAS est inférieur à 13. En réalité, les plantes sensibles sont affectées de moitié par cette salinité. Une croûte blanche se forme généralement au-dessus des sols salins pendant les mois les plus secs de l'année, et on les appelle souvent des sols «alcalins blancs». Cependant, la structure du sol n'est pas affectée. Le sol reste perméable et présente de bonnes caractéristiques de drainage.

Sol salin-alcalin: (non utilisé par les scientifiques du sol Américains) (i) Sol contenant suffisamment de sodium échangeable pour interférer avec la croissance de la plupart des plantes cultivées et contenant des quantités appréciables de sels solubles. Le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15, la conductivité de l'extrait de saturation du sol est supérieure à 4 dS/m (à 25 ° C) et le pH est habituellement de 8,5 ou moins dans le sol saturé. (ii) Le sol salin-alcalin a une combinaison de quantités nocives de sels et soit une alcalinité élevée soit une teneur élevée en sodium échangeable, ou les deux. Celles-ci sont réparties dans le profil de sorte que la croissance de la plupart des plantes cultivées est réduite.

Siphon salin: Débit d'eau saline intermittent ou continu à la surface du sol ou à proximité de celui-ci dans des conditions de terres sèches, ce qui réduit ou élimine la croissance des cultures. Il est différencié des autres conditions salines du sol par l'origine récente et locale, la nappe phréatique peu profonde, la zone racinaire saturée et la sensibilité aux systèmes de culture et aux précipitations.

Sol salin-sodique: (non utilisé par les scientifiques du sol aux États-Unis) Ce type de sol présente les caractéristiques des sols salins et sodiques. Il contient suffisamment de sodium échangeable pour interférer avec la croissance de la plupart des plantes cultivées et contient des quantités appréciables de sels solubles. Le taux de sodium échangeable est supérieur à 0,15, la conductivité de l'extrait de saturation du sol est supérieure à 4 dS/m (à 25°C), le pH est habituellement de 8,5 ou moins dans le sol saturé et le TAS est supérieur à 13. Initialement, ces sols peuvent avoir une bonne perméabilité, mais leur structure se détériore et leur conductivité hydraulique (décrit comment l'eau peut bien passer dans le sol) est réduite s'ils sont restaurés (lessivés) sans amendements tels que le gypse.

Extrait de saturation: La solution extraite d'un sol à sa teneur en eau de saturation (c'est-à-dire que l'addition de plus d'eau entraînerait la formation d'eau libre sur la surface).

Sol sodique: Sol non salin contenant suffisamment de sodium échangeable pour nuire à la production végétale et à la structure du sol dans la plupart des conditions du sol et du type de plante. Le TAS de l'extrait de saturation est supérieur ou égal à 13. Les valeurs d'EC sont inférieures à 4 dS/m et les valeurs de pH supérieures à 8,5. Ces sols sont souvent appelés «sols alcalins noirs». Ils ont de fortes concentrations de sodium échangeables et un pH élevé, ce qui dissout la matière organique présente dans le sol et donne au sol une couleur brun foncé ou noire. Dans ces sols, la structure du sol s'est détériorée, la perméabilité a diminué et la croissance des racines est restreinte. La restauration des sols sodiques est relativement difficile.

Taux d'adsorption du sodium (TAS): Relation entre le sodium soluble et les cations divalents solubles (calcium et magnésium) pouvant servir à prédire la fraction de sodium échangeable d'un sol. Il est également utilisé pour indiquer la qualité de l'eau d'irrigation; En règle générale, plus le TAS est élevé, plus l'eau risque de conduire à des conditions sodiques du sol. Il est défini comme suit, si les concentrations, indiquées entre crochets, sont exprimées en mmoles/litre: **TAS = [sodium] / [calcium + magnésium]** ^{1/2}

Solum (pluriel: sola): Ensemble d'horizons/couches (horizons A, E et B) ayant subi le même cycle de processus de formation du sol. Coupe transversale verticale du sol.

RÉFÉRENCES

- Abrol, I.P., J.S.P. Yadav, et F.I. Massoud. 1988. Salt-Affected Soils and their Management [Les sols affectés par le sel et leur gestion]. FAO Soils Bulletin 39.
- Bernstein, L., Fireman, M. et Reeve, R.C. 1955. Control of salinity in the Imperial Valley, California [Contrôle de la salinité dans l'Imperial Valley, Californie]. USDA, ARS 41-4, 14 p. (cité par Abrol et. al., 1988).
- Biel, Karl et Nicholas Yensen. 2006. Photohalosynthèse. Biosalinity News 7(1): 6-7.
- Bui, E.N., L. Krogh, R.S. Lavado, F.O. Nachtergaele, T. Tóth, et R.W. Fitzpatrick. 1998. Distribution of Sodic Soils: The World Scene [Répartition des sols sodiques: le tableau mondial]. pp 19-33 in M.E. Sumner et R. Naidu (Ed) *Sols Sodiques; Distribution, propriétés, gestion et conséquences environnementales*. Oxford University Press, New York, NY.
- CABI. Fiche technique sur Batis maritima (salicorne). www.cabi.org/isc/datasheet/8562 (consulté en juillet 2016)
- Cardin, G.E., J.G. Davis, T.A. Bauder, et R.M. Waskom. 2007. Managing Saline Soils. *Colorado State University fact sheet* no. 0.503 [Gestion des sols salins. Fiche d'information de l'Université d'État du Colorado no. 0,503]. http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00503.html
- Davis, J.G., R.M. Waskom, T.A. Bauder et G.E. Cardon. 2007. Managing Sodic Soils. *Colorado State University fact sheet* no. 0.504 [Gestion des sols sodiques. Fiche d'information de l'Université d'État du Colorado no. 0,504]. www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00504.html
- Devkota, M., R.K. Gupta, C. Martius, J.P.A. Lamers, K.P. Devkota, K.D. Sayre, et P.L.G. Vlek. 2015. Soil salinity management on raised beds with different furrow irrigation modes in salt-affected lands [Gestion de la salinité du sol sur des plates-bandes surélevées avec différents modes d'irrigation par sillons dans les terres affectées par le sel]. *Agricultural Water Management* 152:243-250.
- Diatta, M., M. Diack et Dov Pasternak. 2000. Bioreclamation of the acid saline soils in Senegal. IPALAC Annual Report [Biorestauration des sols salins acides au Sénégal. Rapport annuel de l'IPALAC].
- Epstein, E. 1976. Genetic potentials for solving problems of soil mineral stress: Adaptation of crops to salinity. pp.73-82. *In* M.J. Wright and S.A.; Ferrari. *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Proc. Workshop at the National Agricultural Library, Beltsville, MD.

- Nov 22-23, 1976 [Potentiels génétiques pour résoudre les problèmes de stress minéral du sol: Adaptation des cultures à la salinité. pp.73-82. Dans M.J. Wright et S.A.; Ferrari. Adaptation des plantes au stress minéral dans les sols difficiles. Proc. Atelier à la National Agricultural Library, Beltsville, MD. Du 22-23 novembre 1976].
- Flugel, W.-A. 1991. River salination due to dryland agriculture in the Western Cape Province, Republic of South Africa. *Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation* (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991) IAHS Publ no. 203 [La salinisation des fleuves due à l'agriculture en zone aride dans la province du Cap occidental, République d'Afrique du Sud. Sédiments et qualité des eaux de ruisseaux dans un environnement en évolution: tendances et explications (Rapport du Symposium de Vienne, août 1991) IAHS Publ. 203].
- Ghassemi, F., A.J. Jakeman, et H.A. Nix. 1995. Salinisation of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Managment and Case Studies [Salinisation des terres et des ressources en eau: causes humaines, ampleur, gestion et études de cas]. CABI Publishing: Wallingford.
- Hanson, B. 1993. Reclaiming Sodic and Saline/Sodic Soils [Restauration des sols sodiques et salins/sodiques]. *Conseils de sécheresse numéro* 92-33.
- Huang, P.M., Y. Li, et M.E. Sumner. 2011. *Handbook of Soil Sciences: Resource Management and Environmental Impacts,* Second Edition (Taylor & Francis) [Manuel des sciences du sol: gestion des ressources et impacts environnementaux, deuxième édition (Taylor et Francis)].
- ICRISAT. 2002. Project PMSO2 Screening and evaluation of salinity tolerance, growth, yield potential and forage quality of pearl millet and sorghum under field conditions [Projet PMSO2 Sélection et évaluation de la tolérance à la salinité, de la croissance, du potentiel de rendement et de la qualité du fourrage du millet perlé et du sorgho dans les conditions naturelles]. *Rapport annuel de ICBA* (1422-1423H) pp. 20-24.
- Indorante, S.J. 2006. Sodium-affected soils in humid areas. pp 1606-1609. in R. Lal (Ed). *Encyclopedia of Soil Science*, 2nd Edition, Vol.2. CRC Press [Sols affectés par le sodium dans les zones humides. pp 1606-1609. dans R. Lal (Ed). *Encyclopedia of Soil Science*, 2e édition, vol.2. CRC Press].
- Lymbery, A.J., G.D. Kay, R.G. Doupé, G.J. Partridge, et H.C. Norman. 2013. The Potential of a salt-tolerant plant (*Distichlis spicata* Cv. NyPa Forage) to treat effluent from inland saline aquaculture and provide livestock feed on salt-affected farmland [Le potentiel d'une plante tolérante au sel (*Distichlis spicata* Cv. NyPa Forage) pour traiter les effluents de l'aquaculture saline intérieure et pour fournir du fourrage au bétail sur les terres agricoles affectées par le sel]. *Science of the Total Environment* 445-446:192–201.
- Maas E.V. Crop tolerance [Tolérance des cultures]. 1984a. California Agriculture, v.38, p.20-21.
- Maas E.V. 1984b. Salt tolerance of plants. In: The Handbook of Plant Science in Agriculture [Tolérance des plantes au sel. Dans: Le Manuel de la phytologie en agriculture]. B.R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Maas, E.V. et S.R. Grattan. 1999. Crop yields as affected by salinity [Les rendements des cultures selon qu'elles sont affectées par la salinité]. Chapter 3 in R.W. Skaggs and J. van Schilfgaarde (Ed.) Agricultural Drainage. Agron. Monogr. 38. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Maas, E.V. et G.J. Hoffman. 1976. *Crop salt tolerance: Evaluation of existing data*. International Salinity Conference. Texas Tech., Lubbock, Texas. 16-20 August [Tolérance des cultures aux sels: évaluation des données existantes. Conférence internationale sur la salinité. Texas Tech., Lubbock, Texas. 16-20 août].
- Maas E.V. et Hoffman G.J. 1977 Crop salt tolerance Current assessment [Tolérance des cultures aux sels- Évaluation actuelle]. J. Irrigation and Drainage Division, ASCE 103(IRZ): 115–134. Proceeding Paper 12993.
- Marcon M.F. 2003. *Batis maritima* (saltwort/beachwort): a nutritious, halophytic, seed bearing, perennial shrub for cultivation and recovery of otherwise unproductive agricultural land affected by salinity salinity [*Batis maritima* (salicorne): un arbuste nutritif, halophyte, contenant des graines, arbuste vivace pour la culture et la restauration des terres agricoles autrement improductives touchées par la salinité]. *Food Research International* 36:123-130.
- Maynard, D.N., G.J. Hochmuth, et J.E. Knott. 1997. *Knott's Handbook for Vegetable Growers [Manuel de Knott pour les producteurs de légumes]*. Fourth edition. John Wiley.
- Metternicht, G.I. et J.A. Zinck. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints [Télédétection de la salinité du sol: potentiels et contraintes]. Remote Sensing of Environment 85:1-20
- Murphy, B. 2006. Sodic soils: Formation and global distribution [Sols Sodiques: Formation et distribution globale]. pp 1589-1593. *in* R. Lal (Ed). *Encyclopedia of Soil Science*, 2nd Edition, Vol. 2. CRC Press.

- Qureshi, R.H. and E.G. Barrett-Lennard. 1998. Saline agriculture for irrigated land in Pakistan: A handbook [Agriculture saline pour les terres irriguées au Pakistan: un manuel]. Australian Centre of International Agricultural Research, Canberra, Australia. 142 pp.
- Rao, N.K. and M. Shahid. 2007 Desert farming: The quest continues [Culture du désert: les recherches se poursuivent]. *Biosalinity News* 8(1):6-7.
- Scoggins, H.L. and M.W. van Iersel. 2006. In Situ Probes for Measurement of Electrical Conductivity of Soilless Substrates: Effects of Temperature and Substrate Moisture Content [Sondes in situ pour la mesure de la conductivité électrique des substrats hors-sol: effets de la température et de la teneur en humidité du substrat]. *HortScience* 41:210-214.
- Shahid, S.A. and A.Al-Shankiti. 2013. Sustainable food production in marginal lands---Case of GDLA member countries [Production alimentaire durable dans les terres marginales --- Cas des pays membres de l'Alliance mondiale des terres arides (GDLA)]. International Soil and Water Conservation Research. 1:24-38.
- Steyl, G. and I. Dennis. 2010. Review of coastal area aquifers in Africa [Revue des aquifères des zones côtières en Afrique]. *Hydrogeology Journal* 18:217-225.
- UNDP. 2011. A New Land Use Model: Forests Fruit Fish [Un nouveau modèle d'utilisation des terres: les forêts donnent du poisson]. Publication disponible en ligne à l'adresse http://www.undp.org/content/dam/bangladesh/docs/Publications/A%20New%20Land%20Use%20Model Forest%20Fruit%20Fish.pdf
- Van Alphen, J.G. 1975. Salt affected soils in Peru. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen [Sols affectés par la salinité au Pérou. Institut international pour la remise en état et l'amélioration des terres]. *Annual Report* 1975. pp. 7-13. (cité par Abrol *et. al.*, 1988)

Ressources utiles en ligne:

- Salt tolerance thresholds for many herbaceous and woody crops [Seuils de tolérance au sel pour de nombreuses cultures herbacées et ligneuses]: http://www.fao.org/docrep/005/y4263e/y4263e0e.htm
- An in-depth look at the tolerance of vegetables to salinity [Un regard en profondeur sur la tolérance des légumes à la salinité]: http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/20360500/pdf pubs/P1567.pdf
- Practical hints on the use of an analog multimeter [Conseils pratiques sur l'utilisation d'un multimètre analogique]: http://cie-wc.edu/AnalogMultimeterBasicsandMeasuringResistance10 5 11.pdf